

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
ENGENHARIA ELÉTRICA

MAICON WILLIAM MACHADO DE CARVALHO

**LÂMPADA AUTÔNOMA COM LEDs PARA
APLICAÇÃO EM MONITORAMENTO E CONTROLE
DE PRAGAS AGRÍCOLAS**

JOINVILLE, SC
2016

MAICON WILLIAM MACHADO DE CARVALHO

**LÂMPADA AUTÔNOMA COM LEDs PARA APLICAÇÃO EM MONITORAMENTO
E CONTROLE DE PRAGAS AGRÍCOLAS**

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Yales Rômulo de Novais

**JOINVILLE, SC
2016**

Ao meu pai de coração, meu exemplo de caráter,
Marcus Vinicius Ostwald, e a minha mãe de
coração, Cristiane.

By the rivers of Babylon,
There we sat down.
Yeah, yeah, we wept,
when we remembered Zion.
(In memorian)

A minha princesa, Patricia, por todo amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer as pessoas sem as quais eu não teria a oportunidade de estar em uma universidade e fazer um trabalho de conclusão de curso:

A madrinha Alice de Moura, pelos primeiros ensinamentos, os quais definiram a minha conduta (in memoriam).

Ao seu Marcus e a Cristiane por todo apoio, carinho e bons exemplos ao longo de todos esses anos.

Ao tio Eliseu e a tia Janete, pelo carinho, companheirismo e bons conselhos.

Ao seu Carlos e a Joslaine, por todo apoio, carinho e atenção.

A vó Shirley, minha primeira professora, pelo carinho e pelas primeiras letras a mim ensinadas.

A minha mãe, Cimara, por ter me dado a vida e me deixado de herança parte da personalidade que fez com que eu pudesse aproveitar o carinho e a boa vontade de todas as pessoas citadas anteriormente (in memoriam).

Ao professor orientador, Yales, pela oportunidade de ser bolsista de iniciação científica do projeto, pela amizade, atenção, tolerância e pelos ensinamentos. Além disto, também sou grato pela sua cobrança para que este trabalho tivesse qualidade e rigor.

Ao Dr. Eduardo R. Hickel e ao professor Dr. Sergio Vidal G. de Oliveira pela amizade e contribuição como banca examinadora do trabalho.

A minha princesa, Patricia, pelo amor, amizade, companheirismo, tolerância e boa vontade.

A Fabiana L. Friedmann e a Francine Casas por todo apoio, atenção e amizade ao longo destes anos de graduação.

Ao amigo Gustavo Lambert, pelos ensinamentos.

Ao amigo Marcos V. Bressan por tolerar a minha ausência no projeto em benefício deste trabalho.

Aos amigos Bruno Bertoldi, Nilton Pedro, Sergio Fernandez e João Batista pela ajuda com a programação.

Ao amigo Felipe Joel pela ajuda com o Altium.

Ao programa de auxílio permanência (PRAPE) da UDESC, sem o qual, chegar a esta etapa seria muito mais difícil.

A FAPESC pelo auxílio financeiro.

A vida tem sentido apenas na luta.
O triunfo e o fracasso estão nas mãos de Deus...
Então, vamos celebrar a luta...
(Autor desconhecido)

RESUMO

Armadilhas luminosas podem ser empregadas para o controle de pragas agrícolas através da coleta massal ou como dispositivo de contaminação de insetos com agentes entomopatogênicos. Atualmente o uso desta ferramenta se restringe ao estudo da flutuação populacional de insetos praga e seus inimigos naturais devido à dificuldade de instalação e manutenção de um número elevado de armadilhas em campo. Para contornar estas dificuldades, diversos entomologistas estão investigando o poder de atratividade de diferentes cores de LEDs sobre insetos de importância econômica na agricultura. Com isto, este trabalho apresenta o projeto e execução de uma lâmpada de LEDs para aplicação em armadilhas luminosas, que funciona a partir de uma bateria de 12 V e pode operar de forma autônoma com a utilização de energia solar fotovoltaica. O espectro de luz emitido pela lâmpada pode ser definido a partir da preferência visual de espécies específicas de insetos, conforme conclusões de estudos realizados por profissionais da área da entomologia agrícola. Para regular a corrente nos LEDs é utilizado um conversor elevador de tensão do tipo *boost* com alta frequência de chaveamento, possibilitando alta eficiência e compactação da lâmpada. Um regulador do tipo *shunt* possibilita a conexão da bateria com um painel solar fotovoltaico com baixo custo e robustez, permitindo sua recarga de forma automática. Com este modelo de lâmpada é possível utilizar uma única bateria de 12 V e um painel de silício cristalino de 36 células, que são facilmente encontrados no mercado.

Palavras Chave: Armadilha luminosa. LEDs. Controle de pragas. Conversor boost. Regulador shunt.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Módulo da lâmpada de LEDs proposta por Knabben et al. (2015). | 14 |
| Figura 2 - Diagrama funcional do sistema eletrônico de geração de energia elétrica a partir de um painel solar fotovoltaico (Knabben et al., 2015). | 15 |
| Figura 3 - Diagrama estrutural da lâmpada. | 16 |
| Figura 4 - Armadilha luminosa “Luiz de Queiroz”. | 17 |
| Figura 5 - Armadilha antigamente usada no Alabama-USA, para a proteção de plantação de tomate. | 18 |
| Figura 6 - Curva da densidade populacional de uma espécie ao longo do tempo. | 18 |
| Figura 7 - Flutuação populacional de adultos da bicheira-da-raiz, <i>Oryzophagus oryzae</i> em arroz irrigado. Itajaí, 2010 a 2012. | 19 |
| Figura 8 - Região do espectro que sensibiliza a visão dos humanos e dos insetos. | 21 |
| Figura 9 - Preferência visual do pulgão-do-algodoeiro. | 21 |
| Figura 10 - Resposta da mariposa “Salt Marsh” a diferentes comprimentos de onda. | 22 |
| Figura 11 - Número relativo de captura de <i>P.unipuncta</i> em função da potência radiante emitida pelas lâmpadas fluorescentes UV. | 23 |
| Figura 12 - Emissão monocromática dos LEDs. | 24 |
| Figura 13 - Composição da luz branca gerada por LEDs e sua relação com temperatura da cor. | 25 |
| Figura 14 - Comparação do poder de atratividade das lâmpadas fluorescente e de LEDs (6,72 W) com a referência. | 28 |
| Figura 15 - (B50, L70) tempo de vida para os LEDs LUXEON de InGaN. | 29 |
| Figura 16 - Manutenção da potência de saída em função do tempo de funcionamento da lâmpada fluorescente UV Actinic BL 15 W da Philips. | 29 |
| Figura 17 - Conversor boost para regulação de corrente sobre os LEDs | 32 |
| Figura 18- Modelo do LED de potência utilizado para o projeto das lâmpadas. | 33 |
| Figura 19 - Vista superior da lâmpada de três faces. | 33 |
| Figura 20 - Distribuição espacial da luz em um LED. | 34 |
| Figura 21 - Distribuição espacial da luz em torno das lâmpadas de três e quatro faces. | 34 |
| Figura 22 - Intensidade de luz normalizada dos LEDs UV-400 nm, Branco Neutro e Verde-520 nm. | 35 |
| Figura 23 - Espectro de uma lâmpada para aplicação em controle biológico da bicheira-da-raiz. | 36 |
| Figura 24- Funções comprimento de onda do LED 460 nm e de luminosidade fotópica do olho humano. | 37 |
| Figura 25 - Relação entre o fluxo radiante e a corrente direta em um LED. | 39 |
| Figura 26 - Influência da temperatura na potência de saída do LED. | 39 |
| Figura 27 - Modelo Térmico de um LED. | 40 |
| Figura 28 - Modelo térmico utilizado para semicondutores em geral. | 41 |
| Figura 29 - Resistência térmica em função da área de PCI simples e dupla face de FR4. | 42 |
| Figura 30 - Variação na corrente I_d em função da tensão V_d para as temperaturas de 0°, 25° e 50° C. | 43 |
| Figura 31 - Diagrama funcional do circuito integrado TPS61500. | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 - Distribuição das perdas por componente..... | 48 |
| Figura 33 - Curva que representa o modelo ideal do LED..... | 49 |
| Figura 34 - Modelo Elétrico do LED. | 50 |
| Figura 35 - Circuito de simulação do conversor Boost. | 50 |
| Figura 36 - Ondulação da corrente de saída e no indutor..... | 51 |
| Figura 37 - Esforços de tensão sobre a chave e o diodo..... | 51 |
| Figura 38 - Ondulação da tensão de saída e a corrente no capacitor..... | 52 |
| Figura 39- Diagrama de controle da corrente de saída do conversor. | 53 |
| Figura 40 - Sinal de saída do compensador V_c e corrente na chave do conversor boost..... | 53 |
| Figura 41 - Modelo simplificado da planta de controle..... | 54 |
| Figura 42 - Diagrama de bode da função de transferência em malha aberta da planta. | 55 |
| Figura 43 - Compensador do tipo 1 com amplificador de trancondutância | 56 |
| Figura 44 - Diagrama de bode da função de transferência do compensador..... | 56 |
| Figura 45 - Margem de ganho e margem de fase da F.T.M.A da planta e compensador..... | 57 |
| Figura 46 - Modelo equivalente elétrico de uma célula solar fotovoltaica. | 58 |
| Figura 47 - Regulador shunt para sistemas fotovoltaicos..... | 59 |
| Figura 48 - Etapas de carga de uma bateria..... | 59 |
| Figura 49 - Curva de $I \times V$ de um painel de silício monocristalino de 36 células em série. | 60 |
| Figura 50 - Circuito de regulação de tensão projetado..... | 61 |
| Figura 51 - Curvas de descarga de baterias de chumbo ácido seladas. | 64 |
| Figura 52 - Fluxograma do algoritmo embarcado no microcontrolador. | 67 |
| Figura 53- LEDs de aviso..... | 68 |
| Figura 54 - Protótipo em operação a partir de uma bateria de 12 V e 7A.h..... | 69 |
| Figura 55 - Temperatura sobre os LEDs azul 460 nm (esquerda) UV 400 nm (direita). | 70 |
| Figura 56 - Temperatura no interior das faces..... | 70 |
| Figura 57 – Tensão sobre a chave. | 71 |
| Figura 58 - Tempo de subida da tensão na chave..... | 71 |
| Figura 59 – Sobre tensão na chave. | 72 |
| Figura 60 - Tensão média, rms e de pico a pico no diodo..... | 72 |
| Figura 61 - Corrente e tensão sobre 9 LEDs em série..... | 73 |
| Figura 62 - Ondulação na corrente sobre 9 LEDs. | 73 |
| Figura 63 - Corrente e tensão na entrada do conversor. | 74 |
| Figura 64 - Ondulação da corrente de entrada..... | 74 |
| Figura 65 - Eficiência do conversor boost em função da tensão na bateria para cada uma das cargas..... | 75 |
| Figura 66 - Tensão máxima e mínima atingida o controlador liga/desliga atuando e a corrente na bateria..... | 76 |
| Figura 67 - Frequência de chaveamento atingida pelo controlador..... | 76 |
| Figura 68 - Geração de energia em Joinville dia 16/11/2016..... | 77 |
| Figura 69 - Radiação solar média em Joinville no dia 16/11/2016..... | 77 |
| Figura 70 - Tempo de funcionamento da lâmpada - 7:48:55- na noite do dia 16/11/2016. | 78 |
| Figura 71 - Tensão na bateria ao longo do dia 16/11/2016. | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Coeficiente de eficiência energética típicos dos LEDs “Royal Blue” de InGaN. | 26 |
| Tabela 2 - Coeficiente de eficiência energética de LEDs UV de InGaN da Vishay. | 26 |
| Tabela 3 - Coeficiente de eficiência energética da lâmpada fluorescente Actinic BL. | 27 |
| Tabela 4 - Preferência visual da bicheira-da-raiz do arroz irrigado. | 31 |
| Tabela 5 - Preferência visual da traça-das-crucíferas. | 31 |
| Tabela 6 - Dados dos LEDs azul 460 nm e UV 400 nm ($T_j=25^\circ$). | 38 |
| Tabela 7 - Potência dissipada em forma de calor para o ponto de operação escolhido. | 41 |
| Tabela 8 - Resultados do projeto do dissipador. | 42 |
| Tabela 9 - Características das cargas do conversor. | 43 |
| Tabela 10 - Parâmetros do Projeto do Conversor. | 44 |
| Tabela 11 - Componentes de Potência do Conversor. | 47 |
| Tabela 12 - Eficiência do método de carga por transferência direta de energia. | 61 |
| Tabela 13 - Corrente drenada da bateria para cada tipo de lâmpada. | 63 |
| Tabela 14 - Tempo de duração da carga de uma bateria de 7 Ah para cada lâmpada. | 64 |
| Tabela 15 - Capacidade de corrente da bateria para manter as lâmpadas. | 65 |
| Tabela 16 - Capacidade do painel solar nas condições padrões de teste. | 66 |
| Tabela 17- Energia gerada dia 16/11/2016. | 78 |
| Tabela 18 - Energia armazenada na bateria e consumida pela lâmpada de seis LEDs. | 78 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 2 | ARMADILHAS LUMINOSAS NA AGRICULTURA | 17 |
| 2.1 | ESTUDO E MONITORAMENTO DE PRAGAS | 18 |
| 2.2 | INFECÇÃO DE PRAGAS COM ORGANISMOS ENTOMOPATOGÊNICOS..... | 19 |
| 2.3 | COLETA MASSAL | 20 |
| 3 | A LUZ E A ATRATIVIDADE AOS INSETOS..... | 21 |
| 3.1 | COMPRIMENTO DE ONDA | 21 |
| 3.2 | FLUXO RADIANTE..... | 22 |
| 3.3 | LEDS COMO FONTE DE LUZ EM ARMADILHAS LUMINOSAS | 24 |
| 3.3.1 | Diversidade de cores | 24 |
| 3.3.2 | Eficiência energética | 25 |
| 3.3.3 | Tempo de vida útil | 28 |
| 3.4 | RESPOSTA DE DIFERENTES ESPÉCIES A LUZ PROVENIENTE DOS LEDS ... | 30 |
| 4 | PROJETO DA LÂMPADA DE LEDS PARA APLICAÇÃO EM ARMADILHA LUMINOSA | 32 |
| 4.1 | ESTRUTURA FÍSICA | 33 |
| 4.2 | LÂMPADA PARA O ESTUDO E MONITORAMENTO DE PRAGAS DIVERSAS. | 34 |
| 4.3 | ESPECTRO E FLUXO RADIANTE DE UMA LÂMPADA PARA ATRAIR A BICHEIRA-DA-RAIZ..... | 35 |
| 4.3.1 | Fluxo radiante emitido pela lâmpada de seis e oito LEDs | 36 |
| 4.4 | PROJETO TÉRMICO | 40 |
| 5 | REGULAÇÃO DA CORRENTE SOBRE LEDS..... | 43 |
| 5.1 | PROJETO DO CONVERSOR BOOST. | 44 |
| 5.2 | ESCOLHA DOS COMPONENTES | 45 |
| 5.3 | CÁLCULO DE PERDAS | 47 |
| 5.4 | SIMULAÇÃO EM MALHA ABERTA | 49 |
| 5.5 | CONTROLE DA CORRENTE DE SAÍDA DO CONVERSOR..... | 52 |
| 6 | OPERAÇÃO AUTONOMA DA LÂMPADA COM UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. | 58 |
| 6.1 | CIRCUITO PARA REGULAÇÃO DA TENSÃO E PROTEÇÃO DA BATERIA ... | 58 |
| 6.1.1 | Projeto dos componentes do regulador shunt | 61 |
| 6.2 | DIMENSIONAMENTO DA BATERIA E DO PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO | 63 |

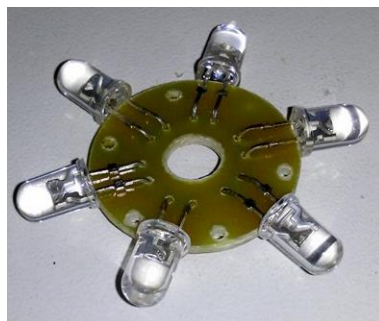
| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.3 | SUPERVISÃO DE TEMPO DE ACIONAMENTO DA LÂMPADA E CARGA E DESCARGA DA BATERIA..... | 66 |
| 7 | RESULTADOS PRÁTICOS..... | 69 |
| 7.1 | TEMPERATURA SOBRE OS LEDS..... | 69 |
| 7.2 | CONVERSOR BOOST..... | 70 |
| 7.3 | EFICIÊNCIA DO CONVERSOR BOOST..... | 74 |
| 7.4 | REGULAÇÃO DA TENSÃO DA BATERIA..... | 75 |
| 7.5 | DIMENSIONAMENTO DA BATERIA E DO PAINEL SOLAR..... | 76 |
| 8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 80 |
| 9 | REFERÊNCIAS..... | 81 |

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética e a diversidade de cores dos Diodos Emissores de Luz (LEDs) vêm despertando o interesse no uso dos mesmos em armadilhas luminosas. Busca se aproveitar destas características dos LEDs para compactar e reduzir o custo das armadilhas, de forma a viabilizar economicamente a aplicação destas no controle de certas pragas agrícolas (HICKEL, MILANEZ e HINZ, 2015; LINK e COSTA, 1989). Diferentes pesquisadores já investigaram a atratividade de espécies de insetos pela luz proveniente dos LEDs (BISHOP et al., 2004; COWAN e GRIES, 2009; CHO e LEE, 2012; HICKEL et al., 2015; JEON et al. 2012; OH et al., 2011). A intenção dos autores é identificar quais cores de luz emitida por LEDs são as mais atrativas às espécies de interesse.

Knabben et al. (2015) desenvolveram um modelo de lâmpada de LEDs para aplicação em armadilhas luminosas cujo espectro emitido foi definido pela preferência visual da bicheira-da-raiz do arroz, *Oryzophagus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) (HICKEL et al., 2015). Composta por 36 módulos, como o da Fig. 1, empilhados de maneira concêntrica, a lâmpada se aproxima em forma física de uma lâmpada fluorescente tradicional. A potência elétrica aplicada sobre os 36 módulos é de 3,46 W e a tensão de funcionamento da lâmpada é 24 V. A tensão de operação da lâmpada foi escolhida para reduzir o número de transistores no espelho de correntes que foi projetado para equalizar a corrente nos LEDs. A corrente elétrica sobre os LEDs é mantida constante com a utilização de espelhos de corrente. Em testes realizados em campo, mostrou-se tão eficaz quanto a lâmpada fluorescente tradicionalmente utilizada nas armadilhas luminosas (KNABBEN et al., 2015).

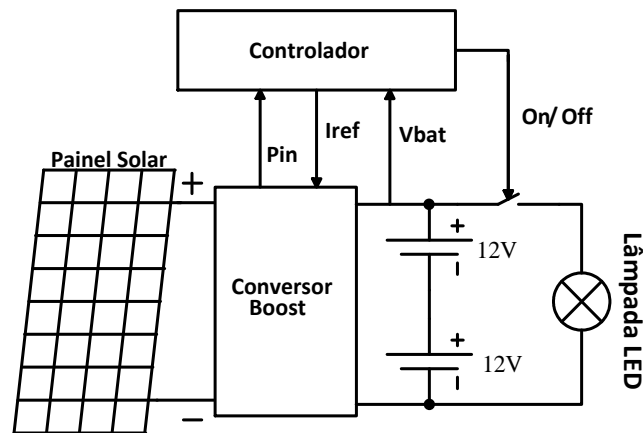
Figura 1 - Módulo da lâmpada de LEDs proposta por Knabben et al. (2015).



Fonte: Produção do próprio autor.

A energia para o funcionamento da lâmpada é proveniente de duas baterias de chumbo ácido de 12 V em série. Para carregá-las de maneira automática foi implementado também por Knabben et al. (2015), um sistema eletrônico para geração de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica. Na Fig. 2 está ilustrado o diagrama estrutural do sistema.

Figura 2 - Diagrama funcional do sistema eletrônico de geração de energia elétrica a partir de um painel solar fotovoltaico (Knabben et al., 2015).



Fonte: Produção do próprio autor.

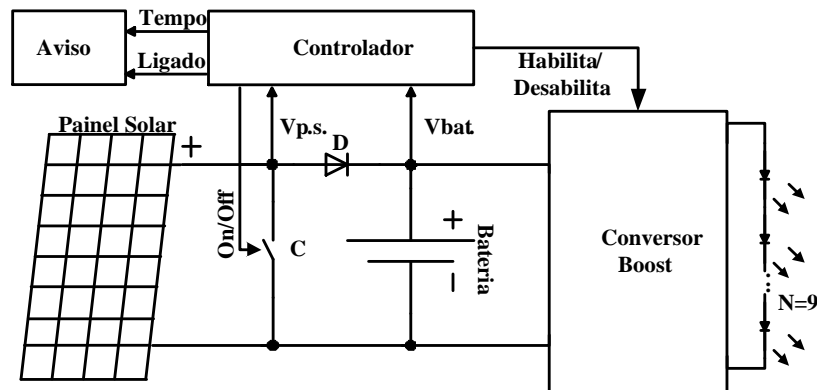
Na Fig. 2, o conversor boost eleva a tensão do painel e possui uma malha de controle da corrente no indutor. A referência para a malha de corrente é dada pelo Controlador que possui embarcado o algoritmo de rastreamento de máxima potência denominado “perturba e observa”. Outras funções como o controle da tensão na bateria, contagem de tempo de acionamento da lâmpada e identificação de dia e noite também estão embarcadas no controlador.

Em testes realizados em campo, no momento da instalação da armadilha, o uso de duas baterias não se mostrou plenamente adequado, pois dificultou a instalação das mesmas, devido ao peso e volume das baterias. Em operação diária de carga e descarga, as tensões sobre as baterias apresentaram desequilíbrio, o que compromete o seu tempo de vida útil e o funcionamento do sistema eletrônico.

Com este trabalho buscou-se projetar uma lâmpada de LEDs que opere com tensão de 12 V. Assim, é possível utilizar apenas uma bateria de chumbo ácido, o que acarreta em menor peso e tamanho do sistema de geração e armazenamento de energia elétrica e dispensa a necessidade de um circuito ou algoritmo para equalizar a tensão sobre as duas baterias.

Na configuração proposta neste trabalho, a carga da bateria, com a energia proveniente de um painel solar fotovoltaico, pode ser feita com um circuito de baixo custo, aproveitando-se da característica natural do painel solar, que se comporta como uma fonte de corrente limitada. Na Fig. 3 está o diagrama estrutural da lâmpada e do controlador de carga da bateria.

Figura 3 - Diagrama estrutural da lâmpada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o controle da corrente sobre os LEDs de maneira mais eficiente, é proposto neste trabalho o projeto de um conversor *boost*. Com esta topologia isenta-se da necessidade de ligá-los em paralelo, o que demanda circuitos específicos para garantir a equalização das correntes que circulam por cada braço de LEDs.

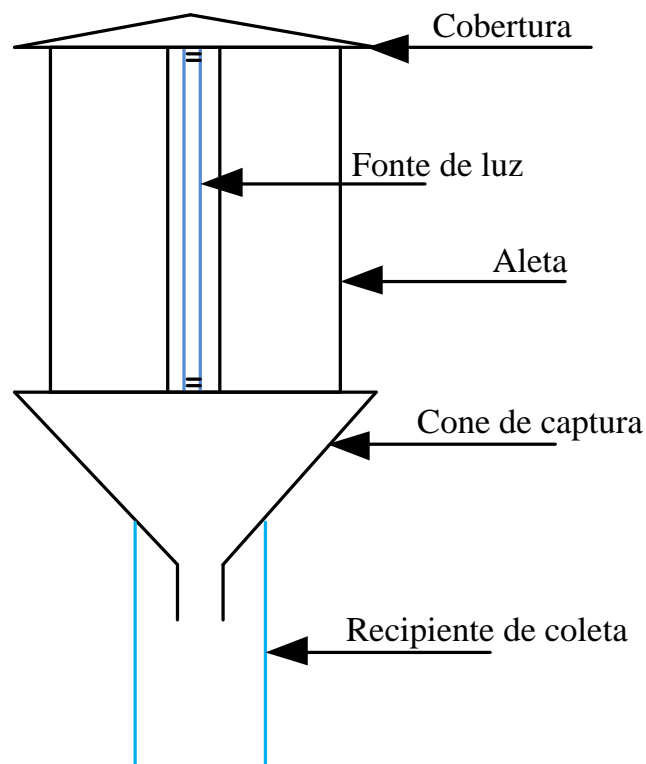
Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Apresentar as aplicações da armadilha luminosa no contexto do manejo integrado de pragas (MIP).
- Discutir como a cor e o fluxo radiante de uma fonte de luz influenciam na captura de insetos por armadilhas luminosas.
- Projetar a lâmpada de LEDs com base na sua aplicação e na praga de interesse, com o objetivo de reduzir o custo de produção.
- Calcular o fluxo radiante emitido pela lâmpada para aplicação no controle biológico da bicheira-da-raiz do arroz irrigado.
- Dimensionar o dissipador de calor para manter a temperatura dos LEDs dentro das especificações, de modo a garantir o tempo de vida útil e eficiência adequada.
- Projetar o conversor *Boost* para controle da corrente na lâmpada.
- Medir a eficiência do conversor *boost* com 6, 8 e 9 LEDs como carga.
- Projetar o circuito de controle da carga da bateria.
- Programar o algoritmo de supervisão e controle da carga e descarga da bateria.
- Dimensionar a bateria e o painel para garantir o funcionamento das lâmpadas projetadas, considerando o período de monitoramento do bicheira-da-raiz no município de Itajaí.

2 ARMADILHAS LUMINOSAS NA AGRICULTURA

Armadilhas luminosas são dispositivos utilizados para atrair e capturar insetos noturnos de fototropismo positivo. Seus componentes principais são a fonte luminosa, as aletas, o cone de captura e a cobertura. Na Fig. 4 tem-se a vista lateral de uma armadilha, cujo modelo é conhecido como “Luiz de Queiroz”.

Figura 4 - Armadilha luminosa “Luiz de Queiroz”.

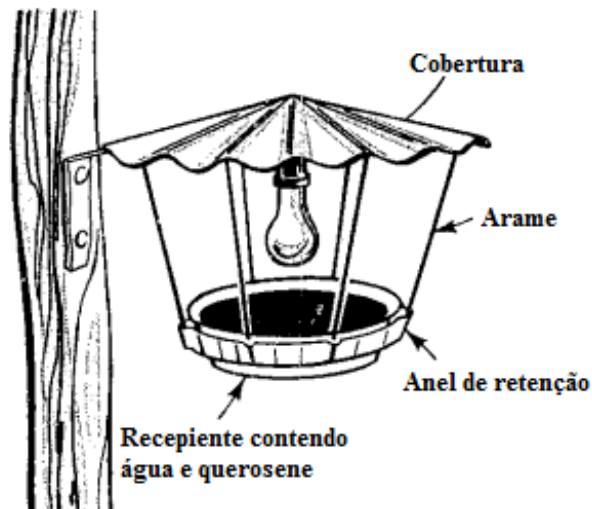


Fonte: Produção do próprio autor.

Este modelo possui quatro aletas com ângulo de 90° entre si que servem para interceptar o voo do inseto. O cone direciona o animal em queda para o recipiente de coleta. A cobertura serve para proteger a parte elétrica e a lâmpada da chuva, bem como impedir a entrada de água no recipiente de coleta. Devido às características mecânicas, esta armadilha é muito utilizada em observações entomológicas, onde há a necessidade de se preservar o inseto para posterior identificação (MATIOLI e SILVEIRA NETO, 1988).

A Fig. 5 mostra um tipo mais simples, idealizado para o controle de pragas agrícolas propriamente dito. Neste modelo, a interceptação do voo acontece devido ao contato do inseto com a mistura de água e querosene (HIENTON, 1969).

Figura 5 - Armadilha antigamente usada no Alabama-USA, para a proteção de plantação de tomate.



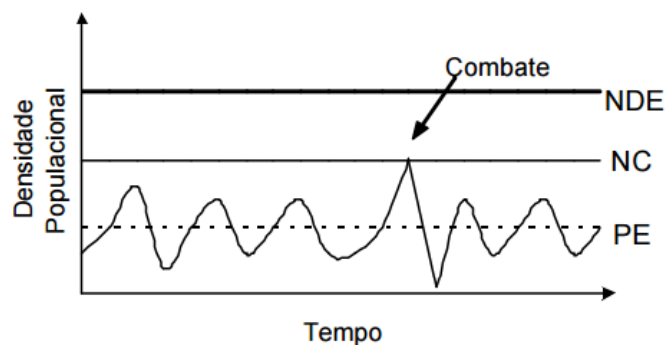
Fonte: Produção do próprio autor, 2016, baseada em HIENTON, 1969.

2.1 ESTUDO E MONITORAMENTO DE PRAGAS

No contexto do manejo integrado de pragas a armadilha luminosa é um dispositivo utilizado para obtenção de amostras de populações de insetos que podem se tornar pragas e causar danos econômicos. As informações obtidas através da contagem dos insetos capturados pela armadilha podem ser utilizadas para determinar o momento e a estratégia adequada de combate à(s) praga(s).

O monitoramento constante ao longo do tempo possibilita acumular dados para formar gráficos como o da Fig. 6, que descreve a densidade populacional de uma espécie qualquer em função do tempo.

Figura 6 - Curva da densidade populacional de uma espécie ao longo do tempo.



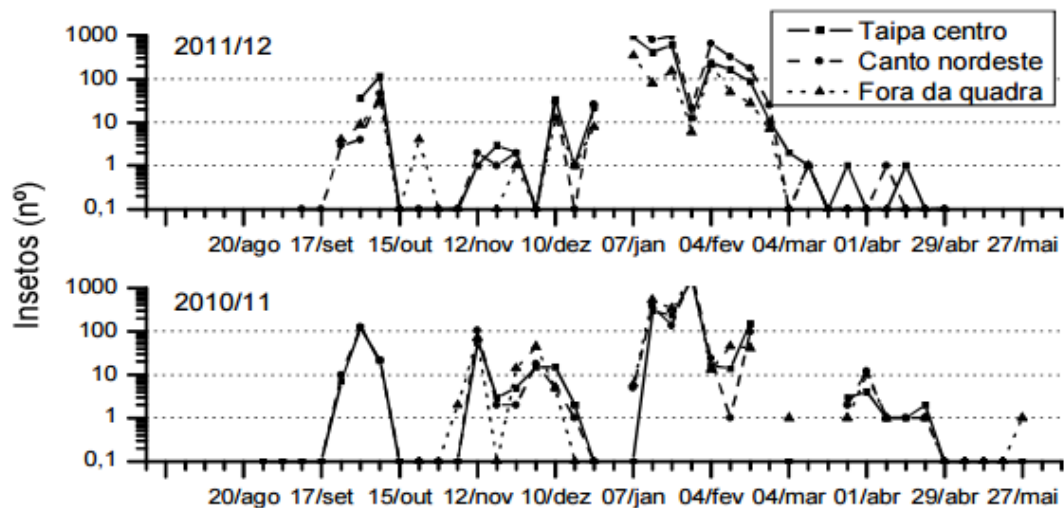
Fonte: ZANNETI, 2016.

No gráfico (Fig. 6), a densidade populacional de um inseto capaz de causar dano econômico de igual valor ao seu custo de controle é representada pela linha NDE (**nível de**

dano econômico). A densidade populacional que exige uma ação de controle é a linha NC (**nível de controle**). A linha PE (**ponto de equilíbrio**) é o nível onde o inseto e a plantação podem conviver sem prejuízos significativos ao agricultor (ZANNETI, 2016).

Na Estação Experimental da EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural do Estado de Santa Catarina) de Itajaí, SC, é conduzido um programa permanente de monitoramento de pragas da cultura do arroz irrigado. O programa, denominado MonitOryza, tem o objetivo de disponibilizar para os técnicos e produtores de arroz irrigado do estado de Santa Catarina, informações sobre a flutuação populacional das pragas durante a safra. Um dos insetos de maior interesse, neste caso, é a bicheira-da-raiz, que é uma praga crônica nas plantações de arroz. Demais insetos, como mariposas e percevejos, também são contabilizados nas armadilhas. Os resultados das coletas são informados aos interessados através de uma página na internet. A Fig. 7 mostra o número de adultos da bicheira-da-raiz capturado em armadilhas luminosas na Estação Experimental nas safras de 2010/2011 e 2011/2012.

Figura 7 - Flutuação populacional de adultos da bicheira-da-raiz, *Oryzophagus oryzae* em arroz irrigado. Itajaí, 2010 a 2012.



Fonte: HICKEL et al., 2013.

2.2 INFECÇÃO DE PRAGAS COM ORGANISMOS ENTOMOPATOGÊNICOS.

A bicheira-da-raiz do arroz irrigado é uma praga crônica nas lavouras, causando enormes prejuízos aos agricultores. Durante a entressafra, ela passa pelo período de hibernação em refúgios próximos às lavouras de arroz. Muitos indivíduos acabam morrendo na hibernação, porém os sobreviventes voltam às lavouras para se reproduzir na safra seguinte. Existe a possibilidade de a mortalidade neste período ser aumentada, se os insetos

chegarem aos refúgios de hibernação previamente contaminados com o fungo *Beauveria bassiana* (HICKEL, MILANEZ e HINZ, 2015)

Hickel, Milanez e Hinz (2015) avaliaram o nível de infecção de adultos da bicheira-da-raiz, com *B. bassiana* em armadilhas luminosas equipadas com reservatório de inóculo fúngico. Os resultados obtidos comprovaram a eficácia da armadilha na contaminação desta praga. Como o fungo *B. bassiana* é um inimigo natural da bicheira-da-raiz, é ele quem exerce a função de controle, enquanto que a armadilha luminosa possibilita o contato dos indivíduos com o patógeno de maneira eficiente. Devido às condições ambientais nos locais de hibernação, acredita-se que ocorra a epizootia, ou seja, o fungo se prolifera, causando a morte da maioria dos *O. oryzae* presentes naquele refúgio.

2.3 COLETA MASSAL

A coleta massal de insetos é uma forma de controle de pragas em que se utiliza grande número de armadilhas, no intuito de atrair e capturar os indivíduos para manter a sua população abaixo do nível de dano econômico (BENTO, 2001).

Link e Costa (1989) avaliaram durante as safras agrícolas de 1983/84 a 1986/87 a eficácia de armadilhas luminosas no controle de brocas das cucurbitáceas, *Diaphania* spp. (Lepidoptera, Pyralidae), nas culturas de pepino rasteiro, morango, abóbora e abobrinha italiana. Os experimentos ocorreram na cidade de Santa Maria – RS. Nas plantações de pepino, o controle com armadilhas luminosas foi similar ao controle químico, porém, nas demais culturas o uso de armadilhas luminosas não foi eficaz. Os autores concluíram que o raio de ação de uma armadilha luminosa (com lâmpada fluorescente de emissão ultravioleta de 15 W), em plantações de pepino rasteiro para controlar a broca das cucurbitáceas, é de 50 metros.

Observa-se que, em casos específicos, o uso adequado destes dispositivos, possibilita o controle de certas espécies de insetos-praga. O fator que mais impressiona os usuários de armadilhas luminosas é o grande número de insetos normalmente capturados. Por isto, passam a acreditar ser possível controlar qualquer tipo de praga com este dispositivo. Porém, deve-se atentar ao fato de que a luz atrai diversas espécies de insetos, e muitas delas não são pragas e podem ter um papel importante no equilíbrio ecológico da lavoura (MATIOLI e SILVEIRA NETO, 1988).

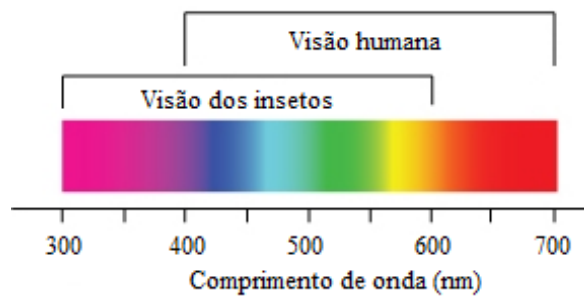
3 A LUZ E A ATRATIVIDADE AOS INSETOS

O comprimento de onda e a potência radiante emitida pela fonte de luz definem o poder de atratividade da mesma sobre os insetos de fototropismo positivo.

3.1 COMPRIMENTO DE ONDA

A luz é uma forma de radiação eletromagnética, portanto pode ser caracterizada por seu comprimento de onda. As radiações eletromagnéticas estendem-se dos raios gama e X até as ondas de rádio e televisão. Tratando-se de luz, o comprimento de onda indica a cor da luz. A Fig. 8 mostra a parte do espectro eletromagnético que sensibiliza a visão dos insetos e dos humanos.

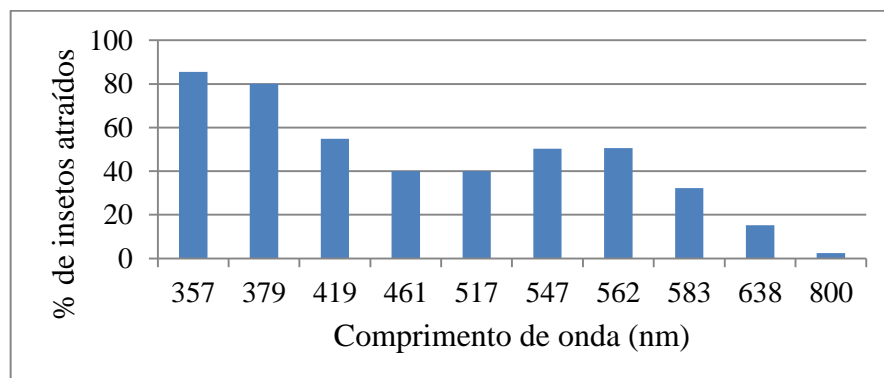
Figura 8 – Região do espectro que sensibiliza a visão dos humanos e dos insetos.



Fonte: Produção do próprio autor.

A preferência visual de diversas espécies de insetos já foi investigada através de testes comportamentais, onde se compara a preferência dos indivíduos por luzes de diferentes comprimentos de onda. A Fig. 9 representa o percentual de insetos da espécie *A. gossipii* (pulgão-do-algodoeiro) atraídos em função do comprimento de onda.

Figura 9 - Preferência visual do pulgão-do-algodoeiro.

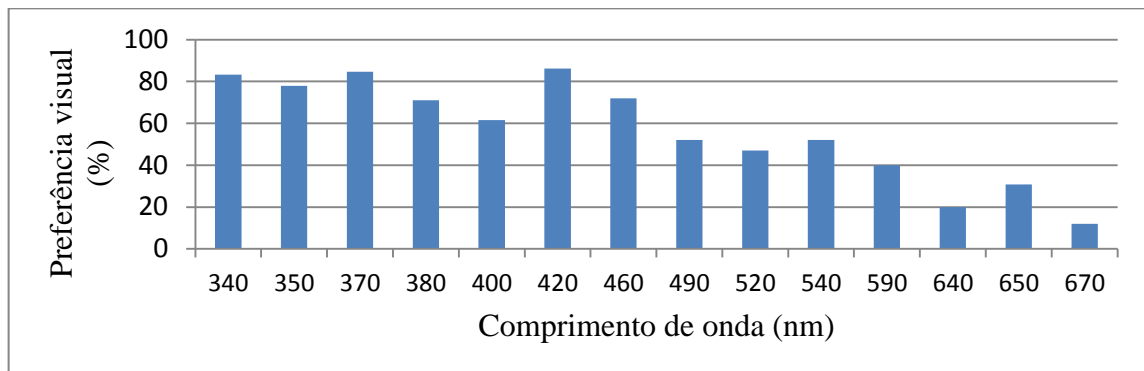


Fonte: Produção do próprio autor, 2016, baseado em POSPISIL, 1970.

Nos testes, os pulgões foram expostos a duas fontes de luz por vez, de modo que todas as cores foram comparadas entre si, e o número de indivíduos que escolheu uma e outra foi computado. No gráfico (Fig. 9) pode-se visualizar que o percentual de insetos atraídos pela fonte luminosa diminui quando se aumenta o comprimento de onda da luz emitida. Neste caso, o maior percentual de afídios foi atraído pela fonte de luz emitindo com 357 nm, na região ultravioleta (UV) do espectro eletromagnético. Destaca-se também a preferência destes insetos pelas luzes de 547 e 562 nm (verde).

Castrejon e Rojas (2010), investigaram a preferência visual de larvas e fêmeas da espécie *E. acrea* (mariposa “Salt Marsh”) à luz emitida em diferentes comprimentos de onda e intensidade constante (Fig. 10).

Figura 10 - Resposta da mariposa “Salt Marsh” a diferentes comprimentos de onda.



Fonte: Produção do próprio autor, 2016, baseado em CASTREJON e ROJAS, 2010.

O gráfico da Fig. 10 mostra o percentual médio de fêmeas que optaram por um comprimento de onda ao invés da luz de controle (570 nm). A preferência visual desse inseto foi pelos comprimentos de onda UV (menores que 400 nm), mas também comdestacada preferência por 420 nm (violeta).

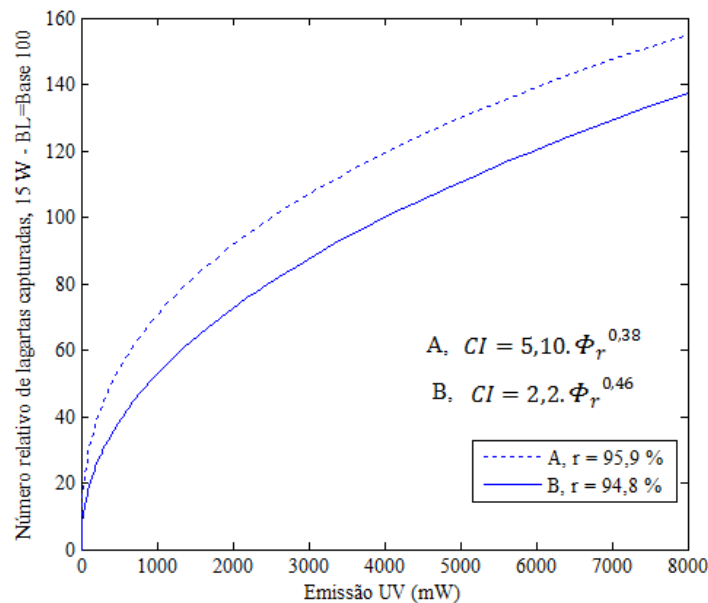
3.2 FLUXO RADIANTE

O fluxo radiante (Φ_r), ou potência radiante, é a potência total, em watts, de radiação eletromagnética emitida ou recebida por um corpo. O fluxo radiante espectral, ou densidade de potência radiante, ($\Phi_{r\lambda}$) é a potência emitida ou recebida por um corpo por unidade de comprimento de onda. Em (1) tem-se a relação entre o fluxo radiante e densidade de potência radiante.

$$\Phi_r = \int_0^{\infty} \Phi_{r\lambda} \cdot d\lambda \quad (1)$$

Barrett, Harwood e Deay (1972) investigaram a relação entre o número de insetos capturados em armadilhas luminosas e o fluxo radiante emitido por lâmpadas fluorescentes do tipo BL de emissão UV. O gráfico da Fig. 11 mostra os níveis de captura de *Pseudaletia unipuncta* (Haworth), em armadilhas luminosas em função da potência radiante emitida pelas lâmpadas.

Figura 11 - Número relativo de captura de *P.unipuncta* em função da potência radiante emitida pelas lâmpadas fluorescentes UV.



Fonte: Produção do próprio autor, 2016, baseado em Barrett; Harwood e Deay, 1972.

As curvas A e B (Fig. 11) são dos experimentos feitos em anos diferentes, sendo A em 1968 e B em 1970. A diferença entre os resultados é devido às condições ambientais e a quantidade de insetos existentes no ambiente em cada ano (Barrett; Harwood e Deay, 1972). Observa-se que, apesar da diferença entre os anos, em ambos os casos, o coeficiente de correlação linear entre as variáveis foi cerca de 0,95, validando as equações obtidas para modelar as curvas.

Na publicação de Barrett, Harwood e Deay (1972) estão disponíveis as funções para diversas espécies capturadas no experimento. Considerando todas as espécies contabilizadas nas armadilhas, os autores concluíram que a função que descreve a captura de insetos em função da potência radiante emitida pela fonte de luz pode ser aproximada pela equação 2. Nesta função CI representa um indicador na base 100, pois está normalizado pelo número de insetos capturados em uma lâmpada de referência e Φ_r é o fluxo radiante em mW.

$$CI \approx 4 \cdot \Phi_r^{0,4} \quad (2)$$

3.3 LEDS COMO FONTE DE LUZ EM ARMADILHAS LUMINOSAS

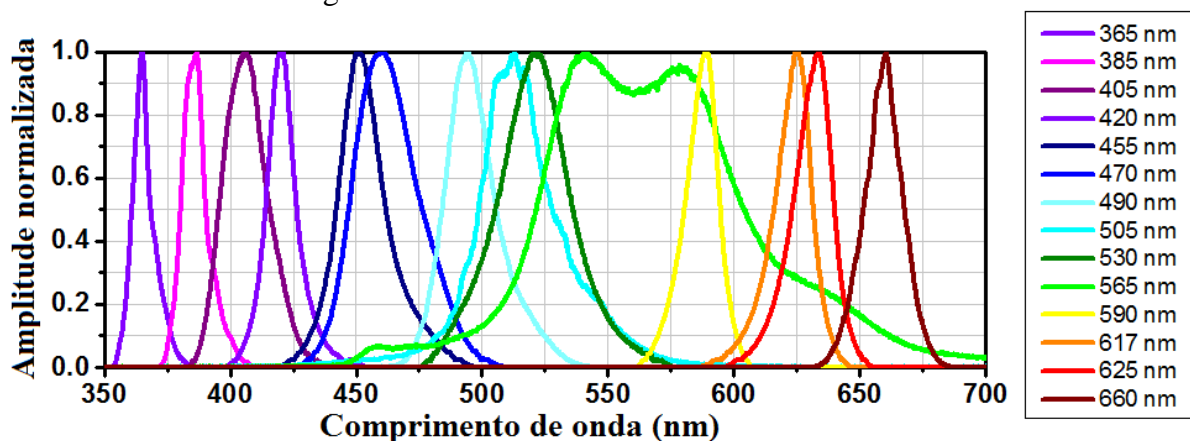
A seguir será abordado como a diversidade de cores, o coeficiente de eficiência energética e o tempo de vida útil dos LEDs podem contribuir para o projeto e desenvolvimento de armadilhas luminosas mais eficientes e confiáveis.

3.3.1 Diversidade de cores

Os materiais semicondutores podem ser feitos de diversos elementos químicos. No caso do LED, o elemento químico com o qual é fabricado determina as características físicas, como as tensões direta e reversa, a potência radiante de saída e a cor da luz emitida pelo dispositivo. Para gerar as cores vermelho e âmbar, utiliza-se materiais semicondutores compostos de arsenieto de gálio e alumínio (AlGaAs). As cores azuis, branca, verdes e ultravioletas são geradas por semicondutores compostos de nitreto de índio e gálio (InGaN). As cores vermelhas, laranjas e âmbar também são geradas por semicondutores de fosfato de alumínio, índio e gálio (AlInGap).

A radiação emitida por cada LED situa-se numa faixa estreita do espectro, por isto aproxima-se bastante de uma luz monocromática. Nos gráficos da Fig. 12 observam-se as curvas de emissão dos LEDs, desde os ultravioletas até os de luz visível ao olho humano.

Figura 12 - Emissão monocromática dos LEDs.

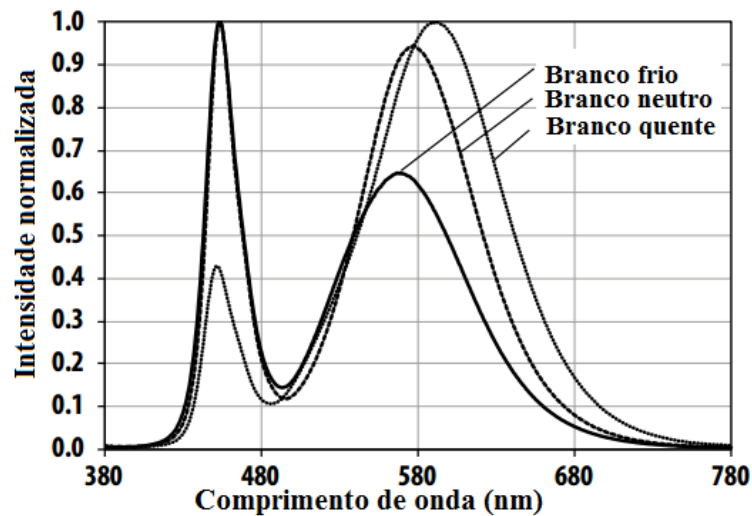


Fonte: Adaptada de https://www.thorlabs.com/images/TabImages/LED4D_AllLED_Spectra.gif.

Na tecnologia dos diodos emissores de luz, a cor branca é feita através da combinação dos LEDs monocromáticos azul, verde e vermelho ou através do uso de camadas de fósforo para transformar as cores azul ou ultravioleta em branca. Esta última técnica é semelhante à utilizada em lâmpadas fluorescentes.

A distribuição da intensidade da luz ao longo do espectro define a temperatura da cor branca. Fontes luminosas que emitem uma intensidade maior de luz na região do azul são chamadas de branco frio. Quando a distribuição da luz é mais intensa na região do verde e amarelo, a temperatura da cor torna-se quente e quando a distribuição é dividida de maneira mais uniforme a temperatura da cor torna-se neutra (ALONSO, 2013). Os gráficos da Fig. 13 mostram a distribuição da intensidade do fluxo radiante no espectro para LEDs de cor branca com diferentes temperaturas de cor.

Figura 13 - Composição da luz branca gerada por LEDs e sua relação com temperatura da cor.



Fonte: Folha de dados AV02-1640EN – Avago, 2016.

Na seção 3.1 foi visto que as espécies que foram investigadas por Castrejon e Rojas (2010) e por Pospisil (1970) possuem uma semelhança no fato de serem fortemente atraídas pela radiação UV e pelas cores azul e verde. Porém, observando-se detalhadamente o gráfico da Fig. 10, percebe-se que a mariposa “Salt Marsh” foi mais atraída pela luz emitida em 420 nm. Na Fig. 12 se pode ver que existe um LED que emite luz com comprimento de onda central de 420 nm. Há então um benefício muito grande nesta diversidade de cores existentes, pois se pode utilizar o LED de 420 nm, garantido que todo fluxo radiante seja emitido em um comprimento de onda cujo inseto possui grande sensibilidade.

3.3.2 Eficiência energética

A relação entre o fluxo radiante e a captura dos insetos na lavoura foi investigada por Barrett, Harwood e Deay (1972), concluindo-se que há uma relação forte entre ambos e que pode ser modelada pela equação 2.

Os diodos emissores de luz possuem como característica marcante o seu alto coeficiente de eficiência energética (W/W), que é dado pelo quociente da potência radiante emitida pela potência elétrica aplicada sobre o dispositivo, conforme equação 3.

$$n = \frac{\Phi_r}{P_e} = \frac{\Phi_r}{V_d \cdot I_d} \quad (3)$$

Aplicando-se os valores de tensão direta, corrente direta e potência radiante, fornecidos pelo fabricante, na equação 3 obtém-se o valor do coeficiente para a condição nominal de operação de um LED qualquer. As Tabelas 1 e 2 mostram modelos de LEDs de diferentes empresas com informações de fluxo radiante e do coeficiente de eficiência energética de cada um, com temperatura de junção a 25 °C e corrente nominal de operação.

Tabela 1 - Coeficiente de eficiência energética típicos dos LEDs “Royal Blue” de InGaN.

| Modelo | Cor | λ Central (nm) | Id(mA) | Φ_r (mW) | η |
|----------------|-----------|------------------------|--------|---------------|--------|
| LXML-PR01-0500 | Azul real | 450 | 700 | 910 | 0,40 |
| LXML-PR01-0425 | Azul real | 450 | 700 | 840 | 0,37 |
| LXML-PR02-1100 | Azul real | 450 | 700 | 1120 | 0,53 |
| LXML-PR02-1000 | Azul real | 450 | 700 | 1030 | 0,49 |
| LXML-PR02-0950 | Azul real | 450 | 700 | 970 | 0,46 |

Fonte: LUXEON Color Portfolio. Disponível em: <http://www.mouser.com/pdfdocs/PhilipsLumileds_SG68.pdf> Acesso em: 25 de Ago. de 2016.

Tabela 2 - Coeficiente de eficiência energética de LEDs UV de InGaN da Vishay.

| Modelo | Cor | λ Central (nm) | Id (mA) | Φ_r (mW) | η |
|------------------|------------|------------------------|---------|---------------|--------|
| VLMU3500-385-120 | UV | 385 | 500 | 780 | 0,44 |
| VLMU3500-395-120 | UV | 395 | 500 | 780 | 0,44 |
| VLMU3500-405-120 | UV/Violeta | 405 | 500 | 780 | 0,44 |

Fonte: UV SMD LED with Silicone Lens. Disponível em: <<http://www.vishay.com/docs/84320/vlmu3500xxx120.pdf>> Acesso em: 25 de Ago. de 2016.

Os dados das Tabelas 1 e 2 apresentam informações sobre modelos específicos. Intencionalmente, foram escolhidos fabricantes que ofertam produtos de elevado nível tecnológico, portanto os valores de coeficiente de eficiência energética são elevados. Porém, existem fabricantes diversos que oferecem produtos com a emissão nesta mesma faixa do espectro, com coeficiente de eficiência inferior.

A título de comparação, os coeficientes de eficiência energética de alguns modelos de lâmpadas fluorescentes oferecidas pela Philips, para aplicação em armadilhas luminosas, são

apresentados na Tabela 3. Os valores de tensão e corrente elétrica são exclusivamente da lâmpada, ou seja, na saída de um reator.

Tabela 3 - Coeficiente de eficiência energética da lâmpada fluorescente Actinic BL.

| Modelo | λ Central (nm) | IL (A) | VL (V) | Φ_r (W) | η |
|-------------------|------------------------|--------|--------|--------------|--------|
| Actinic BL TL 4W | 365 | 0,17 | 29 | 0,6 | 0,12 |
| Actinic BL TL 6W | 365 | 0,16 | 42 | 1,3 | 0,19 |
| Actinic BL TL 8W | 365 | 0,15 | 56 | 1,7 | 0,20 |
| Actinic BL TL 11W | 365 | 0,41 | 33 | 2,0 | 0,15 |
| Actinic BL TL 15W | 365 | 0,35 | 46 | 3,3 | 0,20 |

Fonte: Insect trap folder. Disponível em: <http://www.lighting.philips.com/b-dam/b2b-li/en_AA/products/special-lighting/insect-trap/Insect%20Trap%20folder%20012014.pdf> Acesso em: 25 de Ago. de 2016.

Onde VL é a tensão aplicada sobre a lâmpada, IL é a corrente elétrica e Φ_r é o fluxo radiante na região UV. Com estas informações fornecidas na folha de dados do dispositivo e a equação 4, obtém-se o coeficiente de eficiência energética para as lâmpadas.

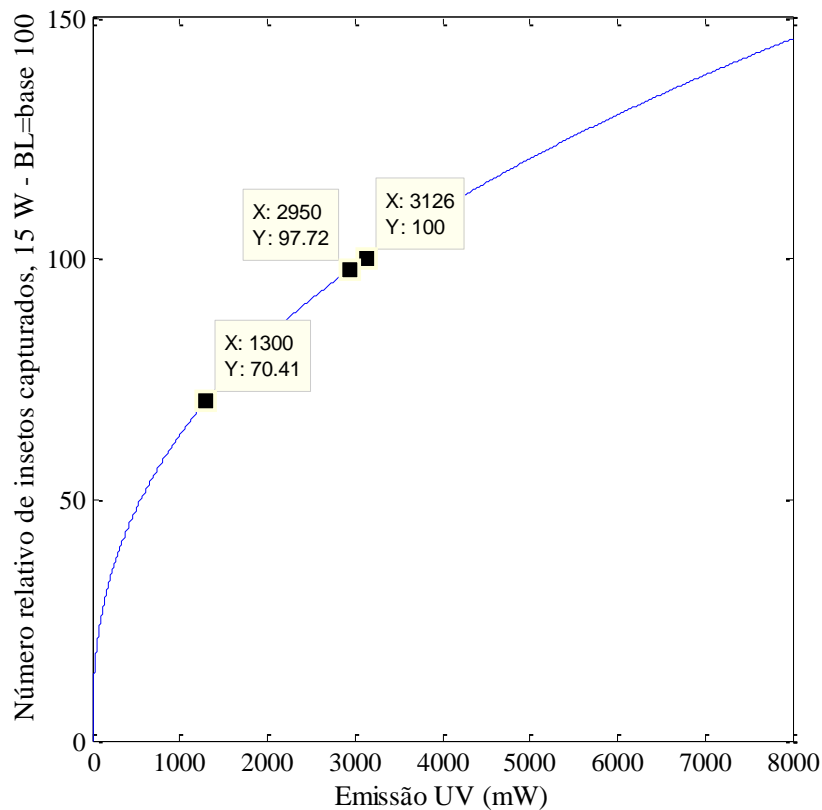
$$n = \frac{\Phi_r}{VL \cdot IL} \quad (4)$$

Com as informações das Tabelas 1, 2 e 3 e a equação 2 pode-se comparar o poder de atratividade dos LEDs e das lâmpada fluorescente de forma relativa. Primeiro, calcula-se o fluxo radiante emitido por uma lâmpada de LEDs UV composta pelo modelo VLMU3500-385-120 (Tabela 2) na qual se aplica uma potência elétrica igual a potência consumida pela lâmpada Actinic BL TL 6W :

$$\Phi_r(led) = (VL \cdot IL) \cdot n = 6,72 \text{ W} \cdot 0,44 = 2,95 \text{ W} \quad (3)$$

Na Tabela 3 verifica-se que o fluxo radiante emitido pela lâmpada Actinic BL TL 6W é igual a 1,3 W. Com o modelo matemático de Barrett, Harwood e Deay (1972) (equação 2), podemos ter uma estimativa do poder de atratividade de cada uma das duas lâmpadas relativo a lâmpada de 15 W utilizada pelos autores como referência. O gráfico da Fig. 14 mostra o número relativo de insetos capturados para a potência que foi utilizada como base (3126 mW), para a lâmpada de LEDs (2950 mW) e para a lâmpada fluorescente Actinic BL TL 6W (1300 mA).

Figura 14 - Comparação do poder de atratividade das lâmpadas fluorescente e de LEDs (6,72 W) com a referência.



Fonte: Produção do próprio autor

No gráfico, observa-se que com a potência de 6,72 W aplicada sobre os LEDs (modelo VLMU3500-385-120) tem-se uma captura de insetos de 97,72 % do número de insetos capturados pela lâmpada de referência.

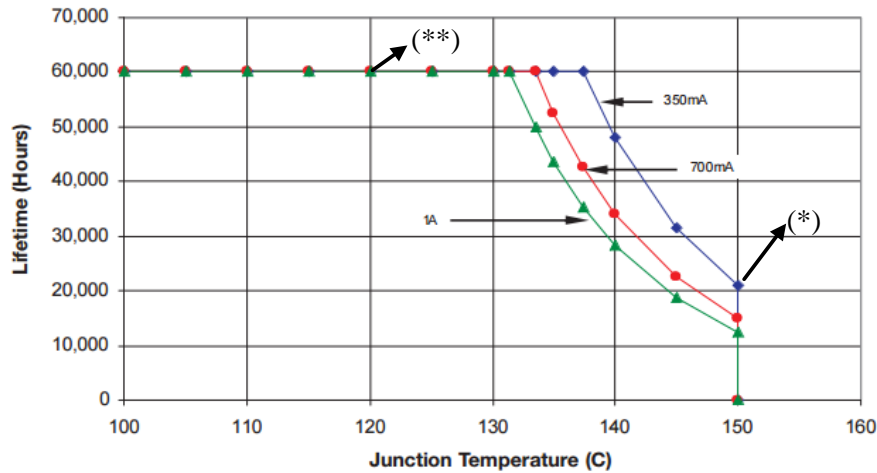
3.3.3 Tempo de vida útil

Além das características avaliadas nas seções 3.1 e 3.2, que têm impacto direto na quantidade de insetos e espécies atraídas pela armadilha luminosa, deve-se levar em conta aspectos referentes à confiabilidade e robustez da fonte de luz. Nestes quesitos, os diodos emissores de luz têm grande vantagem em relação a tecnologia de lâmpadas fluorescentes atualmente utilizada nas armadilhas. Seu tempo de vida é definido como o tempo em que o fluxo radiante de saída é ainda superior a 70% do valor inicial. Para simbolizar esta informação usa-se a sigla L70.

Os gráficos da Fig. 15 mostram curvas de tempo de vida em função da temperatura na junção do LED para diferentes valores de corrente elétrica sobre o semicondutor. No gráfico se pode observar que, se a temperatura na junção for mantida menor que 120 °C (**), no mínimo 50 % dos LEDs deste modelo irão manter o fluxo radiante igual ou superior a 70% do

inicial depois de 60.000 horas. Por outro lado, se a temperatura na junção for de 150 °C a corrente máxima terá de ser reduzida a 350 mA e 50 % dos LEDs irão manter 70% do fluxo radiante inicial após 20.000 horas.

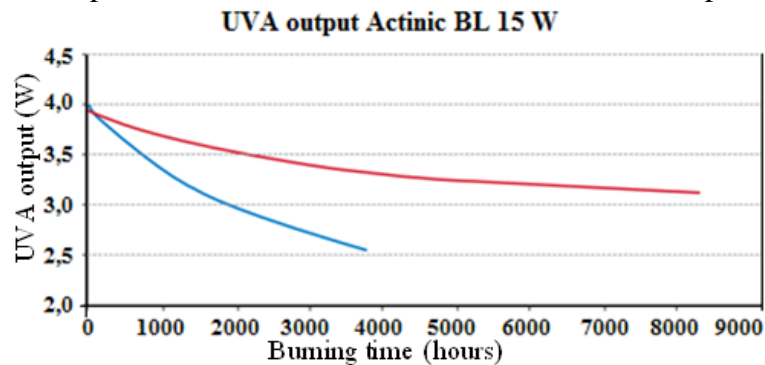
Figura 15 - (B50, L70) tempo de vida para os LEDs LUXEON de InGaN.



Fonte: Reliability Datasheet RD07 LUXEON® Rebel, 2016.

Por outro lado, as lâmpadas fluorescentes possuem tempo de vida útil inferior e baixa confiabilidade. Na Fig. 16 estão as curvas de potência radiante em função do tempo de funcionamento de lâmpadas fluorescentes da família Actinic BL da Philips.

Figura 16 - Manutenção da potência de saída em função do tempo de funcionamento da lâmpada fluorescente UV Actinic BL 15 W da Philips.



Fonte: Insect trap folder. Disponível em <<http://www.lighting.philips.com/main/products/special-lighting/insect-trap.html>> Acesso em: 26 de Ago. de 2016.

As duas curvas representam modelos diferentes de lâmpadas da mesma família para aplicações em armadilhas luminosas. Observa-se que para o melhor modelo (curva superior) a lâmpada terá ao final de 8,0 mil horas 78,5 % da capacidade inicial. No pior modelo (curva inferior), funcionará por apenas 3,8 mil horas, até alcançar 65% da capacidade inicial.

Com estas informações estima-se que os LEDs possam manter a iluminação por cerca de 5 a 7 vezes mais tempo que as lâmpadas fluorescentes apresentadas, dependendo do projeto térmico e da corrente elétrica aplicada sobre eles.

A variação da potência radiante pela fonte de luz implica em uma variação na captura de insetos. Logo, fontes de luz com uma variação de potência menor ao longo do tempo, contribuem também com a confiabilidade das informações obtidas através de armadilhas luminosas.

Outro aspecto muito relevante é o número de manutenções, que pode ser reduzido significativamente. Isto, em aplicações com grande número de armadilhas, representa racionalização de mão de obra.

3.4 RESPOSTA DE DIFERENTES ESPÉCIES A LUZ PROVENIENTE DOS LEDS

Pesquisadores das áreas da entomologia e agricultura estão bastante interessados pelo potencial de uso dos LEDs em armadilhas luminosas e buscam descobrir quais cores (comprimentos de onda) de LEDs possuem maior efetividade na atração de diversas espécies de pragas agrícolas (BISHOP et al., 2004; COWAN e GRIES, 2009; CHO e LEE, 2012; HICKEL et al., 2015; JEON et al., 2012; OH et al., 2011).

Hickel et al. (no prelo) buscaram identificar os LEDs mais atrativos a bicheira-da-raiz, *O. oryzae* (seção 2.2). Para os testes, foi utilizada uma arena exagonal com uma abertura superior e com tubos conectados a sua volta. Na extremidade destes tubos foram posicionadas as fontes luminosas. Durante alguns dias foram adicionados 200 insetos por dia no centro da arena e contabilizados o número médio de indivíduos que optaram por cada uma das fontes de luz em cada dia. Na primeira sessão de testes, que durou 4 dias, foi comparado o poder de atratividade de LEDs do espectro visível ao olho humano com o LED UV-365 nm. Em uma segunda sessão de testes, que durou 5 dias, foram comparados os LEDs UV-370 nm, UV-380 nm e UV-370 nm. Em uma terceira bateria de testes, com duração de cinco dias foram comparados os LEDs UV-400 nm, UV-390 nm e violeta-410 nm. Na Tabela 4 está a ordem de preferência visual da bicheira-da-raiz pelos LEDs testados em cada sessão.

Tabela 4 - Preferência visual da bicheira-da-raiz do arroz irrigado.

| Ordem de preferência | Primeira sessão de testes | | Segunda sessão de testes ¹ | | Terceira sessão de testes ¹ | |
|----------------------|---------------------------|----------------|---------------------------------------|----------------|--|----------------|
| | Cor | λ (nm) | Cor | λ (nm) | Cor | λ (nm) |
| 1° | UV | 365 | UV ^a | 390 | UV ^a | 400 |
| 2° | Azul | 460 | UV ^a | 380 | UV ^a | 390 |
| 3° | Verde | 520 | UV ^b | 370 | Violeta ^a | 410 |

¹ A atratividade das cores seguidas da mesma letra na coluna não apresenta diferença significativa entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: HICKEL et al., 2016.

Nas aferições de Hickel et al. (no prelo) a bicheira-da-raiz foi mais atraída pela luz UV do que pelas luzes verde e azul. Na segunda sessão de testes, para comparação exclusiva entre LEDs UV, o UV-390 nm e o UV-380 nm não apresentam diferença significativa entre si, enquanto que o UV-370 nm foi menos atrativo. Na terceira sessão de testes, comparando-se os LEDs UV-400 nm, UV-390 nm e o Violeta-410 nm, não houve diferença significativa entre eles.

A traça-das-crucíferas, *P. xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae), causa dano econômico em plantações de couve-flor, espinafre, brócolis, nabo, rúcula, agrião entre outras. Cho e Lee (2012) identificaram os LEDs mais atrativos a esta espécie. Em uma câmara contendo um lado escuro e um lado iluminado com a luz proveniente de LEDs, foram inseridos 30 indivíduos por vez e computado a quantidade de insetos que ficaram em cada lado da câmara. Na Tabela 5 temos a ordem dos LEDs que atraíram mais insetos para o lado claro da câmara.

Tabela 5 - Preferência visual da traça-das-crucíferas.

| Ordem de atratividade | Cor | λ (nm) |
|-----------------------|---------------|----------------|
| 1° | Verde | 520 |
| 2° | UV | 365 |
| 3° | Vermelha | 730 |
| 4° | Amarela | 590 |
| 5° | Azul | 470 |
| 6° | Infravermelho | 730 |

Fonte: CHO e LEE, 2012.

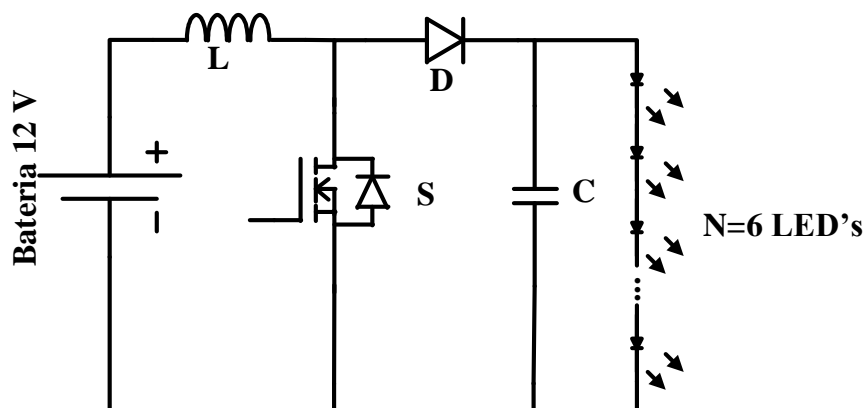
Nas comparações de Cho e Lee (2012) o verde - 520 nm foi o mais atrativo à traça-das-crucíferas, seguido do UV - 365 nm, sendo que o azul - 470 nm, que para a bicheira-da-raiz foi atrativo, mostrou-se pouco efetivo em atrair esta espécie.

4 PROJETO DA LÂMPADA DE LEDS PARA APLICAÇÃO EM ARMADILHA LUMINOSA

Este capítulo trata do projeto de uma lâmpada de LEDs para aplicação em armadilhas luminosas. Questões como o formato físico, o tipo e a quantidade de LEDs, projeto térmico, espectro emitido e potência radiante serão discutidas.

Como já foi definido na introdução, o driver para controle da corrente de LEDs será o conversor *boost* e a fonte de energia para o conversor, uma bateria de 12 V (Fig. 17).

Figura 17 - Conversor boost para regulação de corrente sobre os LEDs



Fonte: Produção do próprio autor.

Constatou-se experimentalmente que o número mínimo de LEDs azul ou UV que podem ser conectados em série à saída do conversor *boost* é igual a seis. Um número menor que este possibilita a circulação de corrente pelo diodo D, indutor L e pelos LEDs sem que o conversor seja acionado. Para LEDs vermelho e infravermelho, cuja tensão direta é menor, o número mínimo de LEDs deverá ser reavaliado. Um número elevado de LEDs pode acarretar em mau funcionamento e elevadas perdas no conversor. Portanto, a quantidade de LEDs na lâmpada deve respeitar as características do conversor e as necessidades das aplicações da armadilha luminosa. O projeto do conversor e da malha de controle da corrente de saída do mesmo é assunto do capítulo 5.

Os LEDs escolhidos para o projeto são de potência (High Power - LEDs), suportam corrente de até 350 mA (Fig. 18) e sua potência máxima é de 1 W. O projeto do dissipador de calor para estes dispositivos é assunto da sessão 4.4.

O número mínimo de LEDs na lâmpada foi definido então pela topologia do conversor utilizado para regulação da corrente sobre o mesmo. O número máximo é definido pelo custo, formato da lâmpada e aplicação da armadilha luminosa.

Figura 18- Modelo do LED de potência utilizado para o projeto das lâmpadas.



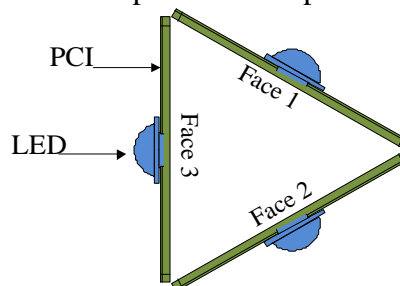
Fonte: <http://www.lednews.org/what-the-high-power-led-definition>

Nas próximas sessões deste capítulo será definido o número ideal de LEDs considerando a aplicação da armadilha para o estudo e monitoramento de pragas diversas e para o estudo, monitoramento e controle da bicheira-da-raiz do arroz irrigado. Esta distinção entre as aplicações possibilita otimizar o número de LEDs, mantendo-se o mesmo circuito eletrônico de controle da corrente, o que torna um futuro produto baseado neste projeto facilmente escalável.

4.1 ESTRUTURA FÍSICA

Na lavoura, é preciso que o fluxo radiante seja distribuído em todos os lados da armadilha luminosa. Portanto os LEDs devem estar dispostos de maneira adequada. Na Fig. 19 temos a vista superior de um modelo de lâmpada com três faces, que possibilita compor a lâmpada com um número múltiplo de três de LEDs em série na saída do conversor *boost*, tais como seis, nove ou doze.

Figura 19 - Vista superior da lâmpada de três faces.



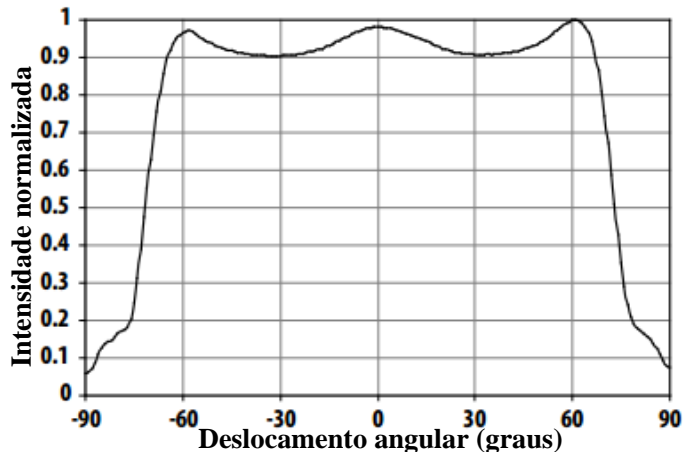
Fonte: Produção do próprio autor.

Os LEDs são soldados na placa de circuito impresso (PCI), a qual serve também como dissipador de calor (sessão 4.4).

Na Fig. 20 temos a intensidade de luz emitida pelo LED em função do deslocamento angular do observador. Percebe-se que se o observador se deslocar mais que 60° em relação

ao centro do LED para esquerda ou para a direita a intensidade de luz percebida será drasticamente reduzida.

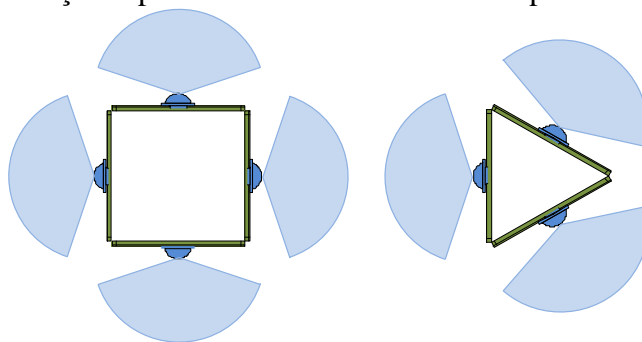
Figura 20 - Distribuição espacial da luz em um LED.



Fonte: Folha de dados AV02-1640EN - Avago. Adaptado.

Baseado nesta curva de distribuição espacial, a Fig. 21 traz a vista superior da lâmpada com três faces, sendo comparada com uma de quatro faces. Mesmo que ainda não atinja uniformidade total, as quatro faces contribuem para melhorar a distribuição da luz no espaço, sendo possível o uso de um número de LEDs múltiplo de quatro (oito, doze ou dezesseis) em série na saída do conversor.

Figura 21 - Distribuição espacial da luz em torno das lâmpadas de três e quatro faces.



Fonte: Produção do próprio autor

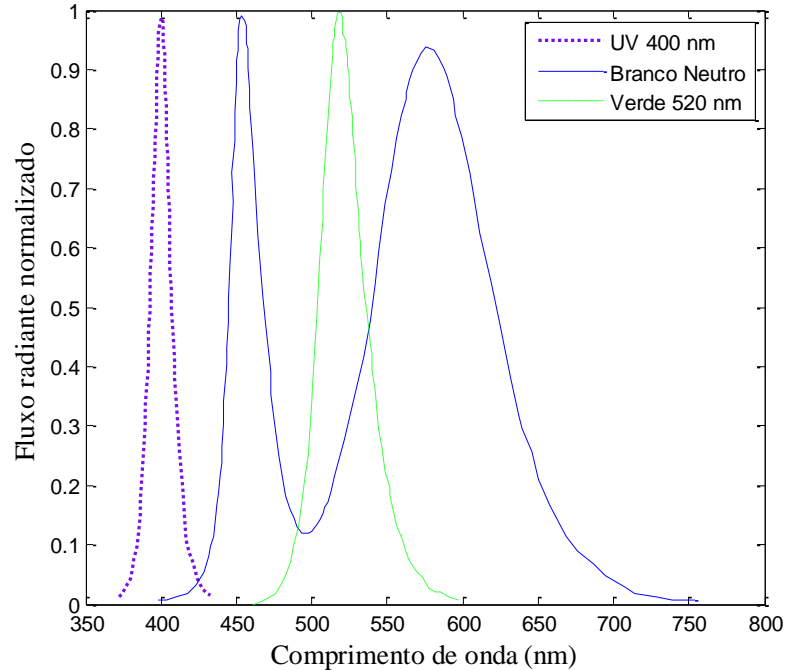
4.2 LÂMPADA PARA O ESTUDO E MONITORAMENTO DE PRAGAS DIVERSAS.

Quando a armadilha é utilizada para estudo e monitoramento de diversas espécies é necessário que a luz esteja bem distribuída, em um amplo espectro, de modo a atrair de forma uniforme variadas espécies.

Com os resultados relatados nos tópicos 3.1 e 3.4, conclui-se que os LEDs de emissão UV, azul e verde tem grande poder de atratividade e que as espécies podem ter preferência

visual diferente uma das outras. Então, para emitir luz em toda a região do espectro que é atrativa ao insetos necessita-se três tipos diferentes de LEDs. A Fig. 22 apresenta a curva de emissão dos LEDs UV-400 nm, Verde-520 nm e Branco Neutro.

Figura 22 - Intensidade de luz normalizada dos LEDs UV-400 nm, Branco Neutro e Verde-520 nm.



Fonte: Produção do próprio autor.

O Branco Neutro possui maior intensidade luminosa na região do azul (455 nm) e do amarelo (570 nm), portanto uma lâmpada com esta combinação de LEDs por face cobre toda a região do espectro atrativa aos insetos. Com esta combinação e três faces é possível ter uma lâmpada com 9 LEDs que atende a aplicação e permite o conversor *boost* operar com uma razão ciclica adequada (Cap. 5) para garantir excelente rendimento do mesmo.

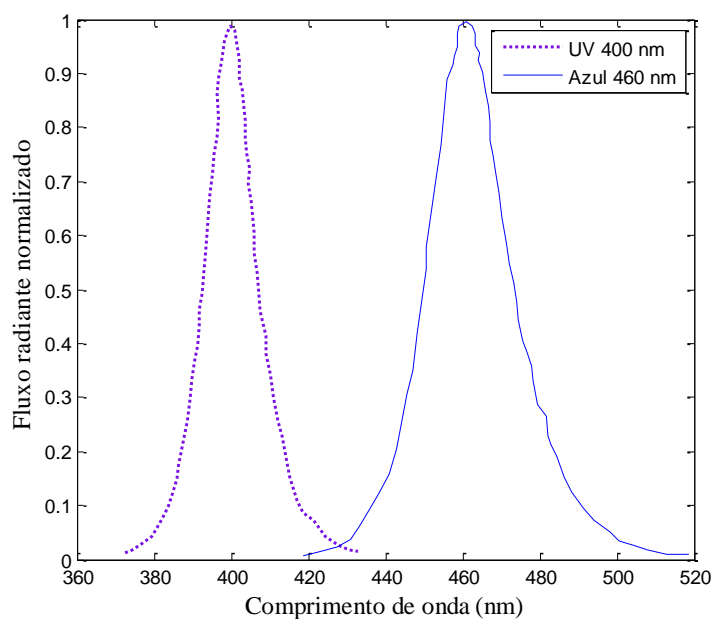
4.3 ESPECTRO E FLUXO RADIANTE DE UMA LÂMPADA PARA ATRAIR A BICHEIRA-DA-RAIZ.

Hickel et al. (2015) obtiveram resultados motivadores com a utilização de armadilhas luminosas para infecção de adultos da bicheira-da-raiz com fungos entomopatogênicos. Hickel et al. (no prelo) investigaram os LEDs mais atrativos a bicheira-da-raiz, concluindo que o UV 400 nm e o azul 460 nm são os mais eficazes.

Com intenção de aumentar a eficácia e reduzir custos de uma armadilha luminosa para aplicação do controle biológico da bicheira-da-raiz, propõe-se uma lâmpada com as duas cores mais atrativas a esta praga por face, o UV 400 nm e o Azul-460 nm. Desta forma tem-se

todo o fluxo radiante emitido pela lâmpada na região do espectro (Fig. 23) ao qual ocorre maior resposta pela espécie. Assim, utilizando-se três faces, tem-se uma lâmpada com seis LEDs e, com quatro faces, a lâmpada possui oito LEDs. Com três faces há um número menor de LEDs, o que acarreta em um menor custo. Com quatro faces, é possível alcançar mais uniformidade na distribuição da luz em torno da armadilha.

Figura 23 - Espectro de uma lâmpada para aplicação em controle biológico da bicheira-da-raiz.



Fonte: Produção do próprio autor.

A mistura de UV 400 nm e azul 460 nm possibilita reduzir o custo total da lâmpada, uma vez que LEDs UV ainda tem um custo superior.

A aplicação do fluxo radiante em um espectro limitado pode diminuir, relativamente, a captura de outras espécies, que tendem a ser mais atraídas pelas cores verde e amarela do que pelo azul e UV. Como foi ressaltado por Matioli e Silveira Neto (1988), as armadilhas luminosas atraem diversas espécies que podem ter um papel importante no equilíbrio da lavoura. Assim, esta limitação dos comprimentos de onda pode reduzir o impacto da armadilha sobre equilíbrio do agroecossistema.

4.3.1 Fluxo radiante emitido pela lâmpada de seis e oito LEDs

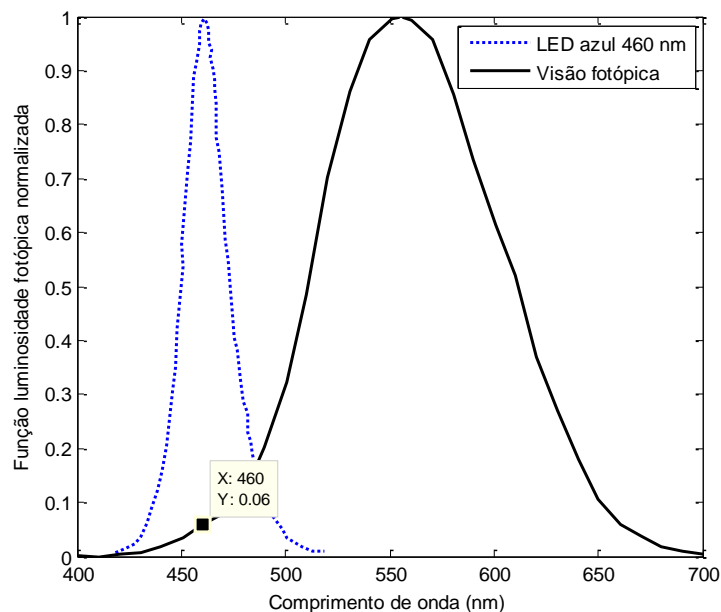
Na seção 3.3.2 (Tabela 1) é possível verificar que até mesmo os LEDs de mesma cor podem ser oferecidos pelos fabricantes com valores diferentes de coeficiente de eficiência energética. Portanto, para ter um parametro confiável, que reflita a capacidade da armadilha de atrair os insetos, é importante quantificar o fluxo radiante emitido pela lâmpada.

Para LEDs de emissão UV, azul real e infravermelho os fabricantes disponibilizam o fluxo radiante em watts para a condição de corrente nominal e temperatura de 25° C na junção do semicondutor. Quando se trata de LEDs cuja emissão está dentro da curva de sensibilidade do olho humano, as folhas de dados apresentam o valor do fluxo luminoso (Φ), que é dado em lumens (lm). Então, para se obter o valor do fluxo radiante emitido pelo LED azul 460 nm, é necessário converter o valor de fluxo luminoso fornecido pelo fabricante para o valor de fluxo radiante. A relação entre o fluxo luminoso e o fluxo radiante é dada pela equação 5.

$$\Phi = Km \int_0^{\infty} V(\lambda) \cdot \Phi_r(\lambda) \cdot d\lambda \quad [\text{lm}] \quad (4)$$

Onde Km é o valor da eficácia máxima de absorção da luz pelo olho humano (683 lm/w), $V(\lambda)$ é função de luminosidade fotópica do olho humano e $\Phi_r(\lambda)$ é a função comprimento de onda da fonte de luz (Fig. 24).

Figura 24- Funções comprimento de onda do LED 460 nm e de luminosidade fotópica do olho humano.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na nota de aplicação denominada “*Tutorials-on-light-measurement*” da empresa Gigahertz Optik os autores consideram o LED como uma fonte de luz monocromática. Desta forma, aplicam a equação 5 em um único comprimento de onda, transformando-a em uma multiplicação simples. Como se todo o fluxo radiante fosse emitido em 460 nm. Esta aproximação não pode ser utilizada para LEDs de cor branca, pois sua emissão é muito ampla.

Considerando os modelos da Tabela 6 e seus respectivos dados fornecidos pelos fabricantes, pode-se então obter o fluxo radiante de cada LED que compõe uma lâmpada para atrair a bicheira-da-raiz.

Tabela 6 - Dados dos LEDs azul 460 nm e UV 400 nm ($T_j=25^\circ$).

| Modelo | λ Central | Vd (típico) | Id(nominal) | Φ_r | Φ |
|---------------|-------------------|-------------|-------------|----------|--------|
| LED-P1-D-Blue | 460 nm | 3,2 V | 350 mA | - | 12 lm |
| IN-K2PUV | 400 nm | 3,5 V | 350 mA | 230 mW | - |

Fonte: Produção do próprio autor.

O coeficiente de eficiência energética aproximado do LED UV é calculado por:

$$\eta_{uv} \approx \frac{\Phi_r}{Vd \cdot Id} = \frac{0,230}{3,5 \cdot 0,35} \approx 0,19 \quad (5)$$

Para o LED azul, é preciso transformar primeiro o fluxo luminoso em fluxo radiante. Considerando que toda a energia radiante é aplicada em um único comprimento de onda, conforme a nota de aplicação da empresa Gigahertz Optik sugere, tem-se a equação 7. Onde $V(\lambda)$ é igual 0,06, a curva da função de luminosidade fotópica do olho humano da Fig. 24. O valor de K_m é igual a 683 lm/W.

$$\Phi = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_r(\lambda) \quad (6)$$

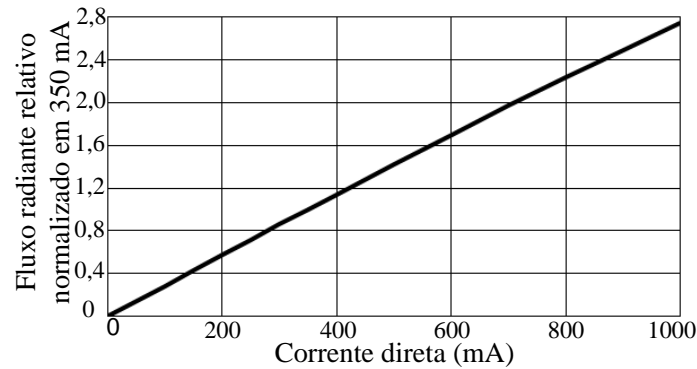
$$\Phi_r = \frac{\Phi}{K_m \cdot V(\lambda)} = \frac{12}{683 \cdot 0,06} = 0,29 \text{ W}$$

O coeficiente de eficiência do LED azul 460 nm é dado pela equação 8:

$$\eta_{azul} \approx \frac{\Phi_r}{Vd \cdot Id} = \frac{0,29}{3,2 \cdot 0,35} \approx 0,26 \quad (8)$$

A corrente sobre os LEDs estabelecida neste trabalho, pelos motivos que serão justificados no capítulo 6, é de 167 mA. A tensão Vd sobre os LEDs para 167 mA foi obtida através de medição. Com o gráfico da Figura 25 é possível perceber que a relação entre a corrente e a potência luminosa de saída é linear, portanto, com as Equações 9 e 10 obtêm-se os fluxos radiantes emitidos pelo azul 460 nm e UV 400, respectivamente.

Figura 25 - Relação entre o fluxo radiante e a corrente direta em um LED.



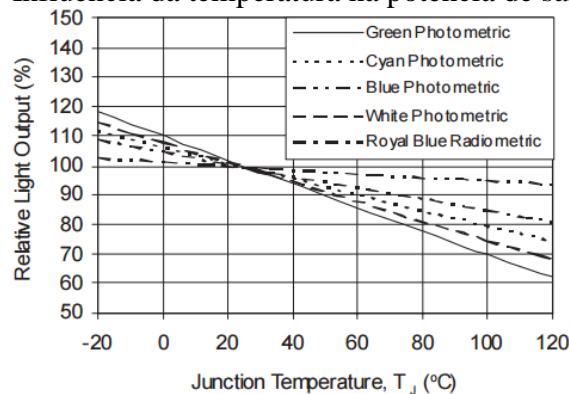
Fonte: Produção do próprio autor, baseada em <http://www.epistar.com.tw/>

$$\Phi_{\text{razul}} = Id \cdot Vd \cdot \eta_{\text{azul}} = 0,167 \cdot 2,97 \cdot 0,26 = 0,130 \text{ W} \quad (9)$$

$$\Phi_{\text{rUV}} = Id \cdot Vd \cdot \eta_{\text{uv}} = 0,167 \cdot 3,2 \cdot 0,26 = 0,0961 \text{ W} \quad (10)$$

No gráfico da Fig. 26, percebe-se o efeito da temperatura de junção sobre a luz gerada com diferentes cores. Os LEDs utilizados para este trabalho não fornecem esta informação, mas baseando-se no gráfico da Fig. 26, será aplicado um fator de correção de 0,8 na potência de saída devido ao aumento de temperatura na junção. Este fator é aplicável pelo fato de a lâmpada estar encerrada em um tubo de acrílico e a área da PCI não ser suficientemente grande para dissipar o calor gerado e manter a temperatura da junção em 25 °C.

Figura 26 - Influência da temperatura na potência de saída do LED.



Fonte: Technical Datasheet DS25, 2016.

Assim, obtém-se uma estimativa da potência radiante emitida pela lâmpada de seis e oito LEDs, produzida para atrair a bicheira-da-raiz.

$$\Phi_{\text{total}} \approx 3 \cdot \Phi_{\text{razul}} \cdot 0,8 + 3 \cdot \Phi_{\text{rUV}} \cdot 0,8 = 0,312 \text{ W} + 0,230 \text{ W} = 0,542 \text{ W}$$

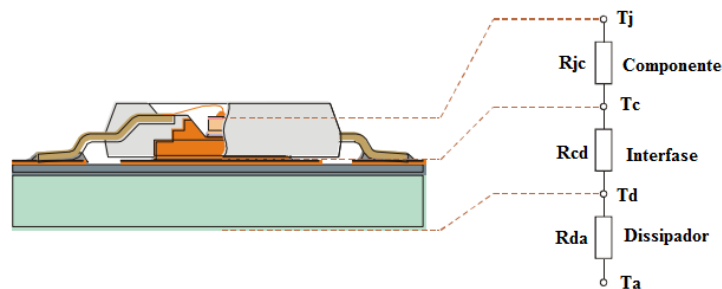
$$\Phi'_{total} \approx 4. \Phi_{razul}.0,8 + 4. \Phi_{rUV}.0,8 = 0,416 W + 0,307 W = 0,723 W$$

4.4 PROJETO TÉRMICO

Observou-se no item 3.3.2, que os LEDs transformam em fluxo radiante apenas uma parte da energia elétrica que é aplicada sobre o dispositivo. A energia que não gera luz é transformada em calor. Nos gráficos da Fig. 15, no item 3.3.3, verifica-se a influência da temperatura na vida útil dos LEDs. Além disto, o calor na junção deste semiconductor também influencia negativamente na luz emitida, conforme pode ser observado na Fig. 26. Portanto, um aspecto de crucial importância no projeto de lâmpadas de LEDs é a transferência de calor da junção para o ambiente de forma eficiente.

A transferência de calor da junção para o ambiente pode ser modelada pelo esquema da Fig. 27, onde T_j é a temperatura na junção do semiconductor, T_c é a temperatura na capsula do semiconductor, T_d é a temperatura no dissipador e T_a é a temperatura no ambiente.

Figura 27 - Modelo Térmico de um LED.



Fonte: Produção do próprio autor, baseado em ALONSO, 2013.

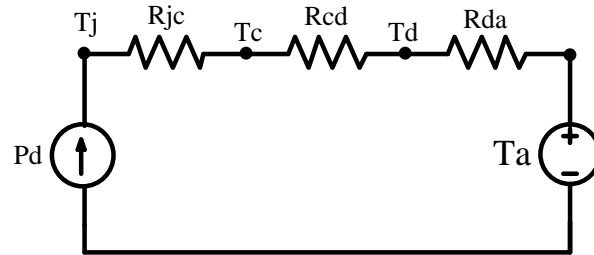
A diferença de temperatura entre a junção e o ambiente é definida em função da resistência térmica total entre as duas partes, conforme equação 11.

$$\Delta T = T_j - T_a = P_d. (R_{jc} + R_{cd} + R_{da}) \quad (11)$$

O fluxo de calor da junção para o ambiente pode ser modelado pelo circuito da Fig. 28. No circuito a fonte de corrente representa a potência dissipada em forma de calor e a fonte de tensão representa a temperatura do ambiente.

A potência dissipada em forma de calor é dada em função da potência elétrica aplicada sobre o LED e do coeficiente de eficiência energética do mesmo, conforme equação 12.

Figura 28 - Modelo térmico utilizado para semicondutores em geral.



Fonte: Produção do próprio autor.

$$Pd = Vd \cdot Id \cdot (1 - \eta) \quad (12)$$

Na Tabela 7 estão os valores calculados de potência dissipada para a condição de operação dos LEDs.

Tabela 7 - Potência dissipada em forma de calor para o ponto de operação escolhido.

| λ (nm) | Modelo | η | Vd (V) | Id (A) | Pd (W) | N° |
|----------------|---------------|--------|--------|--------|--------|----|
| 460 | LED-P1-D-Blue | 0,26 | 2,97 | 0,167 | 0,367 | 1 |
| 400 | IN-K2PUV | 0,18 | 3,21 | 0,167 | 0,427 | 1 |

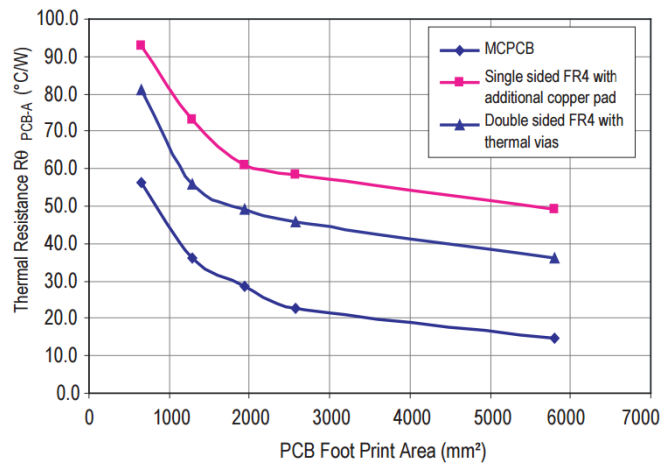
Fonte: Produção do próprio autor.

Como pode ser visto na Fig. 26 a potência radiante emitida pelo LED, tem relação inversa com sua temperatura de junção. Para se alcançar uma boa relação entre potência radiante, tempo de vida útil e tamanho do dissipador, optou-se por trabalhar com a temperatura de 100 °C. A lâmpada será utilizada em ambiente de lavoura e ficará encerrada em um tubo de acrílico, portanto, considerou-se uma temperatura ambiente, no interior do tubo, de 55 °C.

A metodologia utilizada para projeto é baseada na nota de aplicação denominada “*Thermal Management of Avago High Power LED Emitter*”, da empresa Avago Technologies.

As curvas da Fig. 29 são resultados de simulação, que possibilitam dimensionar a área de cobre necessária para garantir a temperatura adequada na junção do semicondutor. As curvas representam diferentes configurações de materiais. A curva superior é para placas de circuito impresso com núcleo de alumínio. A intermediária é para placa de circuito impresso de RF4 com 1,6 mm e 35 μ m (1 oz) de cobre. A inferior é para placas de FR4 dupla face com 1,6 mm e 35 μ m (1 oz) e com vias térmicas em baixo do encapsulamento do componente.

Figura 29 - Resistência térmica em função da área de PCI simples e dupla face de FR4.



Fonte: Nota de aplicação Avago Technologies.

Com a equação 13 é possível calcular a mínima resistência térmica da placa de circuito impresso para o ambiente (R_{PCB-A}) para se obter o valor desejado de temperatura na junção dos semicondutores.

$$R_{PCB-A} = \frac{T_j - T_a}{P_d} - R_{jc} - R_{cd} \quad (13)$$

Na Tabela 8 estão os dados que serviram de base para o cálculo e a área necessária de placa de circuito impresso de FR4 face simples 1 oz para atender a especificação de temperatura na junção dos LEDs.

Tabela 8 - Resultados do projeto do dissipador.

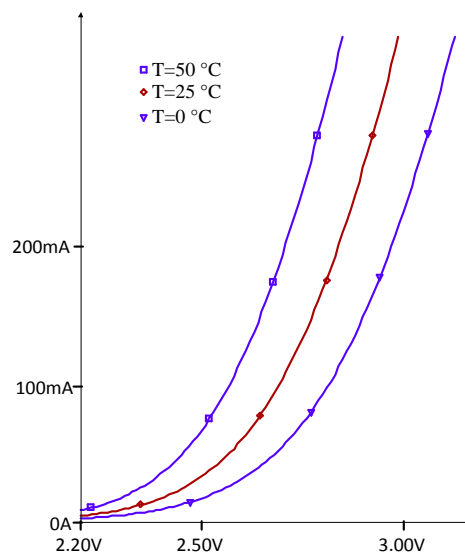
| Modelo | R_{jc} (°C/W) | R_{cd} (°C/W) | T_j (°C) | T_a (°C) | R_{PCB-A} (°C/W) | Área (mm ²) |
|---------------|-----------------|-----------------|------------|------------|--------------------|-------------------------|
| LED-P1-D-Blue | 10 | 1 | 100 | 55 | 127,5 | 690 |
| IN-K2PUV | 10 | 1 | 100 | 55 | 94,4 | 690 |

Fonte: Produção do próprio autor.

5 REGULAÇÃO DA CORRENTE SOBRE LEDS

A corrente direta sobre os diodos emissores de luz determina o fluxo radiante emitido pelos mesmos, conforme visto na Fig. 25 do item 4.3. Por isto costuma-se regular a corrente sobre os mesmos. Outra característica relevante, que reforça a necessidade de regular a corrente, e não a tensão, é a avalanche térmica causada pelo aumento da temperatura de junção. Na Fig. 30 estão as curvas de V_d por I_d de um LED para diferentes temperaturas, nas quais se observa o aumento da corrente, para uma mesma tensão, conforme a temperatura no dispositivo aumenta.

Figura 30 - Variação na corrente I_d em função da tensão V_d para as temperaturas de 0° , 25° e 50° C.



Fonte: Produção do próprio autor.

Este capítulo trata então do projeto de um conversor *boost* para regulação da corrente sobre os diodos emissores de luz. As possibilidades de configuração da lâmpada discutidas no capítulo quatro são vistas neste capítulo como cargas para o conversor. Na Tabela 9 estão os valores de tensão e potência de saída para as condições de seis, oito e nove LEDs em série.

Tabela 9 - Características das cargas do conversor.

| Nº de faces | Nº de LEDs por face | Corrente nos LEDs (mA) | Tensão de entrada (V) | Tensão de saída (V) | Potência sobre os LEDs (W) |
|-------------|---------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|
| 3 Faces | 2 | 166,7 | 12 | 18,77 | 3,13 |
| | 3 | | | 28,55 | 4,76 |
| 4 Faces | 2 | | | 24,47 | 4,08 |

Fonte: Produção do próprio autor.

5.1 PROJETO DO CONVERSOR BOOST.

O projeto do conversor foi feito considerando-se o pior caso de tensão e potência de saída, que é quando a carga é a lâmpada de nove LEDs. A Tabela 10 apresenta os parâmetros a partir dos quais foram calculados os esforços de tensão e corrente nos semicondutores, valores de indutância e capacitância e esforços de tensão e corrente sobre os elementos passivos.

Tabela 10 - Parâmetros do Projeto do Conversor.

| Grandeza | Símbolo | Unidade | Valor | | |
|----------------------------------|-------------------|---------|--------|--------|-----------------------|
| | | | Mínimo | Típico | Máximo |
| Tensão de entrada | V _{in} | V | 11,0 | 12 | 13,5 |
| Tensão de saída | V _{out} | V | 26,0 | 28,55 | 29 |
| Corrente de entrada | I _L | A | 0,394 | 0,407 | 0,430 |
| Corrente de saída | I _{out} | A | | 0,167 | |
| Frequência de comutação | f _s | Hz | | 250 k | |
| Ondulação da corrente de entrada | ΔI _L | A | | | 0,65.I _L |
| Ondulação da tensão de saída | ΔV _{out} | V | | | 0,01.V _{out} |
| Razão cíclica | D | | 0,483 | 0,552 | 0,611 |

Fonte: Produção do próprio autor.

A tensão máxima de bloqueio da chave é dada por:

$$V_{S,máxima} = V_{out} = 28,1 V \quad (17)$$

A corrente média na chave é dada pela equação 18:

$$I_{S,média} = \frac{1}{T} \int_0^{T.D} I_L \cdot dt = I_L \cdot D = 0,263 A \quad (18)$$

A corrente eficaz na chave é dada pela equação 19:

$$I_{S,eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{D.T} I_L^2 \cdot dt} = \sqrt{D} \cdot I_L = 0,336 A \quad (19)$$

A tensão máxima de bloqueio do diodo é igual a tensão máxima de bloqueio da chave.

A corrente média no diodo é dada pela equação 20:

$$I_{D,média} = \frac{1}{T} \int_{T.D}^T I_L \cdot dt = I_L \cdot (1 - D) = 0,167 A \quad (20)$$

A corrente eficaz no diodo é dada pela equação 21:

$$I_{D,eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{D.T}^T I_L^2 \cdot dt} = \sqrt{1-D} \cdot I_L = 0,268 \text{ A} \quad (21)$$

No indutor a corrente média aproximadamente igual a eficaz devido à baixa ondulação desejada. A corrente eficaz no capacitor é dada pela equação 22.

$$I_{C,eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{D.T} (I_L - I_{out})^2 \cdot dt + \int_{D.T}^T (-I_{out})^2 \cdot dt \right)} = 0,209 \text{ A} \quad (22)$$

O cálculo da indutância deve respeitar a ondulação desejada, que é de 65% da corrente no indutor. Assim, o valor de indutância pode ser calculado pela equação 23.

$$L = \frac{V_{in}}{\Delta I_L} \cdot \frac{D}{F_s} = 120,0 \mu H \quad (23)$$

O valor da capacitância de saída é dado pela equação 24:

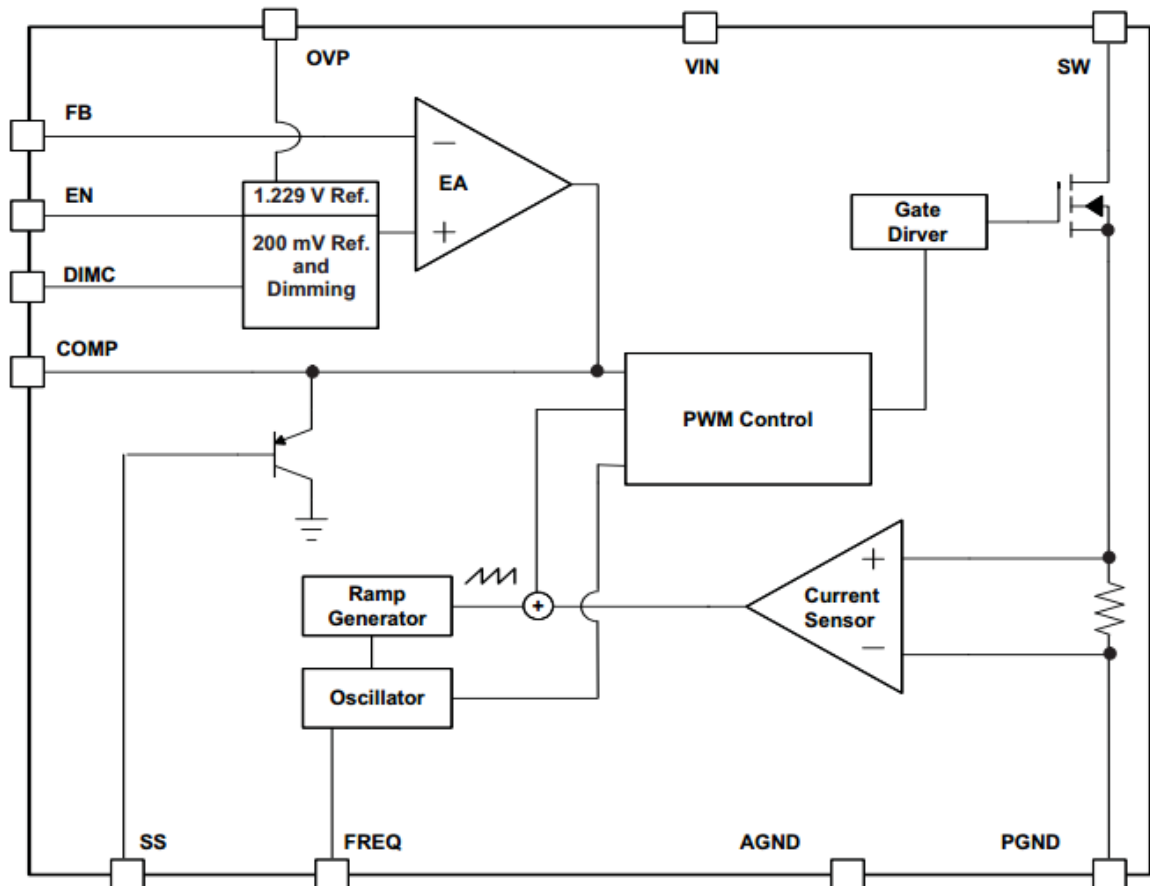
$$C_{out} = \frac{I_{out} \cdot D}{F_s \cdot \Delta V_{out}} = 1,4 \mu F \quad (24)$$

5.2 ESCOLHA DOS COMPONENTES

A escolha dos componentes para execução do projeto partiu de dois objetivos: compactar o tamanho físico da lâmpada e ter alta a eficiência no driver de LEDs. Para tanto, investigou-se circuitos integrados (CI's) que trazem o maior número de funcionalidades incluídos ao chip, possibilitando assim alcançar os objetivos. A partir disto, optou-se pelo CI TPS61500 da Texas Instruments que possui internamente os circuitos de controle e acionamento da chave, o sensor de corrente e a chave.

Na Fig. 31 observa-se o diagrama funcional do CI. Este dispositivo possibilita o controle do conversor em modo de corrente de pico na chave.

Figura 31 - Diagrama funcional do circuito integrado TPS61500.



Fonte: TPS61500 Datasheet.

No diagrama, percebe-se os componentes relacionados com o controle, que são o Gerador de rampa, (*Ramp generator*), oscilador (*Oscillator*), Controle PWM (*PWM control*), sensor de Corrente (*Current sensing*), e amplificador de erro (*EA*). No item 5.5 será discutido detalhadamente os demais aspectos referentes ao controle do conversor. Também estão no diagrama funcional do CI o driver de gatilho (*Gate Driver*) e a chave. Este dispositivo possui frequência de operação ajustável de 200 kHz a 2,2 MHz e também conta com a função de softstart (pino SS) e proteção contra sobretensão de saída (pino OVP). A chave integrada ao CI suporta corrente de até 3 A e tensão de bloqueio de 40 V.

Os demais componentes de potência do conversor são apresentados na Tabela 11, assim como as grandezas relacionadas aos componentes que influenciam no controle da corrente de saída e no rendimento do conversor. O indutor e o capacitor foram escolhidos em função da disponibilidade do modelo no estoque do laboratório de eletrônica de potência. Para reduzir a resistência série equivalente, utilizou-se dois capacitores em paralelo.

Tabela 11 - Componentes de Potência do Conversor.

| Componente | Código | Grandeza | Valor |
|------------|---------------|--------------------------------------|----------------|
| Chave | TPS61500 | $R_{DS(on)} (\Omega) - V_{GS}=3,6 V$ | 0,35 |
| | | Time Rise (ns) | 10 |
| | | Time Fall (ns) | 10 |
| | | $V_{DS} (V)$ | 40 |
| Diodo | 1N5822 | Tensão direta (V) | 0,3 |
| | | Tensão Reversa (V) | 40 |
| | | Corrente média (A) | 3,0 |
| Indutor | SCRH127 | Indutância (H) | 100 μ |
| | | Resistência série (Ω) | 0,22 |
| | | Corrente de saturação (A) | 1,7 |
| Capacitor | TAP 475(*)035 | Capacitância (F) | 2.(4,7 μ) |
| | | RSE (Ω) – 100 kHz | 3,0 |
| | | Tensão máxima (V) | 35 |

Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 CÁLCULO DE PERDAS

A perda de comutação na chave pode ser estimada pela equação 25:

$$P_{com_chave} = \frac{f_s \cdot (t_{rise} + t_{fall}) \cdot I_L \cdot V_o}{2} = 0,0267 W \quad (25)$$

A perda de condução na chave é calculada pela equação 26:

$$P_{cond_chave} = I_L^2 \cdot D \cdot R_{DS(on)} = 0,0446 W \quad (26)$$

A perda de condução do diodo é dada pela equação 27. O valor da resistência R_d foi obtido através da inclinação da curva de tensão direta por corrente direta do diodo no ponto de operação.

$$P_{cond_diodo} = I_L \cdot (1 - D) \cdot V_f + R_d \cdot (I_{D,eficaz})^2 = 0,0611 W \quad (27)$$

A perda de comutação no diodo é considerada desprezível, por se tratar de um diodo de tecnologia Shottky. A energia dissipada no filtro de saída é obtida pela equação 28.

$$P_C = (I_{C,eficaz})^2 \cdot R_{se} = 0,0327 W \quad (28)$$

A potência dissipada por efeito Joule no fio do indutor é determinada pela equação 29. A perda no núcleo do indutor não foi considerada, pois não se encontrou dados confiáveis

sobre o modelo utilizado. A corrente eficaz foi considerada igual a corrente média devido a baixa ondulação.

$$P_{indutor} = (I_{Leficaz})^2 \cdot R_s = 0,0655 \text{ W} \quad (29)$$

A perda devido ao consumo do circuito integrado é dada pela equação 30:

$$P_{chip} = V_{in} \cdot I_Q = 0,042 \text{ W} \quad (30)$$

A perda sobre o resistor shunt de medição da corrente de saída é dada conforme equação 31:

$$P_{shunt} = (I_d)^2 \cdot R_{shunt} = 0,0334 \text{ W} \quad (31)$$

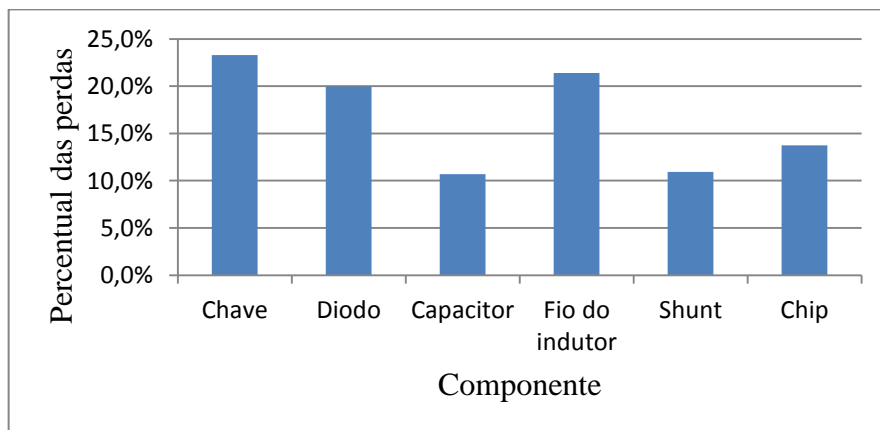
$$P_{total} = 0,306 \text{ W}$$

Com este resultado é possível calcular o rendimento do conversor nesta condição de operação:

$$\eta_c = 1 - \frac{P_{total}}{P_{9LED's}} = 0,936$$

Este rendimento é uma estimativa aproximada, uma vez que a perda no núcleo do indutor não foi considerada neste trabalho. Na Fig. 32 temos a distribuição percentual da perda sobre os componentes.

Figura 32 - Distribuição das perdas por componente.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.4 SIMULAÇÃO EM MALHA ABERTA

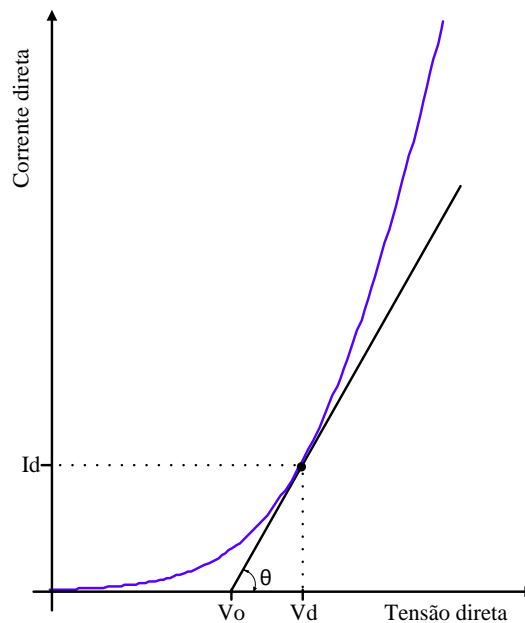
A simulação numérica do conversor em malha aberta é feita com o propósito de se verificar o funcionamento e os esforços, considerando-se os componentes escolhidos para o projeto (Tabela 10). Além destes, também é necessário considerar o comportamento de um diodo emissor de luz, do ponto de vista de carga de um conversor, e obter os seus parâmetros elétricos.

A característica elétrica dos LEDs é regida pela equação 32. Observa-se a relação exponencial da corrente direta I_d com a tensão direta V_d sobre o LED.

$$I_d = I_s \cdot e^{\frac{V_d}{nVT}} \quad (32)$$

O modelo elétrico aproximado de um LED é obtido a partir da reta tangente a curva I_d (V_d) em um ponto de operação. A Fig. 33 apresenta a curva real e sua linearização no ponto de operação.

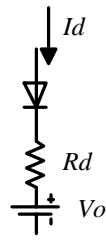
Figura 33 - Curva que representa o modelo ideal do LED.



Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da reta tangente a curva real em um ponto de operação obtêm-se as grandezas que compõem o modelo elétrico do diodo emissor de luz que são a tensão V_o e a resistência R_d . No esquema da Fig. 34, o diodo é ideal e V_o é a tensão mínima necessária para que o semicondutor comece a conduzir corrente elétrica no sentido direto.

Figura 34 - Modelo Elétrico do LED.



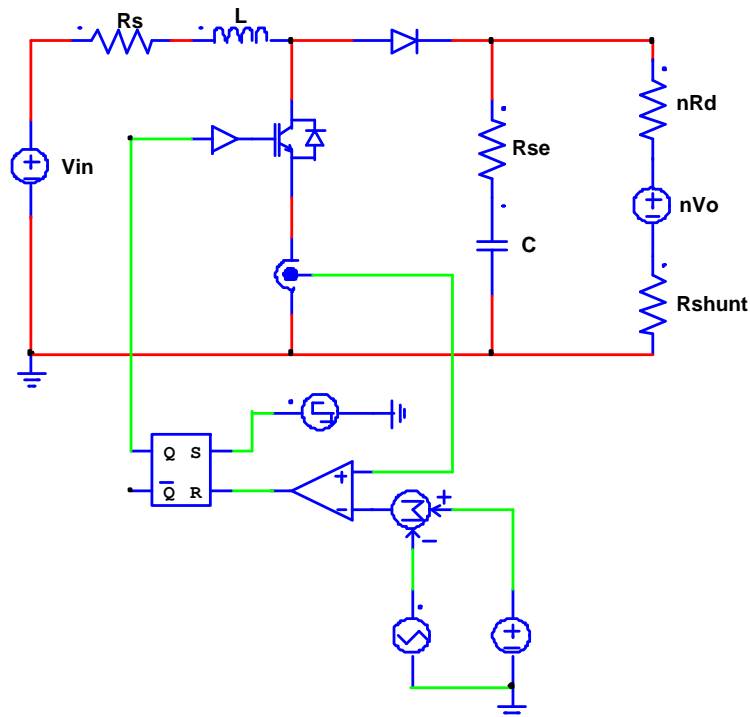
Fonte: Produção do próprio autor.

A partir do coeficiente angular da reta obtêm-se os valores da resistência R_d , conforme (33).

$$tg\theta = \frac{1}{R_d} = \frac{I_d - 0}{V_d - V_o} \quad (33)$$

Na Fig. 35 está o circuito de simulação. Os valores de R_s , L , R_{se} , C são o que estão na Tabela 11. Os valores de V_o e R_d foram obtidos a partir das folhas de dados dos fabricantes e da equação 33 para o LED azul 460 nm, e são 2,97 V e 0,66 Ω , respectivamente. O número de LEDs em série é a letra n , sendo seu valor igual a 9.

Figura 35 - Circuito de simulação do conversor Boost.



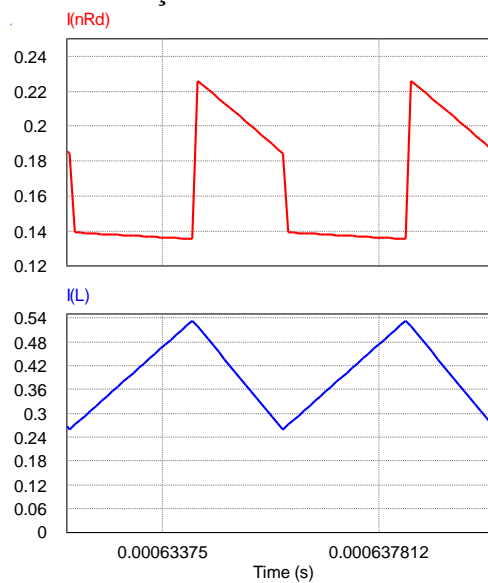
Fonte: Produção do próprio autor.

O valor de R_{shunt} é definido pela equação 32, onde V_{fb} é o valor de referência do compensador e I_d é a corrente sobre os LEDs.

$$R_{shunt} = \frac{V_{fb}}{I_d} = \frac{0,2}{0,167} = 1,2 \Omega \quad (32)$$

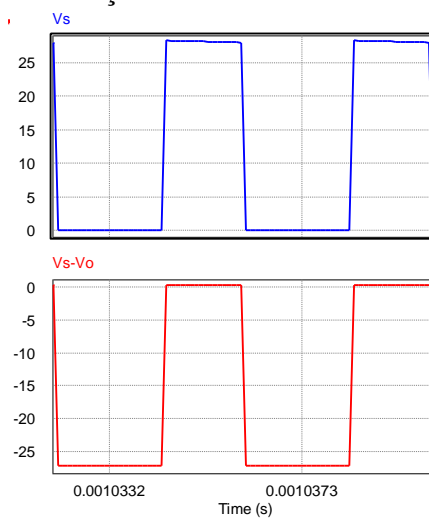
Os gráficos da Fig. 36 correspondem às formas de onda da corrente de saída e da corrente no indutor. Nota-se o efeito da resistência série equivalente do capacitor sobre o formato e os níveis de ondulação da corrente de saída. A corrente no indutor possui um valor médio de 0,39 A e sua ondulação é de 76%. Este valor difere do calculado, pois o indutor utilizado foi de 100 μ H ao invés de 120 μ H.

Figura 36 - Ondulação da corrente de saída e no indutor.



Fonte: Produção do próprio autor.

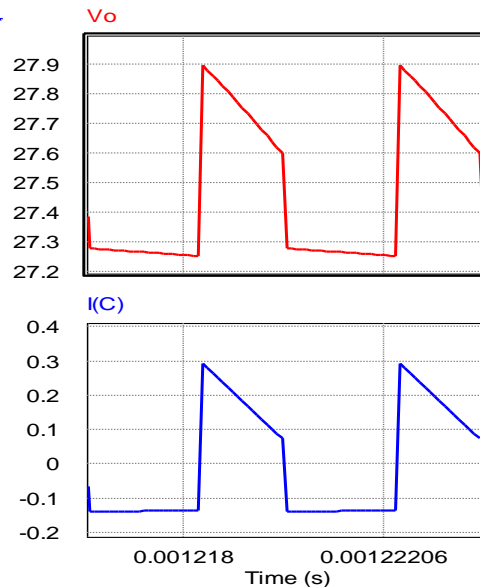
Figura 37 - Esforços de tensão sobre a chave e o diodo.



Fonte: Produção do próprio autor.

A ondulação da tensão de saída é 2,1 %, devido ao redimensionamento da capacitância, pois foi calculada de 1,4 μF e foi utilizado dois capacitores de 4,7 μF em paralelo para se reduzir a resistência série equivalente (Fig. 38).

Figura 38 - Ondulação da tensão de saída e a corrente no capacitor.



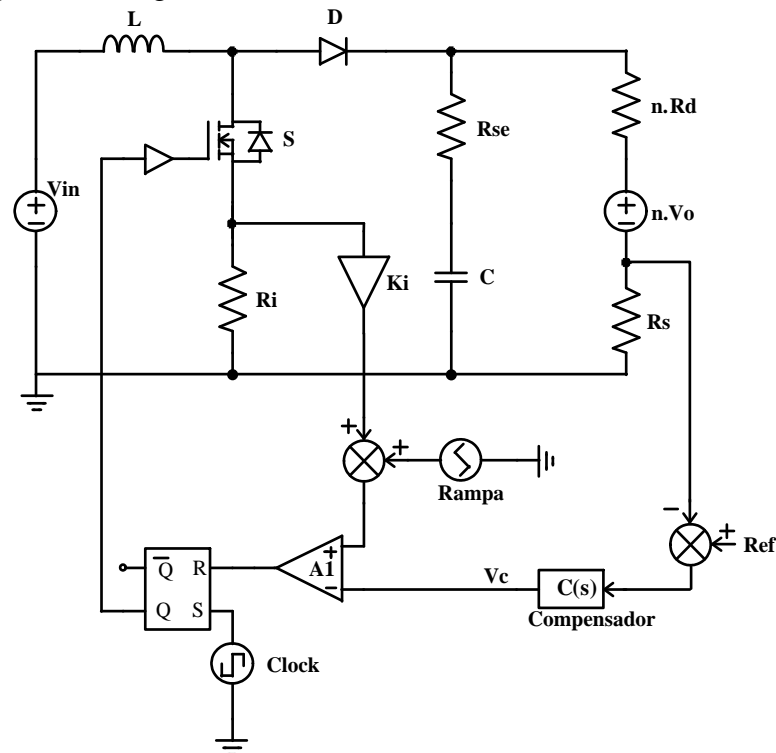
Fonte: Produção do próprio autor.

5.5 CONTROLE DA CORRENTE DE SAÍDA DO CONVERSOR

Os LEDs, para seu adequado funcionamento, necessitam de corrente constante, por isto é necessário controlar a corrente de saída do conversor. Devido à necessidade de redução de tamanho e custo da lâmpada, optou-se pelo CI apresentado no item anterior para controle e acionamento da chave. No diagrama funcional do TPS61500 é possível observar que ele foi projetado para operar com controle em modo de corrente de pico na chave. Este método é bastante adotado na indústria, devido a sua simplicidade e baixo custo (RIDLEY, 2006).

O diagrama de funcionamento de um controlador em modo de corrente de pico na chave está ilustrado na Fig. 39. O sinal de controle V_c e a forma de onda da corrente na chave são mostrados na Fig. 40. Um pulso de clock na entrada S do latch inicia o período de chaveamento, fazendo com que a saída Q fique em nível alto e ligue a chave S. Enquanto a chave conduz sua corrente é igual a corrente no indutor L. Esta corrente cresce com uma derivada que depende da tensão de entrada e do valor de L. Quando a corrente na chave fica igual ao sinal V_c a chave abre e a corrente no indutor começa a decrescer até o final do período de chaveamento.

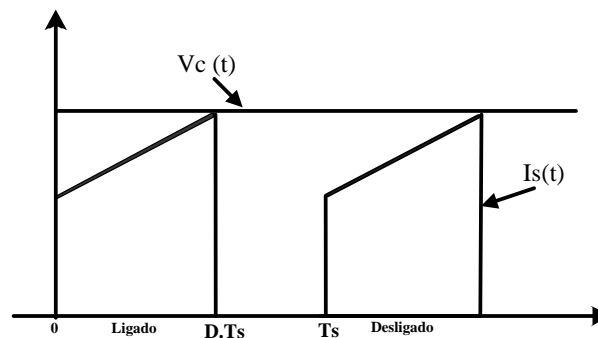
Figura 39- Diagrama de controle da corrente de saída do conversor.



Fonte: Produção do próprio autor.

O controlador deve medir a corrente na chave, neste caso com um resistor shunt, R_i , e dar um ganho K_i . O resultado da multiplicação da tensão sobre o resistor R_i e do ganho K_i é somado a uma rampa, para então ser comparado com o sinal de controle V_c (Fig. 40). A adição da rampa ao sinal lido da corrente na chave é um artifício utilizado para evitar oscilações subharmônicas, inerentes a esta técnica de controle quando a razão cíclica se aproxima ou ultrapassa a 0,5 (ERICKSON e MAKSIMOVI, 2001; RIDLEY, 2006).

Figura 40 - Sinal de saída do compensador V_c e corrente na chave do conversor boost.

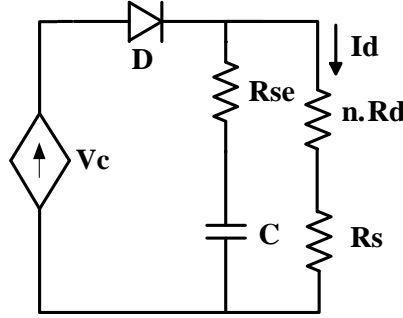


Fonte: Produção do próprio autor.

A planta simplificada utilizada para projetar o compensador $C(s)$ é apresentada na Fig. 41, onde a entrada é uma fonte de corrente dependente do sinal V_c . O resistor $n.R_d$ representa

a resistência R_d de cada LED multiplicada pelo número de LEDs (9) e R_s é a resistência utilizada para medir a corrente na saída. Com estes componentes é possível obter um modelo válido para projetar o compensador de pequenos sinais. (FALIN, 2008).

Figura 41 - Modelo simplificado da planta de controle.



Fonte: Produção do próprio autor

Fazendo o equivalente da impedância vista pela fonte de corrente, temos:

$$Z_{eq} = \frac{S.C.Rse(n.Rd + Rs) + nRd + Rs}{S.C.(Rse + n.Rd + Rs) + 1} \quad (33)$$

A impedância equivalente pode ser vista como o quociente da tensão na saída do conversor sobre a corrente da fonte dependente de V_c .

$$Z_{eq} = \frac{V_o}{I(V_c)} = \frac{S.C.Rse(n.Rd + Rs) + nRd + Rs}{S.C.(Rse + n.Rd + Rs) + 1} \quad (34)$$

Deseja-se controlar a corrente de saída I_d , que é resultado do quociente da tensão de saída pela soma das resistências nR_d e R_s .

$$I_d = \frac{V_o}{nR_d + R_s} \quad (35)$$

Isolando-se V_o da equação 35, colocando-no na equação 34 e fazendo as devidas divisões, temos:

$$\frac{I_d}{I(V_c)} = \frac{S.C.Rse + 1}{S.C.(Rse + n.Rd + Rs) + 1} \quad (36)$$

O ganho da medição da corrente I_d é igual ao valor do resistor R_s .

Falin (2008) inclui um ganho denominado “termo de transcondutância”, descrito na equação 37:

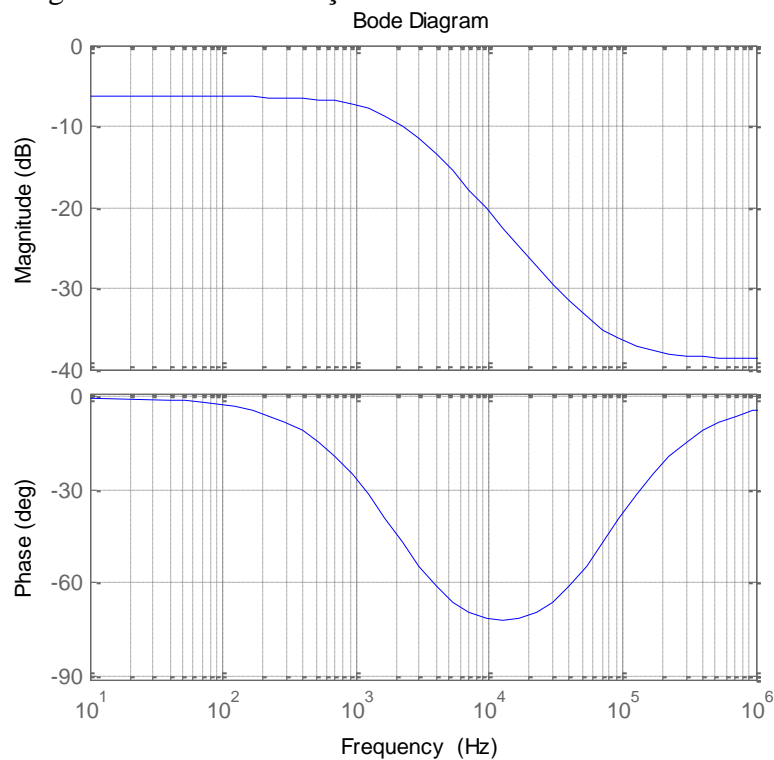
$$K_G = \frac{(1 - D)}{R_i} \quad (37)$$

Multiplicando as Equações 37, 36, o ganho de medição da corrente I_d , o ganho K_i e o termo de transcondutancia, temos a função de transferência em malha aberta (F.T.M.A) da planta.

$$G(s) = \frac{(1 - D). R_s}{K_i. R_i} \cdot \frac{S. C. R_{se} + 1}{S. C. (R_{se} + n. R_d + R_s) + 1} \quad (38)$$

Na Fig. 42 temos o diagrama de bode da F.T.M.A. considerando-se que a multiplicação entre K_i e R_i é igual a 1.

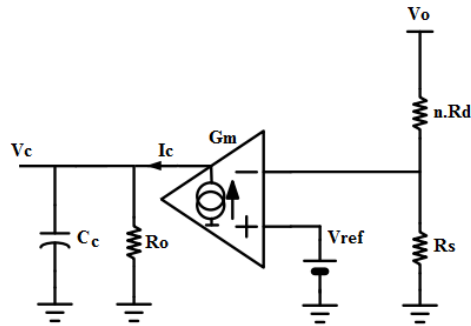
Figura 42 - Diagrama de bode da função de transferência em malha aberta da planta.



Fonte: Produção do próprio autor.

O amplificador de erro existente no circuito integrado TP61500 é um amplificador de transcondutância ao invés de tensão para tensão. Diferentemente do amplificador de tensão para tensão, que exige a realimentação negativa, o amplificador de transcondutância opera em malha aberta. Na Fig. 43 está ilustrado um compensador do tipo 1 com amplificador de transcondutância, onde G_m é o ganho de transcondutância, R_o é a impedância de saída do amplificador e C_c é capacitor de compensação.

Figura 43 - Compensador do tipo 1 com amplificador de trancondutância

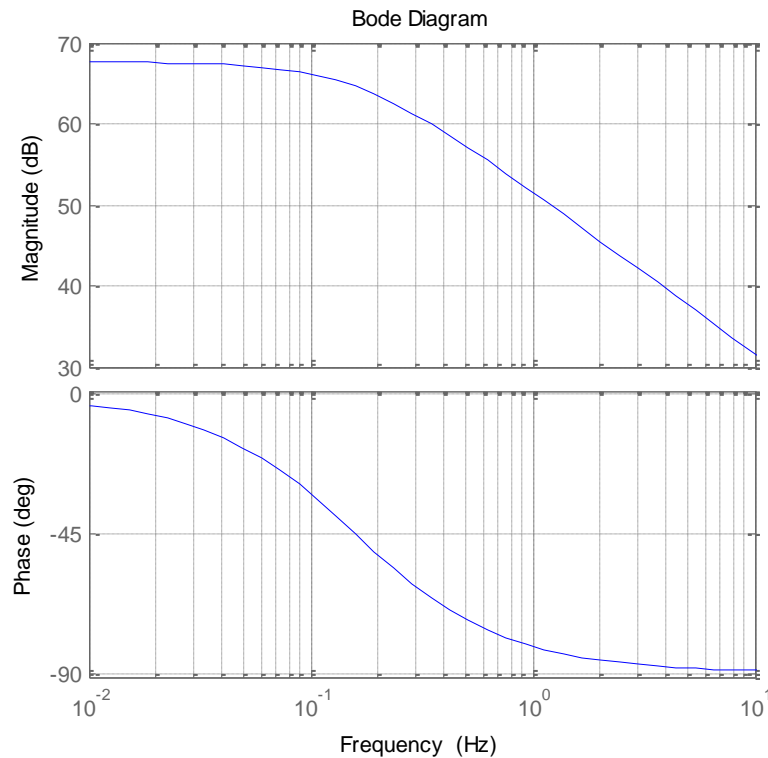


Fonte: Produção do próprio autor, 2016, baseado em LEE, 2014.

A equação 39 representa a função de transferência do compensador. Na Fig. 44 está o diagrama de bode da função de transferência do compensador considerando os valores fornecidos pela fabricante do circuito integrado, onde C_c é igual a 100 nF, R_o é igual a 10 M Ω e G_m é igual a 240 μ A/V.

$$C(S) = \frac{G_m \cdot R_o}{C_c \cdot R_o + 1} \quad (39)$$

Figura 44 - Diagrama de bode da função de transferência do compensador.



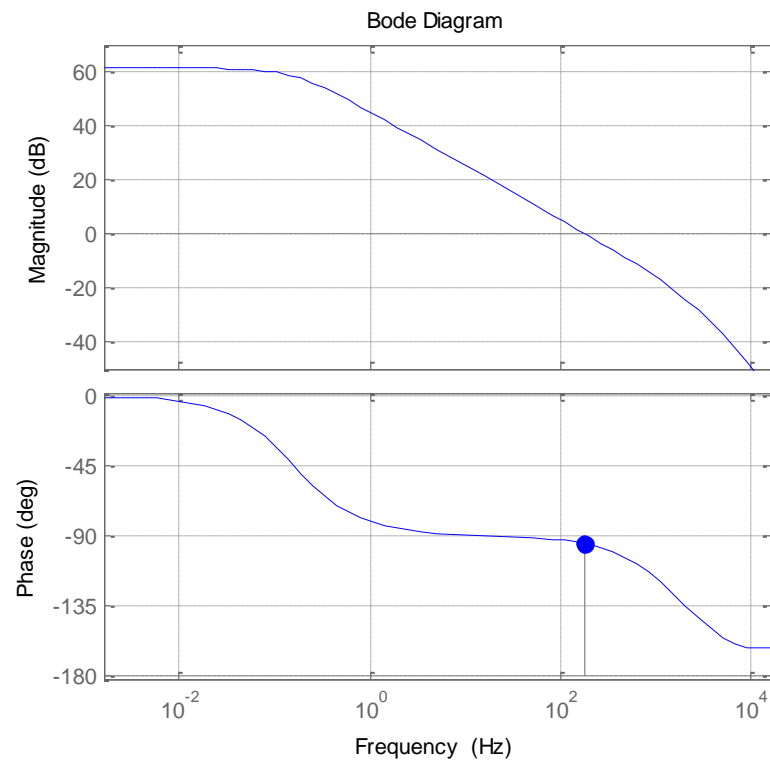
Fonte: Produção do próprio autor.

A equação 40 é o resultado da multiplicação da função de transferência da planta e do compensador.

$$G(s).C(S) = \frac{(1 - D).Rs}{Ki.Ri} \cdot \frac{S.C.Rse + 1}{S.C.(Rse + n.Rd + Rs) + 1} \quad (40)$$

Na Fig. 45 observa-se a fase e o ganho em função da frequência da F.T.M.A da planta multiplicada pela função de transferência do compensador. Com o diagrama é possível verificar o ganho em baixas frequências e as margens de ganho e fase na frequência de cruzamento por zero. O ganho em baixas frequências é elevado, 61 dB, e a frequências de cruzamento por zero é 180 Hz sendo que a margem de fase neste ponto é de -95 graus.

Figura 45 - Margem de ganho e margem de fase da F.T.M.A da planta e compensador.



Fonte: Produção do próprio autor.

6 OPERAÇÃO AUTONOMA DA LÂMPADA COM UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.

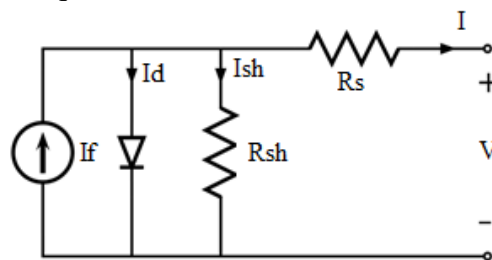
Este capítulo trata dos aspectos referentes ao funcionamento da lâmpada de maneira autônoma, independente do trabalho humano, para carregar as baterias ou ligá-la e desligá-la. Os seguintes assuntos serão abordados:

- ✓ Projeto de um circuito de regulação de tensão da bateria para possibilitar a recarga da mesma com energia solar, proveniente de um painel solar fotovoltaico de silício cristalino com 36 células em série;
- ✓ Dimensionamento do painel solar para carregar em um dia de sol uma bateria de chumbo ácido de 7Ah de capacidade da carga;
- ✓ Projeto do algoritmo de supervisão do sistema eletrônico, que é responsável pelas seguintes tarefas:
 - Identificação do anoitecer através da leitura da tensão no painel solar.
 - Contagem do tempo de acionamento da lâmpada;
 - Desligar a lâmpada em caso de a tensão na bateria ser menor que 10,5 V;
 - Armazenar o tempo transcorrido desde o acionamento da lâmpada até o instante que a lâmpada for desligada, seja por ter alcançado o tempo programado, seja por carga baixa, e indicar com o acendimento de LEDs o tempo transcorrido;
 - Regulação da tensão na bateria quando esta encontrar-se em estado de absorção de carga.

6.1 CIRCUITO PARA REGULAÇÃO DA TENSÃO E PROTEÇÃO DA BATERIA

A energia elétrica gerada em um painel solar fotovoltaico pode ser transferida para uma bateria de maneira direta ou com a utilização de conversores chaveados. Isto é possível pela característica elétrica dos painéis solares, que se comportam como fontes de corrente dependentes da radiação solar (Fig. 46).

Figura 46 - Modelo equivalente elétrico de uma célula solar fotovoltaica.



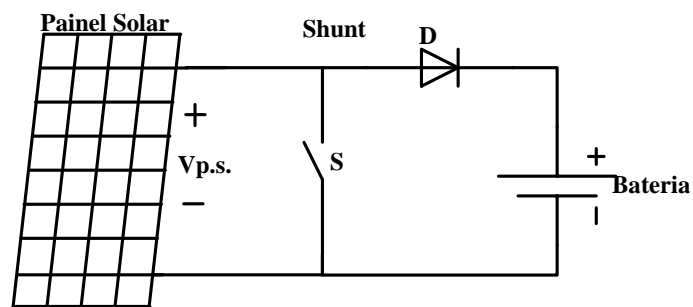
Fonte: Produção do próprio autor.

O emprego de conversores chaveados possibilita utilizar painéis solares com a tensão inferior a das baterias, assim como painéis solares com tensões bem superiores que a das baterias. Isto se deve ao fato que estes dispositivos podem elevar as tensões, bem como converter a diferença de tensão entre o painel e a bateria em corrente elétrica.

A transferência direta de energia de um painel solar para a bateria exige que a tensão no painel solar esteja acima da tensão da bateria, porém se estiver demasiadamente acima, haverá muita perda da energia. Se estiver em um ponto crítico, o aumento da temperatura no painel pode reduzir a tensão do mesmo e impossibilitar que a bateria seja carregada (EGIDO e LORENZO, 1986).

O circuito da Fig. 47, conhecido como regulador *shunt*, possibilita a transferência direta de energia de um painel solar para uma bateria (USHER e ROSS, 1998).

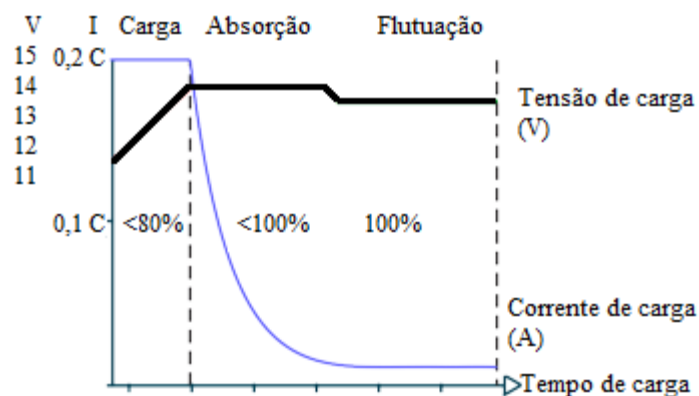
Figura 47 - Regulador shunt para sistemas fotovoltaicos.



Fonte: Produção do próprio autor.

A transferência direta de energia com este circuito tem duas etapas, que são definidas pelo comportamento da bateria. Na Fig. 48 observam-se as etapas de *Carga*, *Absorção* e *Flutuação* de uma bateria.

Figura 48 - Etapas de carga de uma bateria



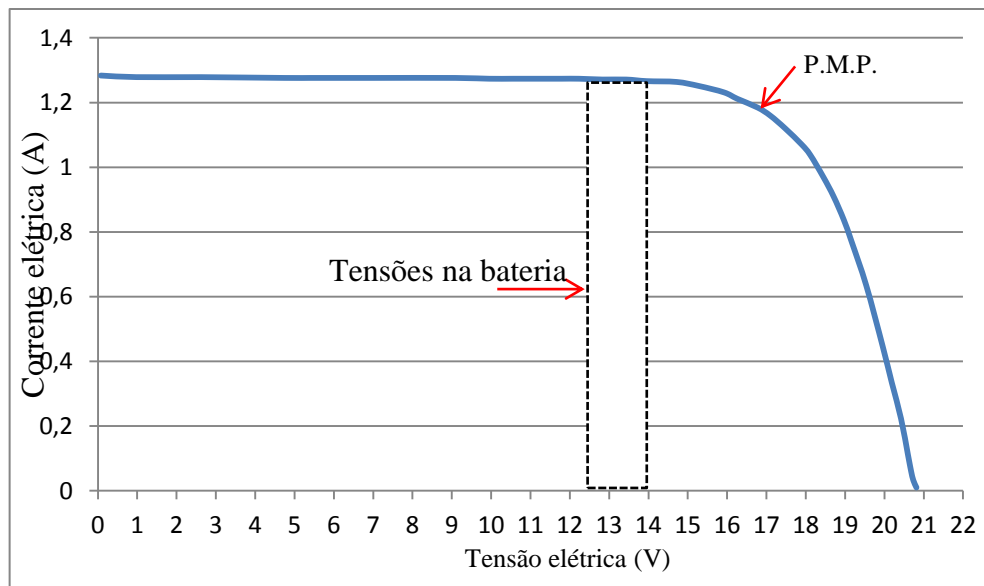
Fonte: Produção do próprio autor.

Na etapa de *Carga*, a bateria encontra-se com menos de 80% de sua capacidade de armazenamento, então o regulador *shunt* não opera, permitindo que toda a corrente elétrica gerada no painel circule para o elemento armazenador de energia. Na etapa de *absorção* é necessário garantir que a tensão na bateria mantenha-se constante. Nesta etapa a chave S é comandada a conduzir toda vez que tensão da bateria ultrapassa o valor de set point, oferecendo um caminho de baixa impedância para a corrente do painel.

Com este circuito é possível carregar baterias com energia elétrica proveniente de painéis solares desde que a corrente de curto circuito máxima do painel não ultrapasse a corrente de carga sugerida pelo fabricante da bateria.

Os painéis solares de silício cristalino, com 36 células em série são amplamente ofertados no mercado. Sua tensão de operação é cerca de 17 V que pode variar conforme a qualidade do painel e a temperatura. Na Fig. 49 observa-se a curva I-V do painel solar modelo 420J da empresa Solar Electric Supply INC para 25° C e 1000 W/m² de irradiação solar.

Figura 49 - Curva de I x V de um painel de silício monocristalino de 36 células em série.



Fonte: Produção do próprio autor.

Com um painel de 36 células e o regulador *shunt* é possível carregar uma bateria de 12 V com baixo custo, baixas perdas e forte robustez. Na Fig. 49 verifica-se os possíveis valores de tensão sobre a bateria durante um dia de carga. O menor valor de tensão que a bateria irá operar foi obtido experimentalmente, e é 12,5 V, conforme pode ser verificado nos resultados práticos deste trabalho, no item 7.5. O maior valor é dado pelo seu set point de carga, que neste caso é de 14,0 V.

A eficiência (η_g) deste método de carga pode ser obtida através de (38), onde V_b é a tensão na bateria, $I_{C.C.}$ a corrente na bateria e $P_{M.P.}$ é potência disponível no painel, caso ele estivesse operando no ponto de máxima potência (P.M.P).

$$\eta_g = \frac{V_b \cdot I_{C.C.}}{P_{M.P.}} \quad (38)$$

É possível ter uma estimativa da eficiência global do sistema composto pela bateria, regulador *shunt* e painel solar considerando a curva da Fig. 49 e alguns valores de tensão da bateria durante um dia de carga (Tabela 12).

Tabela 12 - Eficiência do método de carga por transferência direta de energia.

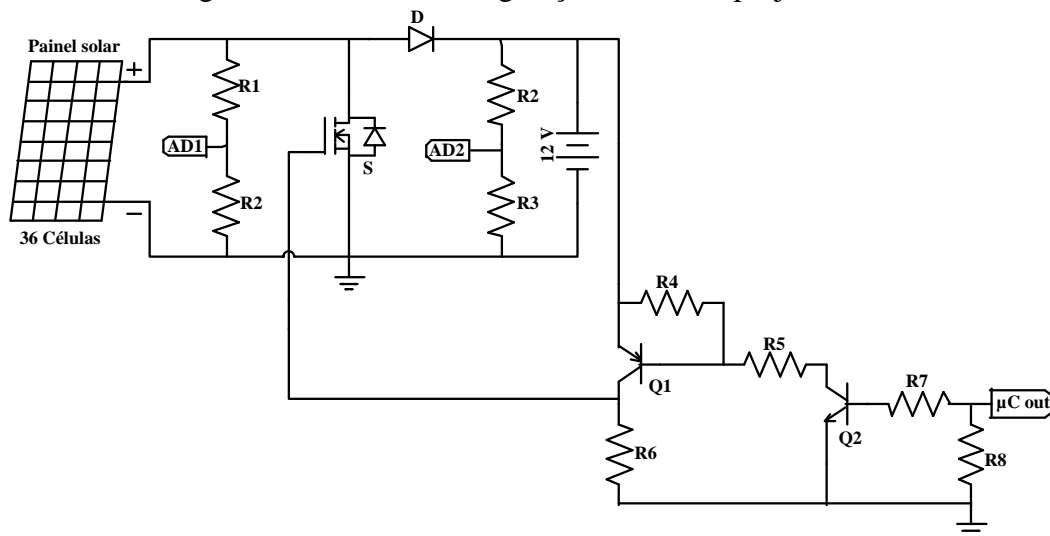
| | | | | |
|----------------|------|------|------|------|
| $P_{P.M.P}$ | 20 W | | | |
| $I_{C.C.}$ (A) | 1,29 | | | |
| V_b (V) | 12,5 | 13,0 | 13,5 | 14,0 |
| η_g | 0,80 | 0,83 | 0,87 | 0,90 |

Fonte: Produção do próprio autor.

6.1.1 Projeto dos componentes do regulador *shunt*

Para seu funcionamento o regulador *shunt* necessita de um circuito de acionamento da chave. O comando para o circuito de acionamento vem da saída de um microcontrolador (Fig.50). Outros circuitos para medir a tensão no painel solar e na bateria também são necessários. Esta sessão trata do dimensionamento destes componentes.

Figura 50 - Circuito de regulação de tensão projetado.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores dos resistores R2 e R3 dos sensores de tensão foram fixados em 56 K Ω e os valores de R1 e R2 foram calculados para que na entrada analógica do microcontrolador a tensão não seja superior a 3,0 V. Para isto foram considerados os valores máximos de tensão assumidos pela bateria ($V_{bm\acute{a}x}$) e a tensão de circuito aberto do painel solar da Figura 49 ($V_{pm\acute{a}x}$), conforme as equações 40 e 41.

$$R1 = R2. \left(\frac{V_{pm\acute{a}x}}{3,0V} - 1 \right) = 354 \text{ k}\Omega \quad (40)$$

$$R2 = R3. \left(\frac{V_{bm\acute{a}x}}{3,0V} - 1 \right) = 224 \text{ k}\Omega \quad (41)$$

No circuito de acionamento da chave o resistor R6 (330 Ω) permite a descarga da capacitância da chave logo após ter sido retirado o comando.

O resistor R8 tem valor igual a 10 k Ω , sendo de pull Down, e os resistores R4, R5 e R7 foram calculados para garantir que os transistores Q1 e Q2 operem na região de saturação.

$$R7 = \frac{3.3V - 0,7V}{500 \mu A} = 520 \Omega \quad (42)$$

$$R5 = R4 = \frac{14,0 - 0,7V}{2.10 \text{ mA}} = 1,330 \text{ k}\Omega \quad (43)$$

A chave selecionada é do modelo IRF1404 com encapsulamento TO220 AB e o diodo Schottky modelo MBR10100 com encapsulamento TO220 AC. O transistor escolhido suporta 40 V de tensão de bloqueio, o que é suficiente para aplicação, e possui uma resistência série ligado de 0,004 Ω . Estes componentes foram escolhidos visando a mínima geração de calor no circuito e desta forma dispensar a necessidade de dissipador de calor. O cálculo das perdas foi efetuado considerando-se corrente de curto circuito de um painel de 50 W e os dados de R_{dson} da chave, tensão direta e resistência R_d do diodo Schottky.

$$P_{cond_diodo} = I_{cc}.V_f + R_d.(I_{cc})^2 = 3,3A.0,4V + 0,1.(3,3A)^2 = 1,32 \text{ W} \quad (44)$$

$$P_{cond_chave} = R_{dson}.(I_{cc})^2 = 0,004.(3,3A)^2 = 0,043566 \text{ W} \quad (45)$$

A frequência de chaveamento pode variar com o estado de carga da bateria e a corrente máxima que o painel está fornecendo, mas como verificado experimentalmente, não chegou a uma centena de Hertz, portanto as perdas de chaveamento foram desconsideradas.

Considerando-se a temperatura ambiente de 35°C no interior do tubo de acrílico e a resistência térmica junção ambiente fornecida pelos fabricantes, tem-se a temperatura na junção do diodo:

$$T_{j_diodo} = R_{ja} \cdot P - T_A = 60.1,32 - 35^\circ\text{C} = 44,2^\circ\text{C} \quad (46)$$

Observa-se que devido a resistência térmica da junção para o ambiente, a característica deste tipo de encapsulamento e a baixa perda, a elevação de temperatura na junção do componente é desprezível.

6.2 DIMENSIONAMENTO DA BATERIA E DO PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Uma parte significativa do custo de montagem de uma armadilha luminosa autônoma são as baterias. Assim, a corrente sobre os LEDs foi definida com o intuito de que a lâmpada de seis LEDs pudesse funcionar a partir de uma bateria de 7 Ah de capacidade, que é amplamente ofertada no mercado e possui excelente relação entre custo e capacidade de corrente.

O tempo necessário de funcionamento da lâmpada para capturar a bicheira-da-raiz é de oito horas por noite (Hickel, E.R. comunicação pessoal). Dessa forma, estipulou-se empiricamente que a bateria deveria armazenar energia para três noites de autonomia, ou seja, aproximadamente 24 horas.

Na Tabela 13 estão descritas a potência sobre os LEDs, a eficiência (η_L) do conversor obtida experimentalmente, a potência total na entrada do conversor e a corrente de entrada do conversor para cada uma das configurações (seis, oito e nove LEDs em série).

Tabela 13 - Corrente drenada da bateria para cada tipo de lâmpada.

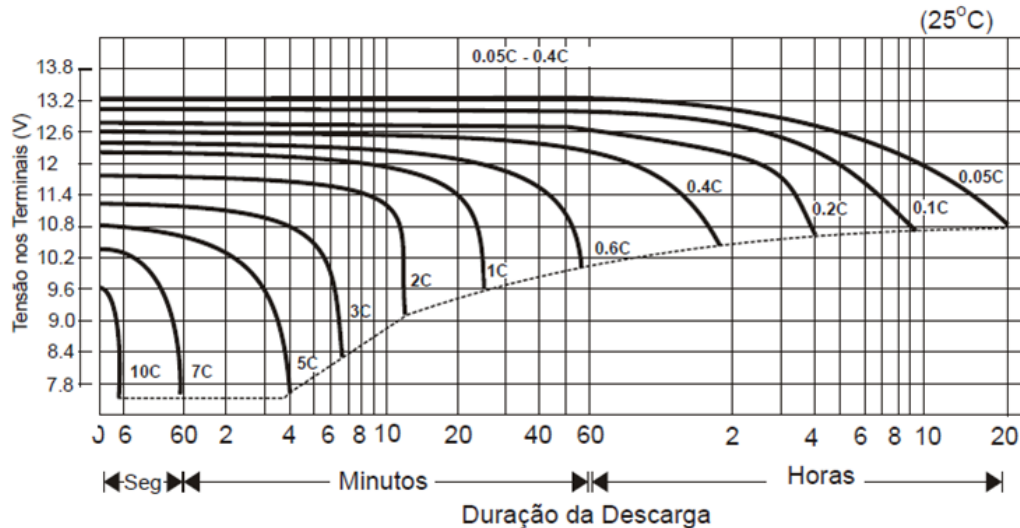
| Nº de LEDs em série | Potência nos LEDs (W) | η_L | Pin (W) | Iin (A) |
|---------------------|-----------------------|----------|---------|---------|
| 6 | 3,13 | 0,892 | 3,51 | 0,292 |
| 8 | 4,08 | 0,934 | 4,37 | 0,364 |
| 9 | 4,76 | 0,933 | 5,10 | 0,425 |

Fonte: Produção do próprio autor.

As curvas da Fig. 51 informam o tempo de descarga de uma bateria de chumbo ácido selada em função da corrente drenada pela carga. A corrente drenada pela lâmpada de seis

LEDs em série é 4,17 % da capacidade total da bateria (7 A.h), portanto, verifica-se que a descarga da bateria para este caso ocorrerá em mais de 20 horas.

Figura 51 - Curvas de descarga de baterias de chumbo ácido seladas.



Para as demais configurações (oito e nove LEDs) o tempo aproximado de descarga está evidenciado na Tabela 14.

Tabela 14 - Tempo de duração da carga de uma bateria de 7 Ah para cada lâmpada.

| Nº de LEDs | I _{in} (A) | Tempo de descarga (horas) |
|------------|---------------------|---------------------------|
| 6 | 0,292 | >20 |
| 8 | 0,364 | 16<t<19 |
| 9 | 0,425 | 14<t<17 |

Fonte: Produção do próprio autor.

Para as lâmpadas compostas de 8 e 9 LEDs em série a bateria de 7 Ah não se mostra adequada. Para estas sugere-se o uso de baterias maiores para que o tempo de vida útil das mesmas seja preservado e a autonomia da lâmpada fique garantida. Além do mais, a lâmpada de nove LEDs foi projetada para atrair diversas espécies, que podem ser capturadas ao longo de toda a noite, portanto deve funcionar por 12 horas por noite. Assim, julgou-se adequado normalizar o consumo da lâmpada de menor potência e definir a capacidade da bateria para as outras em função desta. Na Tabela 15 temos a capacidade de corrente da bateria adequada para cada um dos modelos de lâmpada.

Tabela 15 - Capacidade de corrente da bateria para manter as lâmpadas.

| Nº de LEDs | Tempo ligada por noite (horas) | Consumo Normalizado | Capacidade de Corrente da bateria (A.h) |
|------------|--------------------------------|---------------------|---|
| 6 | 8 | 1 | 7 |
| 8 | 8 | 1,24 | 9 |
| 9 | 12 | 2,17 | 14 |

Fonte: Produção do próprio autor.

Um painel solar de silício cristalino com rendimento de 11,5 % tem capacidade de geração, nas condições padrões de teste (Standart Test Condition, STC), de cerca de 115 W/m². Em (47) P_{stc} é a potência do painel nas condições padrão e A_m é a área do painel, em m².

$$K_i = \frac{P_{stc}}{A_m} \approx 115 \frac{W}{m^2} \quad (47)$$

A energia necessária em um dia de sol para carregar as baterias de 7 A.h, 9 A.h e 10 A.h é dada pelas equações 48,49 e 50.

$$E_{7A.h} = 12V \cdot 7Ah = 84 Wh \quad (48)$$

$$E_{9A.h} = 12V \cdot 9Ah = 108 Wh \quad (49)$$

$$E_{10A.h} = 12V \cdot 14Ah = 168 Wh \quad (50)$$

Podemos saber quanto da energia solar que atinge um painel de um metro quadrado pode ser armazenada em uma bateria pela equação 51, onde E_s é a energia solar, η_p é a eficiência do painel solar de silício cristalino e η_g é a eficiência da etapa de transferência da energia elétrica gerada para a bateria.

$$E_B = E_s \cdot \eta_p \cdot \eta_g \quad (51)$$

A área (em m²) de painel solar fotovoltaico necessária para carregar as baterias pode ser estimada, conforme Equações 52, 53 e 54.

$$A_{p.s.} = \frac{E_{7A.h}}{E_B} \quad (52)$$

$$A_{p.s.} = \frac{E_{9A.h}}{E_B} \quad (53)$$

$$A_{p.s.} = \frac{E_{10A.h}}{E_B} \quad (54)$$

A capacidade de geração nas condições padrões de testes de um painel fotovoltaico capaz de carregar em um dia de sol cada bateria é dado pela equação 55.

$$C_{p.s.} = \frac{E_{A.h}}{E_s \cdot \eta_p \cdot \eta_g} \cdot \frac{P_{stc}}{A_m} \quad (54)$$

Na Tabela 16 está a média mensal da radiação solar diária (E_s) na região do Vale do Itajaí nos meses de monitoramento da bicheira-da-raiz. A fonte dos dados é o Atlas Solarimétrico do Brasil. Com as equações descritas anteriormente, obtém-se a capacidade do painel solar necessária para carregar qualquer uma das baterias (Tabela 16).

Por questões de segurança e confiabilidade, o painel que deve ser instalado é aquele com maior capacidade, para garantir que nos meses de setembro e abril, nos quais há menor quantidade de energia solar na região, a armadilha funcione adequadamente.

Tabela 16 - Capacidade do painel solar (W) para as condições do Vale do Itajaí.

| Mês | E_s (Wh/m ² .dia) | Capacidade do painel solar (W) para carga de baterias | | |
|-----------|--------------------------------|---|-------|--------|
| | | 7 A.h | 9 A.h | 14 A.h |
| Setembro | 3330 | 32,2 | 41,4 | 64,4 |
| Outubro | 3890 | 27,6 | 35,5 | 55,2 |
| Novembro | 5000 | 21,5 | 27,6 | 42,9 |
| Dezembro | 5560 | 19,3 | 24,8 | 38,6 |
| Janeiro | 5000 | 21,5 | 27,6 | 42,9 |
| Fevereiro | 4440 | 24,2 | 31,1 | 48,3 |
| Março | 3890 | 27,6 | 35,5 | 55,2 |
| Abril | 3330 | 32,2 | 41,4 | 64,4 |

Fonte: Produção do próprio autor.

6.3 SUPERVISÃO DE TEMPO DE ACIONAMENTO DA LÂMPADA E CARGA E DESCARGA DA BATERIA.

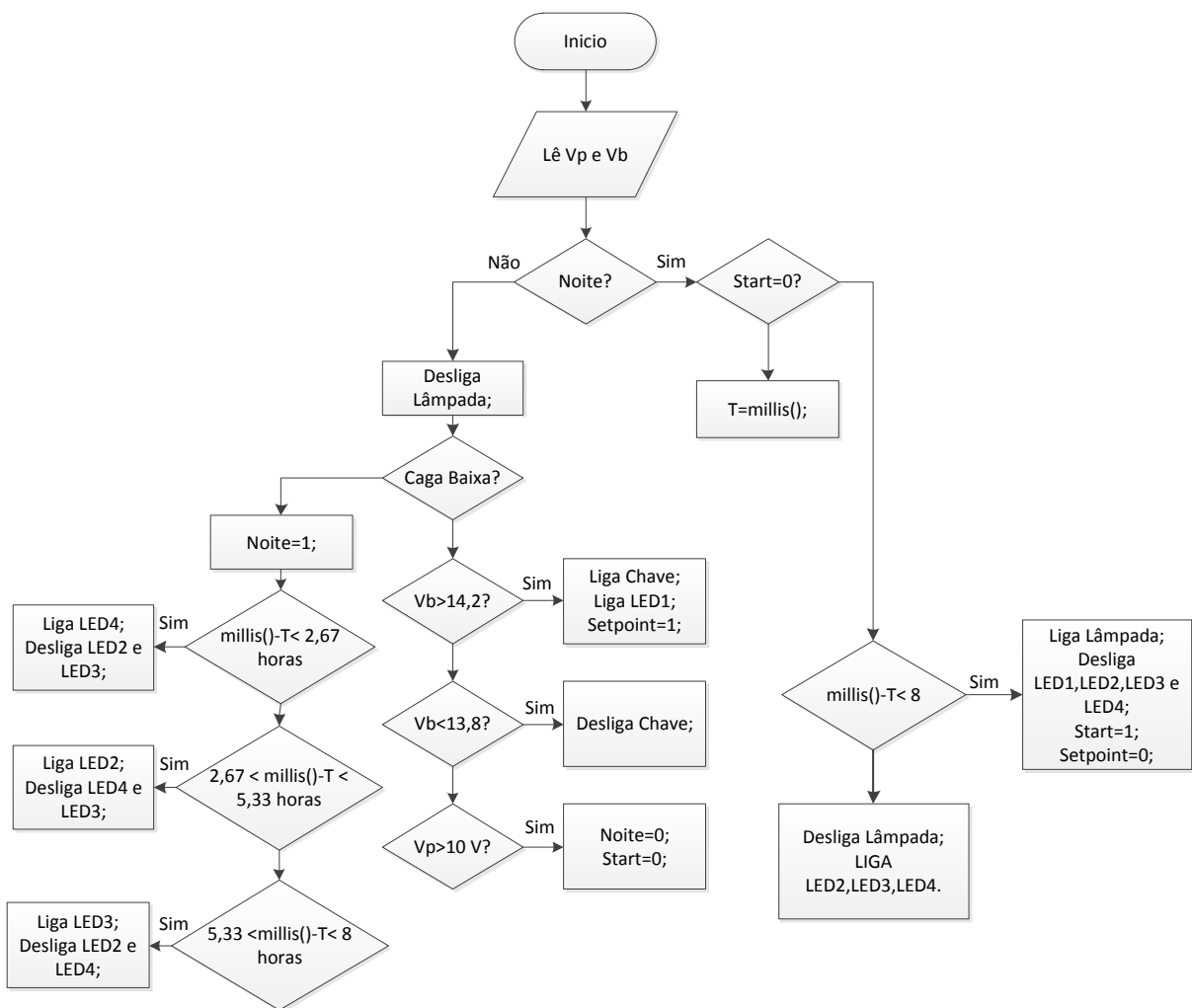
Para a operação da lâmpada de maneira autônoma na lavoura é necessário que ela possua sistema de supervisão. O algoritmo, cujo fluxograma está na Figura 52, foi implementado em linguagem C no microcontrolador MSP430G2231 da Texas Instruments.

As funções deste algoritmo são:

- Identificar se é dia ou noite através da leitura da tensão no painel solar;

- Ligar a lâmpada e desligar os LEDs de aviso quando chegar a noite;
- Monitorar a tensão na bateria;
- Desligar a lâmpada se a tensão na bateria for menor que 10,5V;
- Ligar a chave S do controlador de carga, se a tensão na bateria for maior que 14,2V, desligando-a quando a tensão chegar em 13,8 V;
- Contar o tempo de 8 horas de acendimento da lâmpada;
- Acender os LEDs de aviso para as condições determinadas.

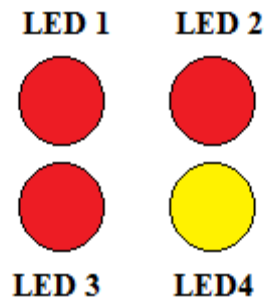
Figura 52 - Fluxograma do algoritmo embarcado no microcontrolador.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Fig. 53 temos a disposição dos LEDs de aviso. Eles foram adicionados com o propósito de informar ao usuário a condição de operação no dia e na noite anterior.

Figura 53- LEDs de aviso.



Fonte: Produção do próprio autor.

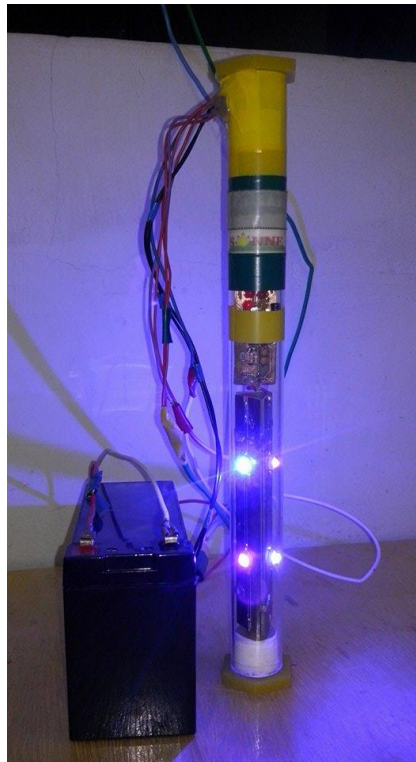
- ✓ LED 1 ligado: Significa que a lâmpada foi desligada durante a noite por carga baixa da bateria menos de 2h40 após ela ter sido ligada;
- ✓ LED 2 ligado: Significa que a lâmpada foi desligada durante a noite por carga baixa da bateria entre 2h40 e 5h20 horas após ela ter sido ligada;
- ✓ LED 3 ligado: Significa que a lâmpada foi desligada durante a noite por carga baixa da bateria entre 5h20 e 8h00 horas após ela ter sido ligada;
- ✓ LED 4 ligado: Significa que a bateria atingiu a etapa de flutuação (carga > 80%) naquele dia;
- ✓ LED 1, LED 2 e LED 3 ligados: Significa que a lâmpada ficou ligada durante as 8h00 horas.

Com a identificação de tempo que a lâmpada ficou ligada na noite anterior é possível ter sempre um LED ligado durante o dia indicando o funcionamento da armadilha. Além disto, sabe-se que a característica das baterias é não segurar a carga quando seu tempo de vida está chegando ao fim, logo esta função serve como um diagnóstico do “estado de saúde” da bateria.

7 RESULTADOS PRÁTICOS

Na Fig. 54 é apresentada a lâmpada de seis LEDs em série, projetada para ser aplicada no controle e monitoramento da bicheira-da-raiz. A energia para seu funcionamento é proveniente de uma bateria de 7 Ah. Na cápsula de acrílico em que está encerrada, há também o conversor *boost*, o regulador *shunt*, o microcontrolador e o visor de LEDs.

Figura 54 - Protótipo em operação a partir de uma bateria de 12 V e 7A.h.

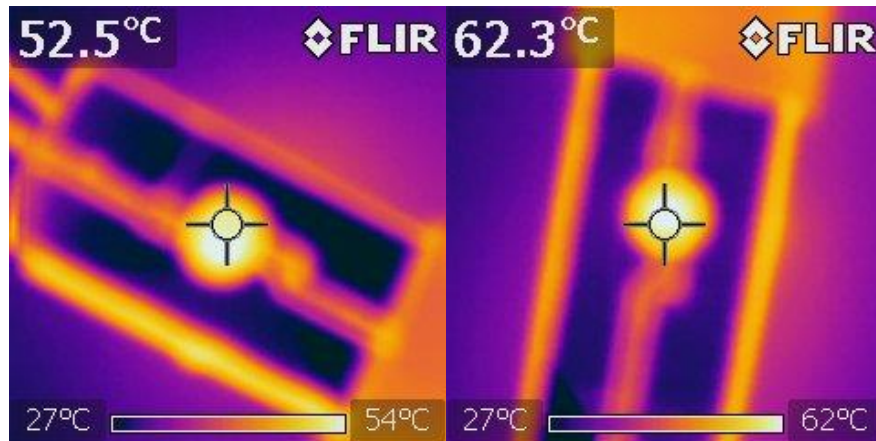


Fonte: Produção do próprio autor.

7.1 TEMPERATURA SOBRE OS LEDS

A temperatura sobre os LEDs foi medida com a câmera térmica FLIR. Os LEDs de ambas as cores (UV-400 nm e Azul-460) foram soldados considerando-se a mesma área de cobre para cada um, porém eles dissipam potências diferentes devido a sua eficiência. Isto é percebido na diferença de temperatura entre eles, conforme é visto na Fig. 55. Os valores medidos estão abaixo do calculado, pois neste caso a lâmpada encontrava-se ao ar livre, fora da capsula de acrílico.

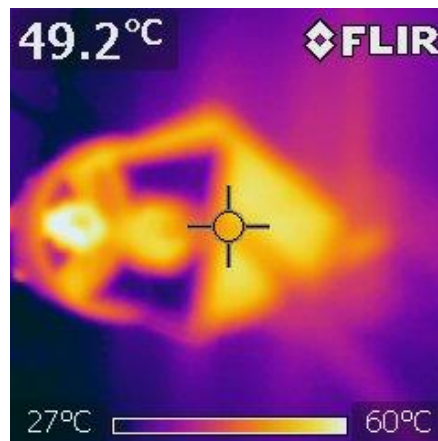
Figura 55 - Temperatura sobre os LEDs azul 460 nm (esquerda) UV 400 nm (direita).



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Fig. 56 tem-se a temperatura no interior das faces.

Figura 56 - Temperatura no interior das faces.

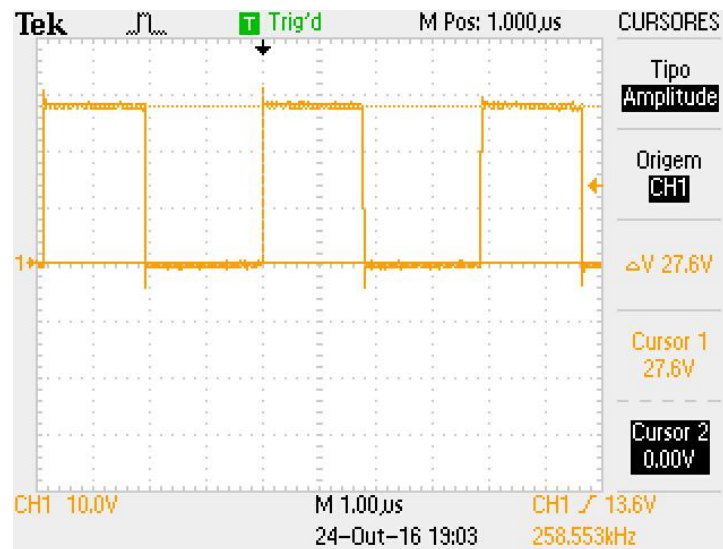


Fonte: Produção do próprio autor.

7.2 CONVERTOR BOOST

As formas de onda de tensão e corrente foram medidas com o conversor tendo como carga nove LEDs em série, sendo a tensão de saída igual a 27,6 e a corrente de saída igual a 167 mA. Na Fig. 57 observa-se a tensão de bloqueio da chave.

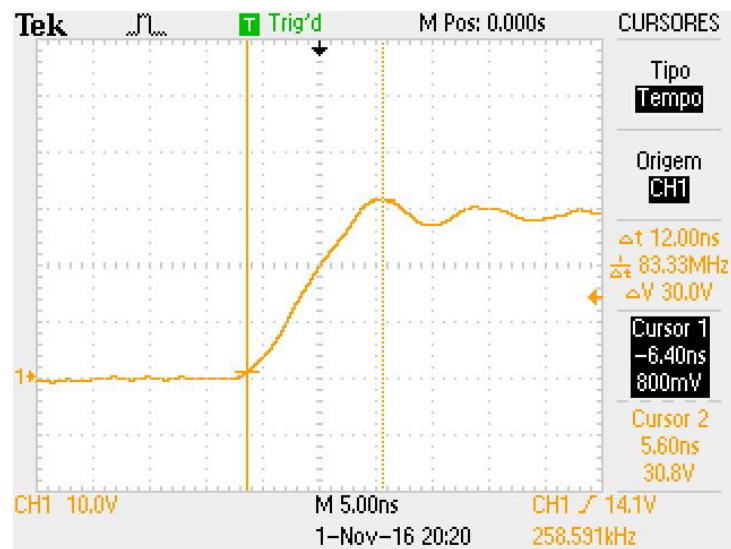
Figura 57 – Tensão sobre a chave.



Fonte: Produção do próprio autor.

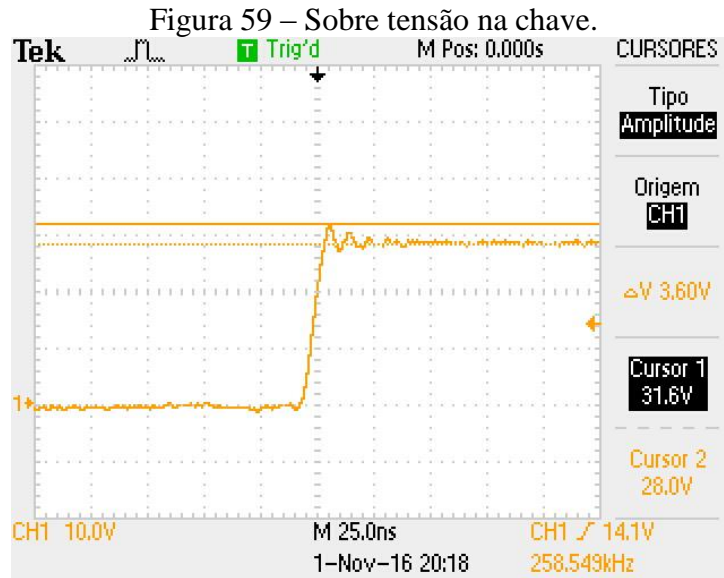
O tempo de subida da tensão na chave é igual a 12 ns, como pode ser visualizado na Fig. 58.

Figura 58 - Tempo de subida da tensão na chave.



Fonte: Produção do próprio autor.

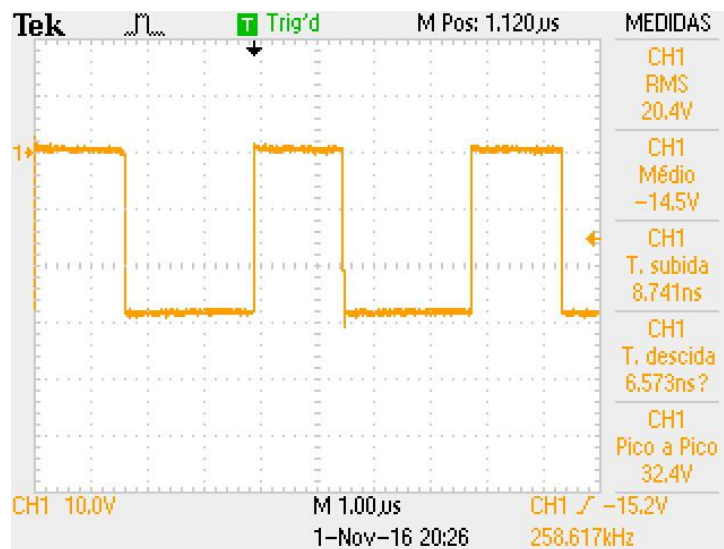
Na Fig. 59 destaca-se com a utilização de cursores de amplitude da sobre tensão na chave que é de 3,60 V.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Fig. 60 verificam-se os valores de tensão média, rms e de pico a pico sobre o diodo, assim como o tempo de subida e descida.

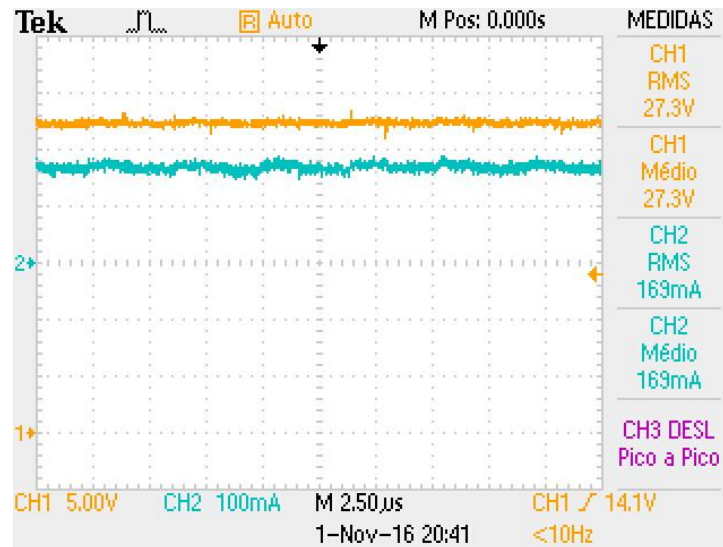
Figura 60 - Tensão média, rms e de pico a pico no diodo.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores médios e eficazes de corrente e tensão sobre os LEDs podem ser verificados na Fig. 61.

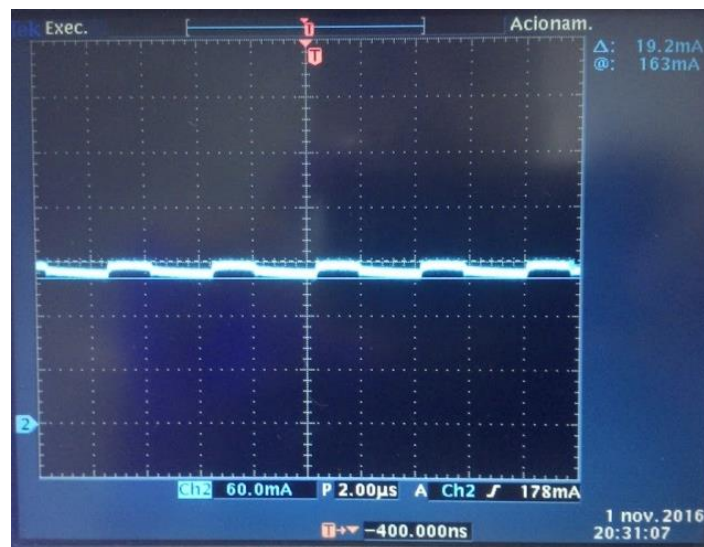
Figura 61 - Corrente e tensão sobre 9 LEDs em série.



Fonte: Produção do próprio autor.

A ondulação da corrente sobre os LEDs , 19,2 mA, é vista na Fig. 62 e representa 11,5 % da corrente média.

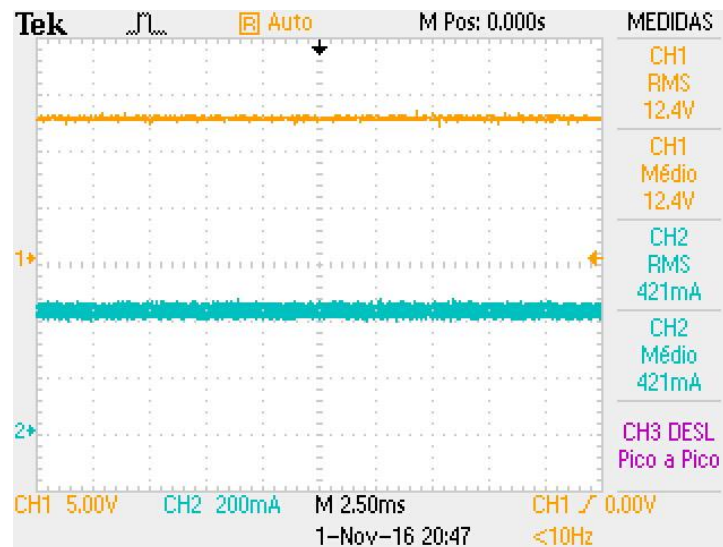
Figura 62 - Ondulação na corrente sobre 9 LEDs.



Fonte: Produção do próprio autor

Na Fig. 63 temos os valores médios e eficazes da corrente e tensão na entrada do conversor *boost*.

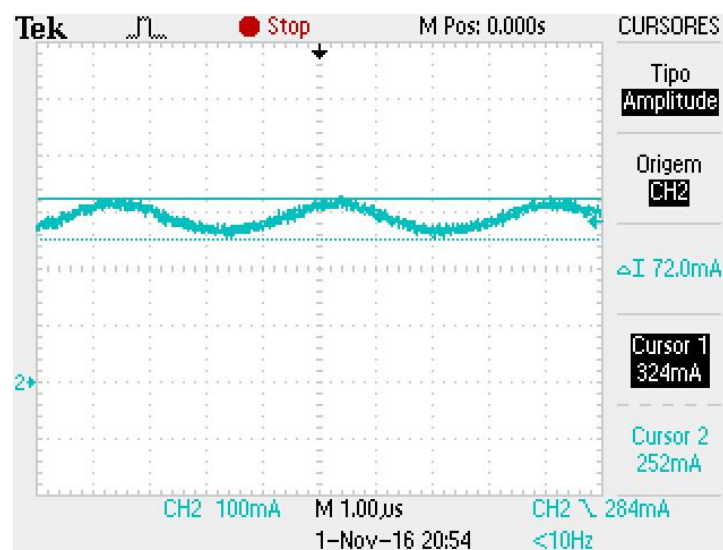
Figura 63 - Corrente e tensão na entrada do conversor.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Fig. 64 visualiza-se a ondulação da corrente de entrada no conversor, que possui um capacitor de 2.2 μ F em paralelo com a entrada.

Figura 64 - Ondulação da corrente de entrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

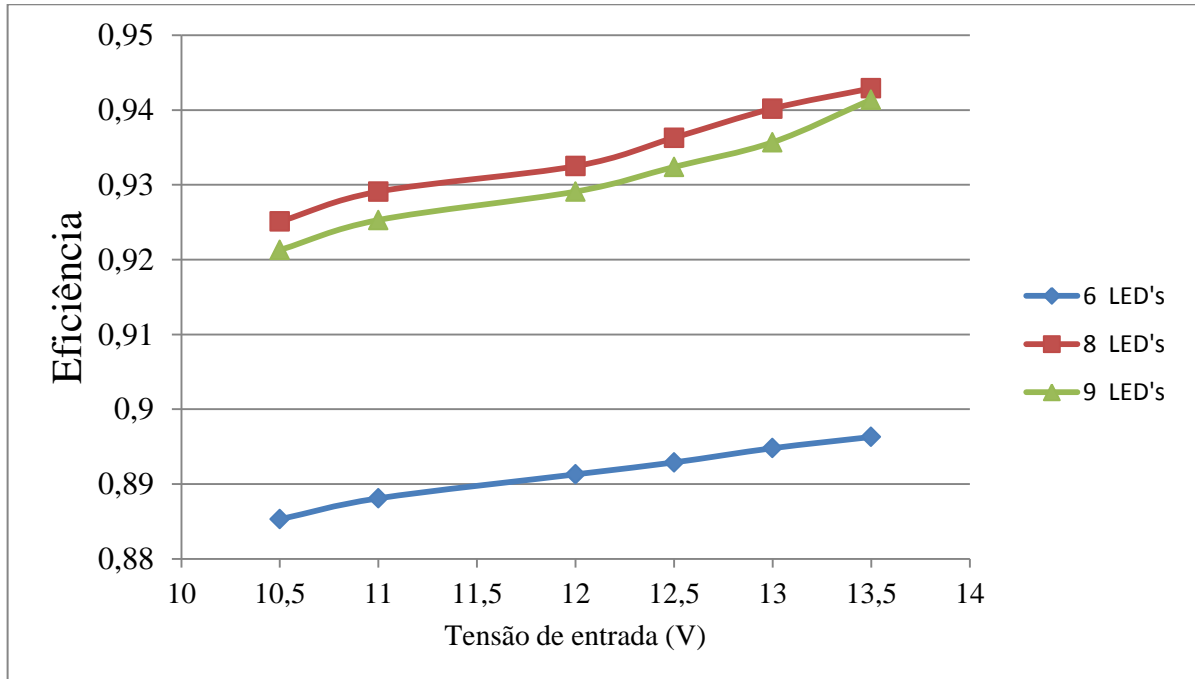
7.3 EFICIÊNCIA DO CONVERSOR BOOST

A eficiência do conversor foi medida com o analisador de energia Tektronix modelo PA4000 na função “Standby mode”.

Na operação do conversor em campo, a tensão na bateria irá variar entre a tensão de carga cheia e a tensão de carga mínima (13,5 e 10,5 V) enquanto que a potência de saída

permanece constante. Portanto, a eficiência do conversor foi medida em função da variação da tensão de entrada. A Fig. 65 mostra as curvas de eficiência para cada condição de carga.

Figura 65 - Eficiência do conversor boost em função da tensão na bateria para cada uma das cargas



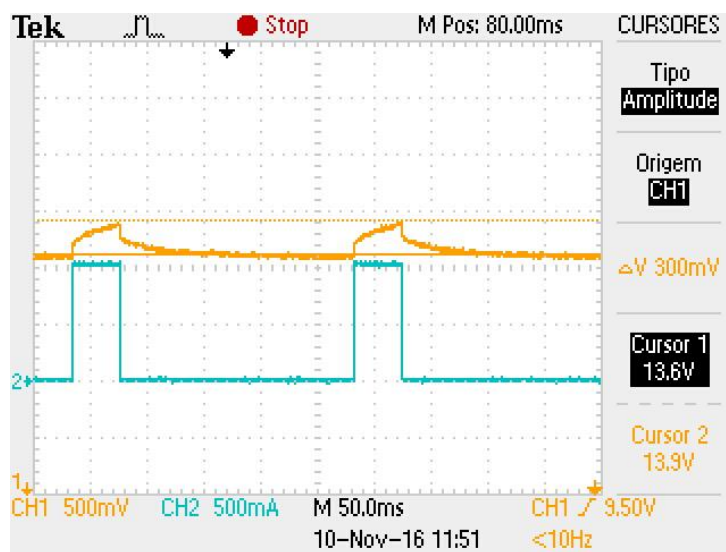
Fonte: Produção do próprio autor

As diferenças entre o rendimento na condição de carga de seis LEDs para as demais pode ser explicada pelo aumento da corrente eficaz no indutor. Uma vez que a corrente nos LEDs em cada um dos casos é a mesma, quando se diminui o número de LEDs a potência de saída também diminui e, conseqüentemente, a corrente de entrada no conversor. Então a ondulação de corrente no indutor aumenta, impactando nas perdas do núcleo do indutor.

7.4 REGULAÇÃO DA TENSÃO DA BATERIA

Na etapa de absorção de carga, o regulador *shunt* começa a operar para manter a tensão da bateria no set point de carga. A Fig. 66 mostra a corrente e a ondulação de tensão na bateria devido a histerese do controlador on/off. Com os cursores de amplitude destaca-se a ondulação da tensão sobre o valor médio de 13,8 V.

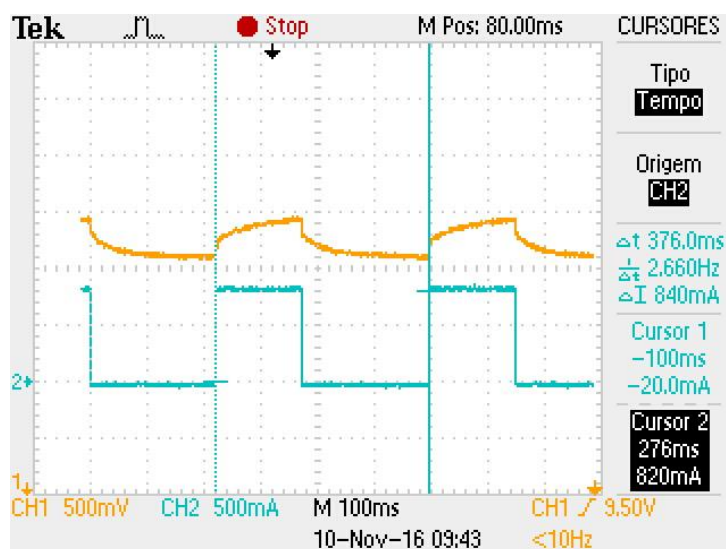
Figura 66 - Os valores de tensão máxima e mínima atingida o controlador liga/desliga atuando e a corrente na bateria.



Fonte: Produção do próprio autor.

A frequência de chaveamento do regulador é variável, sendo definida pela corrente fornecida pelo painel solar e pelo estado de carga da bateria. Na Fig. 67, com os cursores de tempo, é possível observar o período entre os acionamentos da chave e a corrente que circula pela bateria. Nesta situação, a corrente é de 840 mA e a frequência de chaveamento é de 2,66 Hz.

Figura 67 - Frequência de chaveamento atingida pelo controlador.



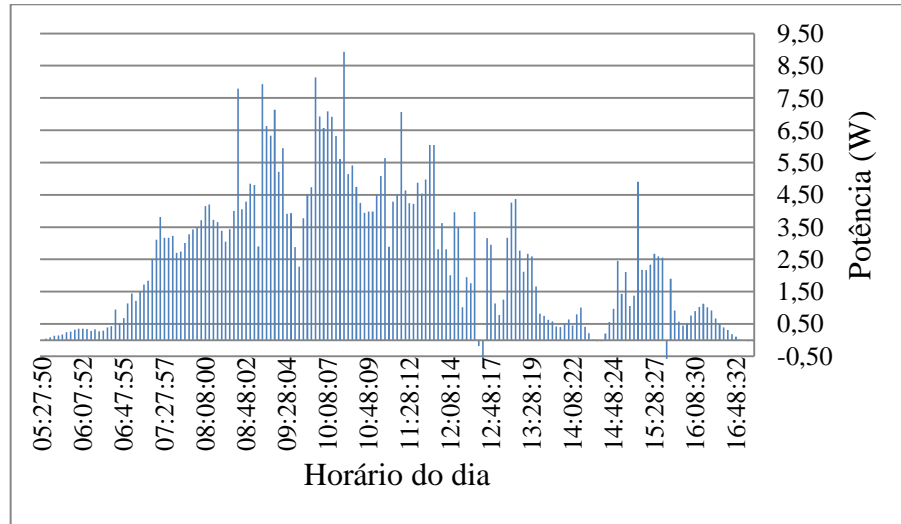
Fonte: Produção do próprio autor.

7.5 DIMENSIONAMENTO DA BATERIA E DO PAINEL SOLAR

Uma bateria de chumbo ácido selada de 12 V e 7 Ah da marca Masterpower foi descarregada até atingir a tensão de 10,5 V, que é equivalente a 80 % de profundidade de

descarga. Então, durante a noite foi conectada em um painel solar de 20 W de capacidade de geração da marca Komaes modelo KM (P) 20 através do regulador *shunt*. O analisador de energia Tektronix PA4000 foi usado para medir a corrente e a tensão na bateria ao longo do dia 16/11/2016. A potência instantânea armazenada na bateria pode ser verificada no gráfico da Fig. 68.

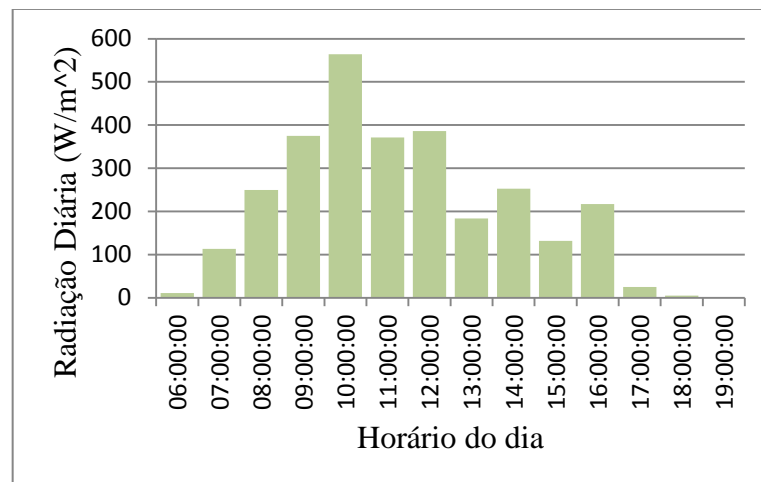
Figura 68 - Geração de energia em Joinville dia 16/11/2016.



Fonte: Produção do próprio autor.

A radiação solar média por metro quadrado em Joinville no dia 16/11/2016 pode ser vista na Fig. 69.

Figura 69 - Radiação solar média em Joinville no dia 16/11/2016



Fonte: Produção do próprio autor, baseado nos dados de: <http://www.ciram.epagri.sc.gov.br/>

A energia elétrica armazenada na bateria, a energia solar disponível por metro quadrado e a energia disponível na área do painel solar pode ser verificada na Tabela 17.

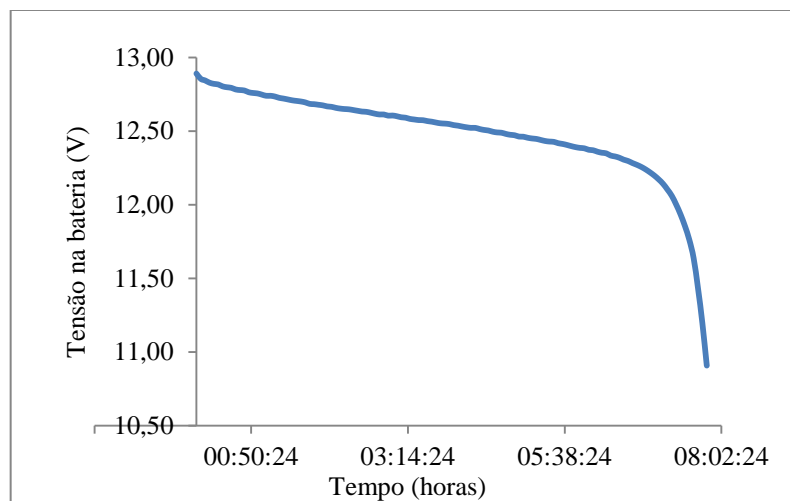
Tabela 17- Energia gerada dia 16/11/2016.

| | |
|--|---------|
| Energia solar (Wh/m ² .dia) | 2887 |
| Área do painel (m ²) | 0,175 |
| Energia solar na área do painel (Wh) | 505,225 |
| Energia acumulada na bateria (Wh) | 29,96 |

Fonte: Produção do próprio autor.

Com esta energia armazenada, a bateria foi colocada para descarregar, tendo como carga a lâmpada de seis LEDs. A curva de tensão na bateria em função do tempo pode ser verificada na Fig. 70.

Figura 70 - Tempo de funcionamento da lâmpada - 7:48:55- na noite do dia 16/11/2016.



Fonte: Produção do próprio autor.

A energia total consumida pela lâmpada, a energia armazenada na bateria e a perda na bateria pode ser verificada na Tabela 18.

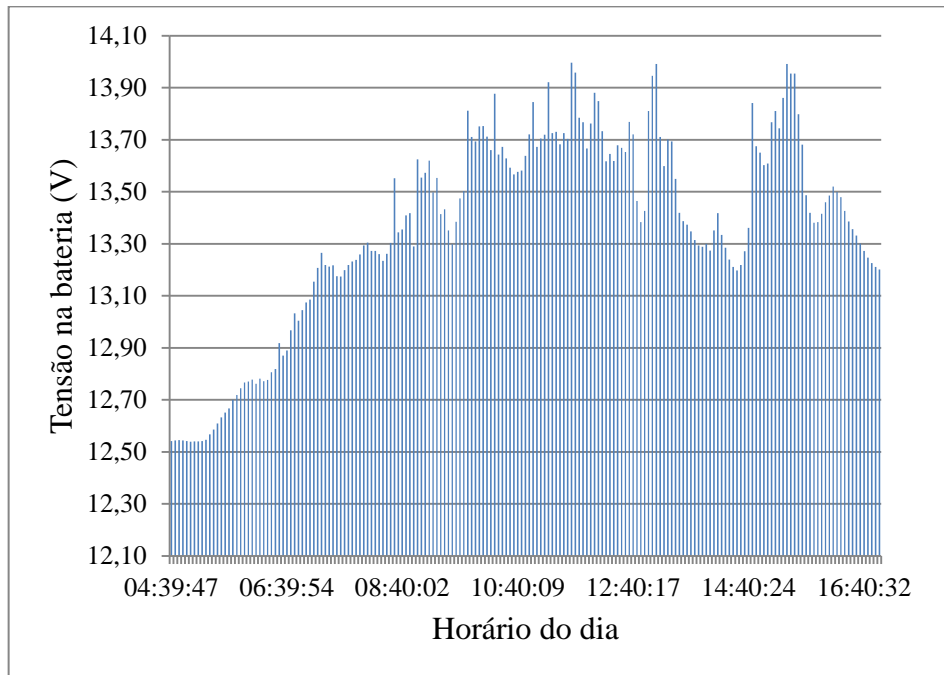
Tabela 18 - Energia armazenada na bateria e consumida pela lâmpada de seis LEDs.

| | |
|-------------------------------------|-------|
| Energia acumulada (Wh) | 29,96 |
| Energia consumida pela lâmpada (Wh) | 24,34 |
| Perdas (Wh) | 5,26 |
| Eficiência | 0,81 |

Fonte: Produção do próprio autor.

A tensão na bateria varia ao longo do dia conforme o estado de carga da bateria e da corrente no painel solar. Os valores de tensão na bateria são apresentados na Fig. 71 e foram utilizados como base para estimar a eficiência da etapa de carga da bateria na sessão 6.2.

Figura 71 - Tensão na bateria ao longo do dia 16/11/2016.



Fonte: Produção do próprio autor.

8 CONCLUSÕES FINAIS

Os objetivos deste trabalho foram projetar e montar uma lâmpada de LEDs autônoma, cujo espectro emitido é sintonizado a preferência visual do inseto que se deseja controlar ou monitorar. O uso de energia solar fotovoltaica como fonte de energia para carregar uma bateria de 12 V possibilita a operação da lâmpada em armadilhas luminosas de forma independente da rede de distribuição de energia elétrica. Isto amplia as possibilidades de aplicação das armadilhas na agricultura, pois permite a utilização das mesmas em locais remotos. A sintonia do espectro emitido pela lâmpada aumenta o “poder de atratividade” da fonte de luz sobre a espécie de interesse e reduz o impacto da armadilha luminosa sobre as espécies que não são pragas e possuem um papel importante no equilíbrio ecológico da lavoura.

Os resultados da execução do projeto mostraram a viabilidade técnica de se utilizar o regulador *shunt* como controlador da carga da bateria e o conversor *boost* como fonte de corrente constante para a lâmpada de LEDs.

Através da revisão bibliográfica observou-se que o fluxo radiante emitido pela lâmpada tem forte relação com a quantidade de insetos atraídos, por isto buscou-se quantificar o fluxo radiante emitido pela lâmpada projetada. Assim, é possível ter um parâmetro confiável que indique o “poder de atratividade” da lâmpada. A comparação entre o índice de captura, “IC”, por watt da lâmpada fluorescente UV do tipo BL e da lâmpada desenvolvida neste trabalho mostrou que a lâmpada com LEDs possui uma vantagem significativa, o que motiva o uso desta em armadilhas luminosas.

A metodologia de dimensionamento do painel solar fotovoltaico pode ser confirmada através da medição da energia gerada em um dia de sol na cidade de Joinville.

Como trabalhos, futuros há bastante a ser feito para se aumentar o tempo de vida útil da bateria. Em campo, devido a temperatura elevada, necessita-se desenvolver um sistema de compensação do “*Setpoint*” de carga em função da temperatura na bateria. Isto pode ser feito incluindo-se um sensor de temperatura ao projeto inicial e os devidos acréscimos no algoritmo de controle e supervisão. Além disto, também se sugere o estudo da viabilidade de se utilizar um sistema de ventilação forçada para a bateria utilizando-se da energia que está sobrando no painel solar quando a bateria estiver carregada.

9 REFERÊNCIAS

Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos / coordenador Chigueru Tiba et al.- Recife : Ed. Universitária da UFPE, 2000. p. 111, mapas.

ALONSO, M. Introduction to LED drivers.Gramado, COBEP - Brazilian Power Eletronics Conference, Tutorial Session, 2013.

BENTO, J.M.S. Fundamentos do monitoramento, da coleta massal e do confundimento de insetos-praga. In: VILELA, E.F.; DELLA LUCIA, T.M.C. (Eds.). Feromônios de insetos; biologia química e emprego no manejo de pragas. 2.ed. Ribeirão Preto: Holos, 2001. p.135-144.

BARRETT, J. R.; HARWOOD, F. W.; DEAY, H. O. Functional Association of Light Trap Catches to Emission of Blacklight Fluorescent Lamps. **Environmental Entomology**, [s.l.], v. 1, n. 3, p.285-290, 1 jun. 1972.

BOWDEN, John. An analysis of factors affecting catches of insects in light traps. **Bulletin Of Entomological Research**,Brisbane, v. 72, n. 72, p. 535-556, jan. 1982.

BANERJEE, A. C.. Flight Activity of the Sexes of Crambid Moths as Indicated by Light-Trap Catches. **Journal Of Economic Entomology**, [s.l.], v. 60, n. 2, p.383-390, 1 abr. 1967. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/jee/60.2.383>.

CASTREJON, Federico; ROJAS, Julio C.. Behavioral Responses of Larvae and Adults of *Estigmene acraea* (Lepidoptera: Arctiidae) to Light of Different Wavelengths. **Florida Entomologist**, [s.l.], v. 93, n. 4, p.505-509, dez. 2010. Florida Entomological Society.

COWAN, T.; GRIES, G. Ultraviolet and violet light: attractive orientation cues for the Indian meal moth, *Plodia interpunctella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, v.131, n.2, p.148-158, 2009.

CHO, K.-S.; LEE, H.-S. Visual preference of diamond back moth, *Plutella xylostella*, to light-emitting diodes. *Journal of Korean Society of Applied Biology and Chemistry*, v.55, p.681-684, 2012.

Egido, M. A., Lorenzo E., "Optimal number of solar cells in photovoltaic modules for residential applications", Seventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference pp. 196-200, 1986.

Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). *Fundamentals of power electronics*. Norwell, Mass: Kluwer Academic.

FALIN, Jeff. **Compensating and measuring the control loop of a high-power LED driver**. 4. ed. Dallas: Analog Applications Journal, 2008. 6 p.

HICKEL, E. R.; MILANEZ, J. M.; HINZ, R. H. Infecção artificial de adultos da bicheira-da-raiz com *Beauveria bassiana* em armadilha luminosa. *Agropecuária Catarinense*, v. 28, p. 74-77, 2015.

HICKEL, Eduardo Rodrigues. Flutuação populacional de adultos da bicheira-da-raiz, *Oryzophagus oryzae*, e de outras espécies de gorgulhos aquáticos em arroz irrigado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 12, n. 3, p.247-254, 27 mar. 2013. Disponível em: <<http://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria>>. Acesso em: 06 nov. 2016.

HICKEL, Eduardo Rodrigues et al. ATRATIVIDADE DE LEDS DE DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA AOS ADULTOS DE *Oryzophagus oryzae* (COLEOPTERA:CURCULIONIDAE). In: congresso brasileiro de arroz irrigado (IXCBAI), 9., 2015, Pelotas. **Anais...** . Pelotas: Sociedade Sul-brasileira de Arroz Irrigado (sosbai), 2015. p. 1 - 4. Disponível em: <<http://www.cbai2015.com.br/docs/trab-4-8292-82.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

HICKEL, E. R.; KNABBEN, G. C; DAL ZOTTO, D.; CARVALHO, M. W. M.; BERTOLDI, B.; DE NOVAES, Y. R. Atratividade de LEDs de diferentes comprimentos de onda aos adultos de bicheira-da-raiz. *Revista Arquivos do Instituto Biológico*. São Paulo. No prelo.

HIENTON, Truman E.. **Summary of Investigations of Electric Insect Traps**: Technical Bulletin. 1498. ed. Washington: Agricultural Research Service-United States Department Of Agriculture, 1969. 144 p.

JEON, Ju-hyun et al. Phototactic response of the rice weevil, *Sitophilus oryzae* Linnaeus (Coleoptera: Curculionidae), to light-emitting diodes. **J Korean Soc Appl Biol Chem**, [s.l.], v. 55, n. 1, p. 35-39, fev. 2012.

KNABBEN, G. C. SONNE-Sistema de gerenciamento, conversão e armazenamento de energia solar fotovoltaica para aplicação em armadilha luminosa com LEDs. 2014. Udesc, Joinville, 2014

KNABBEN, G.C; NOVAES, Y. R.; HICKEL, E.R.; et al. Sonne – armadilha luminosa com leds e energia solar fotovoltaica. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DO ARROZ PARA AMÉRICA LATINA E CARIBE, 12., 2015, Porto Alegre. *Anais*. Porto Alegre: IRGA, p.157, 2015.

LINK, D. ; COSTA, E. C. Eficácia da armadilha luminosa no controle das brocas das cucurbitáceas, *Diaphania* spp. em Santa Maria - RS. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p.311-315, dez. 1989. Trimestral. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/revistaccr/index.php>>. Acesso em: 11 maio 2016.

LONGCORE T, ET ALL. Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Phil. Trans. R. Soc. B* 370: 20140125, 2015.

LEE, Sw. **Demystifying Type II and Type III Compensators Using OpAmp and OTA for DC/DC Converters**. (SLVA662) – Jul., 2014

MATIOLI, J.C.; SILVEIRA NETO, S. **Armadilhas luminosas**: funcionamento e utilização. Belo Horizonte: EPAMIG, 1988.

OH, M.S.; LEE, C.H.; LEE, S.G.; LEE, H.-S. Evaluation of high power light emitting diodes (HPLEDs) as potential attractants for adult *Spodoptera exigua* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, v.54, n.3, p.416-422, 2011.

POSPISIL, Jaromír. VISUAL ORIENTATION OF CERTAIN TROPICAL INSECT SPECIES. *Acta Ent. Bohemoslov*, Praha, n. 68, p.65-76, 25 jun. 1970.

RIDLEY R., Designer's Series, Part V: Current-Mode Control Modeling. *Switching Power Magazine*, 2006.[Online]. Disponível Em: <http://www.switchingpowermagazine.com/downloads/5%20Current%20Mode%20Control%20M>>. Acessado em 1 out., 2016.

USHER E. P.; ROSS M. M. D.. Recommended Practices for Charge Controllers, Report IEA PVPS T3-05: 1998, CANMET Energy Diversification Research Laboratory, Natural Resources Canada, Varennes, Québec, agos., 1998.

ZANETTI, Ronald. *Conceitos básicos do manejo integrado de pragas*. Notas de Aula. 13-13 de jun., p. 1-9, 2016.