**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**WILLIAM HENRIQUE BALDISSERA PEREIRA**

# DESENVOLVIMENTO DE UM ESTROBOSCÓPIO DE LEDs PORTÁTIL DE 1880lx A 300 mm DE DISTÂNCIA COM CUSTO COMPETITIVO

**SÃO LEOPOLDO**
**2019**

William Henrique Baldissera Pereira

# DESENVOLVIMENTO DE UM ESTROBOSCÓPIO DE LEDs PORTÁTIL DE 1880lx COM CUSTO COMPETITIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. MS Leonel Poltosi

São Leopoldo

2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Leonel Poltosi por manter uma postura motivada e proativa, ajudando a manter a motivação durante a implementação deste trabalho e estar sempre disposto a verifica-lo e corrigi-lo, não importando o dia ou horário.

Agradeço a minha esposa Denise Rodrigues por me auxiliar nas tarefas do dia a dia durante o tempo em que passei elaborando este trabalho e compreender os momentos em que optei por não estar com ela para poder realiza-lo.

## RESUMO

Verificar a qualidade de produtos impressos é essencial para uma indústria gráfica e o estroboscópio é uma tecnologia utilizada para isto. Estroboscópios de qualidade no Brasil são caros, incluindo suas peças de reposição. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um estroboscópio portátil de 1880lx a 300 mm de distância utilizando LEDs com um custo baixo. É realizado um estudo do efeito estroboscópico, quais são os parâmetros relevantes para se garantir a sua qualidade e as melhores tecnologias que se pode utilizar para gera-lo. É desenvolvido um protótipo utilizando baterias de Íon-Lítio, LEDs, um conversor *Buck Boost* para a fonte de alimentação e um circuito de controle do acionamento controlado por um microcontrolador. São realizados testes de iluminância para comprovar os limites de funcionamento do protótipo dentro das especificações e uma estimativa de custo de produção para determinar o quão mais barato ele seria com relação aos modelos de mercado.



**Palavras-chave**: Estroboscópio, LED, iluminância, indústria gráfica, custo.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Impressão Offset ..... 19
Figura 2 – Processo de rotogravura ..... 19
Figura 3 – Máquina de Rotogravura ..... 20
Figura 4 – Cortadeira da marca DEACRO ..... 21
Figura 5 – Marca para centralizar o corte do papel ..... 21
Figura 6 – Grade de Registro ..... 22
Figura 7 – Relação entre temperatura do corpo negro e a cor da luz ..... 23
Figura 8 – Efeito estroboscópico ..... 24
Figura 9 – Percepção de sentido de giro contrário ..... 25
Figura 10 – Imagem borrada devido ao tempo da luz acesa ..... 25
Figura 11 – Lâmpada xênon tipo “U” ..... 26
Figura 12 – Gráfico corrente x tempo na lâmpada ..... 27
Figura 13 – Junção p-n emitindo fótons ..... 28
Figura 14 – Gráfico corrente x tensão em um LED Cree XLamp XHP35 ..... 29
Figura 15 – Caminho térmico dentro de um LED ..... 30
Figura 16 – Topologia Buck Boost ..... 32
Figura 17 – Topologia Buck Boost com indutor bifilar ..... 33
Figura 18 – Esquema interno do CI UC3845B ..... 35
Figura 19 – Gráfico Resistor X Capacitor X Frequência de operação ..... 36
Figura 20 – Amplificador de erro ..... 36
Figura 21 – Comparador sensor de corrente ..... 37
Figura 22 – Circuito de saída ..... 37
Figura 23 – Circuito equivalente do CI TL431 ..... 38
Figura 24 – Módulo NodeMCU-ESP12E ..... 39
Figura 25 – Lente e refletor para os LEDs ..... 42
Figura 26 – Conversor Boost ..... 44
Figura 27 – Diagrama de blocos de sistema ..... 46
Figura 28 – Circuito de feedback de tensão ..... 51
Figura 29 – Circuito da fonte de alimentação do microcontrolador ..... 52
Figura 30 – Placa de circuito da fonte montada ..... 53
Figura 31 – Tensão sobre $R5$ ..... 53
Figura 32 – Circuito de acionamento dos LEDs ..... 54

Figura 33 – Fluxograma do programa do microcontrolador .....58
Figura 34 – Tensão sobre o resistor de teste de 1,4 Ω a 166 Hz com a ponteira do osciloscópio em 10x .....59
Figura 35 – Tensão sobre $R34$ a 166Hz com uma largura de pulso de 65µs.....60
Figura 36 – Montagem do estroboscópio para realizar os testes .....61
Figura 37 – Pontos de medida da iluminância d=300mm.....62
Figura 38 – Pontos de medida da iluminância d=500mm.....63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de IRC exigidos por aplicação ..... 24
Tabela 2 – ANSI Chromaticity Standard C78.377A ..... 30
Tabela 3 – Comparativo dos LEDs ..... 41
Tabela 4 – Valores de iluminância para d=300mm ..... 63
Tabela 5 – Valores de iluminância para d=500mm ..... 64
Tabela 6 – Comparativo entre alguns modelos de estroboscópios comerciais e o custo dos componentes do protótipo ..... 65

## LISTA DE SIGLAS

| | |
|---|---|
| A | Ampere, unidade de medida de corrente elétrica |
| ANSI | Instituto de Padrões Nacionais Americanos |
| C | Coulomb, unidade de medida de carga |
| CCT | Temperatura de cor correlata |
| CI | Circuito Integrado |
| CIE | Comissão internacional de Iluminação |
| F | Faraday, unidade de medida de capacitância |
| H | Henry, unidade de medida de indutância |
| IRC | Índice de reprodução de cor |
| LED | *Light Emitting Diode* |
| lm | Lúmen, unidade de medida de produção de luz |
| lx | Lux, unidade de medida de fluxo luminoso |
| m² | Metro quadrado, unidade de medida de área |
| mm | Milímetro, unidade de medida de comprimento. |
| mm² | Milímetro quadrado, unidade de medida de área |
| mpm | Metros por minuto |
| NiCd | Níquel Cádmio |
| RMS | Root Medium Square |
| s | Segundo, unidade de medida de tempo |
| T | Tesla, unidade de medida da densidade de fluxo magnético |
| V | Volt, unidade de medida de tensão elétrica |
| W | Watt, unidade de medida da potência elétrica |
| Wb | Weber, unidade de medida de fluxo magnético |

# LISTA DE SIMBOLOS

| | |
|---|---|
| $\Delta V_{o(\max)}$ | Variação máxima da tensão de saída (V) |
| Ω | Ohm, unidade de medida de resistência elétrica |
| $hfe_{minQ8}$ | Ganho mínimo de corrente de $Q_8$ |
| $A_i$ | Área iluminada (m²) |
| $A_{min}$ | Área mínima do núcleo (m²) |
| $AL$ | Parâmetro para o cálculo de espiras do indutor |
| $B$ | Fluxo magnético máximo armazenado no indutor (Wb) |
| C° | Graus célsius |
| $C_0$ | Capacitor |
| $CTR_{min}$ | Taxa de transferência de corrente mínima |
| $D$ | *Duty cycle* |
| $D_0$ | Diodo |
| $D_{166Hz}$ | *Duty cycle* com uma frequência de 166 Hz |
| $D_{max}$ | *Duty cycle* máximo do CI UC3845 |
| $E$ | Energia armazenada no indutor (J) |
| $E_{Drello}$ | Iluminância do estroboscópio Drello 1296 a 30 cm (lx) |
| $E_N$ | Valor nominal de produção de luz dos LEDs (lm) |
| $E_c$ | Energia entregue a carga por ciclo (J) |
| $f$ | Frequência (Hz) |
| $H_{max}$ | Densidade de fluxo magnético (T) |
| $hfe$ | Ganho de corrente do transistor |
| $I$ | Corrente no indutor (A) |
| $I_{D1med}$ | Corrente média de $D_1$ (A) |
| $I_{Q1(med)}$ | Corrente média em $Q_1$ (A) |
| $I_{Q1med}$ | Corrente média de $Q_1$ (A) |
| $I_{Q6max}$ | Corrente máxima drenada por $Q_6$ (A) |
| $I_{Q6med}$ | Corrente média drenada por $Q_6$ (A) |
| $I_{Q8BE}$ | Corrente que circula na base de $Q_8$ (A) |
| $I_{Q9C}$ | Corrente de coletor de $Q_9$ (A) |
| $I_{R11}$ | Corrente que circula por $R_{11}$ (A) |

| | |
|---|---|
| $I_{R21}$ | Corrente que circula por $R_{21}$ (A) |
| $I_{R4}$ | Corrente que circula por $R_4$ (A) |
| $I_i$ | Corrente de entrada (A) |
| $I_{in(max)}$ | Corrente máxima exigida da bateria (A) |
| $I_{led}$ | Corrente em cada LED (A) |
| $I_{lim}$ | Corrente limite (A) |
| $I_{o(max)}$ | Corrente de saída máxima do indutor (A) |
| $I_o$ | Corrente de saída (A) |
| $L$ | Indutância do indutor (H) |
| $L_0$ | Indutor (H) |
| *mpm* | Metros por minuto |
| $\eta$ | Eficiência da fonte de alimentação |
| $N$ | Número de espiras do indutor |
| $N_1$ | Número de espiras do primeiro segmento do indutor |
| $N_2$ | Número de espiras do segundo segmento do indutor |
| $P_R$ | Pot~encia dissipada no resistor em série com cada LED (W) |
| $P_{R+LED}$ | Potência dissipada em cada conjunto LED e resistor (W) |
| $P_i$ | Potência de entrada (W) |
| $P_o$ | Potência de saída (W) |
| $P_o$ | Potência total de saída (W) |
| $P_{teste1}$ | Potência de saída obtida no teste do circuito (W) |
| $P_{teste2}$ | Potência dissipada no resistor do segundo teste (W) |
| $Q_{drenada}$ | Carga drenada do capacitor (C) |
| $R_0$ | Carga resistiva (Ω) |
| $R_S$ | Resistor em série com a carga (Ω) |
| $R_{led}$ | Resistor para limitar a corrente sobre cada LED (Ω) |
| $R_{test}$ | Resistência do resistor utilizado no teste do circuito (Ω) |
| $R_{teste2}$ | Resistor utilizado no segundo teste (Ω) |
| $S$ | Chave |
| $T_{desc}$ | Tempo de descarga do capacitor (s) |
| $t_{on}$ | Tempo armazenando energia no indutor (s) |
| $T_s$ | Período da frequência de chaveamento (s) |
| $V_{D3}$ | Queda de tensão no diodo $D_3$ (V) |

| | |
|---|---|
| $V_{D4}$ | Queda de tensão no diodo $D_4$ (V) |
| $V_F$ | Queda de tensão no LED de U2 (V) |
| $V_{L1}$ | Tensão no primeiro segmento do indutor quando o transistor abre (V) |
| $V_{Q1(min)}$ | Tensão mínima de trabalho de $Q_1$ (V) |
| $V_{Q8BE}$ | Queda de tensão entre base e emissor de $Q_8$ (V) |
| $V_{Q8BE}$ | Queda de tensão entre base e emissor de $Q_8$ (V) |
| $V_{Q8E}$ | Tensão máxima aplicada no emissor de $Q_8$ (V) |
| $V_{Q8E}$ | Tensão no emissor de $Q_8$ (V) |
| $V_{Q9BE}$ | Queda de tensão entre base e emissor de $Q_9$ (V) |
| $V_{Q9E}$ | Tensão no emissor de $V_9$ (V) |
| $V_R$ | Tensão sobre cada resistor em série com cada LED (V) |
| $V_{R4}$ | Queda de tensão sobre $R_4$ (V) |
| $V_{U4.5}$ | Tensão no terminal 5 de $U_4$ (V) |
| $V_{U4CE}$ | Queda de tensão entre coletor e emissor de $U_4$ (V) |
| $V_{blk}$ | Tensão de bloqueio de U3 (V) |
| $V_i$ | Tensão de entrada (V) |
| $V_{in(max)}$ | Tensão de entrada máxima (V) |
| $V_{in(min)}$ | Tensão de entrada mínima (V) |
| $V_{led}$ | Tensão sobre o LED a uma corrente de 3A (V) |
| $V_o$ | Tensão de saída (V) |
| $V_o$ | Tensão de saída (W) |
| $V_{out}$ | Tensão de saída no teste do circuito (V) |
| $V_{ref}$ | Tensão de referência do CI TL431 (V) |

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO ..... 15**
**1.1 Tema ..... 15**
**1.2 Delimitação do Tema ..... 15**
**1.3 Problema ..... 15**
**1.4 Objetivos ..... 16**
1.4.1 Objetivo Geral ..... 16
1.4.2 Objetivos Específicos ..... 16
**1.5 Justificativa ..... 17**
**2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ..... 18**
**2.1 Aplicações ..... 18**
2.1.1 Inspeção da qualidade de produtos impressos ..... 18
2.1.1.1 Exatidão necessária ..... 21
**2.2 Qualidade da luz ..... 22**
**2.3 Efeito Estroboscópico ..... 24**
**2.4 Lâmpada Flash Xênon ..... 26**
**2.5 LED ..... 27**
**2.6 Tecnologias de fontes de alimentação ..... 31**
2.6.1 Conversor Buck Boost ..... 31
2.6.2 Funcionamento do CI UC3845B ..... 34
2.6.3 Funcionamento do CI TL431 ..... 38
**2.7 Controle do acionamento do transdutor luminoso ..... 38**
2.7.1 Módulo NodeMCU-ESP12E ..... 39
**3 METODOLOGIA ..... 40**
**3.1 Escolha do transdutor luminoso ..... 40**
**3.2 Escolha do LED ..... 40**
**3.3 Escolha do método de acionamento dos LEDs ..... 42**
**3.4 Escolha da fonte de alimentação ..... 43**
**3.5 Escolha da topologia do circuito ..... 43**
**3.6 Definição da potência de saída ..... 44**
**3.7 Diagrama de blocos do equipamento ..... 46**
**3.8 Dimensionamento do circuito da fonte ..... 46**
**3.9 Montagem e teste do circuito da fonte ..... 52**

**3.10 Dimensionamento do circuito de acionamento dos LEDs .....54**
**3.11 Programa do microcontrolador.....57**
**3.12 Montagem e teste do circuito de acionamento dos LEDs .....58**
**4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....61**
**4.1 Medição da iluminância obtida em uma superfície .....61**
**4.2 Comparação de custos .....64**
**5 CONCLUSÃO .....66**
**5.1 Sugestões para trabalhos futuros: .....66**
**REFERÊNCIAS.....68**
**APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DA FONTE.....71**
**APENDICE B – ESQUEMA ELÉTRICO DOS LEDS.....72**
**APENDICE C – ESQUEMA ELÉTRICO DO CONTROLADOR.....73**
**APENDICE D – LISTA DE COMPONENTES.....74**
**APENDICE E – FOTOS DO PROTÓTIPO FINALIZADO .....76**

# 1 INTRODUÇÃO

Praticamente todos os itens consumidos pela sociedade nos dias de hoje possuem algum tipo de embalagem. Devido a demanda crescente das empresas em chamar a atenção dos clientes para os seus produtos, a qualidade da imagem impressa nas embalagens tem sido cada vez mais aprimorada com o uso e desenvolvimento de melhores tecnologias de impressão. Associado a elas, também se fazem necessários melhores métodos de controle da qualidade do produto impresso.

No processo de impressão por rotogravura, é comum que as máquinas imprimam a velocidades superiores a 200 mpm, tornando a inspeção visual do produto durante a produção, pelo operador da máquina, praticamente impossível sem o auxílio de equipamentos especializados. Os dispositivos mais utilizados para esta função são câmeras de alta velocidade e estroboscópios.

Os sistemas baseados em câmeras de alta velocidade custam entre R$300.000,00 e R$2.000.000,00 e são montados em estruturas fixas, enquanto que os estroboscópios custam entre R$150,00 e R$120.000,00, com modelos fixos e móveis. Devido ao alto custo dos sistemas de câmeras, a utilização de estroboscópios é bem mais comum nos processos de impressão e corte de embalagens.

## 1.1 Tema

Projeto e confecção de um estroboscópio de LED’s.

## 1.2 Delimitação do Tema

Este trabalho contemplará o projeto eletrônico, térmico e luminotécnico do estroboscópio.

Este trabalho não contemplará o projeto da carcaça do equipamento.

## 1.3 Problema

Os modelos mais comuns de estroboscópios fabricados nacionalmente utilizam lâmpadas xênon tipo “U” como transdutor. Estas lâmpadas emitem uma quantidade grande de energia em forma de calor e sua eficiência luminosa é baixa. Para aciona-

las é necessário gerar um pulso de alta tensão na ordem de kV. Estes fatores tornam a sua utilização em lugares com risco de explosão pouco viável, assim como exigem um espaço maior para dissipação de calor e, no caso de equipamentos portáteis, uma duração de bateria menor.

Já existem, no mercado internacional, modelos que utilizam LEDs como transdutor luminoso, apresentando um fluxo luminoso e rendimento muito superiores aos tubos de xênon. Por se tratar de um produto internacional, para a sua aquisição no Brasil, são cobrados altos impostos, chegando a 4 vezes o preço de um equipamento equivalente com lâmpada xênon aqui no Brasil.

Os problema que este trabalho se dispõe a resolver é projetar um estroboscópio portátil que tenha uma iluminância de magnitude equivalente a iluminância de um estroboscópio fixo, atinja os mesmos requisitos de qualidade de iluminação e tenha um custo menor que os equipamentos disponíveis no mercado.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estroboscópio portátil que atenda as mesmas especificações de iluminação um estroboscópio fixo com um custo estimado menor que os equipamentos encontrados no mercado.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

a) Determinar dentre os tipos de transdutores luminosos, fontes de energia, topologias de fontes de alimentação e tecnologias de acionamento eletrônico quais são os mais adequados para construir um estroboscópio;
b) Projetar e montar um protótipo eletrônico do estroboscópio;
c) Criar o programa e programar o microcontrolador de acionamento do circuito;
d) Verificar se o protótipo atende as especificações elétricas definidas.
e) Medir a iluminância obtida do protótipo sob os mesmos parâmetros em que os dados do estroboscópio fixo foram obtidos e realizar uma comparação.

## 1.5 Justificativa

O transdutor luminoso que sempre foi utilizado para estroboscópios para inspeção visual de produtos impressos foi a lâmpada xênon. As lâmpadas utilizadas são caras e tem uma vida útil curta. Para o seu acionamento, existem circuitos eletrônicos com características específicas. A mudança do transdutor luminoso para o LED acarreta também na mudança do tipo de circuito de acionamento e no controle da sua emissão de luz. Saber quais parâmetros de funcionamento do equipamento devem ser atingidos, o tipo de LED com o menor preço que irá atingir de forma melhor os resultados esperados e as tecnologias eletrônicas mais adequadas para este tipo de aplicação, requerem uma pesquisa acerca do que já existe de conhecimento sobre estes assuntos.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 2.1 Aplicações

A utilização de estroboscópios, está sempre ligada a situações em que se deseja visualizar o comportamento ou estado atual de objetos em movimento. Dentre suas inúmeras aplicações, cita-se: análise das cordas vocais em seres humanos (AKBULUT 2015); análise do funcionamento de motores a combustão (PUŠKÁRA 2013); inspeção de qualidade de produtos impressos (UNILUX, 2019).

Este trabalho irá deter-se a aplicação na inspeção de qualidade dos produtos impressos.

### 2.1.1 Inspeção da qualidade de produtos impressos

Para se produzir materiais impressos em grandes quantidades (milhares de metros de substrato), são comumente empregados processos de impressão industriais. Dentre os principais processos, estão: offset; flexogravura; rotogravura.

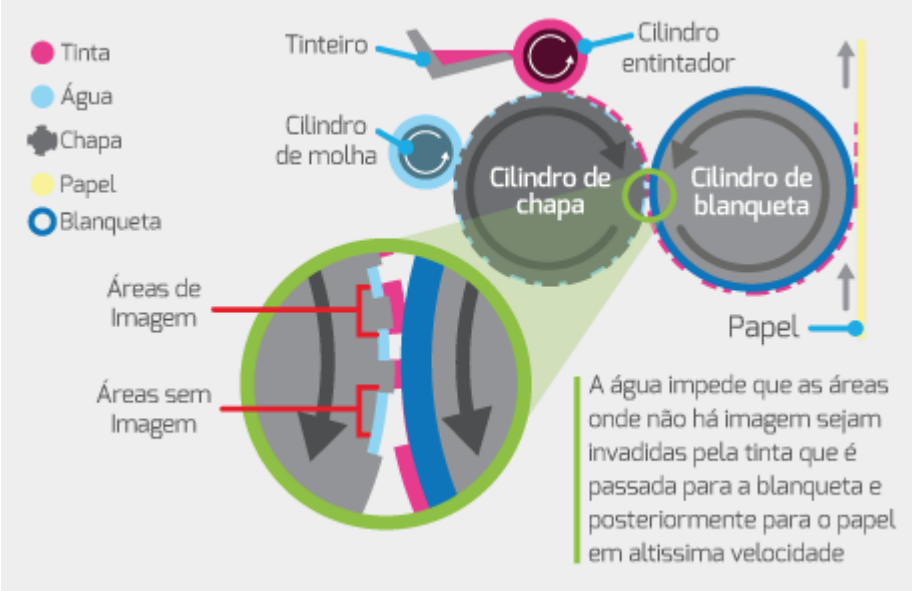
O processo de impressão offset consiste da passagem da tinta de uma matriz para um rolo de borracha e então, do rolo de borracha para o papel ou outro substrato (ENCICLOPÉDIA BRITTANICA, 2016). Geralmente o substrato de matéria prima é obtido no formato de folhas. A Figura 1 ilustra o processo.

Os processos de flexogravura e rotogravura consistem de uma matriz cilíndrica, a qual possui a imagem gravada, que fica banhada pela tinta e então a transfere para o papel ou outro substrato, conforme pode ser visto na Figura 2. Para estes processos, a matéria prima tem o formato de bobina.

Indiferente de qual destes processos seja, as imagens são separadas por cores e cada cor exige uma matriz para imprimi-la individualmente. Durante o processo cada cor é transferida ao substrato no seu devido lugar, uma após a outra, formando a imagem final ao término do processo. A Figura 3 mostra uma máquina de rotogravura.

Estes processos possuem capacidade de impressão que vão de dezenas a centenas de mpm de substrato impresso (Bobst Group, 2019). Devido a esta característica, a qualidade do produto tem de ser controlada durante a produção, a fim de evitar a geração de material defeituoso.

Figura 1 – Impressão Offset




Fonte: Printi (2014)

Figura 2 – Processo de rotogravura

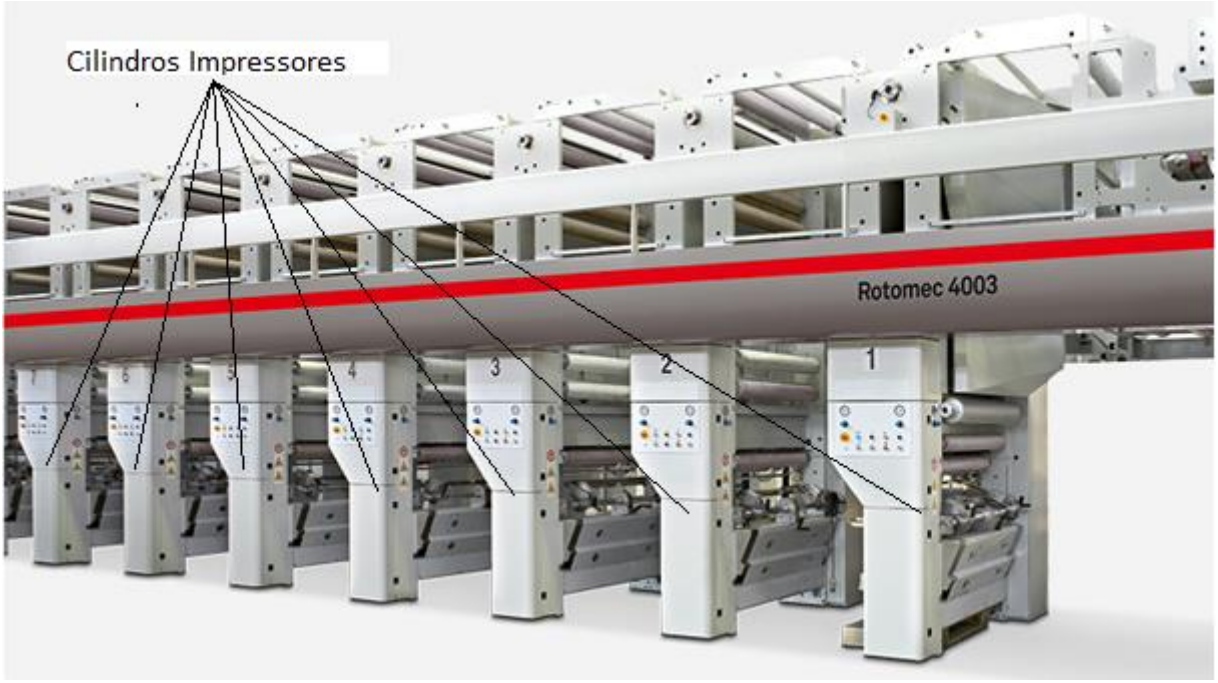
Fonte: Chambril (2019)

Para o controle de qualidade do produto, dois principais fatores são: a cor impressa condizente com a cor exigida e o correto posicionamento de cada cor no substrato. A verificação destas características durante a produção geralmente é feita por sistemas de inspeção computadorizados, que detectam a variação da tonalidade da cor comparando com um padrão pré-estabelecido (AVT, 2019). Estes sistemas são relativamente caros e por isso, só compensam serem implementados em impressoras

que imprimem produtos mais elaborados, consequentemente de maior valor agregado. Para máquinas que não possuem este sistema, utilizam-se estroboscópios fixos ou portáteis para o monitoramento da chamada “grade de registro”, área onde são impressas marcas de controle de sincronismo de impressão.

Outro defeito comum, que é detectado com o uso de estroboscópio, é a presença de tinta em áreas erradas do substrato.

Figura 3 – Máquina de Rotogravura




Fonte: Adaptado de Bobst Group (2019)

As bobinas impressas que saem das impressoras podem chegar ao tamanho de 1m de diâmetro e pesar cerca de uma tonelada. Para fracionar este material em quantidades menores, são utilizados equipamentos chamados “cortadeiras”, que cortam a bobina de 1 m de diâmetro em filetes e os enrolam em bobinas menores, de tamanho suficiente para que uma pessoa consiga levantar com os braços. Na Figura 4 é apresentado um modelo deste equipamento.

O corte destas bobinas deve ser preciso, para tanto, existem marcas de impressão que são utilizadas para centralizar o corte, representada na Figura 5. Para inspecionar estas marcas, também é utilizado o estroboscópio.

Figura 4 – Cortadeira da marca DEACRO

Fonte: Deacro (2019)

Figura 5 – Marca para centralizar o corte do papel

Fonte: O autor

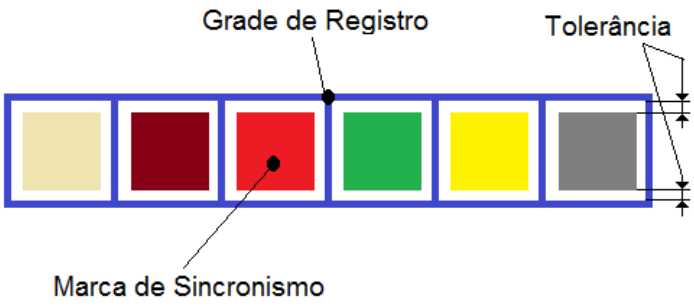
2.1.1.1 Exatidão necessária

Para formar a imagem final de um produto impresso, muitas vezes, é necessária a sobreposição de várias cores. Para garantir que a gravura final tenha a qualidade exigida, existe uma tolerância máxima para o desalinhamento entre as cores impressas expressa em décimos de milímetro (Bobst Group, 2019).

A grade de registro é a ferramenta que demonstra se a cor impressa está dentro da tolerância ou não. Ela é formada por contornos de quadrados alinhados lado a lado, conforme a Figura 6. Cada cilindro impressor deve imprimir um quadrado com a sua

respectiva cor dentro de um contorno da grade. Tanto menor é a diferença de tamanho entre o contorno da grade e o quadrado impressos, quanto menor for a tolerância de desalinhamento.

Figura 6 – Grade de Registro




Fonte: O autor.

## 2.2 Qualidade da luz

Para se realizar qualquer tipo de inspeção visual, faz-se necessário o uso de alguma fonte de luz, seja ela natural ou artificial.

Hoje, após muitos anos de desenvolvimento tecnológico, existem diversos tipos de transdutores luminosos no mercado. Cada um deles é capaz de atender a diferentes requisitos de qualidade.

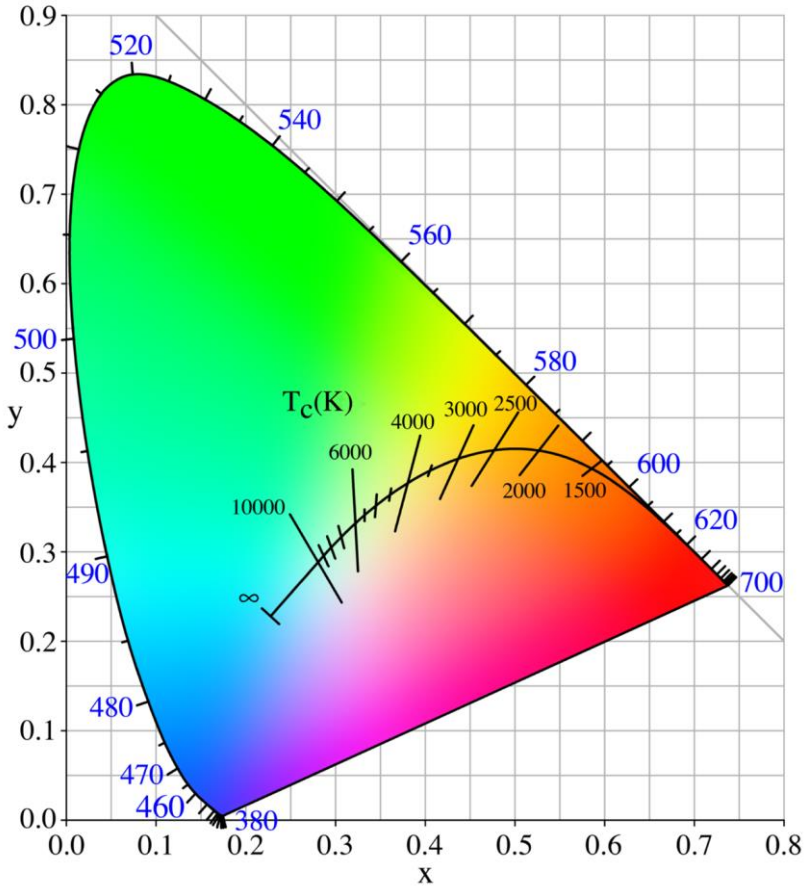
A característica mais utilizada para definir a qualidade de uma fonte luminosa é a intensidade do fluxo luminoso, no entanto, existem outros dois aspectos igualmente importantes: a temperatura de cor e o índice de reprodução de cor (Weinert e Spaulding, 2010).

O fluxo luminoso representa a quantidade total de energia emitida no espectro de luz visível por uma fonte de luz. A sua unidade de medida á o Lúmen (Lm) (Weinert e Spaulding, 2010).

Um corpo negro, quando aquecido, emite luz em determinados comprimentos de onda. À relação entre a cor da luz emitida e a temperatura do corpo, é dado o nome de temperatura da cor correlata (Weinert e Spaulding, 2010). A sua unidade de medida é o Kelvin (K). A Figura 7 demonstra a relação entre elas.

Analisando a Figura 7, pode-se observar que as temperaturas de cor de fontes comuns de luz, como lâmpadas, que vão de 2700K a 6500K, variam do vermelho ao branco azulado.

Figura 7 – Relação entre temperatura do corpo negro e a cor da luz




Fonte: Weinert e Spaulding (2010).

Para ambientes residenciais, bares e restaurantes, a fim de criar uma atmosfera sociável, deve se dar preferência as cores ditas quentes, que vão até 3000K, já para ambientes de escritórios e fábricas, onde se deseja uma atmosfera limpa e precisa, as cores frias são mais indicadas (acima de 4000K) Costa (2006).

O índice de reprodução de cor mede a capacidade de uma fonte de luz de reproduzir as cores de objetos, se comparado a cor obtida a partir de uma fonte de luz ideal (Weinert e Spaulding, 2010). Este índice assume valores de 0, totalmente incapaz de reproduzir a cor, a 100, reproduz a cor igualmente.

De acordo com a aplicação, são exigidos diferentes níveis de IRC, como está relacionado na Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis de IRC exigidos por aplicação

| IRC | Aplicação |
|---|---|
| 90-100 | Estúdios de design gráfico, vitrines de lojas e onde se requeira alta fidelidade de cor. |
| 70-90 | Escolas, consultórios médicos e a maior parte dos escritórios. |
| >50 | Ambientes industriais, estoques e quaisquer lugares que não exijam grande confiabilidade de cor. |

Fonte: Adaptado de Weinert e Spaulding (2010).

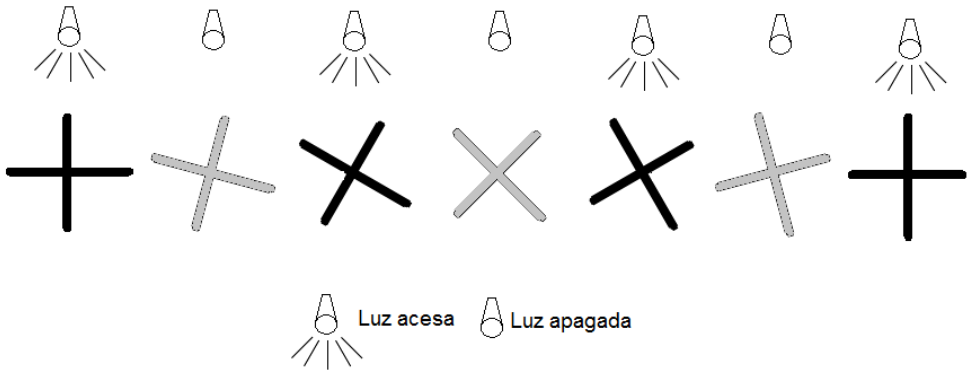
## 2.3 Efeito Estroboscópico

O efeito estroboscópico é o resultado da interação entre uma fonte de luz variável no tempo e um objeto em movimento, fazendo-o parecer se mover pausadamente (PERZ 2014). A Figura 8 demonstra a ocorrência do efeito.

Para um objeto girando com velocidade angular constante, a mudança da frequência e de *duty cycle*, modificam a percepção do efeito estroboscópico (PERZ 2014). Conforme se altera a frequência, a percepção visual do movimento muda com relação a velocidade e sentido de giro, conforme ilustrado na Figura 9.

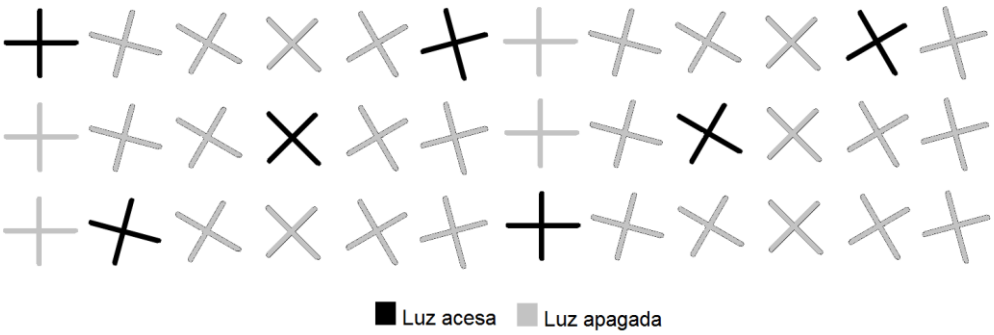
Outro aspecto da imagem percebida pelo efeito estroboscópico, é a nitidez do objeto ou desenho. Esta característica é determinada pelo *duty cycle* da fonte de luz, onde, quanto menor, mais nítida é a imagem, conforme ilustrado pela Figura 10 (PERZ 2014).

Figura 8 – Efeito estroboscópico




Fonte: O autor.

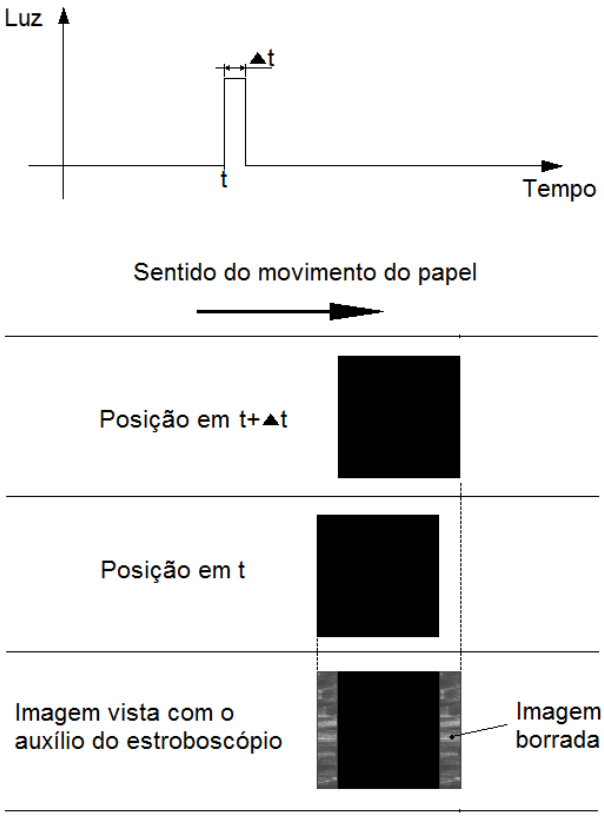
Figura 9 – Percepção de sentido de giro contrário




Fonte: O autor

A redução do tempo em que a luz fica ligada diminuirá o efeito borrado da imagem, porém, causará a diminuição da luminosidade.

Figura 10 – Imagem borrada devido ao tempo da luz acesa



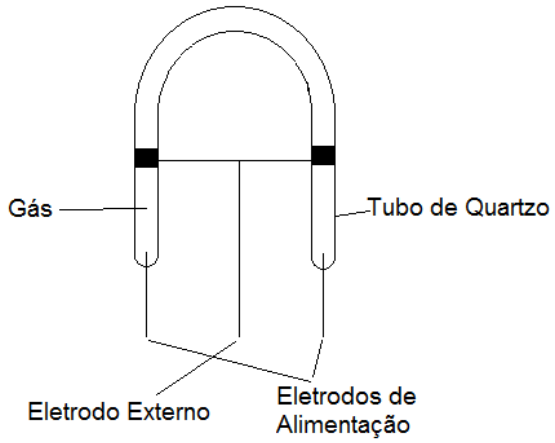

Fonte: O autor

## 2.4 Lâmpada Flash Xênon

A lâmpada xênon é constituída por um tubo hermético, geralmente de quartzo, preenchido por uma mistura de gases incluindo o gás Xenônio, dois eletrodos que ficam em contato com o gás e um eletrodo externo, preso ao tubo. É encontrada comercialmente em forma de “U”, anel, helicoidal ou tubular (PerkinElmer Optoeletronics, 2019)

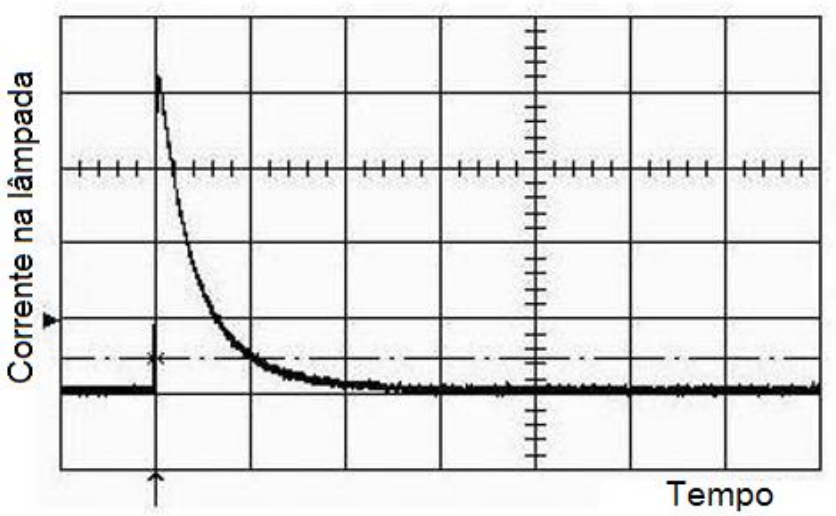
Para o seu funcionamento, submete-se uma tensão contínua em seus terminais que ficam em contato com o gás e aplica-se um pulso de alta tensão no eletrodo externo, entre 2000V e 150000V dependendo da lâmpada. Com a alta tensão, o gás é ionizado e se torna condutivo, conduzindo a corrente elétrica entre os terminais com tensão contínua. Ao circular a corrente elétrica, o gás aquece até o ponto de plasma, liberando uma quantidade grande de calor, o qual é dissipado pelo material do tubo, e um flash luminoso de alta intensidade. Normalmente é utilizado um capacitor para alimentar a lâmpada devido a sua necessidade de alta corrente em curto espaço de tempo. Após a completa descarga do capacitor, o flash se extingue. Na Figura 11 é mostrado uma lâmpada tipo “U” e na Figura 12 pode-se observar o comportamento da corrente na lâmpada (Lighting Associates, 2019).

Figura 11 – Lâmpada xênon tipo “U”




Fonte: O autor.

Figura 12 – Gráfico corrente x tempo na lâmpada




Fonte: Adaptado de OSRAM (2010)

Na Figura 12 observa-se que a condução de corrente na lâmpada tem um pico abrupto inicial e depois decai de forma mais lenta até o valor nulo. A largura do pulso geralmente fica em torno de dezenas de microssegundos, podendo variar conforme o tipo de gás da lâmpada, a quantidade de energia armazenada no capacitor e a indutância do circuito de alimentação, incluindo o capacitor (OSRAM, 2014).

A temperatura de cor da luz emitida fica em torno de 9800K.

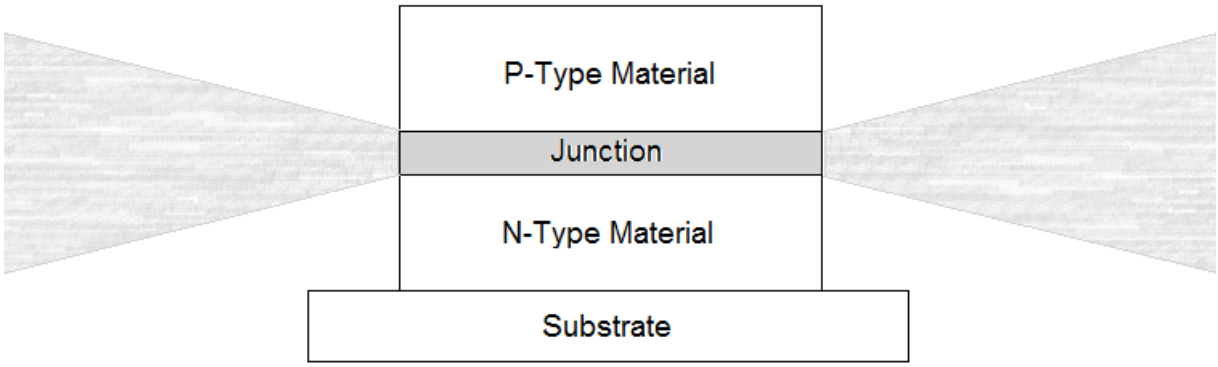
## 2.5 LED

LEDs são semicondutores que, ao serem percorridos por uma corrente elétrica, emitem luz. Eles não apresentam aquecimento pela luz emitida, porém, o cuidado com a sua faixa de temperatura de trabalho seja crucial para a longevidade dele (Weinert e Spaulding, 2010).

O LED, como qualquer diodo, é formado por uma junção de material semicondutor simples *p*-*n*. Quando ele é percorrido por uma corrente elétrica, da junção dos dois diferentes materiais, são emitidos fótons, conforme a Figura 13, processo que ocorre com qualquer tipo de diodo, porém, no caso dele, os tipos de materiais são escolhidos de forma que o comprimento de onda esteja dentro do espectro visível. Variando-se os tipos de componentes de sua construção, pode-se obter diferentes cores de luz.

O primeiro LED vermelho foi desenvolvido por Nick Holonyak na General Electric. Hoje, um único LED branco já é fabricado com a capacidade 610 lúmens e vendido comercialmente como qualquer outra fonte de luz.

Figura 13 – Junção p-n emitindo fótons




Fonte: Weinert e Spaulding (2010)

Se comparada com outras fontes de luz tradicionais, as luminárias LED apresentam diversas vantagens, como: eficiência cinco vezes maior que as lâmpadas incandescentes e alógenas; luz mais direcional, permitindo o foco do que se quer iluminar; a qualidade da luz pode ser igual ou superior; tem vida útil até 20 vezes maior; não emitem raios infravermelho ou ultravioleta, não degradando os objetos que iluminam (Weinert e Spaulding, 2010).

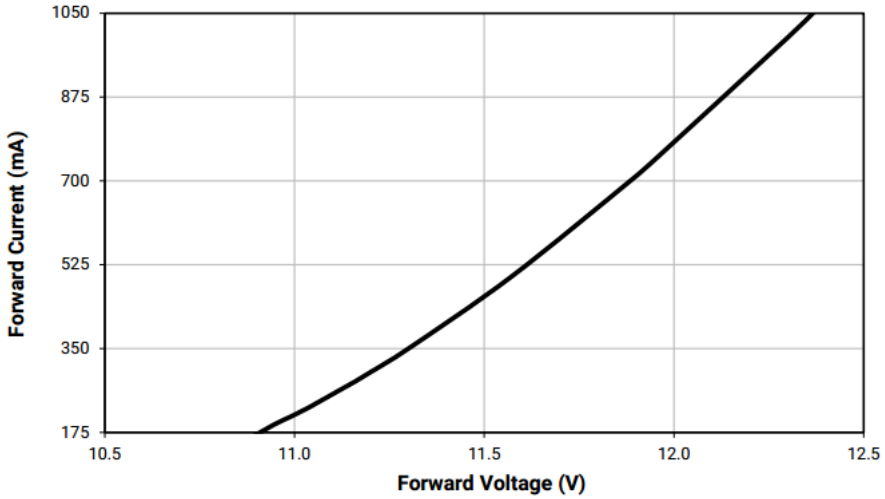
Assim como a maior parte das lâmpadas fluorescentes, os LEDs necessitam de conversores de energia (*drivers*) para funcionarem, não podendo ser ligados diretamente a tensão da rede elétrica. Esta necessidade está relacionada a sua baixa tensão de trabalho, em torno de 3,2 V para LEDs brancos. Mesmo os encapsulamentos que possuem diversos deles interligados em série, sugerindo uma tensão de alimentação maior, necessitam de um circuito regulador de corrente. Esta característica se deve ao rápido aumento dela para uma pequena variação na tensão de alimentação, conforme pode ser visto na Figura 14 (Weinert e Spaulding, 2010).

Observando-se a Figura 14, pode-se constatar que para um acréscimo de 4,5% da tensão, tem-se um crescimento de mais de 50% da corrente no LED.

Da mesma forma como a potência dos LEDs aumentou com o seu desenvolvimento ao longo dos anos, o seu IRC também evoluiu. A poucos anos atrás, já haviam luminárias LED sendo vendidas comercialmente emitindo uma quantidade

de lúmens equivalente as lâmpadas comuns, porém, era visível o seu baixo IRC se comparado as lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Hoje, eles já são encontrados com índices de reprodução de cor de até 100% (Weinert e Spaulding, 2010).

Figura 14 – Gráfico corrente x tensão em um LED Cree XLamp XHP35




Fonte: Cree (2017)

Apesar de ser classificado com algum nível de IRC, o aspecto real da luz dos LEDs pode diferir de forma bastante perceptível de outra fonte de luz com índice igual. Segundo o relatório técnico da CIE 177:2007, *Color Rendering of White LED Light Sources*, embasado em diversas pesquisas acadêmicas, o IRC não é capaz de predizer a qualidade da cor da luz de LEDs brancos. Sempre que possível, deve-se observar a qualidade da luz do LED em pessoa (Weinert e Spaulding, 2010).

Ao se utilizarem diversos LEDs em conjunto, caso eles difiram em um número expressivo de CCT, será visível a sua diferença de temperatura de cor. Visto que a maioria das aplicações em iluminação utilizam mais de um LED em cada luminária, os fabricantes classificam os LEDs produzidos em conjuntos (bins) que são identificados por um CCT e possuem uma tolerância de variação definida. Na Tabela 2 estão apresentados os valores de tolerância e CCT do padrão ANSI C78.377A (Weinert e Spaulding, 2010).

O LED, assim como as outras fontes comuns de luz, transforma parte da energia elétrica em luz e outra parte em calor, com a vantagem de não irradia-lo

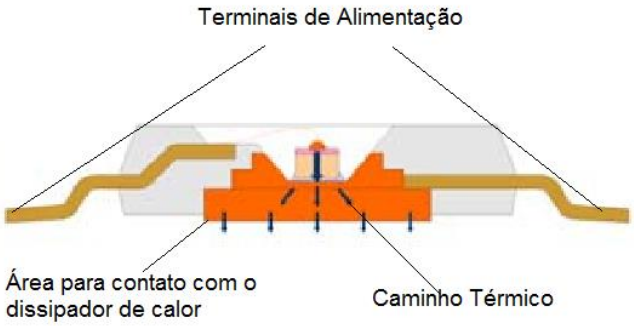
através de raios infravermelho e raios ultra violeta. A correta dissipação do calor produzido é essencial à garantia da sua longevidade (Weinert e Spaulding, 2010).

Tabela 2 – ANSI Chromaticity Standard C78.377A

| ANSI C78.377ª CCT Standard | |
|---|---|
| CCT Nominal | CCT Tolerância (K) |
| 2700K | 2725±145 |
| 3000K | 3045±175 |
| 3500K | 3465±245 |
| 4000K | 3985±275 |
| 4500K | 4503±243 |
| 5000K | 5028±283 |
| 5700K | 5665±355 |
| 6000K | 6530±510 |

Fonte: Adaptado de Weinert e Spaulding (2010).

Figura 15 – Caminho térmico dentro de um LED




Fonte: Adaptado de OSRAM Opto Semiconductors (2011).

A temperatura de junção do LED é um dos seus parâmetros mais importantes. Quanto mais ela aumenta, menor é a quantidade de luz emitida e vida útil do componente. Para o controle desta temperatura, os três fatores influentes são: a corrente que circula pelo LED, o caminho térmico e a temperatura ambiente (Weinert e Spaulding, 2010). A Figura 15 mostra o caminho pelo qual o calor circula dentro do LED.

## 2.6 Tecnologias de fontes de alimentação

Pode-se classificar os tipos de fontes de alimentação em dois principais grupos: as fontes lineares e as fontes chaveadas. Comparando-se equipamentos com as duas tecnologias, as fontes chaveadas apresentam menor volume, peso e, consequentemente, menor custo (Lopes, 2012). O rendimento de fontes lineares fica normalmente em torno de 25%, enquanto que as fontes chaveadas variam de 65% a 95% na maior parte dos casos (Mehl, 2012).

As fontes chaveadas geralmente consistem de um elemento armazenador de energia e um elemento comutador que controla a passagem da energia. É comum o uso de indutores como armazenador de energia e transístores e diodos como comutadores.

Existem diversos tipos de arranjos nos quais se apresentam estes elementos. De acordo com as características de entrada e saída de tensão e corrente, eles recebem classificações. Dentre elas estão os rebaixadores de tensão e os elevadores de tensão.

Para controlar a comutação dos elementos ativos do circuito e, por consequência, as características de tensão e corrente de saída da fonte, comumente são utilizados circuitos integrados dedicados a esta função (Pomilio, 2018).

A tensão de saída da fonte é um dado levado em consideração pelo controlador para realizar o ajuste da comutação do transistor. Para que este dado chegue de forma adequada para o CI, são utilizados circuitos de feedback de tensão.

Nesta seção são apresentados a topologia do conversor *Buck Boost*, o funcionamento do CI UC3845B e o dimensionamento e funcionamento do circuito de feedback de tensão baseado no CI TL431.

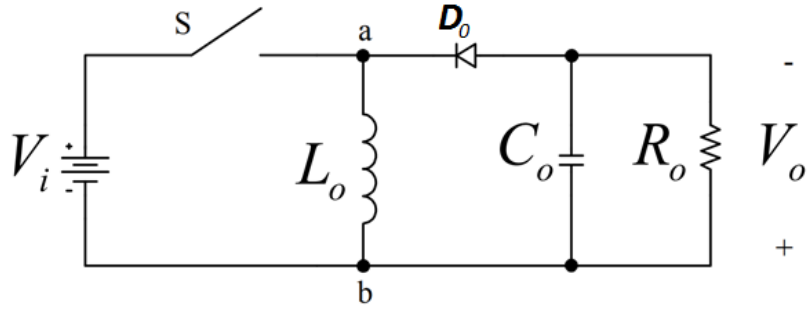
### 2.6.1 Conversor Buck Boost

O conversor Buck Boost (também chamado de Flyback) é uma topologia de fonte chaveada que permite trabalhar no modo contínuo e possui a vantagem de permitir tensões de entrada com valores acima ou abaixo da tensão de saída (Lopes, 2012).

A Figura 16 mostra a topologia de um conversor Buck Boost. Para a simplificação dos cálculos, é considerado que a fonte tem uma eficiência de 100%. O

funcionamento do circuito se dá da seguinte forma: quando $S$ é fechada, $V_i$ faz circular uma corrente com valor crescente por $L_0$, armazenando energia nele, enquanto $D_0$ está bloqueado e a carga $R_0$ está sendo alimentada por $C_0$. Quando a chave $S$ abre, o indutor L0 cria uma tensão reversa a tensão aplicada por $V_i$ e descarrega a sua energia no capacitor $C_0$ e na carga $R_0$ através do diodo $D_0$ que fica diretamente polarizado. Ao fechar a chave s novamente, o ciclo se repete (Mello, 2012).

Figura 16 – Topologia Buck Boost




Fonte: Petry, 2019.

Nesta configuração, quando a chave S abre, a tensão sobre ela é a soma da tensão de entrada com a tensão de saída. Uma forma de reduzir esta tensão é utilizando um indutor bifilar, conforme a Figura 17 Pomilio (2019).

O $D$ é determinado pela relação entre $t_{on}$ e $T_s$ da frequência de chaveamento de $S$, conforme a Equação (1) Lopes (2012).

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \tag{1}$$

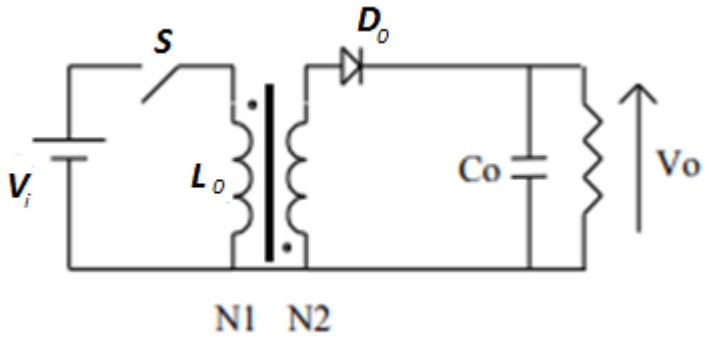
A corrente máxima de entrada $I_{in(max)}$ será dada pela Equação (2) Pomilio (2019).

$$I_{in(max)} = \frac{P_i}{D \cdot V_{i(min)}} \cdot 2 \tag{2}$$

A Equação (3) determina a relação entre $V_o$ e $V_i$ a partir do número de espiras do primeiro segmento ($N_1$) e do segundo segmento ($N_2$) Pomilio (2019).

$$V_o = \frac{N_1}{(N_2 + N_1)} \cdot \frac{V_i \cdot D}{(1 - D)} \quad (3)$$

Figura 17 – Topologia Buck Boost com indutor bifilar




Fonte: Adaptado de Pomilio (2019)

Considerando que $P_i$ é igual a potência de saída ($P_o$), a Equação (4) determina a relação entre a corrente de entrada ($I_i$) e saída ($I_o$).

$$P_i = P_o \therefore V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o \quad (4)$$

A energia entregue a carga $(E_c)$ a cada ciclo é definida pela Equação (5).

$$E_C = \frac{P_i}{f} \quad (5)$$

O fluxo magnético máximo $(B)$ que é armazenado no indutor pode ser calculado pela Equação (6).

$$B = \frac{E_C}{I} \quad (6)$$

A Equação (7) demonstra o cálculo da área mínima $(A_{min})$ do núcleo em função da densidade do fluxo magnético máxima admitida pelo material dele $(H_{max})$ (Texas Instruments, 2001).

$$A_{min} = \frac{B}{H_{max}} \quad (7)$$

A energia armazenada no indutor $(E)$ é calculada pela Equação (8).

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (8)$$

A indutância do indutor ($L$) é determinada pela Equação (9).

$$L = \frac{2 \cdot E_C}{I^2} \quad (9)$$

Para facilitar o cálculo do número de espiras do indutor $(N)$ em função da indutância desejada, o fabricante THORNTON disponibiliza o parâmetro $AL$ para cada tipo de núcleo. A Equação (10) calcula $N$ em função deste parâmetro e $L$ (THORNTON, 2019).

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} \quad (10)$$

A Equação (11) demonstra o cálculo da carga drenada ($Q_{drenada}$) de $C_0$ e a Equação (12) calcula a sua capacitância função da variação máxima da tensão de saída ($\Delta V_{o(max)}$), do tempo em que o capacitor permanece descarregando ($T_{desc}$) e de $I_o$(Pomilio, 2019).

$$Q_{drenada} = T_{desc} \cdot I_o \quad (11)$$

$$C_0 = \frac{Q_{drenada}}{\Delta V_{o(\max)}} \quad (12)$$

### 2.6.2 Funcionamento do CI UC3845B

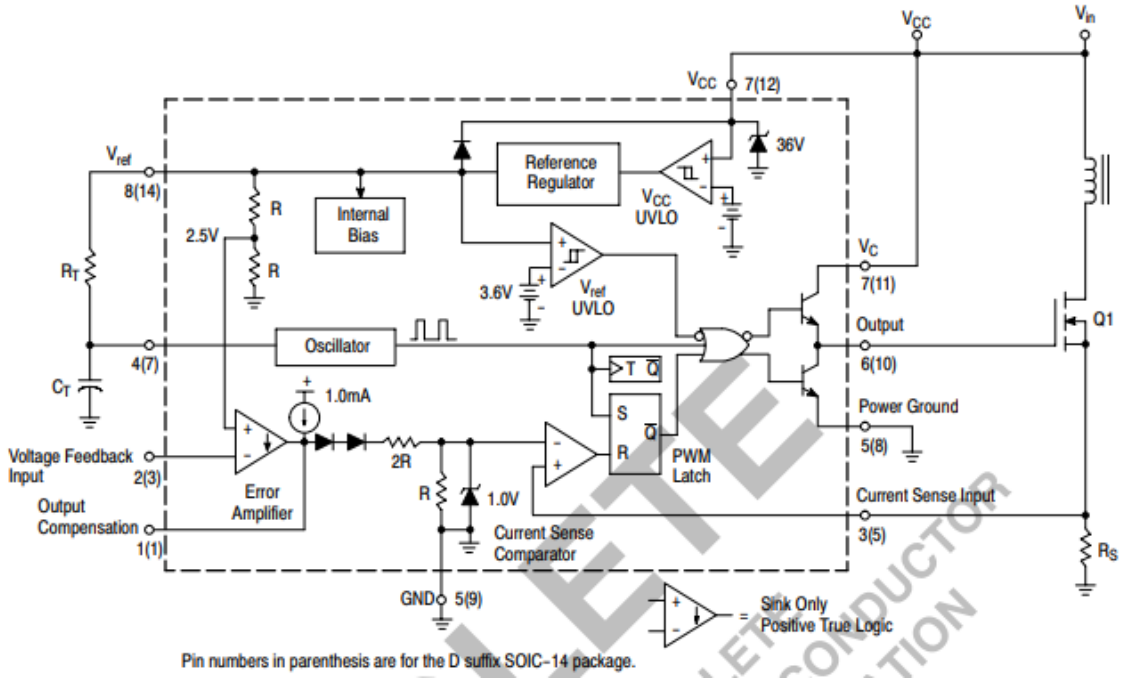
O CI UC3845B é um controlador de frequência fixa de alta performance, especificamente projetado para conversores DC-DC. Ele possui um oscilador, uma

saída de tensão de referência fixa, um amplificador de erro de alto ganho, um comparador sensor de corrente e uma saída projetada especialmente para fornecer alta corrente para operar um MOSFET de potência conforme pode ser visto na Figura 18 (ON Semiconductor, 2013).

O oscilador possui uma frequência que é definida por um resistor, conectado entre o pino 8 e o pino 4, e um capacitor, conectado ao pino 4 e 5. Os valores destes componentes são escolhidos de acordo com a Figura 19 que relaciona a frequência de oscilação, capacitância e resistência (ON Semiconductor, 2013).

O amplificador de erro de alto ganho tem a sua entrada não inversora conectada a uma tensão de referência interna de 2,5 V, enquanto que a sua entrada inversora está disponível pelo pino 2, assim como a sua saída está disponível o pino 1, conforme a Figura 20. É comum o uso deste circuito para o controle da tensão de saída do conversor.

Figura 18 – Esquema interno do CI UC3845B

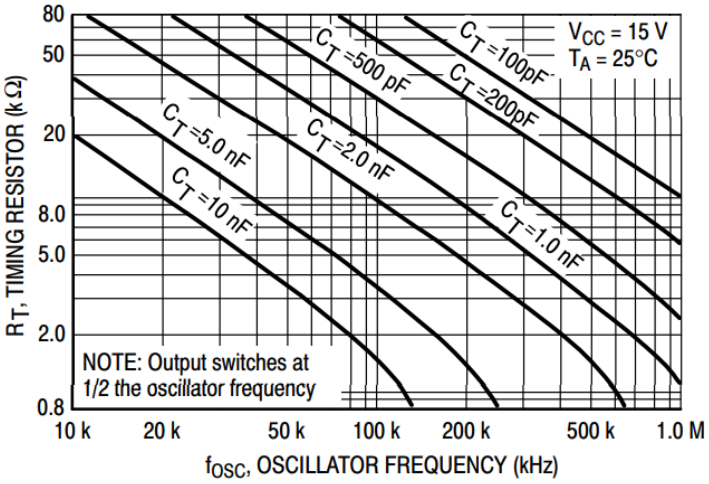



Fonte: Adaptado de ON Semiconductor (2013)

O comparador sensor de corrente tem a sua entrada não inversora conectada a saída do amplificador de erro através de dois diodos e um resistor. Quando esta saída está em nível alto, a tensão na entrada não inversora fica com um valor fixo de

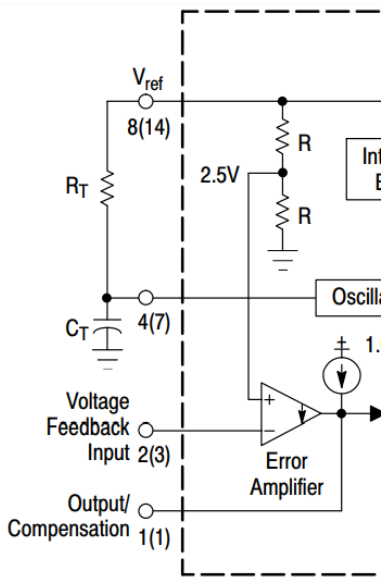
1 V. A entrada inversora do amplificador é conectada ao pino 3 conforme mostrado na Figura 21 (ON Semiconductor, 2013).

Figura 19 – Gráfico Resistor X Capacitor X Frequência de operação




Fonte: Adaptado de ON Semiconductor (2013)

Figura 20 – Amplificador de erro

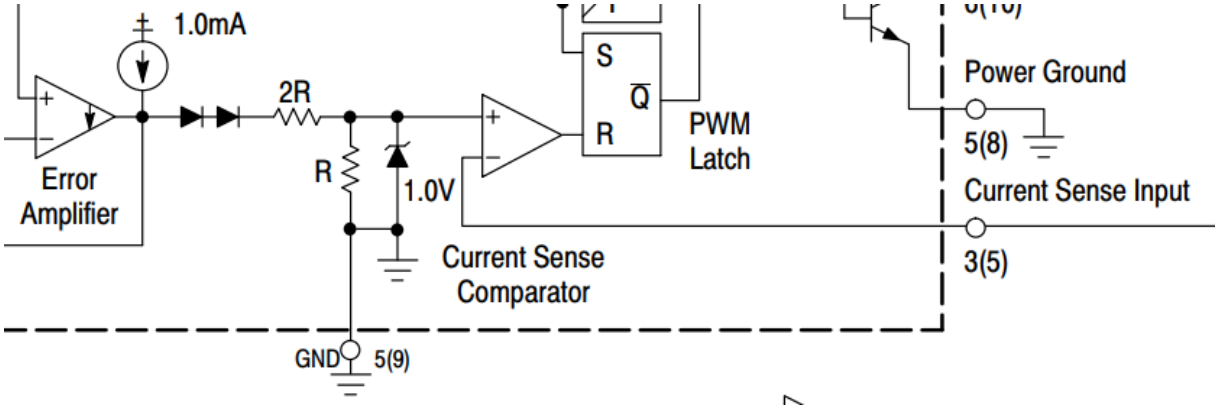



Fonte: Adaptado de ON Semiconductor (2013)

Caso a tensão no pino 3 ultrapasse o valor de 1 V, a saída do sensor de corrente bloqueia o acionamento do MOSFET pelo circuito de saída. Para uma aplicação como sensor de corrente, este pino é conectado a um resistor ($R_S$) em série com a carga, tendo um valor bem baixo, dimensionado de forma a gerar uma tensão de 1 V quando a corrente limite ($I_{lim}$) for atingida, a qual é calculada pela Equação (13).

(13)

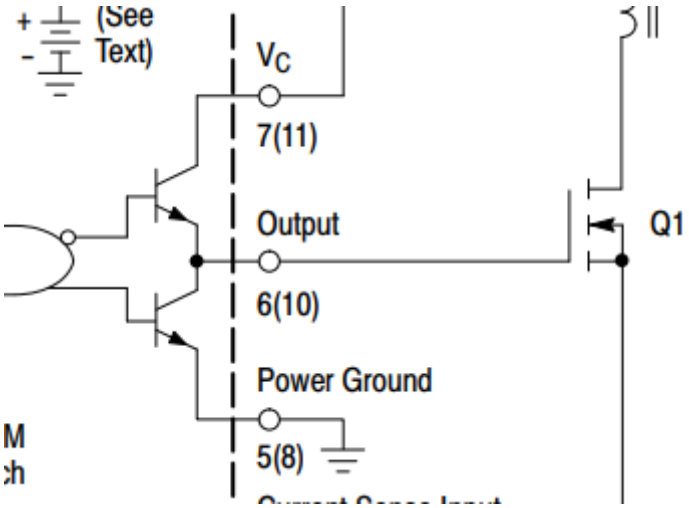
Figura 21 – Comparador sensor de corrente




Fonte: Adaptado de ON Semiconductor (2013)

O circuito de saída é especialmente projetado para acionar o *gate* de um MOSFET de potência. Ele é capaz de fornecer uma corrente de até 1 A pelo pino 6. O pino 5 deve ser conectado ao polo negativo da fonte e o pino 7 ao polo positivo, conforme a Figura 22 (ON Semiconductor, 2013).

Figura 22 – Circuito de saída




Fonte: Adaptado de ON semiconductor (2013)

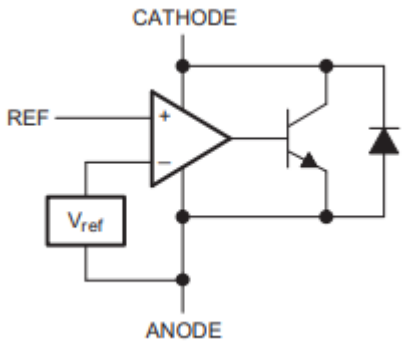
A queda máxima de tensão é cerca de 3 V entre os pinos 7 e 6 e entre os pinos 6 e 5.

### 2.6.3 Funcionamento do CI TL431

O CI TL431 é um regulador de tensão por desvio de corrente. Dentre as suas principais aplicações está a monitoração da tensão. Ele possui três terminais: o catodo, a referência e o anodo. O seu circuito equivalente está representado na Figura 23.

Quando o pino Referência, que está conectado a entrada não inversora do comparador, tem uma tensão abaixo de tensão de referência ($V_{ref}$), o transistor, que tem a base conectada a saída do comparador, fica bloqueado. Quando a tensão na entrada não inversora do comparador ultrapassa o valor de $V_{ref}$, o comparador aciona a base do transistor, fazendo-o entrar em saturação, aumentando a corrente entre catodo e anodo, fixando a queda de tensão entre eles em 2,5 V.

Figura 23 – Circuito equivalente do CI TL431




Fonte: Adaptado de Texas 2018

## 2.7 Controle do acionamento do transdutor luminoso

Para que o transdutor luminoso seja acionado de acordo com a frequência e duração desejados, é necessário um circuito de controle. Os estroboscópios mais baratos geralmente utilizam circuitos osciladores baseados no CI LM555, enquanto que os estroboscópios mais sofisticados geralmente possuem circuitos baseados em microcontroladores.

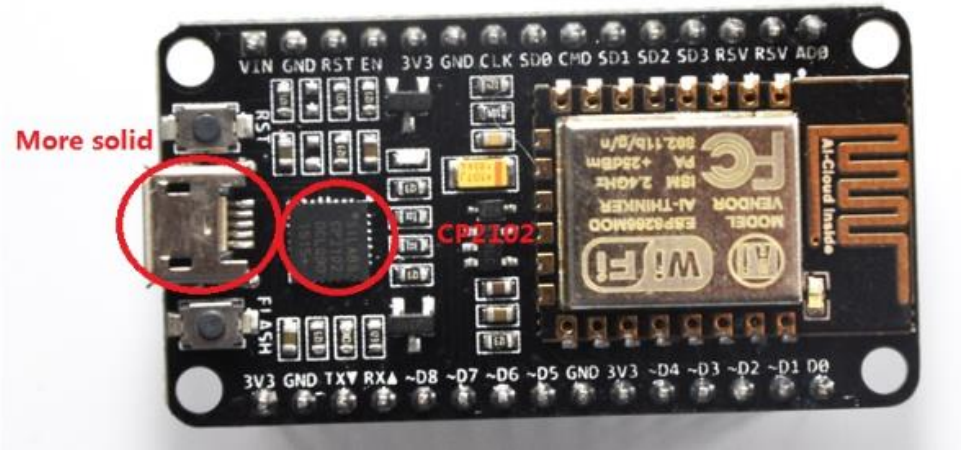
### 2.7.1 Módulo NodeMCU-ESP12E

O módulo NodeMCU-ESP12E é composto por um módulo ESP12E, um conversor USB-serial e um circuito conversor de 5 V para 3,3 V. Estes circuitos compõem uma placa que possui um conector micro USB e duas barras de pinos como interface de entrada e saída, como pode ser visto na Figura 24 (ESPRESSIF, 2015).

O módulo ESP12E é composto por um microcontrolador ESP8266EX e alguns outros componentes montados em uma placa sob uma proteção metálica e uma antena de circuito impresso. O microcontrolador pode ser configurado com um clock de até 160MHz, é capaz de estabelecer uma conexão 802.11b/g/n 2.4 GHz Wi-Fi, possui 13 pinos de I\O configuráveis e tem suporte para interrupções e timers. É possível programa-lo pela interface de programação do Arduino.

O conversor USB-serial tem como função principal permitir a programação do microcontrolador pela porta USB de um computador, por meio de um cabo micro USB conectado ao conector da placa.

Figura 24 – Módulo NodeMCU-ESP12E




Fonte: ESPRESSIF (2019)

O conversor 5 V-3,3 V tem a função de regular a tensão que alimenta o ESP12E, o qual pode ter como entrada a tensão proveniente do conector micro USB ou dos pinos VIN e GND da barra de pinos (ESPRESSIF, 2019).

# 3 METODOLOGIA

Na primeira parte deste capítulo, nos itens 3.1 a 3.5, são apresentadas as escolhas do transdutor luminoso e tecnologias eletrônicas que foram empregadas no projeto, bem como as suas justificativas. O dimensionamento dos componentes dos circuitos propostos, montagem e testes, estão descritos nos itens 3.6 a 3.12.

## 3.1 Escolha do transdutor luminoso

Nos itens 2.4 e 2.5 foram apresentados dois tipos de transdutores luminosos que possuem as características adequadas para a utilização em estroboscópios.

O acionamento e alimentação de lâmpadas xênon pode ser realizado com circuitos eletrônicos relativamente simples, porém é necessário a utilização de tensões relativamente altas, da ordem de milhares de volts para o disparo e de centenas de volts para a alimentação. Lâmpadas de boa qualidade são caras e importadas. A sua vida útil é relativamente baixa. Além destes fatores, a emissão de energia em forma de calor acarreta em uma eficiência energética baixa e necessidade de prever formas de dissipa-lo. Considerando que o estroboscópio é um equipamento portátil, o isolamento térmico e elétrico do equipamento torna-se dificultado devido a estas questões.

Apesar de os LEDs necessitarem de circuitos eletrônicos de acionamento mais elaborados, são uma fonte de luz que não irradia calor, possuem uma tensão de alimentação relativamente baixa, uma eficiência energética maior que as lâmpadas xênon, e principalmente uma vida útil muito mais longa, tornando o custo benefício melhor. Portanto, o transdutor luminoso escolhido é o LED.

## 3.2 Escolha do LED

Para a escolha do LED foram utilizados os seguintes critérios: quantidade de luz máxima necessária em Lumens, espaço físico ocupado, preço e disponibilidade.

Para definir a quantidade de luz necessária ($L_{nec}$) foi utilizado como referência a especificação de iluminância do estroboscópio da marca Drello modelo Drelloscop 1296 que possui uma iluminância ($E_{Drello}$) de 1880 lx para uma distância de 30 cm

entre o objeto e o estroboscópio e uma área ($A_i$) iluminada 0,216 m². Para encontrar a quantidade de luz em Lumens, utiliza-se a Equação (14).

$$L_{nec} = A_i \cdot E_{Drello} = 0{,}216 \cdot 1880 = 406\ lm \quad (14)$$

A especificação dos LEDs quanto a quantidade de luz produzida é definida em lumens. Devido a característica do acionamento pulsado da luz em um estroboscópio, o LED ficará acionado somente durante no máximo 1% do tempo e consequentemente, sendo capaz de produzir somente 1% da sua capacidade nominal de luz. Desta forma tem-se que a especificação de produção nominal de luz do LED deve ser 100 vezes maior que a quantidade necessária. Esta proporção foi escolhida com base no estroboscópio portátil da marca Unilux modelo Beacon. Pela Equação (15) podemos obter o valor nominal de produção de luz ($E_N$) que o LED deve ter.

$$E_N = 406 \cdot 100 = 40600\ lm \quad (15)$$

Avaliando os LEDs de alto rendimento disponíveis no mercado, tem-se os LEDs da Tabela 3, dos fabricantes Epistar e CREE.

Ao testar os LEDs da Epistar, viu-se que, apesar da sua especificação ser de 8000 a 9000 lm, 30 a 34 V, constatou-se que a luminosidade produzida era de 4000 lm e a tensão de trabalho circulando uma corrente de 3 A era de 39,4 V. Foram considerados os dados do teste para preencher a Tabela 3.

Tabela 3 – Comparativo dos LEDs

| Descrição | Luminosidade (lm) | Tamanho (mm) | Preço por unidade (R$) | Quant. | Preço Total (R$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Epistar COB 100W | 4000 | 45X45 | 26,00 | 10 | 260,00 |
| CREE XP-L 10W | 1000-1150 | 3,5X3,5 | 15,00 | 41 | 615,00 |

Fonte: O autor

Comparando os dois modelos de LED citados, apesar de a área ocupada pelo LED CREE ser menor, seu custo total acaba sendo bem maior. Devido a este fator o LED escolhido foi o Epistar COB de 100W.

Foram utilizados refletores e lentes focais de 60° conforme a Figura 25 para concentrar o feixe de luz emitida.

Figura 25 – Lente e refletor para os LEDs

Fonte: ESPRESSIF (2019)

### 3.3 Escolha do método de acionamento dos LEDs

Foram analisados dois métodos de acionamento dos LEDs: por corrente constante e por tensão constante.

A curva V x I do LED, conforme a Figura 14, demonstra um controle maior da potência dele pelo controle da corrente. Para tanto são utilizados métodos de acionamentos geralmente com indutores em série com o LED controlando a sua corrente. Devido a alta corrente que irá circular pelos LEDs no momento do acionamento e a necessidade de uma corrente estável, o indutor teria que armazenar uma energia muito alta, aumentando o seu tamanho e, após o desligamento do LED, esta energia teria que ser remanejada para algum outro armazenador a fim de não consumir potência. Considerando que os LEDs são acionados em uma frequência de até 166 Hz, qualquer perda de potência em mais transistores, resultaria em uma perda de eficiência e maior trabalho para controlar.

Para aumentar o controle da potência do LED pela variação da tensão aplicada, é comum usar-se resistores em série. Normalmente calcula-se o valor do resistor para

ficar com uma queda de cerca de 10% da tensão sobre ele. Para LEDs de alta potência, isto significa uma perda considerável de eficiência, porém, o circuito de acionamento se torna bastante simples. O acionamento escolhido é o controle por tensão fixa.

### 3.4 Escolha da fonte de alimentação

Foram analisados dois tipos de fonte de alimentação para o estroboscópio: baterias de Níquel Cádmio (NiCd) e baterias de Íon-lítio.

As baterias de NiCd tem a vantagem de serem mais baratas, porém, tem uma densidade de carga menor que as baterias de íon-lítio e uma vida útil menor.

As baterias de íon-lítio são cada vez mais utilizadas em ferramentas elétricas portáteis. Equipamentos de diversas marcas diferentes utilizam o mesmo modelo de bateria, criando um padrão no mercado, facilitando encontrar peças de reposição e tornando o preço ao longo do tempo mais baixo. A fonte de alimentação escolhida é uma associação de baterias de íon-lítio de 6 células de 3,7 V, 2,6Ah da marca SANYO modelo 18650.

### 3.5 Escolha da topologia do circuito

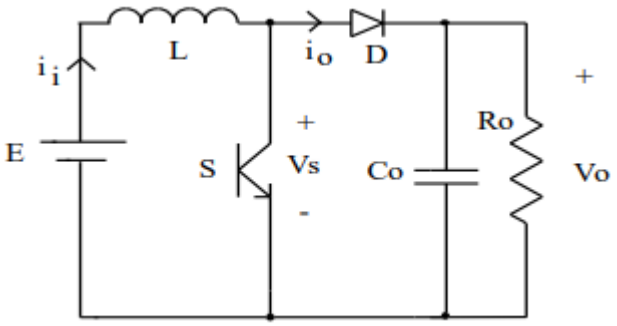
Como a bateria possui uma tensão de 22,2 V, o circuito conversor de tensão deverá elevar a tensão. Foram analisadas três topologias de fontes de alimentação: fonte linear, conversor boost e conversor buck-boost para realizar esta função.

Para uma fonte linear operar, é necessária uma tensão alternada. Como é utilizada uma bateria de tensão contínua, seria necessário um circuito que convertesse esta tensão em alternada, o que complicaria mais o projeto do circuito.

O conversor boost tem a característica de fornecer uma tensão de saída maior que a tensão de entrada. Devido ao posicionamento de seus componentes, a tensão de entrada fica ligada quase que diretamente a saída através do indutor e diodo, como pode ser visto na Figura 26. Devido ao capacitor de elevado valor na saída do circuito, no momento em que se aplica a tensão da bateria no capacitor vazio, esta ligação pode gerar um curto circuito que exceda a corrente máxima suportada pela bateria de íon-lítio, a qual pode pegar fogo nestas condições.

O conversor buck-boost também tem a característica de elevar a tensão, porém, ela tem polaridade invertida na sua saída. Como não há uma ligação direta da tensão de entrada com a saída, não existe o risco de a corrente aumentar sem o controle adequado, conforme pode ser visto na Figura 16. A topologia escolhida é o conversor buck-boost.

Figura 26 – Conversor Boost




Fonte: Pomilio, 2019.

### 3.6 Definição da potência de saída

A potência de saída foi definida utilizando os seguintes critérios: potência dos LEDs, valor dos resistores em série com os LEDs e a quantidade de circuitos LED e resistor.

De acordo com o teste experimental realizado, a uma corrente ($I_{LED}$) de 3 A, os LEDs apresentam uma tensão ($V_{led}$) de 39,4 V. Considerando que eles ficarão ligados por somente no máximo 1% do tempo, a potência consumida por cada LED ($P_{LED}$) é definida pela Equação (16).

$$P_{LED} = V_{led} \cdot I_{led} \cdot 0{,}01 = 39{,}4 \cdot 3 \cdot 0{,}01 = 1{,}182W \quad (16)$$

Para definir o valor dos resistores em série com os LEDs ($R_{led}$), foram utilizados valores que provocam uma queda de tensão de cerca de 10% da tensão do LED, ou seja, 3,94 V, definidos na Equação (17).

$$R_{LED} = \frac{3{,}94}{I_{LED}} = \frac{3{,}94}{3} = 1{,}31\Omega \quad (17)$$

Devido aos valores de resistores disponíveis, o valor escolhido foi de 1,2Ω. Para este valor de resistor, a potência dissipada sobre ele ($P_R$) é definida pela Equação (18) e a tensão sobre ele ($V_R$) é definida pela Equação (19).

$$P_R = R_{LED} \cdot {I_{LED}}^2 \cdot 0{,}01 = 1{,}31 \cdot 3^2 \cdot 0{,}01 = 0{,}118W \quad (18)$$

$$V_R = I_{LED} \cdot R_{LED} = 3 \cdot 1{,}2 = 3{,}6V \quad (19)$$

A Equação (20) demonstra a potência de cada circuito série LED e resistor ($P_{R+LED}$).

$$P_{R+LED} = P_R + P_{LED} = 1{,}182 + 0{,}118 = 1{,}3W \quad (20)$$

Como foram utilizados 10 circuitos série LED e resistor, tem-se que a potência de saída total ($P_o$) é definida pela Equação (21) e a tensão de saída ($V_o$) pela Equação (22).

$$P_o = P_{R+LED} \cdot 10 = 1{,}3 \cdot 10 = 13W \quad (21)$$

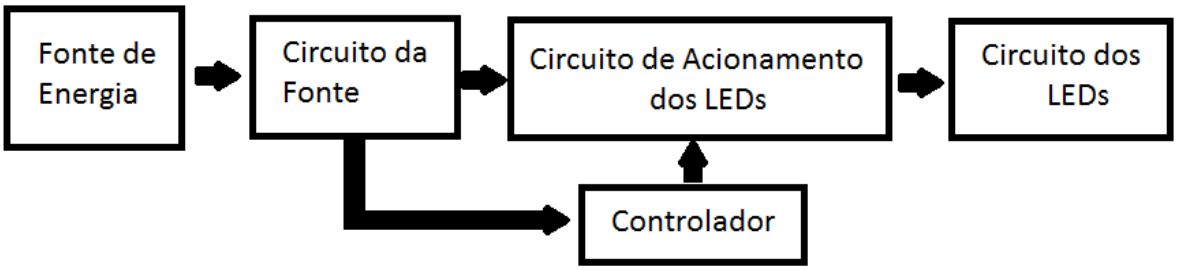
$$V_o = V_{LED} + V_R = 39{,}4 + 3{,}6 = 43V \quad (22)$$

De acordo com o datasheet do LED, ele pode ser ligado por até 5s sem a necessidade de um dissipador de calor adicional. Nos testes realizados, após 15 minutos ligado com uma frequência de acionamento de 166hz e com um *duty cycle* de 0,01, a temperatura de seu invólucro aumentou de 20 C° para 23 C°. A partir destes resultados, optou-se por não se utilizar dissipador de calor adicional no LED e observar a variação de temperatura após o protótipo montado.

### 3.7 Diagrama de blocos do equipamento

De acordo com a Figura 27, o equipamento foi dividido nos seguintes blocos: fonte de energia, que fornece energia para o sistema; circuito da fonte, que adequa a tensão de entrada para os outros circuitos; circuito de acionamento dos LEDs, que manipula o acionamento de potência dos LEDs; circuito dos LEDs, que é composto pelos LEDs e seus resistores; e o controlador, que recebe o sinal do encoder e controla o sinal que vai para o circuito de acionamento dos LEDs.

Figura 27 – Diagrama de blocos de sistema




Fonte: O autor

### 3.8 Dimensionamento do circuito da fonte

Nesta seção, foram escolhidos os parâmetros $\eta$, $f$ e o CI controlador. A partir destes e do intervalo de variação da tensão de entrada, foram dimensionados o indutor, o diodo e o transistor de chaveamento, bem como, foi escolhido o circuito de medição da tensão de saída e dimensionados os seus componentes.

O $\eta$ escolhido é 0,7, a $f$ escolhida é 100 kHz. A variação da tensão de entrada ($V_{i\Delta}$), de acordo com a variação da carga das baterias, é de 19,2 a 25,2 V. O controlador escolhido é o CI UC3845B.

A $P_i$ é obtida pela Equação (23).

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} = \frac{13}{0{,}7} = 18{,}57W \tag{23}$$

O *duty cycle* máximo ($D_{max}$) do CI UC3845 para os valores dos componentes escolhidos é de 0,46. Como a energia armazenada pelos capacitores de saída é consumida pelos LEDs em no máximo 1% do tempo, variando de acordo com a frequência, a fonte irá detectar uma tensão abaixo do *setpoint* durante a maior parte do tempo, fazendo com que se opere com o *duty cycle* máximo durante a maior parte do tempo.

Para otimizar a utilização do indutor, ele foi projetado para transferir, nos 56% do tempo restante, a mesma quantidade de energia armazenada nos primeiros 46% do tempo.

A partir da Equação (2), a corrente $I_{in(max)}$ é determinada pela Equação (24).

$$I_{in(max)} = \frac{P_i}{D_{max} \cdot V_{i(min)}} \cdot 2 \cdot = \frac{18{,}57}{0{,}46 \cdot 19{,}2} \cdot 2 = 4{,}2A \tag{24}$$

Para determinar o núcleo que foi utilizado no indutor, leva-se em conta a quantidade de energia que se quer transferir por ciclo, a quantidade de fluxo magnético máxima admitida pelo núcleo, a frequência máxima de operação e se é possível acomodar o enrolamento no seu espaço físico disponível.

A partir da Equação (5), $f$ e da Equação (23), a $E_C$ é definida pela Equação (25).

$$E_C = \frac{P_i}{f} = \frac{18{,}57}{100000} = 0{,}0001857J \tag{25}$$

Para gerar esta energia, considerando a ($I_{in(max)}$) e a Equação (6), o $B$ é definido pela Equação (26).

$$B = \frac{E_C}{I_{in(\max)}} = \frac{0{,}0001857}{4{,}2} = 0{,}000044214Wb \tag{26}$$

O material escolhido para o núcleo do indutor é o ferrite, que opera bem até uma frequência de 100 kHz. De acordo com o catálogo da Thornton, a $H_{max}$ recomendada para este material é de 0,25 T. de acordo com a Equação (7), a Equação (27) define a $A_{min}$.

$$A_{min} = \frac{B}{H_{max}} = \frac{0{,}000044214}{0{,}25} = 176{,}856mm^2 \quad (27)$$

O núcleo escolhido foi o NEE-42/21/20 da Thornton, que possui uma área de 240mm².

De acordo com $I_{\mathrm{in(max)}}$, procurando na tabela de fios de cobre esmaltados AWG, o fio AWG 20 de diâmetro de 0,8118mm, suporta uma corrente máxima de 1,6A. Foram utilizados 3 fios AWG20 em paralelo para confeccionar o indutor.

Adaptando a Equação (8) e utilizando a $E_C$, $L$ é definida pela Equação (28).

$$L = \frac{2 \cdot E_C}{{I_{in(max)}}^2} = \frac{2 \cdot 0{,}0001857}{4{,}2^2} = 21{,}054\mu H \quad (28)$$

De acordo com o parâmetro AL para um gap de 0,25mm da especificação do núcleo e a Equação (10), a Equação (29) calcula $N_1$.

$$N1 = \sqrt{\frac{L}{AL}} = \sqrt{\frac{21054}{925}} = 4{,}77\ espiras \quad (29)$$

Para determinar as características do segundo segmento do indutor, adaptando a Equação (3), a Equação (30) relaciona o número de espiras com $V_{in}$, $V_o$ e $D$.

$$V_o \frac{N1}{N_1 + N_2} = \frac{V_{in(min)} \cdot D}{(1 - D)} \quad (30)$$

$$N_2 = \frac{V_o \cdot (1 - D)}{V_{in(min)} \cdot D} N_1 - N_1 = \frac{43 \cdot (1 - 0{,}46)}{19{,}2 \cdot 0{,}46} 4{,}77 - 4{,}77 = 7{,}77\ espiras$$

Para determinar as características do fio de $N_2$, a partir da Equação (4), a Equação (31) relaciona as tensões e correntes de entrada e saída do indutor.

De acordo com a tabela de fios AWG, o fio escolhido foi o primeiro condutor com corrente nominal acima de $I_{\mathrm{o(max)}}$, que é o AWG19, com capacidade para conduzir 2 A.

$$V_{in(min)} \cdot I_{in(max)} = V_o \cdot I_{o(max)} \tag{31}$$

$$I_{\mathrm{o(max)}} = \frac{V_{in}}{V_o} I_{in(max)} = \frac{19{,}2}{43} 4{,}2 = 1{,}87535A$$

O diodo $D_1$ conduz a corrente em 54% do tempo, variando de 0 a $I_{o(\mathrm{max})}$. A tensão de trabalho é a tensão de saída de 43 V. Devido a elevada frequência de trabalho, ele precisa ter um tempo de recuperação reversa baixo. A corrente média conduzida por $D_1$ ($I_{D1med}$) é definida pela Equação (32).

$$I_{D1med} = \frac{I_{\mathrm{o(max)}}}{2} \cdot 0{,}54 = \frac{1{,}87535}{2} 0{,}54 = 0{,}49228A \tag{32}$$

O diodo escolhido foi o SG55F da marca Rectron com capacidade para conduzir uma corrente média de até 5 A, suporta uma tensão RMS de 210 V e tem um tempo de recuperação reversa máximo de 35 ns.

O transistor $Q_1$ conduzirá por no máximo 46% do tempo uma corrente que aumenta linearmente de 0 a $I_{in(\mathrm{max})}$. A sua tensão máxima de trabalho $V_{Q1(min)}$ deve ser maior que a soma da tensão $V_{in(\mathrm{max})}$ com a tensão no primeiro segmento do indutor quando o transistor está aberto $V_{L1}$, conforme a Equação (33). A Equação (34) calcula a sua corrente média.

$$V_{Q1(min)} = V_{in(max)} + V_{L1} = 25{,}2 + 19{,}2 = 44{,}4V \tag{33}$$

$$I_{Q1(med)} = \frac{I_{\mathrm{in(max)}}}{2} \cdot 0{,}46 = \frac{4{,}2}{2} 0{,}46 = 0{,}966A \tag{34}$$

O transistor escolhido foi o IRF3205 da marca International Rectifier que suporta uma corrente média de 110A, tensão máxima de 55V.

A fonte deve produzir uma tensão fixa de saída, para tanto, é necessário um circuito de feedback de tensão para o CI controlador da fonte. Devido ao polo negativo da tensão de saída não ser comum ao polo negativo da tensão de entrada, foi utilizado

um optoacoplador para sinalizar que a tensão desejada foi atingida, como pode ser observado na Figura 28.

Para medir a tensão de saída e acionar o optoacoplador, foi utilizado o CI TL431 com um divisor resistivo ajustável pelo trimpot $R_2$ no seu pino de referência e o diodo zener $D_2$ em série com o seu pino de alimentação e o LED do optoacoplador $U_2$ para reduzir a tensão sobre o CI, uma vez que a sua tensão máxima de trabalho é menor que a tensão $V_o$.

Para o TL431 ser acionado, ele precisa de uma tensão de 2,5 V em seu pino de referência. O trimpot $R_2$ foi definido em 5 kΩ. Para que essa tensão seja atingida no momento em que a saída tiver uma tensão maior que 43 V, o dimensionamento do divisor resistivo é definido pela Equação (35).

$$2{,}5 = \frac{R_2}{R_3 + R_2} 43$$

$$R_3 = \frac{R_2 \cdot 43 - 2{,}5R_2}{2{,}5} = \frac{2500 \cdot 43 - 2{,}5 \cdot 2500}{2{,}5} = 40{,}5k\Omega \tag{35}$$

A tensão máxima de trabalho recomendada do TL431 é de 36 V. Para reduzir a tensão de saída de 43 V para 36 V, $D_2$ deverá ter uma queda de tensão mínima de 7 V. Foi escolhido o diodo zener de 10 V.

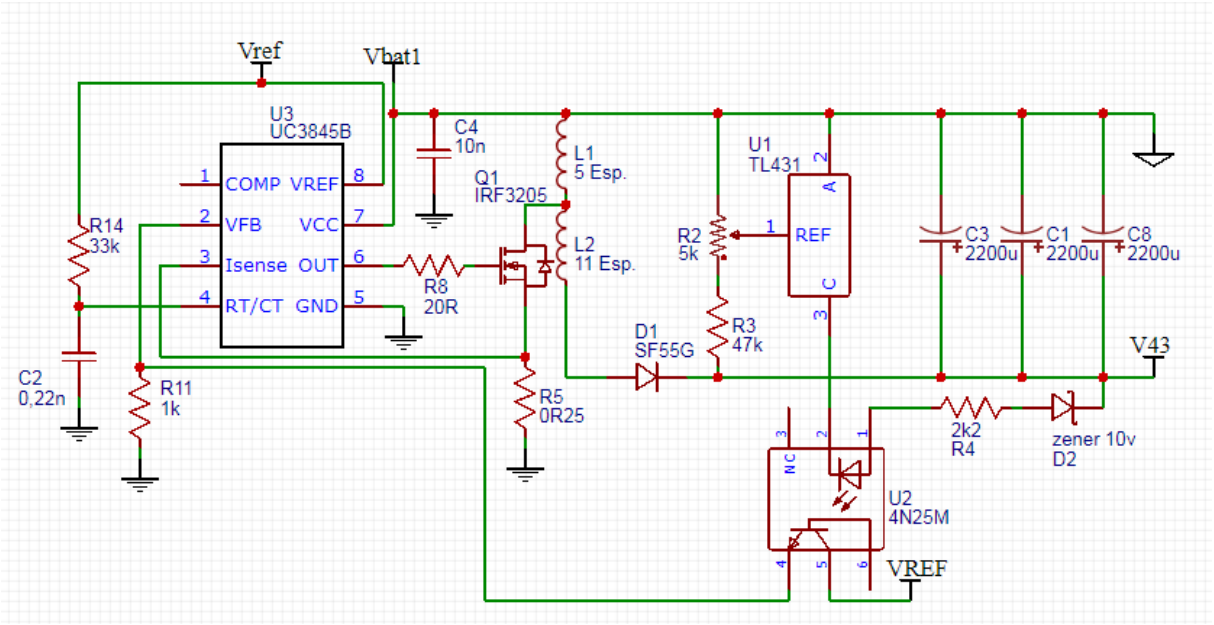
Conforme o item 2.6.2, o bloqueio do MOSFET ocorrerá quando o pino 2 de U$U_3$ tiver uma tensão maior que a tensão de bloqueio ($V_{blk}$) que é de 2,5 V, para tanto, a Equação (36) define o valor de corrente que deve circular por $R_{11}$ para gerar a tensão desejada.

$$I_{R11} = \frac{V_{blk}}{R_{11}} = \frac{2{,}5}{1000} = 2{,}5mA \tag{36}$$

O $U_2$ tem um $CTR_{min}$ de 20%. Para garantir a circulação da $I_{R11}$, a Equação (37) define a corrente $I_{R4}$ mínima.

$$I_{R4} = \frac{I_{R1}}{CTR_{min}} = \frac{0{,}0025}{0{,}2} = 12{,}5mA \tag{37}$$

Figura 28 – Circuito de feedback de tensão




Fonte: O autor

No momento em que U1 tem uma tensão maior que 2,5 V em seu pino 1, ele se comporta como descrito no item 2.6.3, gerando uma queda de tensão de 2,5 V entre os pinos 3 e 2. A tensão $V_F$ de U2 é de 1,3V. A queda de tensão sobre $D_2$ é de 10 V. A queda de tensão sobre $R_4$ ($V_{R4}$) é dada pela Equação (38) e o valor da sua resistência mínima é obtida na Equação (39).

$$V_{R4} = V43 - 2{,}5 - 1{,}3 - 10 = 29{,}2V \tag{38}$$

$$R_4 = \frac{V_{R4}}{I_{R4}} = \frac{29{,}2}{0{,}0125} = 2336 \sim 2200\Omega \tag{39}$$

$\Delta V_{o(\max)}$ deve ser de 0,3 V. O capacitor deverá manter uma corrente de 30 A por um período de 60µs. A partir das Equações (11) e (12), a Equação (40) calcula a quantidade de carga que será drenada pelos LEDs e a Equação (41) calcula a capacitância que o capacitor deve ter.

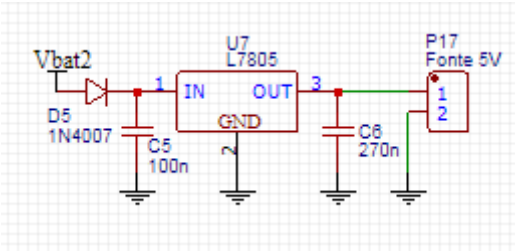
$$Q_{drenada} = T \cdot I = 0{,}00006 \cdot 30 = 1{,}8mC \tag{40}$$

$$C_{1+3+8} = \frac{Q_{drenada}}{\Delta V_{max}} = \frac{0{,}0018}{0{,}3} = 6000\mu F \quad (41)$$

Os capacitores escolhidos são de 2200µF 63 V para $C_1$, $C_3$ e $C_8$.

Para alimentar o microcontrolador, é necessário a tensão de 5 V. A Figura 29 mostra o circuito da fonte de alimentação projetada. Ela é composta pelo CI LM7805, o diodo $D_5$ para prevenir uma tensão reversa no circuito e os capacitores $C_5$ e $C_6$ conforme o datasheet de $U_7$.

Figura 29 – Circuito da fonte de alimentação do microcontrolador




Fonte: O autor

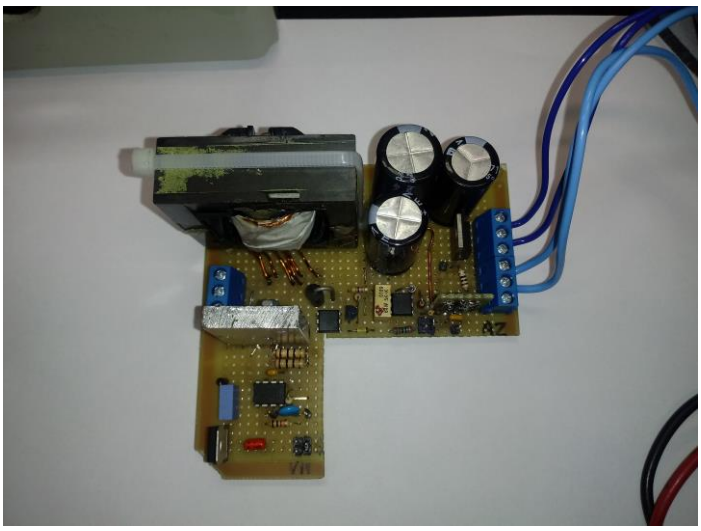
### 3.9 Montagem e teste do circuito da fonte

Após terem sido dimensionados todos os componentes da fonte, foi realizada a montagem em placa de circuito conforme a Figura 30.

Para realizar o teste do circuito, foi conectado um resistor de 100Ω a saída da fonte e $R_2$ foi ajustado para regular a saída da fonte com a maior tensão possível. Sob esta condição, foi medida uma tensão de 46,8 V. A Equação (42) demonstra a potência de saída da fonte medida.

$$P_{teste1} = \frac{{V_{out}}^2}{R_{test}} = \frac{46{,}8^2}{100} = 21{,}9\ W \quad (42)$$

Figura 30 – Placa de circuito da fonte montada



Fonte: O autor

A Figura 31 mostra a tensão sobre $R_5$, indicando a corrente que circula entre drain e source de $Q_1$.

Figura 31 – Tensão sobre $R_5$

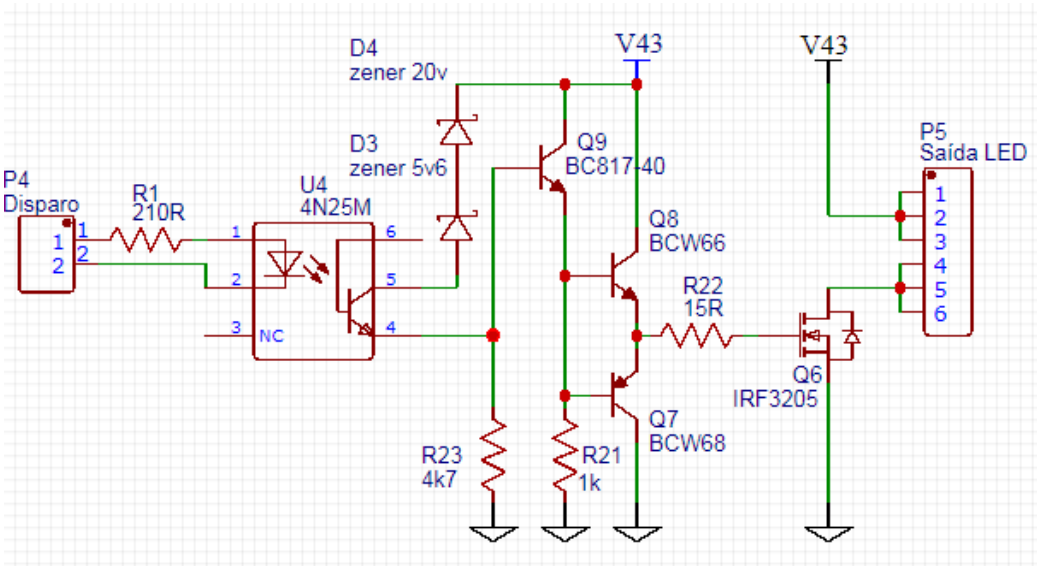
Fonte: O autor

O período de chaveamento do transistor é cerca de 10 µs ou uma frequência de 100 kHz. O transistor fica fechado cerca de 4 µs. Neste tempo, a corrente excursiona de cerca de 0,5 A a 4,2 A. É possível observar que a fonte está funcionando no modo contínuo devido a corrente iniciar em um valor diferente de zero. Ao fechar o transistor, ocorre um pico de corrente de cerca de 10 A.

### 3.10 Dimensionamento do circuito de acionamento dos LEDs

O circuito de acionamento dos LEDs deverá aplicar a tensão da fonte nos LEDs durante o intervalo definido pelo controlador. Ele é composto de um MOSFET de potência, um circuito driver para o *gate* do MOSFET e um optoacoplador para isolar a tensão entre este circuito e o controlador conforme a Figura 32.

Figura 32 – Circuito de acionamento dos LEDs




Fonte: O autor

A corrente que o MOSFET deve conduzir é a corrente individual de cada LED multiplicada pela quantidade de LEDs, conforme a Equação (43).

$$I_{Q6max} = 10 \cdot 3 = 30\ A \tag{43}$$

Como os LEDs são acionados por no máximo 1% do tempo, a Equação (44) define a corrente média ($I_{Q6med}$) que circula pelo transistor.

$$I_{Q6med} = I_{Q6max} \cdot 0{,}01 = 0{,}3\ A \tag{44}$$

O transistor escolhido é o mesmo que $Q_1$.

O *gate* de $Q_6$ é acionado pelo transistor $Q_8$, o qual é acionado por $Q_9$, o qual é acionado por $U_4$ que por sua vez é acionado pelo controlador.

O *gate* de $Q_6$ suporta uma tensão máxima de 20 V. Para garantir que a tensão não exceda este limite, $D_3$ e $D_4$ limitam a tensão no terminal 5 de $V_4$ ($V_{U4.5}$) de acordo com a Equação (45).

$$V_{U4.5} = V43 - V_{D3} - V_{D4} = 43 - 5{,}6 - 20 = 17{,}4\ V \tag{45}$$

A tensão máxima aplicada no emissor de $Q_8$ ($V_{Q8E}$) é definida por $V_{U4.5}$ subtraído pelas quedas de tensão entre coletor e emissor de $U_4$ ($V_{U4CE}$) e entre base e emissor de $Q_9$ e $Q_8$, conforme a Equação (46).

$$V_{Q8E} = V_{U4.5} - V_{U4CE} - V_{Q9BE} - V_{Q8BE} = 17{,}4 - 0{,}5 - 1{,}2 - 2 = 13{,}7\ V \tag{46}$$

A corrente máxima que irá carregar e descarregar o *gate* de $Q_6$ ($I_{Gmax}$) é de 1 A. A Equação (47) calcula o valor de $R_{22}$ em função desta corrente.

$$R_{22} = \frac{V_{Q8E}}{I_{Gmax}} = \frac{13{,}7}{1} = 13{,}7\ \Omega \sim 15\ \Omega \tag{47}$$

Foi considerado como 100 o hfe min de $Q_8$ ($hfe_{minQ8}$). A corrente que circulará pela base de $Q_8$ ($I_{Q8BE}$) é definida pela Equação (48).

$$I_{Q8BE} = \frac{I_{Q8C}}{hfe_{minQ8}} = \frac{1}{100} = 10\ mA \tag{48}$$

A tensão no emissor de $Q_9$ é calculada pela Equação (49). A corrente de $R_{21}$ é definida pela Equação (50).

$$V_{Q9E} = V_{Q8E} + V_{Q8BE} = 13{,}7 + 2 = 15{,}7\ V \tag{49}$$

$$I_{R21} = \frac{V_{Q9E}}{R_{21}} = \frac{15{,}7}{1000} = 15{,}7\ mA \tag{50}$$

A corrente de coletor mínima de $Q_9$ ($I_{Q9C}$) é calculada pela Equação (51).

$$I_{Q9C} = I_{Q8BE} + I_{R21} = 0{,}01 + 0{,}0157 = 25{,}7\ mA \quad (51)$$

A partir desta corrente, a Equação (52) calcula a corrente de base de $Q_9$.

$$I_{Q9BE} = \frac{I_{Q9C}}{hfe_{minQ9}} = \frac{25{,}7}{100} = 0{,}257\ mA \quad (52)$$

A tensão no emissor de $U_4$ é definida pela Equação (53).

$$V_{Q9E} + V_{Q9BE} = 15{,}7 + 1{,}2 = 16{,}9\ V \quad (53)$$

A corrente de R23 é definida pela Equação (54) e a corrente de coletor de U4 é definida pela Equação (55).

$$I_{R23} = \frac{V_{U4E}}{R23} = \frac{16{,}9}{10000} = 1{,}69\ mA \quad (54)$$

$$I_{U4C} = I_{Q9BE} + I_{R23} = 0{,}000257 + 0{,}00169 = 1{,}947mA \quad (55)$$

Considerando o $CTR_{min}$ de U4 = 20 %, conforme o datasheet, a corrente que deverá circular pelo LED de U4 é definida pela Equação (56).

$$I_{U4LED} = \frac{I_{U4C}}{CTR_{U4min}} = \frac{0{,}001947}{0{,}2} = 9{,}735\ mA \quad (56)$$

A tensão máxima sobre o LED de $U_4$ $V_{fLED}$ é de 1,5 V. A tensão aplicada pelo microcontrolador é de 3,3V. A Equação (57) calcula o valor de $R_1$.

$$R1 = \frac{V_{mic} - V_{fLED}}{I_{U4LED}} = \frac{3{,}3 - 1{,}5}{0{,}009735} = 184{,}9\ \Omega \sim 180\ \Omega \quad (57)$$

Quando o LED de $U_4$ é desacionado, $Q_8$, $Q_9$ e o transistor de $U_4$ entram em corte e a tensão do *gate* de $Q_6$ faz circular uma corrente $I_{Q7B}$ pela base de $Q_7$ que é definida pela Equação (58).

$$I_{Q7B} = \frac{V_{Q6G} - V_{Q7BE}}{R21 + R22} = \frac{13{,}7 - 2}{1000 + 15} = 11{,}527\ mA \quad (58)$$

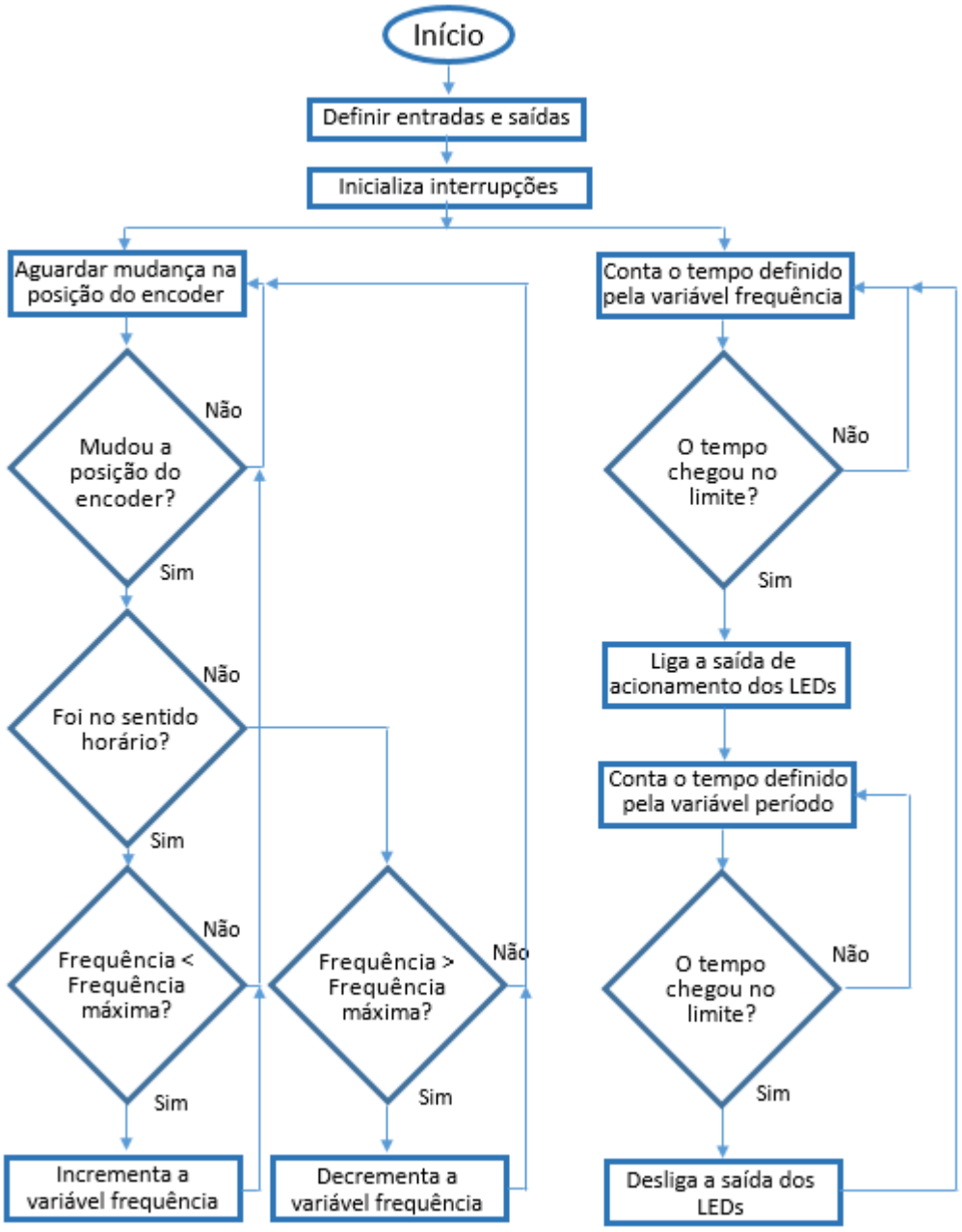
O $hfe_{minQ7}$ é 100. A Equação (59) calcula a corrente mínima que $Q_7$ é capaz de conduzir entre coletor e emissor.

$$I_{Q7CE} = I_{Q7B} \cdot hfe_{minQ7} = 0{,}011527 \cdot 100 = 1{,}1527\ A \quad (59)$$

### 3.11 Programa do microcontrolador

O programa do microcontrolador tem a função de acionar o circuito de acionamento dos LEDs de acordo com a frequência e período desejado. Ele recebe o sinal do encoder para modificar o valor de frequência de saída. Ele foi desenvolvido no programa Arduino IDE em linguagem de programação C. A Figura 33 demonstra o seu fluxograma.

Figura 33 – Fluxograma do programa do microcontrolador




Fonte: O autor.

### 3.12 Montagem e teste do circuito de acionamento dos LEDs

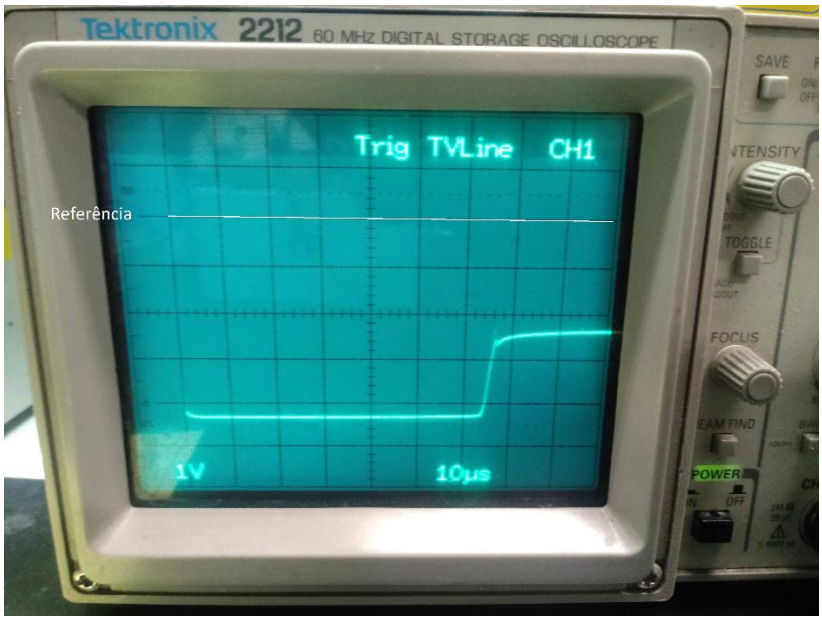
Após terem sido dimensionados os componentes do circuito de acionamento dos LEDs e ter sido programado o microcontrolador, eles foram montados e acoplados na placa de circuito da fonte conforme a Figura 30.

Para testar os circuitos montados, foi conectado a saída do circuito um resistor de 1,4 Ω e foi ajustada a tensão de saída para 43 V e a frequência de operação para 166 Hz. Nestas condições, foi obtida a forma de onda da Figura 34.

Como a ponteira do osciloscópio está configurada para atenuar o sinal medido em 10x, cada graduação da escala vertical corresponde a tensão de 10 V. O terminal de referência da ponteira ligada ao osciloscópio foi conectado ao pino 1 de $P_5$ e a ponta de medição foi conectada ao pino 4 de $P_5$, medindo uma tensão negativa na escala do equipamento. Devido ao drain de $Q_6$ ficar aberto quando desacionado, a tensão medida não vai a zero. Foi adicionada uma linha de referência para indicar o nível 0 V na Figura 34. Pode-se perceber que a saída fica alimentada durante um período de aproximadamente 65µs com uma tensão de cerca de 43 V. A Equação (60) calcula a potência dissipada no resistor de teste.

$$P_{teste2} = \frac{{V_o}^2}{R_{teste2}} D_{166Hz} = \frac{43^2}{1{,}4} \cdot 166 \cdot 0{,}000065 = 14{,}25\ W \tag{60}$$

Figura 34 – Tensão sobre o resistor de teste de 1,4 Ω a 166 Hz com a ponteira do osciloscópio em 10x

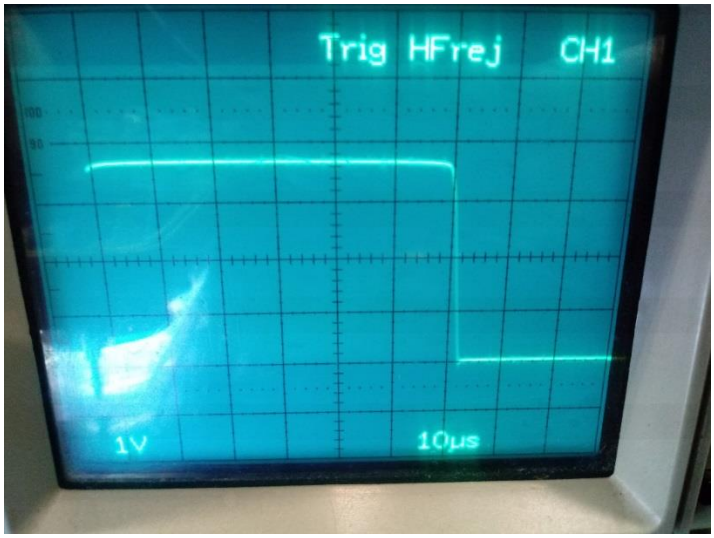



Fonte: O autor

De acordo com a Equação (21), a potência de saída necessária para acionar os LEDs de forma satisfatória é de 13 W. O resultado do teste realizado demonstra que o circuito atende a especificação.

Foi desconectado o resistor de teste e conectado o conjunto de LEDs e resistores na saída do circuito. A Figura 35 mostra a medição da tensão sobre o $R_{34}$, indicando a corrente que circula pelo LED.

Figura 35 – Tensão sobre $R_{34}$ a 166Hz com uma largura de pulso de 65µs




Fonte: O autor

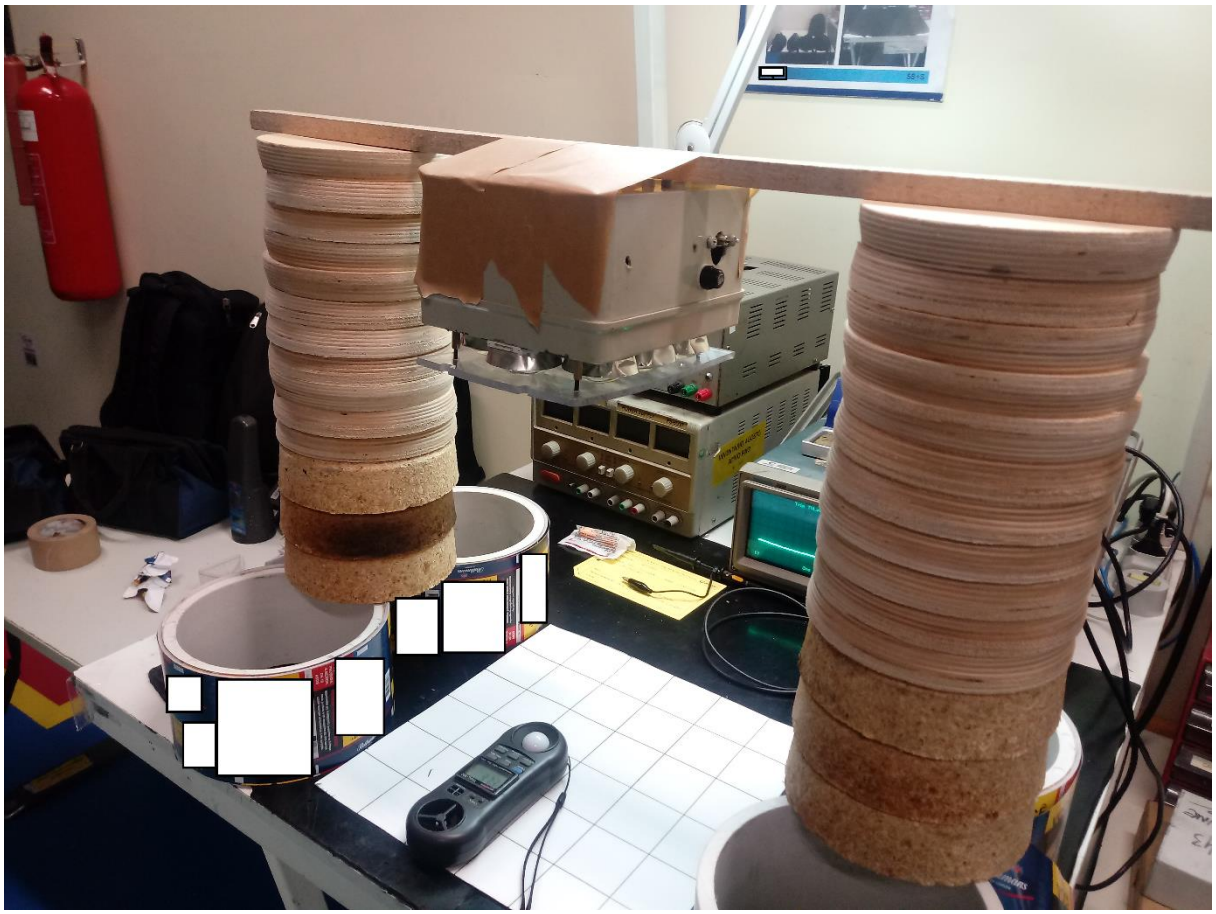
Como o valor de $R_{34}$ é 1,2 Ω, a tensão medida de 3,6 V demonstra a circulação de uma corrente de 3 A.

# 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 4.1 Medição da iluminância obtida em uma superfície

De acordo com o modelo de estroboscópio que foi utilizado como referência, o teste de iluminância é realizado com o aparelho oscilando a iluminação a uma frequência de 166 Hz com a duração de pulso de 65 µs. O equipamento foi montado em uma estrutura conforme a Figura 36.

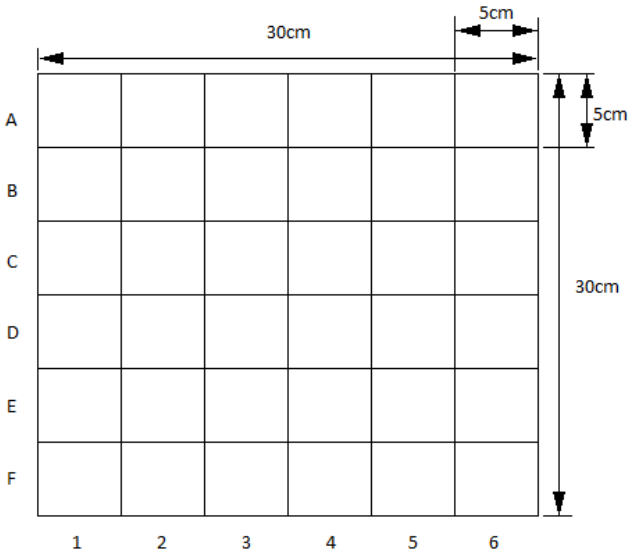
Figura 36 – Montagem do estroboscópio para realizar os testes



Fonte: O autor

Para medir a iluminância foi utilizado o aparelho THAL-300 da marca INSTRUTHERM na função de Luxímetro. O instrumento foi posicionado sobre a superfície abaixo do estroboscópio. Foram medidos 36 pontos diferentes da superfície para uma distância de 300 mm, conforme a Figura 37, e 100 pontos para uma distância de 500mm, conforme a Figura 38.

Figura 37 – Pontos de medida da iluminância d=300mm




Fonte: O autor

Os resultados obtidos para uma distância de 300 mm estão demonstrados na Tabela 4.

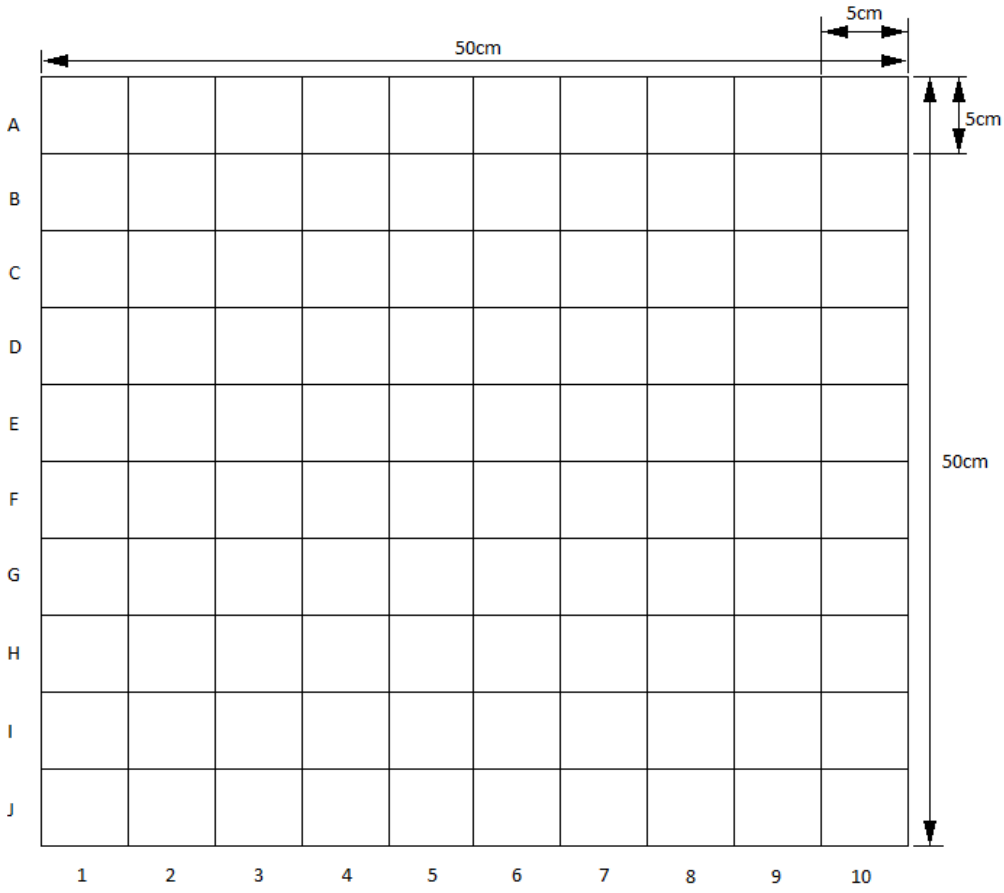
Os resultados obtidos para uma distância de 500 mm estão demonstrados na Tabela 5.

De acordo com o datasheet do estroboscópio utilizado como referência, para uma distância de 300mm, o valor de iluminância obtido é de 1880lx, enquanto que para uma distância de 500mm, o valor de iluminância obtido é de 676lx.

Comparando os valores obtidos nos pontos de medição da Tabela 4 com o valor de iluminância de referência, pode-se observar que as medições das linhas A e F e colunas 1 e 6 estão abaixo. Estes dados limitam a área que atende a especificação do estroboscópio de referência em um quadrado de 20 cm X 20 cm, totalizando uma área iluminada de 0,04 m².

Observa-se que as medições realizadas nos pontos C3, C4, D3 e D4 tem os maiores valores de iluminância, diminuindo conforme os pontos se afastam do centro. Esta característica demonstra uma não homogeneidade na iluminação da superfície. Esse efeito se deve a maior concentração de LEDs iluminando o centro da superfície do que nas extremidades devido ao ângulo de abertura das lentes ser de 60º.

Figura 38 – Pontos de medida da iluminância d=500mm




Fonte: O autor

Tabela 4 – Valores de iluminância para d=300mm

| d=300 mm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1403 | 1650 | 1800 | 1850 | 1705 | 1510 |
| B | 1612 | 2000 | 2120 | 2151 | 2000 | 1742 |
| C | 1740 | 2101 | 2306 | 2320 | 2180 | 1850 |
| D | 1740 | 2030 | 2250 | 2257 | 2102 | 1848 |
| E | 1503 | 1882 | 2002 | 2040 | 1891 | 1658 |
| F | 1291 | 1454 | 1706 | 1620 | 1604 | 1387 |

Fonte: O autor

Tabela 5 – Valores de iluminância para d=500mm

| d=500mm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 440 | 475 | 589 | 600 | 635 | 624 | 604 | 579 | 509 | 448 |
| B | 488 | 662 | 695 | 768 | 771 | 764 | 785 | 712 | 680 | 514 |
| C | 592 | 683 | 815 | 850 | 900 | 890 | 883 | 839 | 700 | 590 |
| D | 605 | 720 | 860 | 920 | 951 | 970 | 930 | 878 | 765 | 608 |
| E | 634 | 746 | 870 | 940 | 980 | 990 | 960 | 910 | 781 | 643 |
| F | 639 | 763 | 883 | 945 | 976 | 981 | 960 | 920 | 788 | 647 |
| G | 610 | 745 | 820 | 877 | 930 | 940 | 910 | 790 | 758 | 600 |
| H | 581 | 668 | 760 | 830 | 870 | 847 | 840 | 792 | 680 | 585 |
| I | 485 | 632 | 678 | 753 | 758 | 750 | 760 | 683 | 656 | 512 |
| J | 425 | 492 | 577 | 600 | 622 | 620 | 600 | 580 | 501 | 436 |

Fonte: O autor

Comparando os valores obtidos nos pontos de medição da Tabela 5 com o valor de iluminância de referência, pode-se observar que as medições das linhas A e J e colunas 1 e 10 estão abaixo. Os pontos I2, I9 e B2 também apresentaram um valor abaixo da especificação. Se desconsiderados estes três pontos, o equipamento atende a especificação do estroboscópio de referência para um quadrado de 40cmx40cm, totalizando uma área iluminada de 0,16 m².

A não homogeneidade observada no teste anterior também foi constatada neste teste, onde os valores de iluminância vão decrescendo conforme os pontos de medição se afastam do centro da superfície.

## 4.2 Comparação de custos

No Apêndice D consta a lista de materiais e o custo total dos materiais utilizados para a elaboração do protótipo.

Para realizar a estimativa de custo da produção do protótipo, considerou-se o valor dos custos de produção e impostos como sendo duas vezes o valor dos componentes e o lucro de 20% da soma total.

A Tabela 6 demonstra os valores de estroboscópios portáteis de modelos comerciais e suas especificações quanto a iluminação e o tipo de transdutor luminoso utilizado.

Tabela 6 – Comparativo entre alguns modelos de estroboscópios comerciais e o custo dos componentes do protótipo

| Modelo | Iluminância | Área iluminada | Preço | Transdutor |
|---|---|---|---|---|
| Unilux LED 3 | 2660 lx | 0,0264 m² | R$7600,00 | LED |
| SKF TKRS 10 | 800lx | 0,008 m² | R$6300,00 | Lâmpada xênon |
| Protótipo | 1880lx | 0,04 m² | R$2491,20 (Valor estimado) | LED |

Fonte: O autor

Analisando a Tabela 6 pode-se constatar a grande diferença entre o custo de estroboscópios portáteis comerciais e o valor estimado para o protótipo. Considerando que grande parte do valor adicional dos modelos importados se deve a taxas de importação, a diferença de valor com relação ao equipamento projetado pode indicar uma oportunidade de negócio.

# 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho se propôs a projetar e construir um protótipo de um estroboscópio portátil que apresentasse características de iluminância e qualidade de iluminação semelhantes as características de um estroboscópio fixo de qualidade e com um custo menor que os equipamentos disponíveis no mercado.

Verificou-se que a utilização de baterias de Íon-Lítio como fonte de energia, um conversor *Buck Boost* para gerar a tensão de alimentação e um circuito de acionamento por tensão constante foram eficazes em acionar os LEDs com a potência elétrica necessária e a precisão requerida.

No item 4.1 comprovou-se o atendimento a especificação de iluminância requerida para as distâncias de 30 cm, para uma área iluminada de 0,04 m², e 50 cm para uma área iluminada de 0,16 m² com três pontos de medição abaixo do valor especificado. No item 4.2 constatou-se que o valor estimado do equipamento projetado é mais de duas vezes menor que um equipamento comercial com especificações semelhantes.

O estroboscópio projetado é capaz de atender as especificações de iluminância que se propôs dentro de uma área limitada e possui um valor estimado muito inferior aos modelos comerciais com características semelhantes.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros:

- Modificar o projeto para operar com uma alimentação 220 VAC;
- Levar em consideração o efeito skin para projetar o indutor da fonte;
- Projetar um circuito para o controle da bateria;
- Utilizar baterias de parafusadeiras no lugar das baterias 18650;
- Utilizar algum tipo de display para verificar a frequência de operação e comandos;
- Projetar uma entrada para sincronismo externo para conectar o equipamento a sinais de encoders de máquinas;
- Utilizar LEDs que atendam a especificação descrita;
- Utilizar lentes com ângulos menores para concentrar mais a iluminação no centro e aumentar a área em que o equipamento atende as especificações;
- Utilizar diodos zener mais rápidos;

- Utilizar o recurso de comunicação Wifi que o microcontrolador possui para controla-lo;

- Utilizar um circuito Snnuber em Q1.

# REFERÊNCIAS


Akbulut, S., Altintas, H. & Oguz, H.. **Videolaryngostroboscopy versus microlaryngoscopy for the diagnosis of benign vocal cord lesions: a prospective clinical study.** European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, Jan. 2015, Volume 272, Issue 1, pp 131–136.

AVT. **Jupter.** Disponível em: https://www.avt-inc.com/Jupiter/. Acesso em: 31 Maio 2019.

Bobst Group. **Registron® S 6100 - GP Register control system.** Disponível em: https://www.bobst.com/ghen/products/equipments/overview/machine/registronr-s-6100-1/#.XOccZ0yJLIU. Acesso em: 31 Maio 2019.

Bobst Group. **Rotomec 4003 - Rotogravure printing press**. Disponível em: https://www.bobst.com/bren/products/gravure/gravure-presses/specifications/machine/rotomec-4003/#.XOcTA0yJLIU. Acesso em: 31 Maio 2019.

Chambril. **Rotogravura.** Disponível em: https://www.portalchambril.com.br/artigos-tecnicos/rotogravura/. Acesso em: 31 Maio 2019.

Costa, G. J.. **Iluminação Econômica.** 4. Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2006

Deacro Industries. **C610C-NW SLITTER REWINDER**. Disponível em: https://www.deacro.com/project/c610c-nw-slitter-rewinder/. Acesso em: 31 Maio 2019.

Encyclopédia Britannica. **Offset printing**. 2016. Disponível em: https://www.britannica.com/technology/offset-printing. Acesso em: 1 Maio 2019.

Espressif. **ESP8266 dev board with WiFi, Arduino, NodeMCU,Lua,USB, webserver, 32 Mbit flash**. 2015. Disponível em: https://bbs.espressif.com/viewtopic.php?t=899. Acesso em: 31 Maio 2019.

Lighting Associates, Inc.. **Application Notes – Discharge Circuits**. Disponível em: http://www.lightingassociates.org/i/u/2127806/f/tech_sheets/Application_Notes__Discharge_Circuits.pdf. Acesso em: 31 Maio 2019.

Lopes, K. dos S.. **Sistema de fontes reguladas/isoladas/sincronizadas para aplicação em UPS.** Disponível em: http://www.uel.br/pos/meel/disserta/2012_Kleber%20dos%20Santos%20Lopes_2009-1.pdf. Acesso em: 30 maio 2019.

Mehl, E. L. M.. **Fontes Chaveadas.** Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/fonteschaveadas.pdf. Acesso em: 31 Maio 2019.

Mello, L. F. P.. **Projetos de fontes chaveadas: teoria e prática.** 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012.

ON Semiconductor. **UC3844B.rev11**. 2013. Disponível em: https://www.onsemi.com/pub/Collateral/UC3844B-D.PDF. Acesso em: 31 Maio 2019.

OSRAM Opto Semiconductors. **LED Fundamentals: Internal Thermal Resistance of LEDs**. Disponivel em: https://www.osram.com/os/products/led-general-lighting/tools-and-service/led-fundamentals/internal_thermal_resistance_of_leds.jsp. 2011. Acesso em: 30 Maio 2019.

OSRAM Opto Semiconductors. **LEDs for Flash Applications**. 2010. Disponível em: https://visualescrita.files.wordpress.com/2010/11/funcionamiento-flash-led.pdf. Acesso em: 31 Maio 2019.

PerkinElmer Optoelectronics**. High Performance Flash and Arc Lamps Catalog**. Disponível em: https://laser-caltech.web.cern.ch/laser-caltech/report/Flash%20lamp%20Eg&G.pdf. Acesso em: 31 Maio 2019.

Perz, M., et al. **Modeling the Visibility of the Stroboscopic Effect Occurring in Temporally Modulated Light Systems.** Lighting Research & Technology, vol. 47, no. 3, Maio 2015, pp. 281–300, doi:10.1177/1477153514534945.

Petry, C. A.; Moia, J.. **Conversores CC-CC (Buck-Boost e Flyback).** Disponível em: http://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Conversores_Estaticos/Pos_2014/Apresentacao_Aula_06.pdf. Acesso em: 30 Maio 2019.

Pomilio, J. A.. **IT505 Fontes Chaveadas.** 2018. Disponível em: http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it505-fontes-chaveadas. Acesso em: 30 Maio 2019.

Pomilio, J. A.. **Pré-Reguladores de Fator de Potência - Cap. 3.** 2007. Disponível em: http://dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/pfp/Cap3.pdf. Acesso em: 30 Maio 2019.

Printi. **Impressão Digital vs Impressão Offset**. 2014. disponível em: https://www.printi.com.br/blog/impressao-digital-vs-impressao-offset. Acesso em: 31 maio 2019.

Puškára, M., et al. **Method for accurate measurement of output ignition curves for combustion engines.** Elsevier Ltd. Measurement, Maio 2013, Volume 46, Issue 4, pp 1379–1384.

Texas Instruments. **Magnetics Design 5 - Inductor and Flyback Transformer Design**. 2001. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ml/slup127/slup127.pdf. Acesso em: 30 Maio 2019.

Texas Instruments. **TL431 / TL432 Precision Programmable Reference.** 2018. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf. Acesso em: 30 Maio 2019.

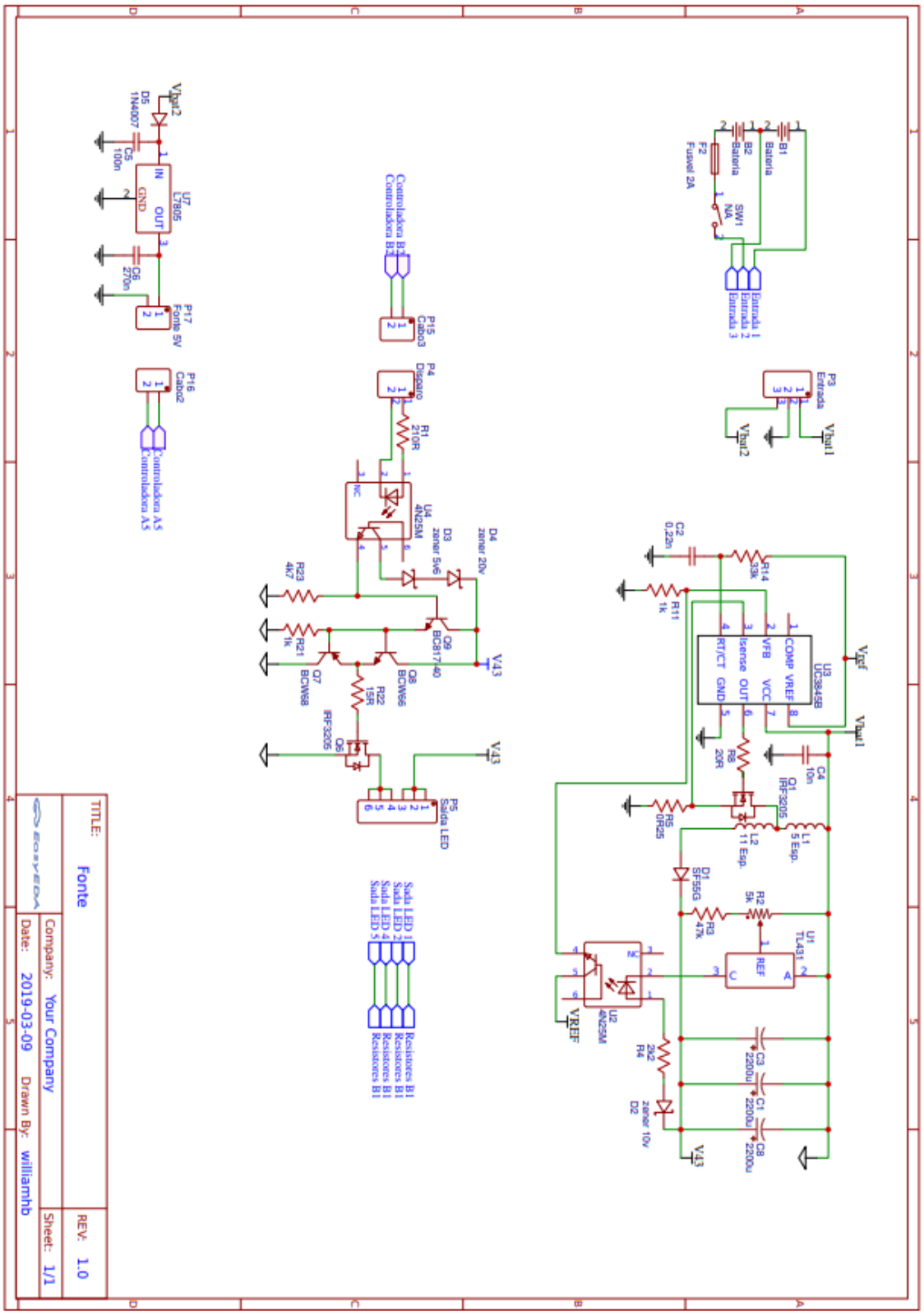
Thornton Eletrônica Ltda. **Fórmulas.** Disponível em: http://www.thornton.com.br/formulas.htm. Acesso em: 30 Maio 2019.

UNILUX. **IMPRESSÃO.** Disponível em: https://unilux.com/pt/ind%C3%BAstrias/ind%C3%BAstria-de-impress%C3%A3o. Acesso em: 31 Maio 2019.

Weinert J., Spaulding C.. **LED Lighting Explained: Understanding LED Sources, Fixtures, Applications and Opportunities**. Philips 2010.

# APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DA FONTE

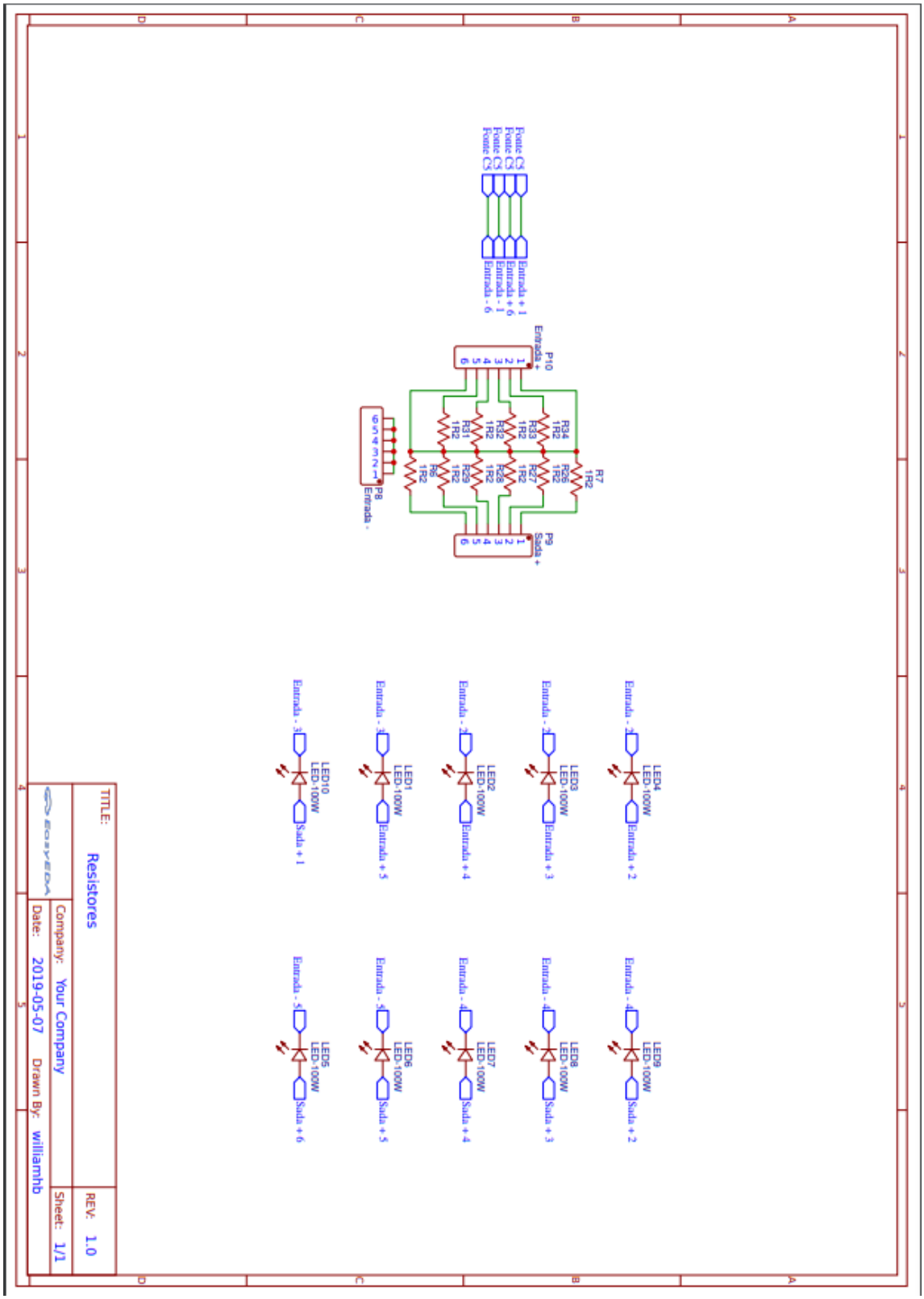
Figura A1 – Esquema elétrica da fonte




Fonte: O autor

# APENDICE B – ESQUEMA ELÉTRICO DOS LEDS

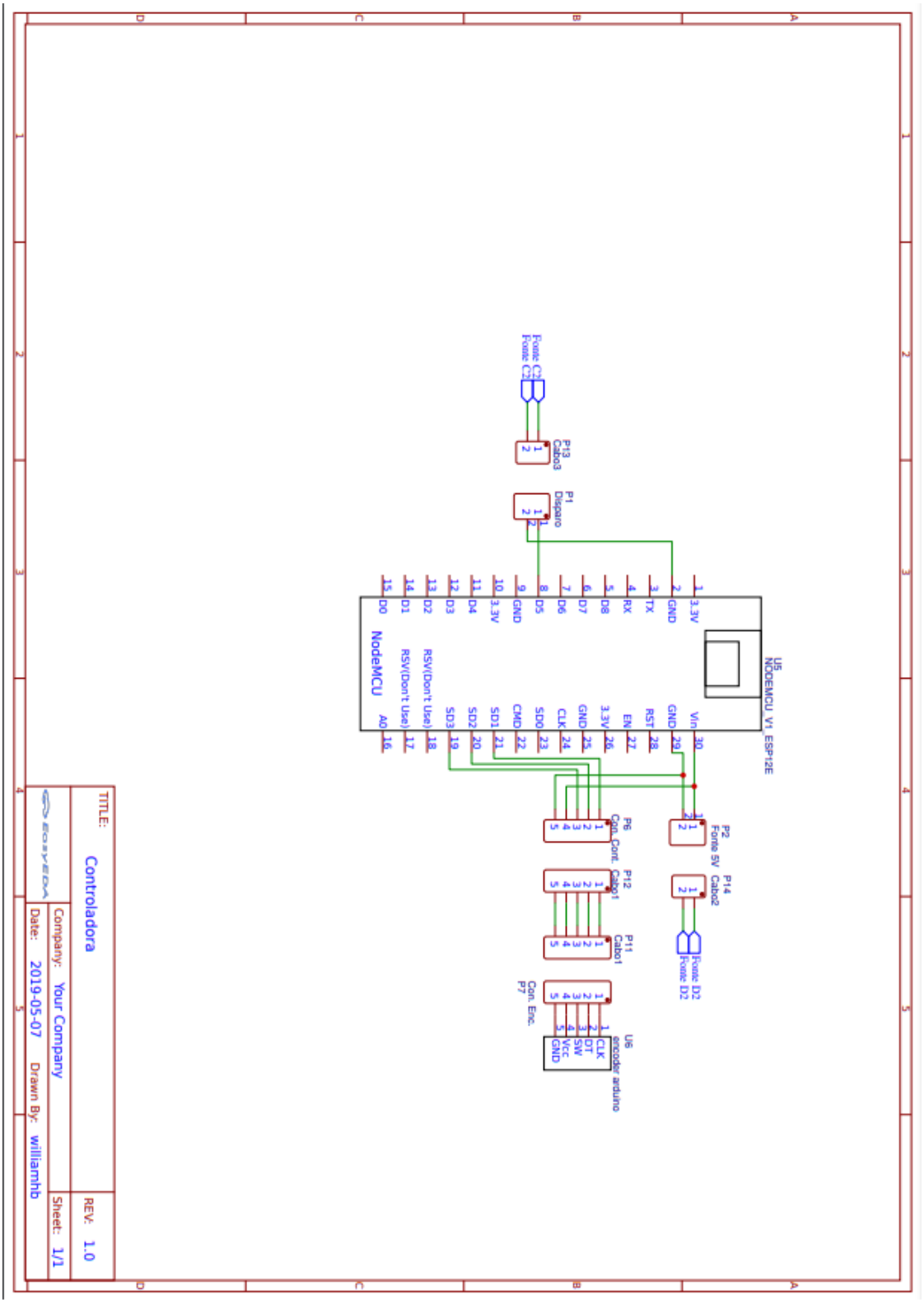
Figura B1 – Esquema elétrico dos LEDs




Fonte: O autor

# APENDICE C – ESQUEMA ELÉTRICO DO CONTROLADOR

Figura C1 – Esquema elétrico do controlador




Fonte: O autor

# APENDICE D – LISTA DE COMPONENTES

Figura D1 – Lista de componentes

| Componente | Especificação | Quantidade | Custo (R$) |
|---|---|---|---|
| B1 e B2 | Btaeria de Íon Lítio modelo 18650 2,6 Ah SANYO | 6 | R$ 90,00 |
| C1, C3 e C8 | Capacitor 2200uF 63V | 3 | R$ 15,00 |
| C2 | Capacitor 0,22nF 63V | 1 | R$ 0,50 |
| C4 | Capacitor 10n 63V | 1 | R$ 0,50 |
| C5 | Capacitor 100n 63V | 1 | R$ 0,50 |
| C6 | Capacitor 270n 50V | 1 | R$ 0,50 |
| D1 | SF55G | 1 | R$ 2,00 |
| D2 | 1N4740A | 1 | R$ 0,40 |
| D3 | 1N4734A | 1 | R$ 0,40 |
| D4 | 1N4747A | 1 | R$ 0,40 |
| D5 | 1N4007 | 1 | R$ 0,15 |
| F2 | Fusível de vidro 20mm 2A | 1 | R$ 0,50 |
| L1+L2 | Núcleo NE 42/21/20 + carretel + cobre | 1 | R$ 30,00 |
| LED1,LED2,LED3,LED4,LED5,LED6,LED7,LED8,LED9,LED10 | LED 100W COB EPISTAR 6500K | 10 | R$ 260,00 |
| P3, P5, P8, P9 e P10 | Borne KRE 3 vias | 10 | R$ 10,00 |
| Q1 e Q6 | IRF3205 | 2 | R$ 8,00 |
| Q7 | BCW68 | 1 | R$ 0,10 |
| Q8 | BCW66 | 1 | R$ 0,10 |
| Q9 | BC817-40 | 1 | R$ 0,10 |
| R1 | Resistor 1/8 W 210R | 1 | R$ 0,10 |
| R11,R21 | Resistor 1/8 W 1k | 2 | R$ 0,20 |
| R14 | Resistor 1/8 W 33k | 1 | R$ 0,10 |
| R2 | Trimpot 5k | 1 | R$ 2,50 |
| R22 | Resistor 1 W 15R | 1 | R$ 0,50 |
| R23 | Resistor 1/8 W 4k7 | 1 | R$ 0,10 |
| R26,R27,R28,R29,R31,R32,R33,R34,R6,R7 | Resistor 1/2 W 1,2R | 10 | R$ 2,00 |
| R3 | Resistor 1/8 W 47k | 1 | R$ 0,10 |
| R4 | Resistor 1/2 W 2k2 | 1 | R$ 0,10 |
| R5 | Resistor 1 W 0,25R | 1 | R$ 0,50 |
| R8 | Resistor 1 W 20R | 1 | R$ 0,50 |
| SW1 | Chave NA 6A | 1 | R$ 6,00 |
| U1 | TL431 | 1 | R$ 1,50 |
| U3 | CI UC3845B | 1 | R$ 6,00 |
| U4 e U2 | 4n25 | 2 | R$ 5,00 |
| U5 | NodeMCU-ESP12E | 1 | R$ 40,00 |
| U6 | Encoder Arduino | 1 | R$ 15,00 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| U7 | LM7805 | 1 | R$ 1,50 |
| | Lentes e refletores para LED 100W | 10 | R$ 250,00 |
| | Placa de circuito perfurada 10cmx10cm | 2 | R$ 14,00 |
| | Caixa de montagem 15cmx20cmx15cm | 1 | R$ 35,00 |
| | | **Total** | **R$ 692,85** |

Fonte: O autor

# APENDICE E – FOTOS DO PROTÓTIPO FINALIZADO

Figura E1 – Protótipo finalizado

Fonte: O autor

Figura E2 – Protótipo finalizado aberto

Fonte: O autor