

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Lucas Amorim Bonini

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO VIA LUZ VISÍVEL PARA TRANSMISSÃO DE
DADOS VIA MICROCONTROLADORES**

Santa Maria, RS
2018

Lucas Amorim Bonini

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA
LUZ VISÍVEL PARA TRANSMISSÃO DE DADOS VIA MICROCONTROLADORES**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Prof^o. Dr. Marco Dalla Costa

Co-orientador: Prof^o. Dr. Álysson Ranieri Seidel

Santa Maria, RS

2018

Lucas Amorim Bonini

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA
LUZ VISÍVEL PARA TRANSMISSÃO DE DADOS VIA MICROCONTROLADORES**

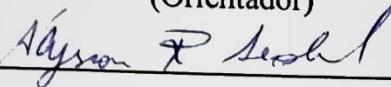
Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para
obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Aprovado em 18 de dezembro de 2018



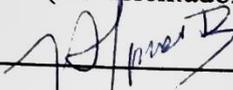
Marco Dalla Costa, Dr. (UFSM)

(Orientador)

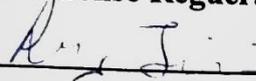


Álysson Ranieri Seidel, Dr. (UFSM)

(Co-orientador)



Vitalio Alfonso Reguera, Dr. (UFSM)



Lucas Teixeira, Msc. (UFSM)

Santa Maria, RS

2018

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha avó Maria Carolina (in memoriam) pelo seu exemplo de mansidão e simplicidade.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me dar forças e capacidade para chegar até esta etapa.

Ao restante de minha família, minha mãe Lenamar, meu pai Valdemar (in memoriam) e minha avó Maria (in memoriam) pelo excessivo cuidado, carinho, amor e investimento em minha vida.

A Primeira Igreja Batista em Santa Maria pelos preciosos e eternos ensinamentos que me foram passados.

Aos integrantes do grupo GSEC - Grupo de Pesquisa em Sistemas Elétricos e Computacionais, em especial o futuro engenheiro Eduardo Viera pelo suporte e dedicação a esse trabalho.

Aos Professores Álysson Ranieri Seidel e Marco Dalla Costa pela orientação e pelos conhecimentos compartilhados.

Por último, aos futuros engenheiros e amigos Tiago Ribas Junior, Lucas Rossato Rocha, Miguel Martins, Victor Refosco, Ivan Viero Sarturi, Matheus Righi, Jean Rossini e Jean Muenchen pela amizade desenvolvida ao longo do período de graduação.

Soli Deo Gloria.

RESUMO

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA LUZ VISÍVEL PARA TRANSMISSÃO DE DADOS VIA MICROCONTROLADORES

AUTOR: Lucas Amorim Bonini
ORIENTADOR: Marco Dalla Costa
CO-ORIENTADOR: Álysson Ranieri Seidel

Com o desenvolvimento da tecnologia aplicada em sistemas de comunicação houve grande impacto na maneira em que nos comunicamos e transmitimos informações. A busca por portabilidade, por exemplo, fez com que surgissem tecnologias para transmissão de dados sem cabos, seja através de ondas de rádio frequência e com o surgimento do LED, vem atingindo até mesmo o espectro de luz visível. Os LEDs estão rapidamente substituindo os equipamentos de iluminação tradicionais, e usá-los para comunicação via luz visível (*Visible Light Communication – VLC*) é uma tendência muito forte devido à sua característica única de alta taxa de comutação. Este trabalho apresenta os conceitos e características gerais de sistemas de comunicação bem como o estudo e desenvolvimento de um protótipo com as características mínimas necessárias para a transmissão de dados via luz visível, utilizando a modulação por variação de posição de pulso (*Variable Pulse Position Modulation – VPPM*).

Palavras chave: Comunicação por luz visível. LED. Modulação por variação de posição de pulso. Sistema de comunicação.

ABSTRACT

STUDY AND DEVELOPMENT OF A VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM FOR DATA TRANSMISSION VIA MICROCONTROLLERS

AUTHOR: Lucas Amorim Bonini
ADVISOR: Marco Dalla Costa
CO-ADVISOR: Álysson Ranieri Seidel

With the growth and expansion of technology there has also been a great impact in the way we communicate and transmit information. The search for portability, for example, led to the emergence of technologies for wireless transmission, through radiofrequency waves and, with the emergence of LEDs, has been reaching up to the visible light spectrum. LEDs are rapidly replacing traditional lighting fixtures and using them for Visible Light Communication (VLC) is a very strong trend because of its unique feature of high switching rate. This work presents the general concepts and characteristics of communication systems as well as the development of a prototype with the basic characteristics necessary for the transmission of data via visible light using Variable Pulse Position Modulation (VPPM).

Keywords: Communication system. Visible Light Communication (VLC). Variable Pulse Position Modulation (VPPM). LED.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Telégrafo	12
Figura 2 – Blocos de um sistema básico de comunicação por luz visível	13
Figura 3 - Sistema de comunicação	16
Figura 5 - Amostragem do sinal	18
Figura 6 - Protocolo humano e protocolo de redes de computador	19
Figura 7 - Transporte de mensagem	20
Figura 8 - Espectro de ondas de rádio	21
Figura 9 - Contraste entre Li-Fi e VLC	22
Figura 10 - Largura de Banda da luz visível.....	23
Figura 11 – Abordagem tricromática (UV) (a) e dicromática(b).....	24
Figura 12 - Mistura de cores	25
Figura 13 – pc-LED	26
Figura 14 – Setup experimental para avaliar a necessidade do filtro de luz azul	27
Figura 15 – Processo de emissão de luz em um LED.....	29
Figura 16 – Princípio elementar da comunicação por luz visível.....	30
Figura 17 – Modulação OOK	31
Figura 18 – Princípio de funcionamento da modulação VPPM	31
Figura 19 – Modulação VPPM	32
Figura 20 – RLL 4B6B	33
Figura 21 – Diagrama de blocos da transmissão VLC utilizando modulação VPPM..	35
Figura 22 – Diagrama representativo empregado para transmissão VLC	37
Figura 23 – Modelo de driver utilizando um único MOSFET	39
Figura 24 – Esquemático do circuito de chaveamento para acionamento dos LEDs..	39
Figura 25 – Esquemático do Gate Driver	40
Figura 26 – Diagrama simplificado do receptor	41
Figura 27 – Esquemático do Filtro-amplificador.....	42
Figura 29 – Lógica de funcionamento do registrador <i>Analog Comparator</i> da Plataforma Tiva C	43
Figura 30 – Gráfico de tensão versus corrente para LEDs utilizados para aplicação VLC	45
Figura 31 – Esquemático completo do circuito para transmissão VLC	45
Figura 32 – IDE Keil μ Vision 5	47

Figura 33 – Medidas de corrente durante a transmissão.....	48
Figura 34 – Corrente e tensão nos LEDs	48
Figura 35 – Corrente no LEDs (T _x) para diferentes razões cíclicas.....	50
Figura 36 – Teste de iluminância dos LEDs.....	50
Figura 37 – Gráfico de <i>dimming</i> resultado da modulação VPPM.....	51
Figura 38 – Demodulação dos dados transmitidos em VPPM	52
Figura 39 – Sinal de transmissão e recepção com d=0,5	52
Figura 40 – Protótipo emissor/receptor de comunicação por luz visível.....	53
Figura 41 – Tensão de recepção vs. distância por d=0,5	54
Figura 42 – Teste de detecção experimental para recepção VLC através de modulação VPPM	55
Figura 43 – Recepção de dados via comunicação serial.....	55
Figura 44 – Placa desenvolvida para a transmissão.....	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÕES	12
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	14
1.2.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	ORGANIZAÇÃO	14
2	SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO	16
3	TIPOS DE LEDs	24
4	TRANSMISSÃO POR LUZ VISÍVEL	29
5	DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR/RECEPTOR VLC	36
5.1	TRANSMISSOR VLC	36
5.1.1	Plataforma de desenvolvimento empregada para transmissão de dados	37
5.1.2	Driver para acionamento do LED para VLC	38
5.1.3	Gate Driver	40
5.2	RECEPTOR VLC.....	40
5.2.1	Fotodiodo	41
5.2.2	Amplificador e Filtro	41
5.2.3	Microcontrolador RX	43
6	ANÁLISES, TESTES E RESULTADOS	45
7	CONCLUSÃO	56
8	REFERÊNCIAS	58
9	ANEXO A	62
10	ANEXO B	63
10.1	CÓDIGO DO TRANSMISSOR	63
10.2	CÓDIGO DO RECEPTOR:	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÕES

Segundo SCHAF (2018), desde tempos remotos com *fire beacons* ou tochas de fogo que serviam de alerta para grandes distâncias, a comunicação tem sido de grande importância, sendo uma ferramenta de integração, instrução, de troca mútua e desenvolvimento. A informação que antes era de caráter simples e de grandes distâncias, significando apenas um sim/não ou, no caso de algo complexo, como um decreto real, havia uma demora de semanas, talvez meses e anos para que chegasse até o destino desejado, hoje já possui um caráter muito mais imediato e de longo alcance, graças ao advento da telefonia e da internet.

Por volta de 1870, nos Estados Unidos, os telégrafos, mostrado na Figura 1, já estavam incorporados à vida cotidiana da população, mesmo que em pequena escala. Em seguida, Alexander Graham Bell e Elisha Gray descobriram, de forma independente, que poderiam enviar uma enorme gama de tons sonoros pelos fios telegráficos. Anos mais tarde o sistema telefônico acabou ficando cada vez mais saturado e a comunicação em grandes distâncias era extremamente difícil devido ao amontoado de fios e ruídos do sistema causados pela interferência de uma transmissão em outra. A solução para isso veio com a amplificação eletrônica e as modulações analógicas por volta da metade do século XX. Até que em 1956 o primeiro telefone digital nasceu e 24 anos depois, mais da metade das ligações na América do Norte eram realizadas de forma eletrônica. (PAMPANELLI, 2004)

Figura 1 – Telégrafo

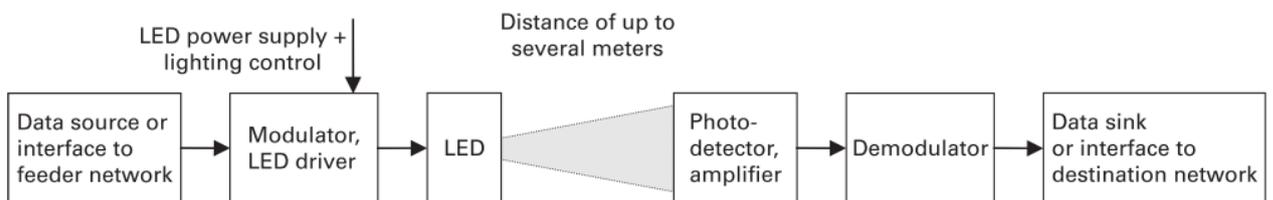


Ainda nesse tempo, a primeira geração da telefonia móvel começa a surgir com aparelhos pesando de 3 até 10 kg, com uma tecnologia de baixíssima qualidade e diversos problemas de compatibilidade e operação. Só em 1997 com o surgimento da tecnologia GSM, também conhecida como segunda geração (2G), houve a padronização da telefonia móvel e a expansão do uso dos dispositivos móveis. Desde então, a evolução das tecnologias para comunicação vem se desenvolvendo de uma forma quase exponencial (KARUNATILAKA et al., 2015). Anteriormente a transmissão era muito mais simples, sendo atualmente comum a transmissão de vídeos em tempo real por *smartphones*.

Com o crescimento e ampliação dessas tecnologias houve também grande impacto até mesmo nos hábitos da população mundial e alterou as diretrizes de diversas pesquisas científicas e produções tecnológicas. A busca por portabilidade, por exemplo, fez com que surgissem tecnologias para transmissão sem cabos, seja através de ondas de rádio frequência atingindo até mesmo o espectro de luz visível (ST, 2018).

Atualmente pesquisas relativas a transmissão de dados via luz visível (*Visible Light Communication – VLC*) vem ganhando relevância e a atenção para sistemas de transmissão que agregam eficiência sob o aspecto de efetividade da comunicação associada a eficiência da iluminação. A recente prosperidade de fontes de luz eficientes em termos energéticos para unidades residenciais, de varejo e comerciais, os LEDs estão rapidamente substituindo os equipamentos de iluminação tradicionais, e usá-los para VLC é uma tendência muito forte devido à sua característica única de alta taxa de comutação (KARUNATILAKA et al., 2015). A Figura 2 mostra um diagrama de blocos de um sistema elementar de comunicação de luz visível, com emissor e receptor na mesma figura.

Figura 2 – Blocos de um sistema básico de comunicação por luz visível



Fonte: (ARNON, 2015)

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar sistemas VLC a partir do desenvolvimento de um sistema de comunicação básico via luz visível com as características necessárias para transmissão de dados via micro controladores conforme mostra a Figura 2 através de um diagrama de blocos de um sistema elementar de comunicação por luz visível, com emissor e receptor presentes na mesma figura.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender a estrutura de um sistema de comunicação;
- estudar os tipos de LED para transmissão VLC;
- entender o funcionamento da transmissão VLC;
- determinar o tipo de modulação para transmissão de dados;
- programar o módulo transmissor e o módulo receptor;
- desenvolver um protótipo utilizando microcontroladores;
- testar as características da transmissão implementada.

1.3 ORGANIZAÇÃO

O trabalho será organizado em 6 capítulos, sendo o primeiro capítulo a introdução do trabalho. Logo após, o capítulo 2 descreve as características, conceitos e a estrutura de um sistema de comunicação, a conceituação de camadas em um sistema de comunicação através do modelo ISO/OSI e aspectos gerais de modulação com um breve histórico englobando sistemas de luz visível. No capítulo 3 descreve-se os aspectos construtivos de alguns tipos de LEDs, as formas de gerar-se luz branca e uma comparação analítica de cada um no contexto VLC. O capítulo 4 desenvolve como acontece a comunicação por luz visível além de explicar os tipos mais comuns de modulação de acordo a padronização IEEE 802.15.17. O capítulo 5 mostra através de diagramas e esquemáticos os critérios e o desenvolvimento do protótipo com as características necessárias para uma comunicação VLC. O capítulo 6 apresenta alguns testes,

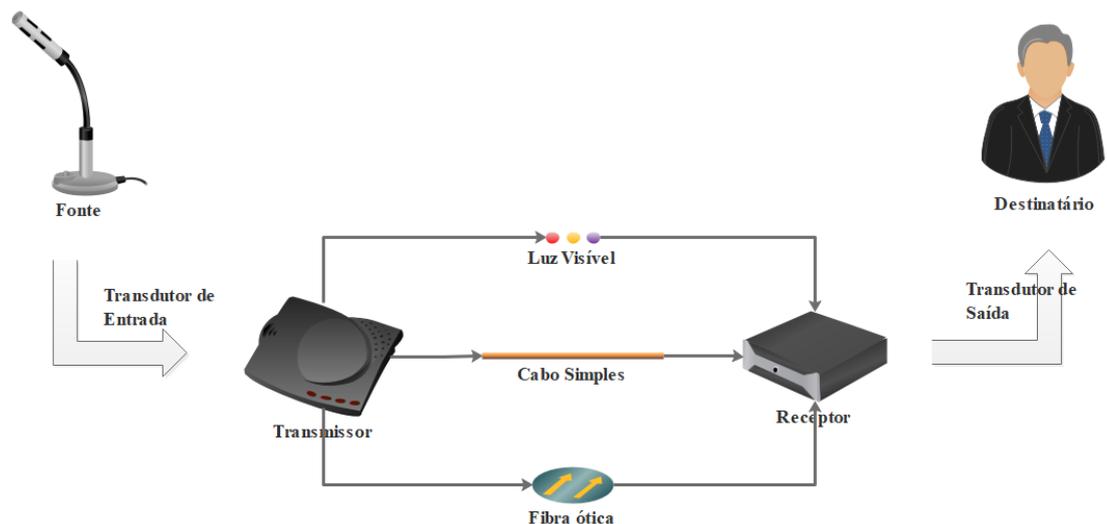
validações e conclusões das transmissões realizadas. Por fim, são apresentadas as considerações finais do trabalho realizado.

2 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

Para melhor compreensão e entendimento das tecnologias voltadas a sistemas e comunicação, faz-se necessário o conhecimento de alguns conceitos principais. A Figura 3 mostra o esquema de um sistema de comunicação, sendo basicamente forma pelos seguintes componentes:

- fonte que origina a mensagem;
- transdutor de entrada que converte os dados em sinais elétricos;
- transmissor que modifica a banda base para melhor eficiência na transmissão;
- o canal ou meio por onde o transmissor envia a mensagem;
- receptor que reprocessa o sinal recebido desfazendo as modificações feitas pelo transmissor e o canal;
- transdutor de saída que converte os sinais elétricos para a forma original;
- e destinatário final(LATHI, 1998).

Figura 3 - Sistema de comunicação



Fonte: Elaborada pelo autor

O canal de comunicação é comumente composto por cabos: tais como coaxial, fibra ótica, entre outros ou *links* via rádio no caso de comunicação sem fio ou *wireless*. À medida que a distância aumenta, o sinal é atenuado e pode sofrer interferências de dois tipos: externas

e internas. No caso de interferências externas trata-se de sinais gerados por outros equipamentos ou campos magnéticos. Já no caso de interferências internas, pela utilização de emendas por exemplo, trata-se dos movimentos dos elétrons em um cabo gerando calor e atenuações. (LATHI, 1998)

Quando se fala em transmissão de sinais, os parâmetros mais importantes a serem considerados são a largura de banda (B) e a potência de sinal (S). A largura de banda é a faixa de frequências que o canal pode transmitir com fidelidade. Um fator interessante é que taxa de transmissão de dados está diretamente ligada com a largura de banda. Por exemplo, ao triplicar a taxa de transmissão de dados, comprimindo o sinal no tempo, a largura de banda também deve ser triplicada. Já a potência do sinal está diretamente ligada com a qualidade de transmissão. Se um sinal é transmitido com maior potência, as chances de recebê-lo com baixo ruído ou alterações de informação são maiores (LATHI, 1998).

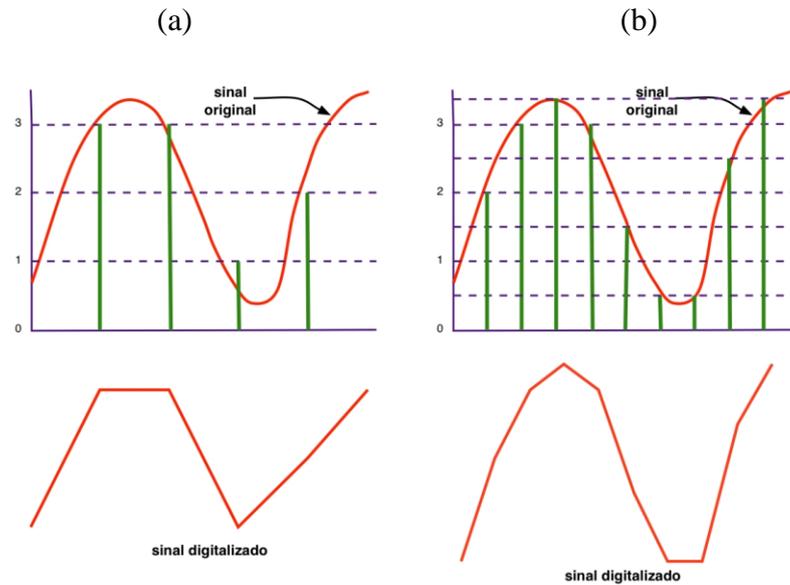
Durante a transmissão de sinais, interferências e ruídos são acrescentados ao sinal e são representadas matematicamente através de uma relação sinal ruído ou SNR (*Signal to Noise Ratio*). Trata-se da razão entre a potência do sinal (S, medido em Watts) e a potência do ruído (N, medido em Watts).

$$SNR = \frac{S (W)}{N (W)}$$

À medida que a distância de comunicação aumenta, mantendo-se a potência de transmissão, o SNR vai diminuindo, ou seja, é uma relação inversa. Quanto maior a potência do sinal a ser transmitido, maior o valor de SNR, conseqüentemente maiores distâncias de transmissão são permitidas, mantendo a fidelidade.

A demanda de processamento necessário para a recepção varia de acordo com a frequência e a qualidade necessária para transmissão da mensagem. Basicamente coleta-se amostras suficientes do sinal a fim de possibilitar a reconstrução sem perdas significativas. A Figura 4 exemplifica esse processo. Enquanto na Figura 4 (a) a amostragem do sinal ocorre em uma frequência não adequada ao sinal original, gerando uma digitalização infiel, a Figura 4 (b) mostra um sinal digitalizado muito mais próximo do original já que a frequência em que as amostras são coletadas é maior.

Figura 4 - Amostragem do sinal



Fonte: Núcleo de processamentos de dados, Universidade Estadual de Maringá

O teorema de amostragem ou comumente conhecido como teorema de Nyquist diz que a frequência de amostragem do sinal deve ser pelo menos duas vezes maior que a frequência original do sinal para que possibilite reconstruí-lo sem grandes perdas de informação. (LATHI, 1998) Além de determinar a frequência de amostragem, a Figura 4 também mostra a importância de verificar os níveis de quantização. Definindo-se uma quantidade de níveis, representados pelas linhas pontilhadas na Figura 4, cada amostra é arredondada até o nível mais próximo. Logo, assim como a frequência de amostragem, quanto maior a quantidade de níveis na amostragem do sinal, mais fiel a digitalização comparada ao original. Em geral utiliza-se 128 ou 256 níveis. (LATHI, 1998)

Cada vez que se tenta realizar uma comunicação, utiliza-se algum tipo de linguagem, ou seja, algum sistema de símbolos, sinais ou códigos para transmitir uma mensagem. Alguns exemplos são o alfabeto oficial da língua portuguesa que possui 26 letras, a matemática convencional que utiliza 10 números, espaço e pontuação. Em sistemas de comunicação, cada letra, número, pontuação, espaço, é chamado de símbolo. Código Morse possui dois símbolos: marca e espaço. Dependendo da quantidade de símbolos (M) de um sistema, diz-se que é um sistema M -ário. Por exemplo, em computação utiliza-se o sistema binário, onde temos dois símbolos, 1 e 0. (LATHI, 1998)

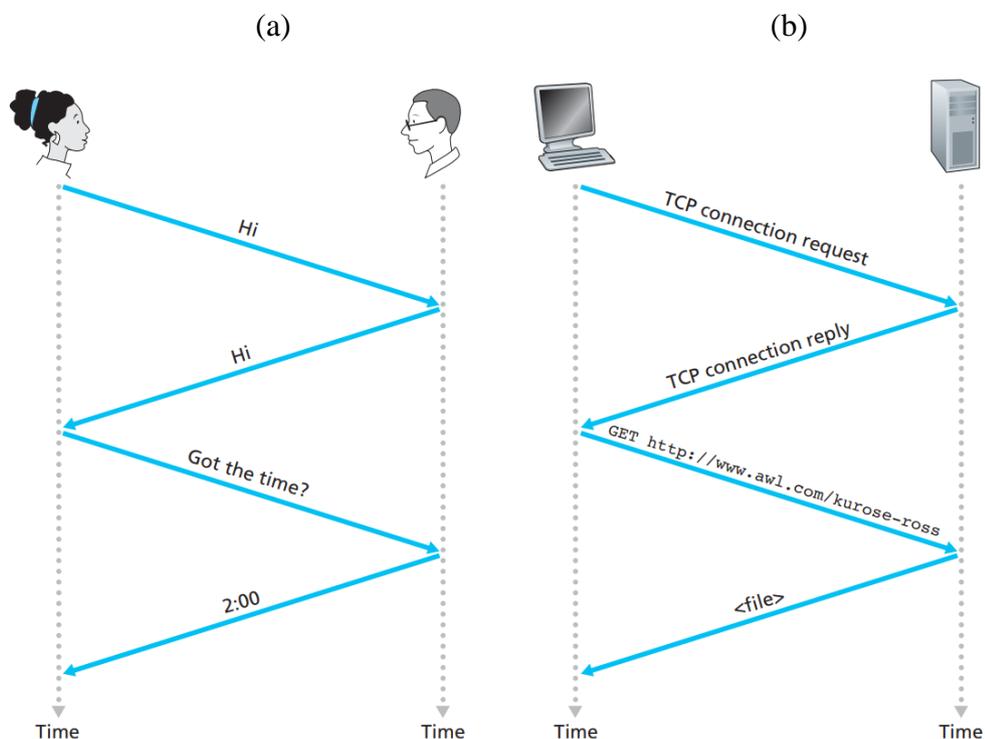
A quantidade de símbolos ou dígitos binários que um canal de comunicação pode transmitir por segundo com a probabilidade de erro próxima de zero é dada pela equação de Shannon:

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR)$$

Em que C é a capacidade do canal em bits por segundo, B é a largura de banda em Hertz e SNR a relação da potência do sinal em Watt e a potência do ruído também em Watt. Nessa equação, percebe-se que se não houver ruídos na transmissão o canal tende a ter capacidade infinita.

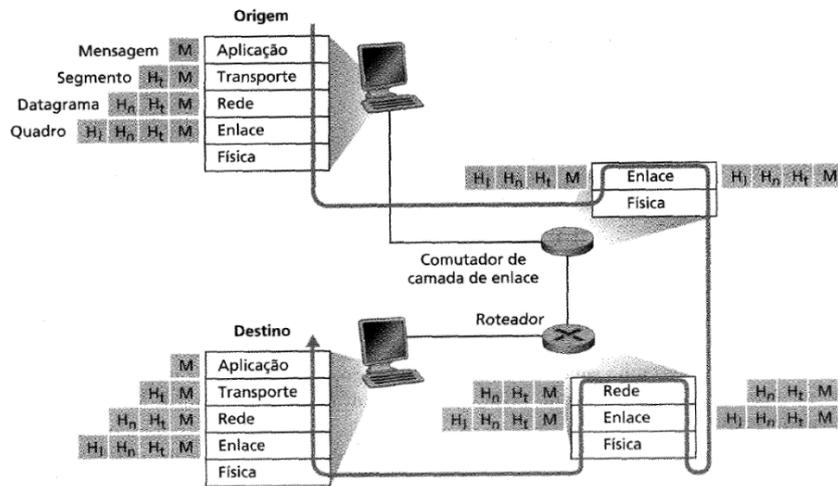
Duas pessoas ao se comunicarem utilizam uma série de regras e protocolos previamente estabelecidas para que a mensagem seja inteligível. Existe uma ordem na disposição das letras, ou símbolos, que formam palavras, essas palavras formam frases e frases formam textos. A Figura 5 mostra que em entre computadores não é diferente. Um protocolo define o formato e a ordem das mensagens trocadas entre duas ou mais entidades comunicantes, bem como as ações tomadas na transmissão e / ou recepção de uma mensagem ou outro evento (KUROSE; ROSS, 2013).

Figura 5 - Protocolo humano e protocolo de redes de computador



Em uma grande empresa de montagem, cada setor possui uma determinada função em uma linha de fabricação até chegar ao consumidor final. Em redes de computadores cada setor dessa empresa simboliza uma camada de comunicação. A Figura 6 mostra como é o processo de comunicação entre dois computadores no formato de uma linha de fabricação, onde a mensagem sai da origem passando por setores (camadas) de processo, deslocando-se para outras indústrias (comutadores e roteadores) até chegar ao destino. O modelo representativo mais comum para camadas é o OSI, representado na Tabela 1, que utiliza sete camadas e cada uma possuindo um protocolo e uma funcionalidade diferente(LI et al., 2011).

Figura 6 - Transporte de mensagem



Fonte: KUROSE; ROSS, 2006, p.39

Tabela 1 - Camadas modelo OSI

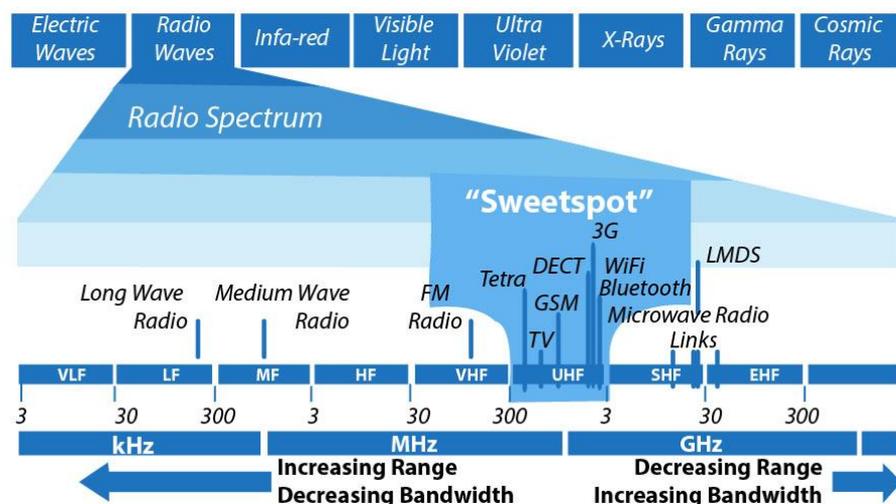
CAMADA	FUNÇÃO
7 - Aplicação	Transferência de arquivos, envio de e-mail, terminal virtual
6 - Apresentação	Formatação dos dados, conversão de códigos e caracteres
5 – Sessão	Negociação e conexão com outros nós
4 - Transporte	Oferece métodos para a entrega de dados ponto-a-ponto
3 – Rede	Roteamento de pacotes em uma ou várias redes
2 – Enlace	Detecção de erros
1 – Física	Transmissão e recepção dos bits brutos através do meio físico de transmissão

Fonte: José Mauricio Santos Pinheiro (projetodereedes.com.br)

Há ainda o modelo TCP que se diferencia por não apresentar as camadas de sessão e apresentação. A camada Física tem relação direta com o canal de transmissão. Dependendo do meio utilizado, seja cabo coaxial, DSL, fibra ótica ou ainda sem fio, existe um protocolo que rege o sistema de comunicação (LI et al., 2011), (COLIN; MATHIEU; NAKECHBANDI, 2016).

A tecnologia sem fio ou *wireless* teve origem de forma regulamentada em 1985 por uma decisão do órgão regulador na área de telecomunicações dos Estados Unidos, chamado *Federal Communications Commission (FCC, 1934)*, que permitiu o uso sem licença das bandas do espectro de rádio em 900 MHz, 2,4 GHz e 5,8 GHz. Com o advento da decisão as indústrias manufatureiras se aproveitaram do espectro e começaram a produzir produtos, porém, como esses produtos eram fabricados por diferentes companhias, os mesmos não possuíam compatibilidade, não atraindo tanto os consumidores. Isso fez surgir o protocolo padrão 802.11 aprovado pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)* em 1997. Alguns anos depois uma organização global sem fins lucrativos foi criada para promover o novo padrão sem fio e então nomeou a tecnologia de *Wi-Fi*. Atualmente a comunicação sem fio tornou-se ferramenta de trabalho e lazer para o cotidiano das pessoas. Existem muitas tecnologias que podem ser usadas para comunicação sem fio e *Wi-fi* é, sem dúvida, uma tecnologia muito eminente que possui grandes aplicações em atividades pessoais e profissionais(SINGH et al., [s.d.]).

Figura 7 - Espectro de ondas de rádio

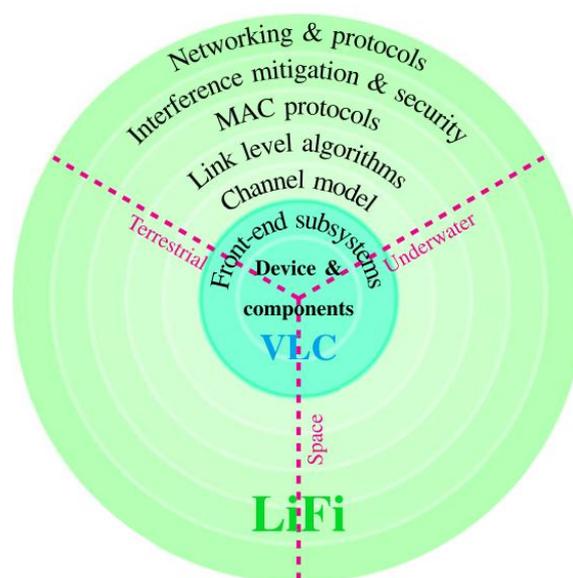


Fonte: Nuzeal Corporation – IT Product Compliance Management for Global Markets

A Figura 7 amplia o espectro de ondas de rádio mostrando algumas aplicações em cada faixa de frequência. Percebe-se que quando se fala da tecnologia *Wi-Fi* trata-se apenas de uma pequena faixa localizada no chamado *Sweetspot* do espectro eletromagnético. Aplicações em astronomia, por exemplo, utilizam antenas para comunicação que operam na faixa de 30 até 300 GHz. Após essa faixa de operação encontra-se no espectro ótico de luz infravermelho e luz visível.

Optical Wireless Communications (OWC) é o conceito dado para comunicação a partir da faixa de operação que utiliza luz infravermelha, luz visível e até luz ultravioleta. O dispositivo mais antigo que utiliza luz visível para comunicação é o *Photophone* desenvolvido por Alexander Graham Bell que utiliza a luz solar para transmitir sinais de voz por aproximadamente 200m (BELL et al., 1880). Dentro desse conceito, o físico alemão Harald Hass definiu o termo *Li-Fi* em um TED Talk no ano de 2011, o qual seria uma forma de comunicação ótica (OWC)(ST, 2018).

Figura 8 - Contraste entre Li-Fi e VLC



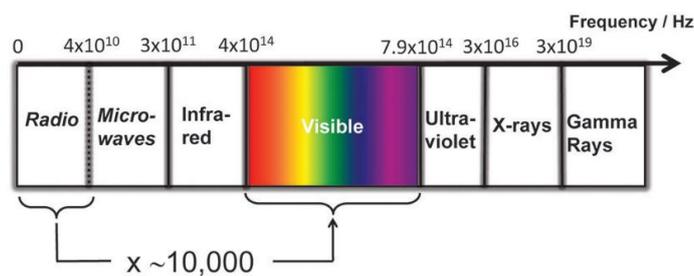
Fonte: Journal of Lightwave Technology (Volume: 34, Issue: 6, March15, 15 2016)

A Figura 8 mostra que enquanto *Li-Fi* descreve um sistema completo de comunicação sem fio via luz, *Visible Light Communication* (VLC) engloba uma parte mais específica de *Li-Fi*, como uma técnica de comunicação essencialmente em substituição do cabo, e descreve a transmissão de dados utilizando LED's e recepção utilizando fotodiodos pelo princípio da detecção direta (HAAS et al., 2016). As atividades com VLC levaram a uma padronização

denominada IEEE 802.15.7, na qual tem-se os tipos de modulação disponíveis para transmissão e ainda um suporte para dimerização (RAJAGOPAL; ROBERTS; LIM, 2012).

A demanda por equipamentos sem fio tem feito pesquisadores explorar o espectro eletromagnético e com o advento dos LED's isso inclui também a faixa de luz visível (KARUNATILAKA et al., 2015). São grandes as motivações para se trabalhar com essa tecnologia. A Figura 9 por exemplo, mostra que a largura de banda do espectro de luz visível é incomparavelmente maior do que a de rádio. Além disso, não causa e nem sofre interferência das ondas de rádio, é segura no sentido de que não ultrapassa as paredes de um local fechado, sendo perfeita para aplicações hospitalares, aeroespaciais e utilização *indoor* de maneira geral (MA; LAMPE; HRANILOVIC, 2013).

Figura 9 - Largura de Banda da luz visível



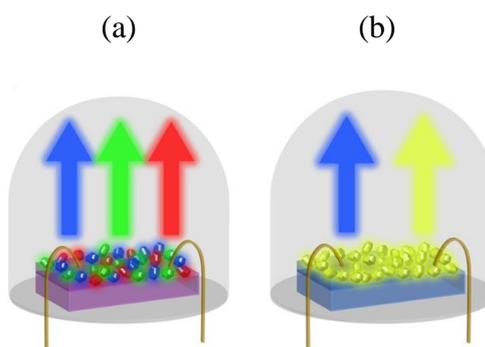
Fonte: SPIE Newsroom

3 TIPOS DE LEDs

O LED possui a característica de emitir luz em uma faixa específica do espectro de luz visível incluindo o infravermelho, através de um processo de dopagem principalmente nas cores azul, verde, vermelho e suas combinações (PINTO, 2012). Servem como fonte de iluminação artificial, e são amplamente utilizados em telefones celulares, câmeras fotográficas, controle remotos, televisores entre outros.

A qualidade de uma lâmpada LED é sempre associada com o quão brilhante e uniforme é a iluminação de uma área. Isto é o que influencia as pessoas na escolha do tipo de lâmpada a ser utilizada. Além de uma boa iluminação, propriedades da cor tais como a temperatura e a distribuição de uma fonte de luz desempenham um papel importante na iluminação [35].

Figura 10 – Abordagem tricromática (UV) (a) e dicromática(b)



Fonte: (LIN; KARLSSON; BETTINELLI, 2016)

A geração de luz branca por um semicondutor cuja luz é parcialmente ou totalmente usada para excitar uma ou várias camadas de fósforo, é um método viável e comum para aplicações gerais de iluminação. Existem várias abordagens diferentes para gerar luz branca com base em fósforos excitados por LEDs semicondutores. Eles podem ser classificados em abordagens dicromáticas, tricromáticas e tetracromáticas como mostra a Figura 10 (a) e (b). (SCHUBERT, 2006) Essas abordagens usam fontes de excitação UV ou fontes de excitação de espectro visível (principalmente LEDs azuis). Geralmente, a eficiência da fonte luminosa diminui com o aumento da multi-cromaticidade da fonte. Assim, as fontes dicromáticas têm a maior eficácia luminosa da radiação e também o maior potencial de eficiência da fonte luminosa. Por outro lado, a capacidade de renderização de cor é menor para fontes dicromáticas e aumenta com a multi-cromaticidade da fonte. (SCHUBERT, 2006)

Figura 11 - Mistura de cores



Fonte: Elaborada pelo autor

Sabendo que a luz branca pode ser obtida combinando as três cores fundamentais (vermelho, verde e azul, RGB), como mostra a Figura 11, geradas por três LEDs distintos, seria necessário empregar vários chips de LED e conseqüentemente gerar uma grande desvantagem devido aos altos custos de produção. Por esta razão, é atualmente preferido usar a abordagem dicromática, utilizando apenas um LED combinado com fósforos adequados.(LIN; KARLSSON; BETTINELLI, 2016)

O uso de LED branco para iluminação e comunicação foi conduzido por Tanaka et al. no início dos anos 2000 (TANAKA; HARUYAMA; NAKAGAWA, 2000), relatando uma transmissão de dados de 400 Mbps baseada em análises numéricas e simulações de computador. Nos últimos anos, grupos de pesquisa conseguiram demonstrar que altas taxas de dados até a faixa de gigabits por segundo são possíveis com o VLC baseado em LED, usando a escolha certa dos esquemas de modulação, codificação de linha e uso de equalizadores no transmissor e receptor.(JR, 2016)

A principal propriedade dos LEDs que tornam viável o VLC, é sua suscetibilidade à modulação de amplitude em frequências altas o suficiente para atingir taxas de dados significativas, sem afetar a função de iluminação primária do LED(JOVICIC; LI; RICHARDSON, 2013). A funcionalidade de iluminação primária não é afetada porque o olho humano não consegue perceber a modulação de amplitude da luz, desde que a frequência de modulação esteja acima do chamado limiar de fusão de *flicker*(JOVICIC; LI; RICHARDSON, 2013).

As tecnologias LED, apresentam características de desempenho que ampliam a viabilidade e operação em um sistema VLC. Existem diferentes tipos de LEDs, cada um com suas próprias características especiais que os tornam adequados para diferentes tipos de aplicações com requisitos específicos.

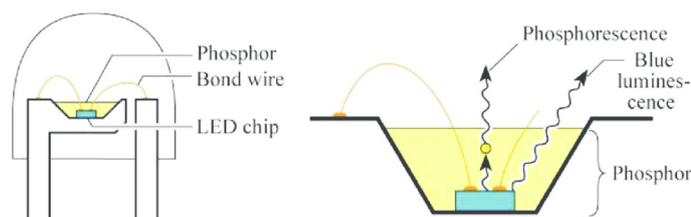
Multi-chip LEDs consistem em três ou mais chips de LED que emitem cores diferentes, geralmente vermelho, verde e azul (RGB), para produzir luz branca. Eles têm a vantagem de que o controle de cores pode ser alcançado dependendo das intensidades de luz dos diferentes chips, e três canais de cores individuais podem ser implementados, cada um fornecendo aproximadamente 15 MHz de largura de banda. Os pc-LED são mais baratos e menos complexos comparados com esse tipo de LED, porém eles possuem limitação na largura de banda devido a camada de fósforo. (KARUNATILAKA et al., 2015),(JR, 2016)

Os OLEDs geram luz usando uma camada orgânica prensada entre portadores positivos e negativos, e são usados principalmente em monitores de tela plana. A resposta de frequência típica para OLEDs é da ordem de 100 kHz, muito mais baixa do que os LEDs inorgânicos, o que torna os OLEDs menos adequados para aplicações de alta velocidade.(KARUNATILAKA et al., 2015)

Micro LEDs ou μ -LED são matrizes de diodo que geralmente emitem luz na faixa de comprimento de onda de 370–520 nm, com a possibilidade de usar conversão de comprimento de onda para produzir luz branca. Cada pixel individual varia de 14 a 84 μm , a largura de banda de 3 dB atinge 450 MHz, permitindo velocidades de até 1,5 Gbps. (KARUNATILAKA et al., 2015),(JR, 2016) Neste caso, além de iluminação, as informações poderiam estar sendo transmitidas por um painel de TV, por exemplo.

Os LEDs de cavidade ressonante ou rc-LED usam o método de cavidade ressonante para melhorar a eficiência da extração de luz, bem como outras propriedades como direcionalidade, intensidade e pureza. Os rc-LEDs são particularmente adequados para aplicações de comunicação óptica, mais especificamente para comunicação de dados via POF (Plastic Optical Fibre) e comunicação infravermelho, mas rc-LEDs de alto brilho são melhores para o VLC para telas coloridas. Eles podem ser modulados em excesso de 100 MHz. (KARUNATILAKA et al., 2015),(JR, 2016)

Figura 12 – pc-LED

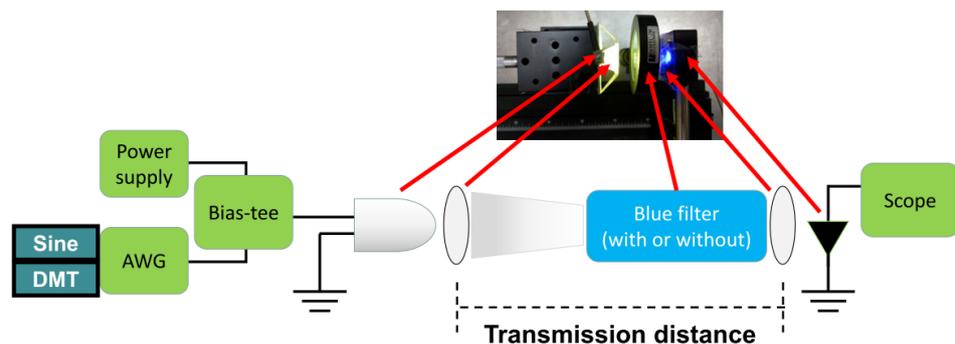


Fonte: (NOTO et al., 2016)

O LED *Phosphor Converted* ou pc-LED emprega um único chip LED azul de nitrato de gálio-índio (InGaN) para pulsar um revestimento de fósforo de Yttrium Garnet (YAG). O fósforo converte parte da luz azul em verde, amarelo e vermelho, enquanto a outra parte da luz azul é vazada, cuja mistura produz branco como mostra a Figura 10 e a Figura 11. Dependendo da quantidade de fósforo, a luz branca produzida pelos pc-LEDs pode ser classificada como branco quente, branco neutro ou branco frio e caracterizada pela temperatura de cor. Esses LEDs são de baixo custo, mas têm uma limitação de largura de banda (a frequência de modulação direta é limitada a alguns MHz) devido à resposta lenta do fósforo. (KARUNATILAKA et al., 2015), (JR, 2016)

O processo de geração de luz amarela na camada de fósforo tem uma constante de tempo substancialmente maior que o próprio LED azul e, portanto, um filtro azul como na Figura 13, é normalmente usado no receptor para eliminar essa componente lenta e reduzir a interferência entre símbolos (ISI). Portanto, na maioria das configurações experimentais, esse filtro é aplicado. No entanto, Sung et al. (SUNG; CHOW; YEH, 2014) notou que o filtro azul diminui o SNR em frequências mais baixas e deixa o SNR nas frequências mais altas inalteradas. Assim, do ponto de vista da teoria da informação, diminui a capacidade de informação do canal. (STEPNIAK; SCHUPPERT; BUNGE, 2015)

Figura 13 – Setup experimental para avaliar a necessidade do filtro de luz azul



Fonte: [22]

Os pc-LEDs, RGB-LED, μ -LED e OLED possuem características específicas de operação, tais como, diferentes faixas de frequência. Além disso, outros critérios para escolha do tipo de LED na elaboração de um projeto de transmissão de dados do tipo VLC devem ser levados em consideração, como, por exemplo, a potência de operação do sistema de iluminação, índice de cores e custo, dentre outros fatores que variam de acordo com o propósito do sistema VLC (KARUNATILAKA et al., 2015).

Tabela 2 – Comparação de diferentes tipos de LEDs

Parâmetros	pc-LED	RGB-LED	μ -LED	OLED
Banda	3-5MHz	10-20MHz	>300MHz	<1MHz
Eficiência	130 lm/W	65 lm/W	N/A	45 lm/W
Custo	Baixo	Alto	Alto	Baixo
Complexidade	Baixo	Moderado	Alto	Alto
Aplicação	Displays	Displays	Displays	Displays

Fonte: IEEE Communications Surveys & Tutorials

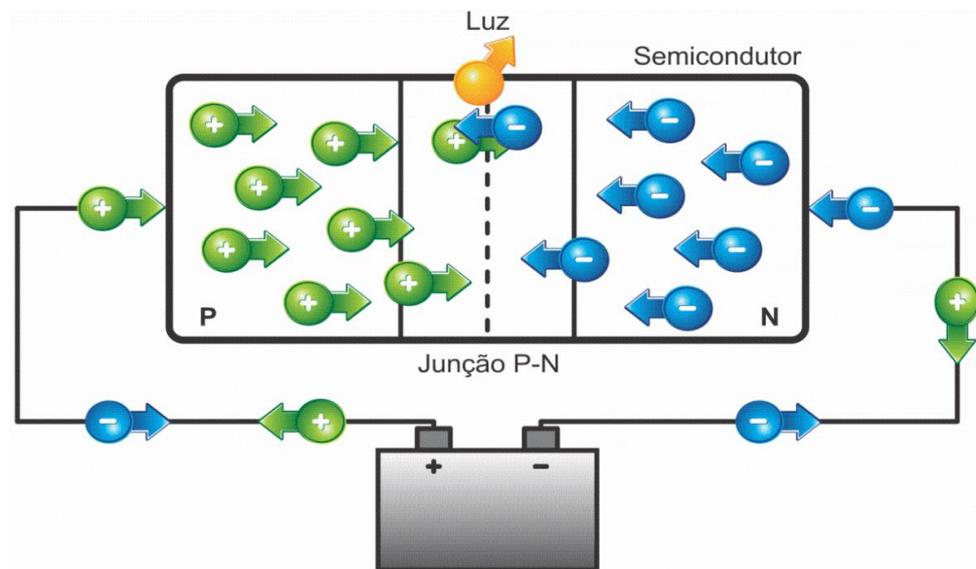
A Tabela 2 resume as principais características das tecnologias de LED mais difundidas analisando a banda de frequência, a eficiência, custo, complexidade e aplicação (KARUNATILAKA et al., 2015). Atualmente, as lâmpadas que utilizam pc-LED caracterizam-se por uma série de vantagens importantes comparadas com as gerações anteriores de lâmpadas, pois não contêm mercúrio altamente tóxico, são mecanicamente robustas, têm uma maior longevidade (até 25.000 a 30.000 h) e especialmente têm uma maior eficiência energética. (LIN; KARLSSON; BETTINELLI, 2016)

Logo, utilizando-se de um tipo de LED já amplamente difundido em iluminação e até mesmo utilizado em displays, é possível integrar a infraestrutura de iluminação e a função de comunicação de dados, para isso é preciso estabelecer essa conexão através de protocolo adequados que serão abordados no Capítulo 4.

4 CODIFICAÇÃO DE DADOS PARA COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL

O LED possui dois materiais semicondutores distintos, um do tipo P e outro do tipo N, formados através de uma dopagem eletrônica. Nesta junção, o material do tipo P possui lacunas (falta de elétrons) enquanto o material do tipo N possui cargas negativas (excesso de elétrons). Quando se polariza diretamente, os elétrons e lacunas se movimentam em direção ao mesmo ponto. Assim, a combinação entre estes elementos resulta na emissão de fótons, transformando energia elétrica em luz. (PINTO, 2012)

Figura 14 – Processo de emissão de luz em um LED



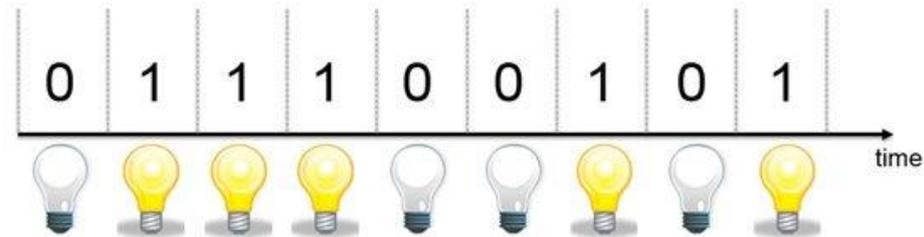
Fonte: Rafael Adaime Pinto (2012)

O processo oposto também é possível. Em uma amostra de semicondutor exposta a uma fonte de luz externa, os fótons que chegam à amostra podem fornecer aos elétrons a quantidade certa de energia para entrar em condução, através de um efeito conhecido como absorção de fótons. Esses elétrons fotogerados estão livres para se mover na rede de semicondutores e, como tal, podem servir ao propósito de portadores de carga sob a ação de um campo elétrico aplicado externamente (HARUYAMA, 2010).

Quando o mesmo dispositivo é usado para fins de iluminação e comunicação de dados, várias considerações importantes sobre o design do sistema devem ser consideradas. Esse cenário é particularmente relevante quando o dispositivo de iluminação é um LED ou uma

matriz de LEDs, já que outros dispositivos de iluminação oferecem suporte limitado para comunicações. (HARUYAMA, 2010)

Figura 15 – Princípio elementar da comunicação por luz visível



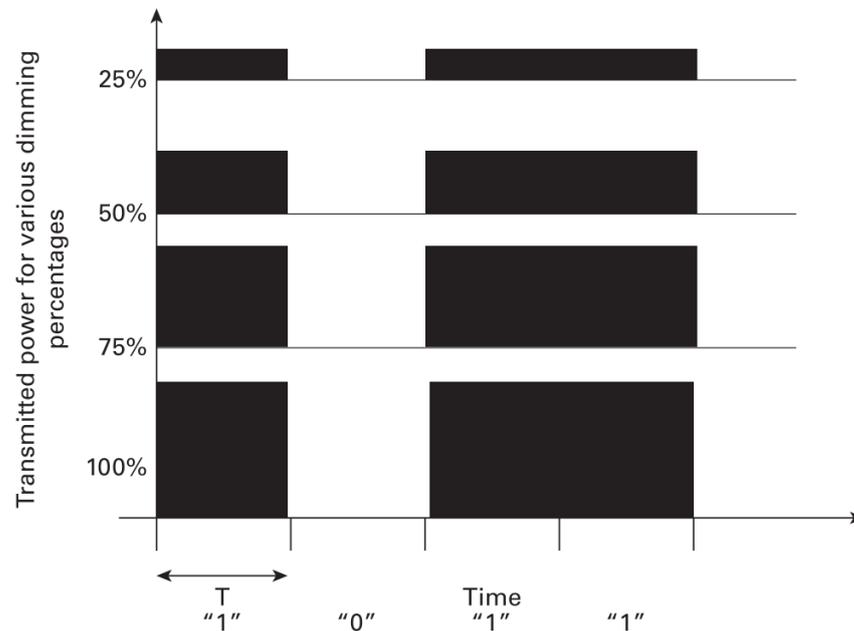
Fonte: Texas Instruments E2E Community

Dessa forma, utilizando-se das suscetibilidades dos LEDs em serem modulados em altas frequências descritas no Capítulo 3, e também um fotodiodo, através da absorção de fótons, pode-se transmitir sinais em taxas consideráveis através do chaveamento do LED, como mostra a Figura 15. Logo, temos um LED que além de servir para iluminação, é capaz de transmitir sinais. Também, um fotodiodo como receptor.

Uma limitação importante a ter em mente é que um dispositivo de iluminação deve funcionar como uma lâmpada, por isso precisamos de modulações que evitem oscilações no nível de iluminação (como *on-off keying*, OOK) e que podem ser usadas mesmo quando a luz é desligada (com a lâmpada emitindo abaixo ou perto da sensibilidade do olho). (RUFO et al., 2011)

Entre os tipos de modulação existentes existem quatro diferentes métodos que encapsulam informações no domínio do tempo no contexto do VLC. A principal diferença entre os cenários de comunicação convencionais e o VLC é o requisito de manter um desempenho de comunicação adequado, juntamente com a necessidade de reduzir a intensidade da luz. São elas: OOK, PPM, IPPM, VPPM. (ARNON, 2015)

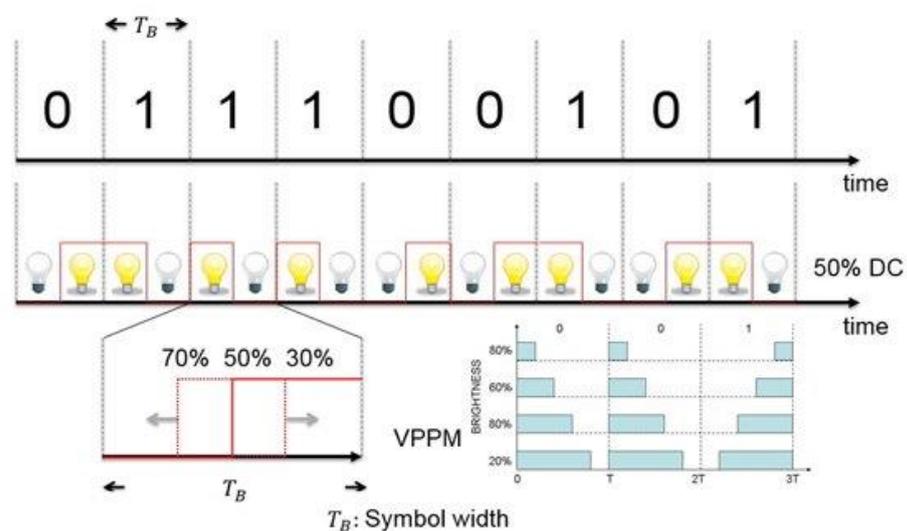
Figura 16 – Modulação OOK



Fonte: (ARNON, 2015)

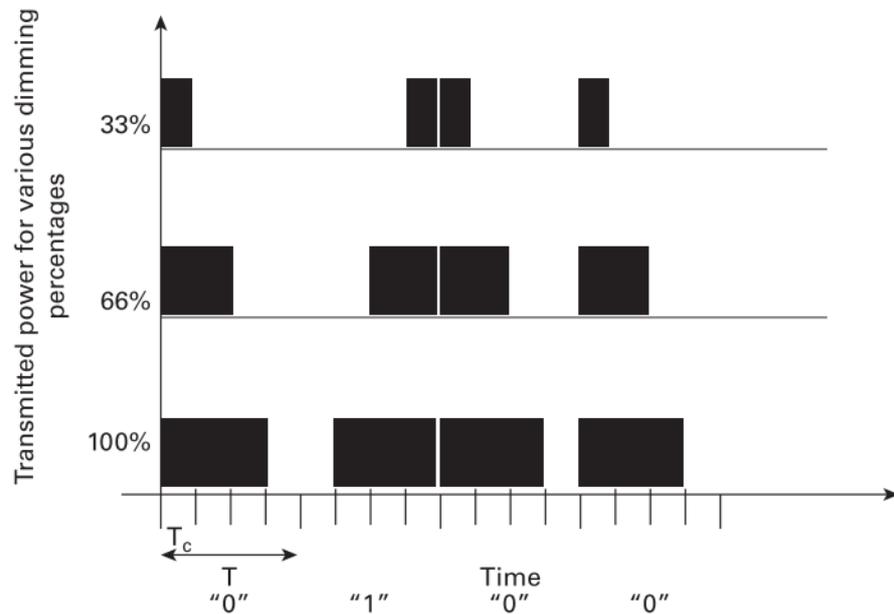
Na modulação *on-off keying* (OOK), mostrada na Figura 16, o sinal binário é codificado transmitindo energia óptica por T segundos se a informação for "1", enquanto que quando a informação é "0", nenhuma potência óptica é transmitida. O escurecimento da luz é implementado reduzindo a potência de pulso transmitida de acordo com o percentual de escurecimento necessário. (ARNON, 2015)

Figura 17 – Princípio de funcionamento da modulação VPPM



Fonte: Texas Instruments E2E Community

Figura 18 – Modulação VPPM



Fonte: (ARNON, 2015)

Variable pulse position modulation (VPPM) é uma forma de modulação de sinal na qual o bit de mensagem é codificado transmitindo um pulso no início do símbolo para “0” e no final do símbolo para “1”. A duração do pulso é determinada de acordo com a percentagem de iluminação necessária (*dimming*). A principal vantagem deste método é que a comunicação não é afetada por uma mudança na quantidade de escurecimento, desde que haja alguma iluminação. Este esquema é repetido a cada T segundos, de modo que a taxa de bits transmitida é de $1 / T$ bits por segundo. (ARNON, 2015)

Atualmente já existe uma padronização para a comunicação por luz visível (*IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support*) onde estão presentes apenas as modulações OOK, VPPM. Porém, outro tipo de modulação também está presente: a modulação *Colour shift keying (CSK)*. Essa pode ser usada se o sistema de iluminação usar LEDs do tipo RGB. Combinando as diferentes cores de luz, os dados de saída podem ser transportados pela própria cor e assim a intensidade da saída pode ser constante. A desvantagem deste sistema é a complexidade do transmissor e do receptor. (GEORGE et al., 2014)

O padrão IEEE oferece três configurações físicas (PHY) para o VLC. O PHY I opera de 11,67 a 266,6 kbps, o PHY II opera de 1,25 a 96 Mbps e o PHY III opera entre 12 e 96 Mbps. PHY I e PHY II são definidos para uma única fonte de luz, e suporte para modulação OOK e

VPPM. O PHY III utiliza múltiplas fontes ópticas com diferentes frequências (cores) e usa um formato de modulação CSK. (RAJAGOPAL; ROBERTS; LIM, 2012)

Cada configuração contém mecanismos para modular a fonte de luz, codificação de linha (*run length limited*, RLL) e codificação de canal para correção antecipada de erros (*forward error correction*, FEC).

Figura 19 – RLL 4B6B

4B (input)	6B (output)	Hex
0000	001110	0
0001	001101	1
0010	010011	2
0011	010110	3
0100	010101	4
0101	100011	5
0110	100110	6
0111	100101	7
1000	011001	8
1001	011010	9
1010	011100	A
1011	110001	B
1100	110010	C
1101	101001	D
1110	101010	E
1111	101100	F

Fonte: IEEE 802.15.7

Os códigos de linha RLL são usados para evitar execuções longas de 1s e 0s que podem causar problemas de *flicker* e recebem símbolos de dados aleatórios na entrada e garantem o equilíbrio DC com 1s e 0s iguais na saída de cada símbolo. Vários códigos de linha RLL, como Manchester, 4B6B e 8B10B são definidos no padrão e fornecem compensações entre a sobrecarga de codificação e a facilidade de implementação. (RAJAGOPAL; ROBERTS; LIM, 2012)

A Figura 19 mostra uma tabela padrão disponibilizada pelo padrão IEEE da codificação de linha 4B6B, onde 2 bits são acrescentados em conjuntos de 4bits formando *frames* de 6 bits.

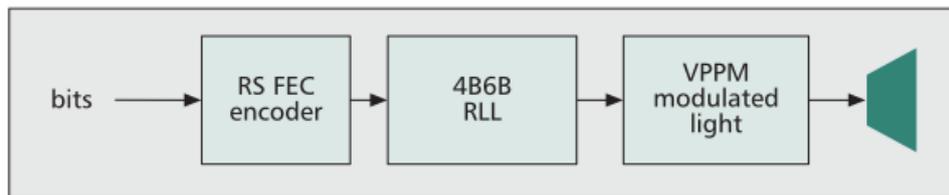
O IEEE 802.15.7 também suporta vários esquemas FEC. Basicamente trata-se da introdução de dados redundantes, antes da transmissão ou armazenamento de dados. O FEC fornece ao receptor a capacidade de corrigir erros sem um canal reverso para solicitar a retransmissão de dados. O primeiro código FEC, chamado de código Hamming, foi introduzido no início dos anos 50. Reed-Solomon (RS) e códigos convolucionais (CC) são preferidos em relação aos esquemas avançados de codificação. (RAJAGOPAL; ROBERTS; LIM, 2012)

Os códigos Reed-Solomon são códigos cíclicos não binários com símbolos compostos de sequências de m bits, onde m é qualquer inteiro positivo com um valor maior que 2. São particularmente úteis para correção de erros de *burst*; isto é, eles são eficazes para canais que possuem memória. Além disso, eles podem ser usados eficientemente em canais onde o conjunto de símbolos de entrada é grande. Uma característica interessante do código RS é que até dois símbolos de informação podem ser adicionados a um código RS de comprimento n sem reduzir sua distância mínima. (SKLAR, 2001)

Em sistemas de comunicação sem fio, satélite e espacial, a redução do erro é crítica e, devido à excelente capacidade de correção de erros, os códigos convolucionais binários são um dos mais conhecidos códigos de correção de erros para esses sistemas de comunicação. Existem dois ramos de algoritmos de decodificação para códigos convolucionais: decodificação sequencial (probabilística) e decodificação de limiar (feedback, algébrico). (BYUN et al., 2010)

O padrão IEEE 802.15.17 oferece três padrões para transmissões VLC. Segundo Alin-Mihai Cailean e Mihai Dimian (2017) em seu estudo sobre o impacto do padrão 802.15.17, ao contrário da modulação OOK, a distância máxima de comunicação utilizando modulação VPPM é reduzida enquanto a taxa de dados permanece constante. A modulação VPPM é idealizada principalmente para aplicações que envolvem variação de fluxo luminoso (*dimming*) de alta resolução e situações em que a taxa de dados é menos significativa em relação à distância de comunicação. No âmbito do transporte, o VPPM parece ser adequado para aplicações de economia de energia com base no controle de intensidade de luz, como nos sistemas inteligentes de iluminação pública, que podem ser ainda mais aprimorados com recursos de transmissão de dados (CA, 2017). Diante disso, foi escolhida a modulação VPPM para a transmissão VLC neste trabalho, onde Figura 20 mostra um diagrama de blocos da transmissão.

Figura 20 – Diagrama de blocos da transmissão VLC utilizando modulação VPPM



Fonte: IEEE Communications Magazine (2012, pg. 72-82)

5 DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSMISSOR/RECEPTOR VLC

Uma comunicação dita *simplex* é quando há um transmissor e um receptor e os papéis não se invertem. Já uma comunicação *half-duplex* é quando um dispositivo constitui tanto um transmissor quanto um receptor, porém não simultaneamente. Dispositivos de comunicação por luz visível, geralmente utilizam sistemas ditos *simplex* ou *half-duplex*. Além disso, os sistemas são geralmente híbridos (RAHAIM; VEGNI; LITTLE, 2011) utilizando RF ou infravermelho (*infrared* – IR).

Neste capítulo será mostrado um protótipo de comunicação VLC tipo *simplex*, seu desenvolvimento, resultados obtidos e características observadas no mesmo.

5.1 TRANSMISSOR VLC

Como, neste trabalho, o objetivo da comunicação por luz visível não é atingir altas taxas de transmissão, uma aproximação do modelo PHY I é o mais adequado. Todos os testes e desenvolvimento do protótipo serão realizados em ambiente interno e segundo Carlos Medina *et. al* (2015) para aplicações externas, códigos mais robustos usam RS e CC concatenados, para superar a perda de trajetória devido a distâncias mais longas e possíveis interferências introduzidas por fontes de ruído óptico.(JR, 2016) Portanto optou-se também por desconsiderar os códigos FEC.

Tabela 3 – Modos de operação PHY I com modulação VPPM

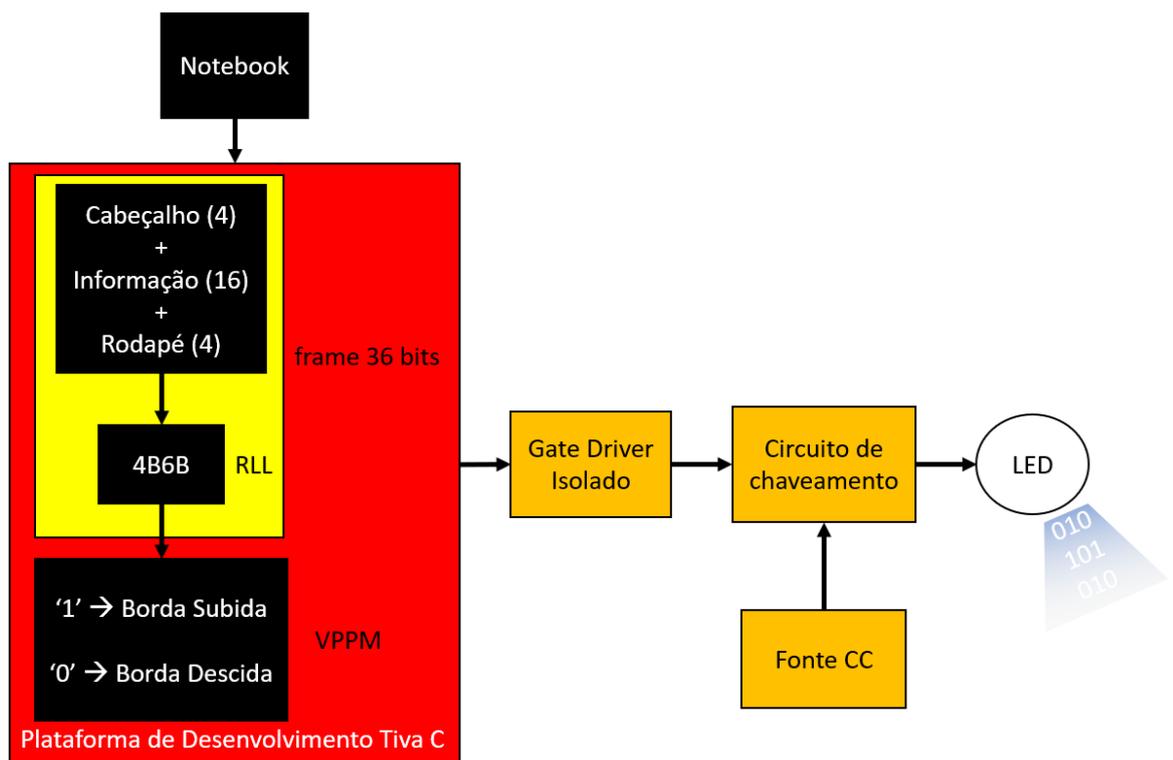
Modulação	Código RLL	Taxa de clock óptico	Fec		Taxa de dados
			Código Externo (RS)	Código interno (CC)	
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	não	35.56 kb/s
			(15,4)	não	71.11 kb/s
			(15,7)	não	124.4 kb/s
			não	não	266.6 kb/s

Fonte: Adptado: IEEE Communications Magazine (2012, pg. 72-82)

Então, dos padrões disponíveis, parcialmente mostrados na Tabela 3, foram respeitados apenas os grifados, deixando o digrama para transmissão segundo o padrão mostrado na Figura 20, porém com uma taxa de dados de 10 kbps, já que a taxa de chaveamento de Drivers para LED com alta eficiência são usualmente limitados por algumas dezenas de kbps.(LEE et al., 2016) além de facilitar a compreensão e respeitar os limites de processamento da Plataforma de Desenvolvimento utilizada.

A Figura 21 mostra um diagrama geral da transmissão VLC realizada, destacando o emprego de um notebook responsável por enviar o código a ser transmitido, a plataforma de desenvolvimento Tiva™ C desenvolvida pela Texas Instruments, um *gate driver* isolado entre plataforma e circuito de chaveamento responsável por gerar o padrão de forma de onda a ser transmitido conforme mostra o diagrama apresentado. Para essa proposta optou-se por transmitir um *frame* com 24 bits (6x4bits) que ao aplicar o código de linha gera-se 36 bits (6x 6bits). Parte desse *frame*, é simbolicamente representado por metadados, ou seja, dados complementares de transmissão, sendo 6 bits para cabeçalho e 6 para rodapé. O restante dos 24 bits (que decodificados geram 16 bits) é composto por informação útil ou *payload*. Esses números foram escolhidos com base no código RLL 4B6B, podendo gerar combinações de caráter reservado para identificar de forma padrão o início e o fim de um *frame*.

Figura 21 – Diagrama representativo empregado para transmissão VLC



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.1 Plataforma de desenvolvimento empregada para transmissão de dados

Para realizar o tratamento e transmissão de dados do protótipo de transmissão VLC foi empregado o microcontrolador TM4C123GH6PM acoplado na plataforma de desenvolvimento

Tiva™ C desenvolvida pela Texas Instruments. O microcontrolador possui arquitetura ARM (Acorn RISC Machine), arquitetura da família RISC desenvolvida pela empresa ARM holdings e o ambiente de desenvolvimento (IDE) escolhido foi o Keil μ Vision 5. O mesmo possui uma versão limitada de funcionamento, liberando 32 kb de dados em código para programação, o que é considerado suficiente para os propósitos desse trabalho, pois é caracterizado pela facilidade em criar novos projetos e simplicidade para acompanhar os registradores em tempo real.

Para realizar a transmissão de dados foi empregado um temporizador com suporte a tratamento de interrupções, disponibilizados pela plataforma utilizada. As bibliotecas TivaWare™ também foram utilizadas, visto que essas disponibilizam funções que facilitam a implementação do projeto com esses microcontroladores.

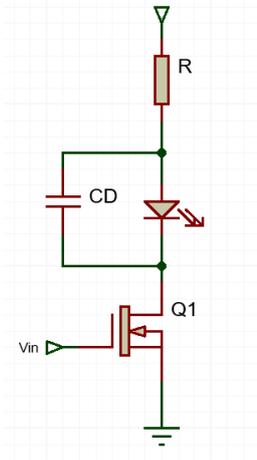
5.1.2 Driver para acionamento do LED para VLC

O projeto de drivers de LED para comunicações é uma tarefa desafiadora, pois envolve duas áreas normalmente separadas de projetos eletrônicos. Projeto de potência está ligado a processamento de energia e visa, ao final, reduzir a ondulação da corrente no LED, reduzindo a ondulação da intensidade luminosa. Logo, o sistema ideal é muito lento. Para comunicação deseja-se o oposto, maximizar a largura de banda que se consegue modular a corrente do LED, portanto a intensidade luminosa. O projeto do driver de LED também deve levar em consideração o tipo de sinal de modulação. Dois tipos de drivers podem ser considerados: Drivers On / Off são considerados drivers adequados para a transmissão de formatos de modulação digital e drivers analógicos são considerados adequados para formatos de modulação mais complexos, exigindo níveis de saída contínuos ou múltiplos (HARUYAMA, 2010).

Como o protótipo utiliza modulação digital, foi considerado a utilização de um Driver On/Off utilizando apenas um transistor de efeito de campo de metal-óxido-semicondutor (MOSFET) pois é o dispositivo ativo preferido no domínio digital por sua baixa resistência à condução. Assim, o MOSFET pode lidar simultaneamente com altas correntes dissipação de energia conforme mostra a Figura 22.(HARUYAMA, 2010) Essa Figura mostra um modelo simples de driver para VLC utilizando apenas um transistor MOSFET Q1, um LED para transmissão, um resistor R para limitar a corrente onde, neste trabalho é limitada pela fonte de

corrente contínua e um capacitor C_D empregado para alcançar maiores velocidades de chaveamento.

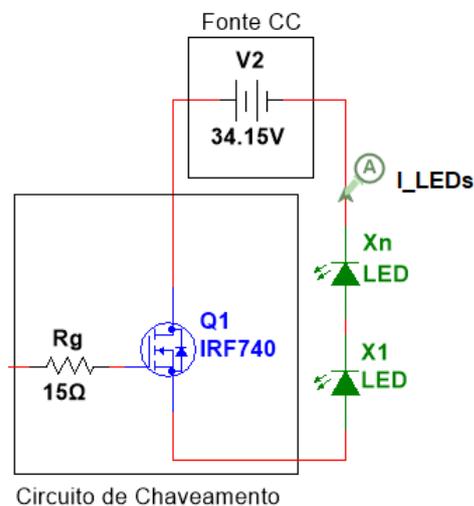
Figura 22 – Modelo de driver utilizando um único MOSFET



Fonte: Adaptado:(HARUYAMA, 2010)

Como o objetivo deste trabalho não engloba o dimensionamento de drivers para VLC para obter melhor eficiência energética e/ou largura de banda, a Figura 23 mostra o esquemático do circuito que foi empregado para alimentação dos LEDs X_1 até X_N onde $N = 28$, constituído pelo emprego de um MOSFET Q1 onde o modelo IRF740 foi escolhido pela disponibilidade e pela utilização em conversores DC/DC para telecomunicações e iluminação industrial, com alimentação através de uma fonte V2 de até $40V_{DC}$.

Figura 23 – Esquemático do circuito de chaveamento para acionamento dos LEDs.

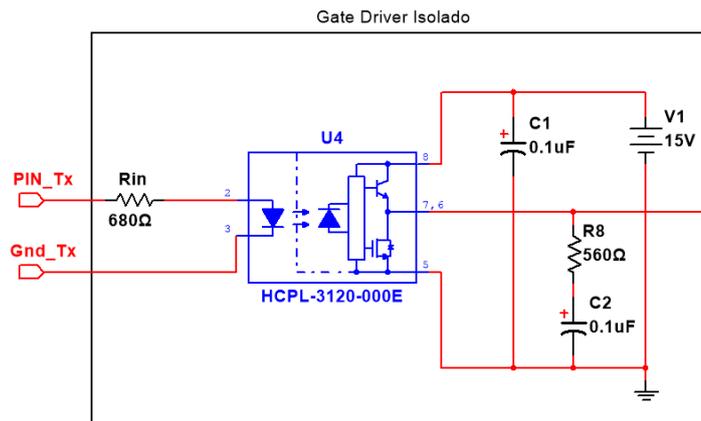


Fonte: Elaborada pelo Autor

5.1.3 Gate Driver

Para o Gate Driver foi utilizado o opto-acoplador modelo HCPL-3120 idealizado para esse tipo de aplicação. O circuito trabalha de forma isolada garantindo a segurança para a plataforma de desenvolvimento e a comunicação com o terminal do notebook. O dispositivo possui tempos de propagação de no máximo 500ns à 10kHz.

Figura 24 – Esquemático do Gate Driver



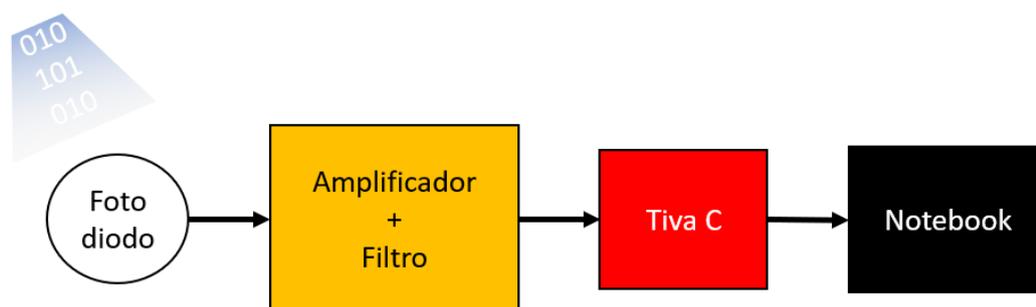
Fonte: Elaborada pelo Autor

A Figura 24 mostra o esquemático do Gate Driver onde as entradas PIN_Tx e Gnd_Tx são os pinos da plataforma responsável pela transmissão do sinal já modulado. A topologia utilizada é a mesma apresentada pelo *datasheet* para aplicações de sinais com onda quadrada (SHEET, [s.d.]).

5.2 RECEPTOR VLC

A Figura 25 mostra um diagrama simplificado para a recepção VLC. O sinal é recebido por um fotodiodo, amplificado, filtrado e processado pelo microcontrolador. Após o processamento dos dados, o microcontrolador envia-os para o *notebook* através de uma comunicação serial. É possível visualizar então, a informação e o rodapé. A seguir serão apresentados os detalhes de esquemáticos de cada bloco que compõe o receptor.

Figura 25 – Diagrama simplificado do receptor



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.1 Fotodiodo

O fotodiodo de silício de alta velocidade e alta sensibilidade utilizado é o BPW34 que consegue captar ondas de 430 até 1100 nanômetros. Sabendo-se que o espectro de luz visível vai, por aproximação, de 400 até 700 nanômetros, o fotodiodo torna-se satisfatório para as aplicações desse trabalho. Algumas características e aplicações desse fotodiodo são:

- ✓ Especialmente adequado para aplicações de 400 nm a 1100 nm
- ✓ Tempo de comutação curto (20 ns)
- ✓ Photo-interruptores
- ✓ Controles remotos IR
- ✓ Eletrônica industrial
- ✓ Para circuitos de controle e acionamento

O fotodiodo empregado é representado no circuito através da entrada do Amplificador + filtro da Figura 25.

5.2.2 Amplificador e Filtro

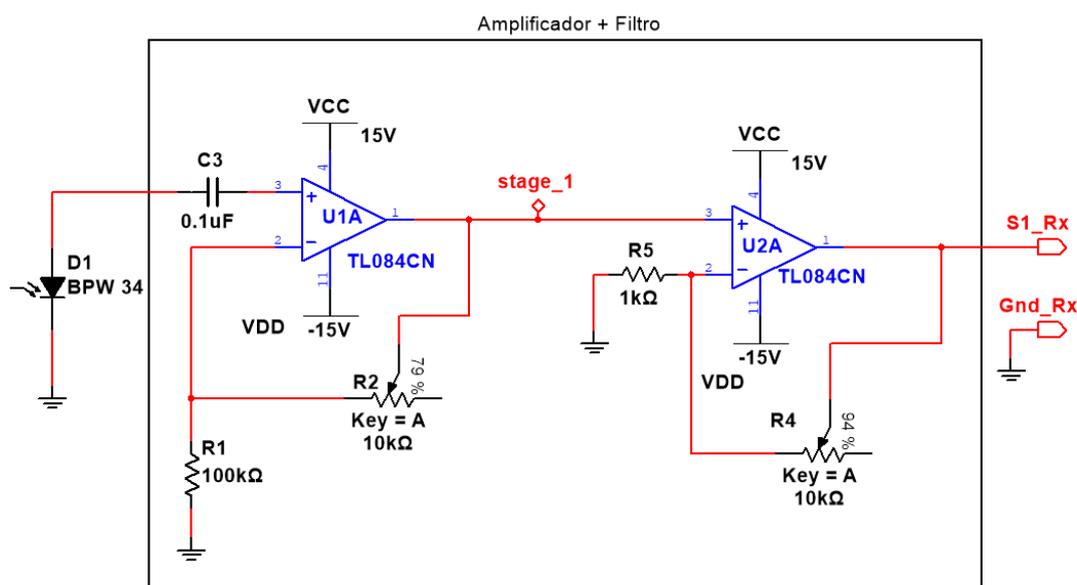
Muitos trabalhos sobre projeto de amplificador, para sistemas de comunicação de fibra óptica com taxas de dados de alta velocidade (centenas de Gbps), foram publicadas nos últimos anos. Embora o princípio do projeto da maioria deles possa ser usado em sistemas VLC, a natureza do canal de espaço livre impõe sérias limitações como fontes naturais e secundárias de iluminação e anteparos, à potência óptica do receptor. (HARUYAMA, 2010)

A principal função do amplificador nesse trabalho, mostrado na Figura 25 e Figura 26 além de amplificar o sinal recebido, é a de remoção de *offset* ou interferência provenientes da iluminação externa, a qual para aplicações de VLC podem ser fontes de ruído na comunicação. Trio Adiono e Syifaul Fuada (2017) mostram que a tensão de *offset* pode proceder à distorção

dos dados recebidos, onde esta condição ocorre devido à saturação do Amp-Op e então faz um sinal de corte. Portanto, precisa-se de um circuito de remoção de *offset* no sistema de *front-end* analógico do receptor.(ADIONO; FUADA, 1990)

Além disso, o amplificador é sensível a variação da distância entre transmissor e receptor e, para controle é realizado em malha aberta resulta que a tensão do sinal recebido varia conforme a distância. O sinal então, tem grande faixa dinâmica, dependente da distância do receptor e outros fatores geométricos. Logo, deve ser amplificado com ganho variável para adequada decodificação em diferentes situações resultantes da mobilidade do receptor. Não há um limite determinado para a tensão na recepção que pode implicar em sinais muito baixos ou elevados a ponto de danificar o circuito empregado se não forem adotadas as devidas proteções ou a operação em malha fechada que, possui um maior controle do sinal filtrado, sem grandes variações de tensão em diferentes distâncias.

Figura 26 – Esquemático do Filtro-amplificador



Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4 resume os componentes projetados para a operação do filtro, cujo projeto foi realizado empregando amplificadores com topologia não inversora. O capacitor C3 na Figura 26 atua como um filtro passa alta removendo todo o sinal DC (*offset*) proveniente de outras fontes de iluminação. Ainda, a interferência de lâmpadas fluorescentes ou incandescentes carregam uma frequência de portadora de 100 à 150 Hz, com frequência dominante/significativa de aproximadamente 100 Hz (ADIONO; FUADA, 1990). Além disso,

como o sinal recebido pelo BPW 34 é na ordem de $50\mu\text{A}$, optou-se por separar em dois estágios de amplificação para evitar trabalhar nas zonas de saturação dos Amp-Ops. O modelo de amplificador operacional utilizado no estágio de amplificação é o TL084CN que possui uma baixa corrente de polarização, tipicamente 30 pA e corrente de *offset* de 5 pA .

Tabela 4 – Tabela de componentes empregados no Filtro-amplificador

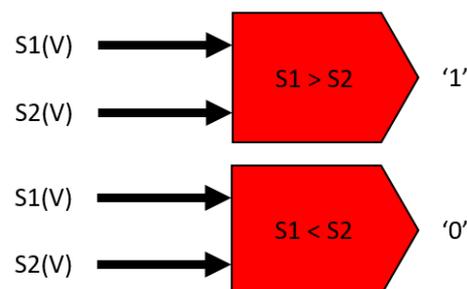
COMPONENTE	VALOR
R1	100 k Ω
R2	10 k Ω
C3	0,1 μF
R4	10 k Ω
R5	1 k Ω
TL084CN	3 MHz

Fonte: Elaborada pelo autor

5.2.3 Microcontrolador RX

Diferente do método comum para demodulação utilizando o registrador *Analog to Digital Converter (ADC)* em que se realiza amostragens e os demais processos resumidamente explicados no Capítulo 2 deste trabalho, aqui optou-se por utilizar o registrador *Analog Comparator* disponível na plataforma Tiva C. A Figura 27 mostra a lógica de funcionamento desse periférico sendo S1 e S2 tensões de entrada de 0 até 3.3V na Plataforma Tiva C. Esse periférico basicamente permite comparar dois sinais analógicos recebidos nos pinos nessa plataforma, gerando internamente um bit '1' se $S1 > S2$ ou bit '0' se $S1 < S2$. Como o periférico também possui uma referência interna, substitui-se o sinal S2 pela mesma, não havendo necessidade de utilizar uma das entradas físicas da Plataforma.

Figura 27 – Lógica de funcionamento do registrador *Analog Comparator* da Plataforma Tiva C



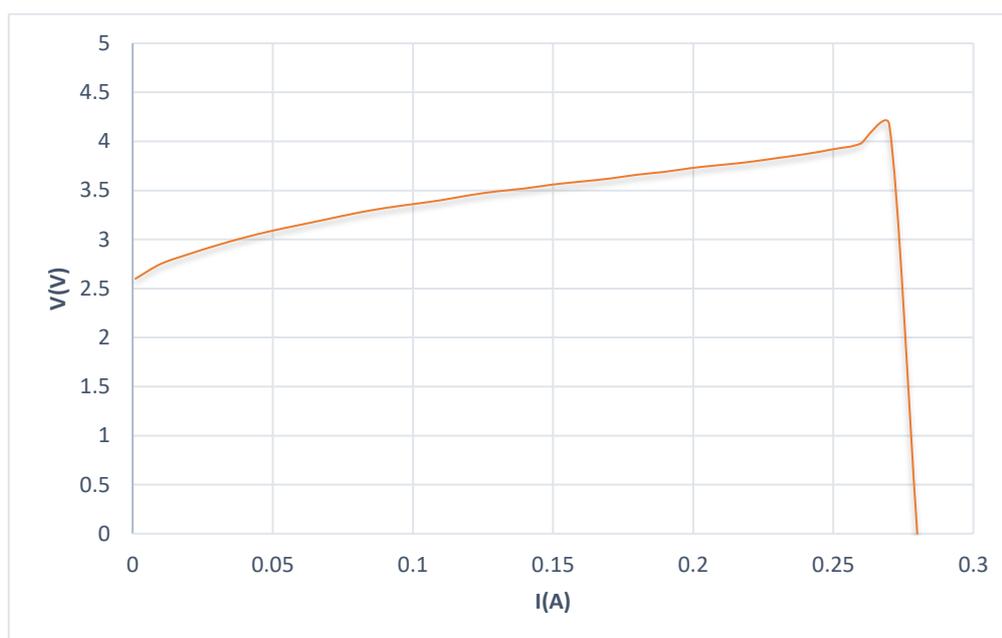
Fonte: Elaborado pelo Autor

Como o sinal modulado assemelha-se a um sinal com modulação PWM, pode-se detectar as bordas de subida e descida do sinal modulado através desse comparador. Além disso é possível utilizar o registrador *Interrupt* para determinar o que deve ser feito em cada uma dessas bordas.

6 ANÁLISES, TESTES E RESULTADOS

Os LEDs para fins de iluminação e transmissão de dados a serem utilizados no protótipo foram extraídos de uma lâmpada comercial disponível. Então, para garantir maior segurança na obtenção dos resultados com o conjunto de matriz de LEDs empregado, realizou-se um ensaio de caracterização dos LEDs utilizados nos testes de transmissão. Para obter os dados necessários dos LEDs utilizados, variou-se a corrente de uma fonte I_{DC} na ordem de 10 mA e mediu-se a respectiva tensão dos LEDs obtendo-se 30 amostras de corrente e tensão conforme mostra a Figura 28. Essa operação foi repetida em 4 LEDs e então extraiu-se a média em cada valor de tensão. A Figura 28 mostra a curva tensão versus corrente para os LEDs utilizados na transmissão VLC observando-se os limites de operação do LED empregado.

Figura 28 – Gráfico de tensão versus corrente para LEDs utilizados para aplicação VLC

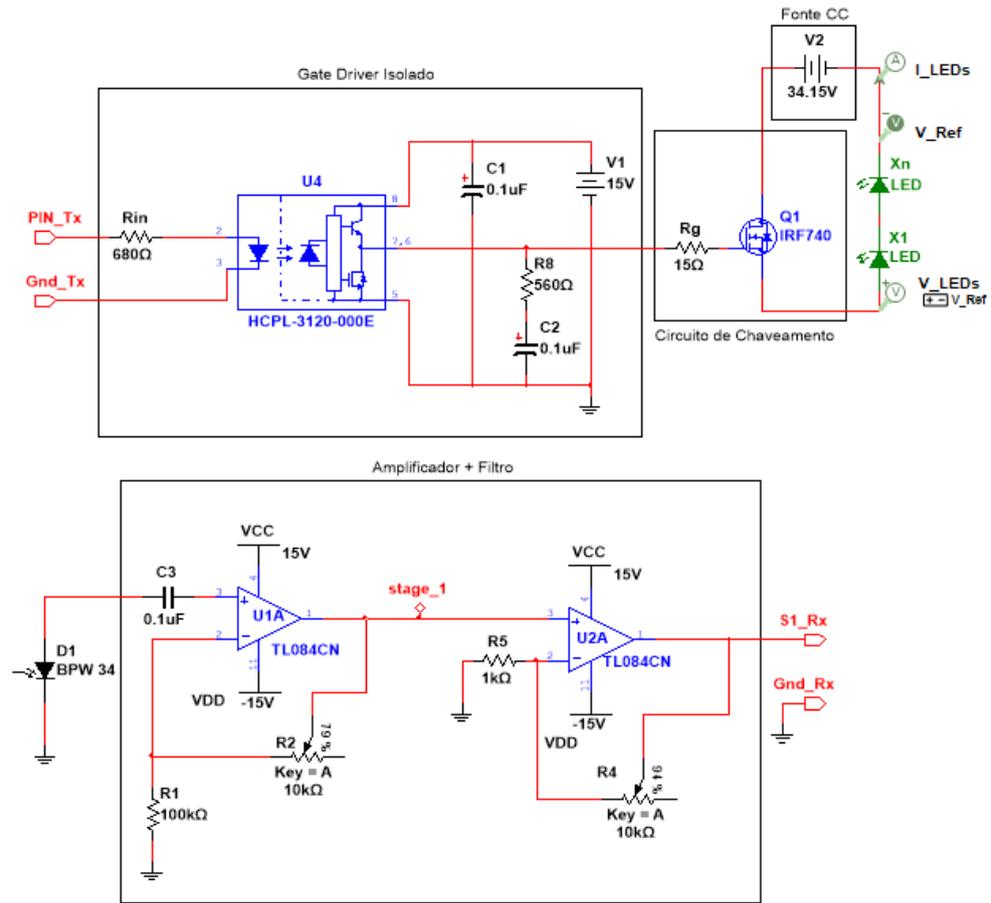


Fonte: Elaborada pelo autor

Para operar de maneira segura, deve-se manter os parâmetros de tensão e corrente de forma em que o ponto de operação fique com uma área igual ou menor que a área do gráfico, garantindo que a potência $P = V \cdot I$ permaneça dentro dos limites do dispositivo.

A partir disso, desenvolveu-se um protótipo, conforme o esquemático mostrado na figura 29. Parâmetros do mesmo podem ser vistos na Tabela 5

figura 29 – Esquemático completo do circuito para transmissão VLC

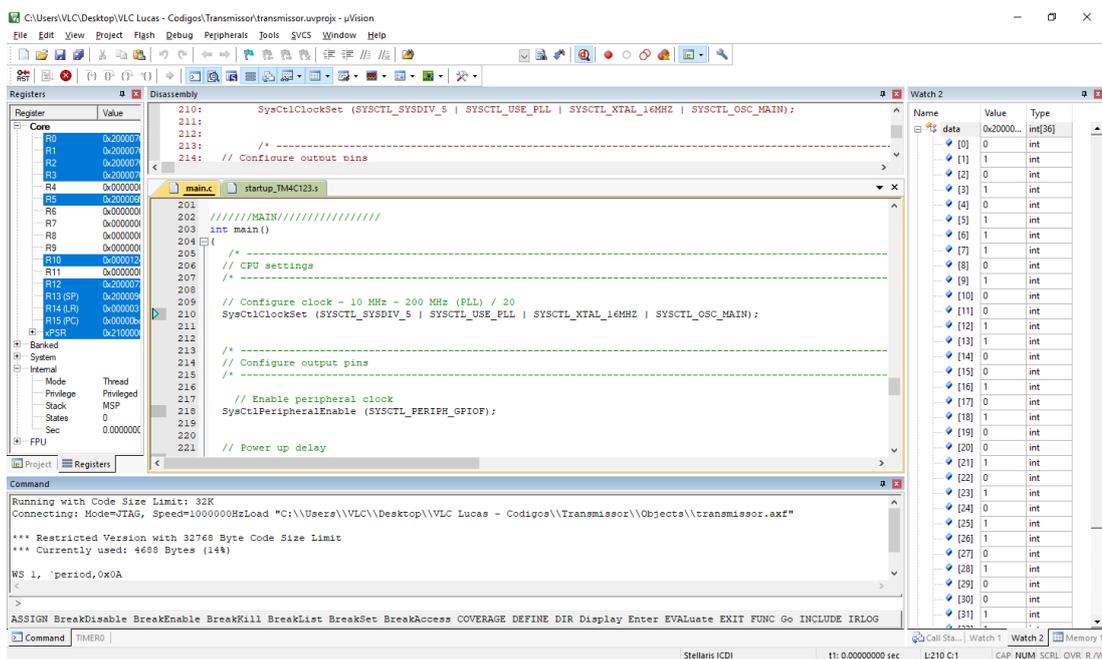


Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 5 – Dados gerais do protótipo

Dados gerais do protótipo	
Tensão no MOSFET IRF740	34.15 V
Tensão no Gate Driver	13 V
Corrente Gate Driver (I_{Rg})	15,9 mA
Corrente dos LEDs	17.13 mA
Frequência de chaveamento de Q1	$\cong 10$ kHz

Para realizar os testes de transmissão pretendidos, seguindo os diagramas da Figura 21 e Figura 25 desenvolvidas no capítulo 5, com esquemático disposto na figura 29 – Esquemático completo do circuito para transmissão VLC, utilizou-se o ambiente de desenvolvimento do *software* Keil μ Vision 5 conforme pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – IDE Keil μ Vision 5

Fonte: Elaborada pelo autor

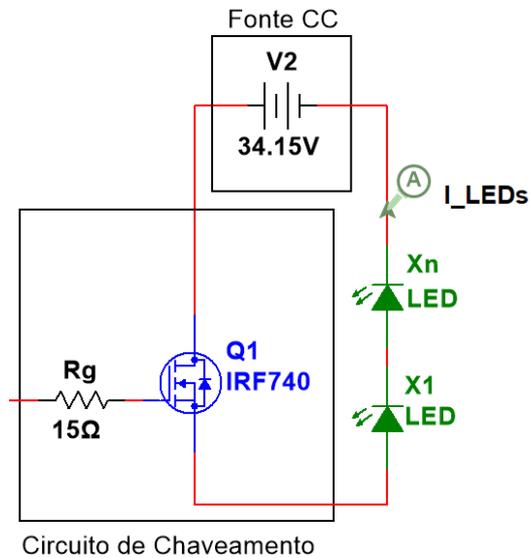
A Figura 30 mostra uma visão do *software* onde o código para transmissão foi desenvolvido e então compilado na Plataforma Tiva C. O código gera um padrão de bits previamente estabelecidos como exemplo e pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 – Bits selecionados para a transmissão com código de linha (RLL)

0 1 0 1 0 1	Cabeçalho
1 1 0 1 0 0	Informação
1 1 0 0 1 0	
1 0 0 1 0 1	
0 1 1 0 1 0	
0 1 1 1 0 0	Rodapé

A partir desses bits gera-se o sinal modulado e então o mesmo é transmitido ao circuito através dos pinos da Plataforma Tiva C, representados na figura 29 pelas *labels* PIN_Tx e Gnd_Tx, responsáveis pelo acionamento do circuito de chaveamento e comutação dos LEDs. A tensão no interruptor IRF740, provida por uma Fonte (V2) ITECH IT6302 foi mantida em 34.15V e a tensão no driver (V1), provida por uma Fonte Tektronix PWS4305, foi mantida em 13V. A posição ou tempo dos bits altera-se manualmente via *software*.

Figura 31 – Medidas de corrente durante a transmissão

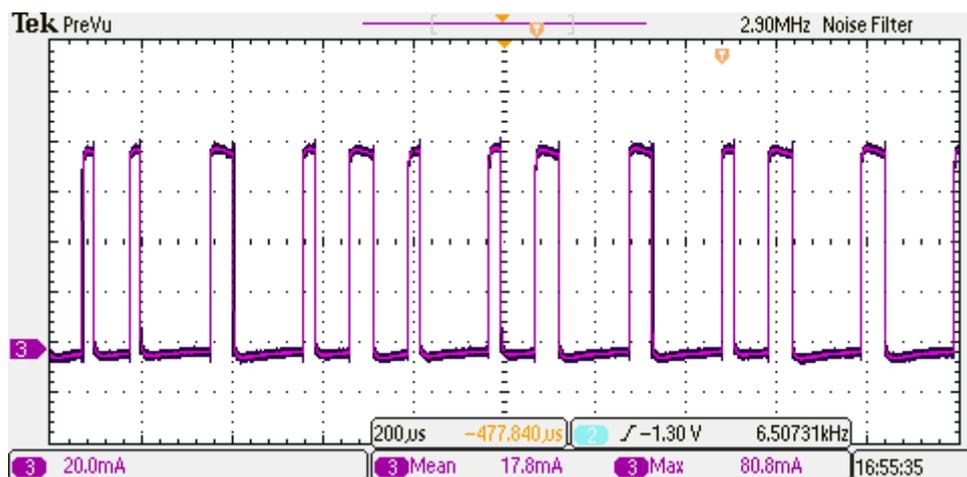


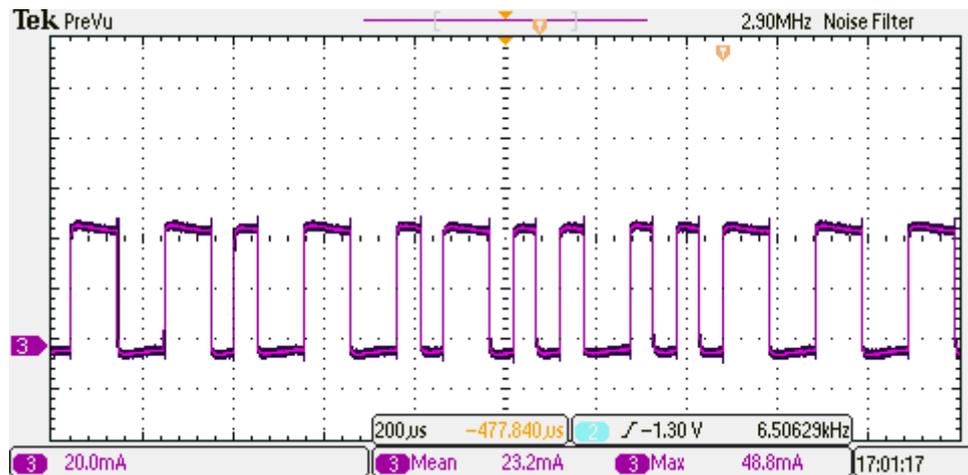
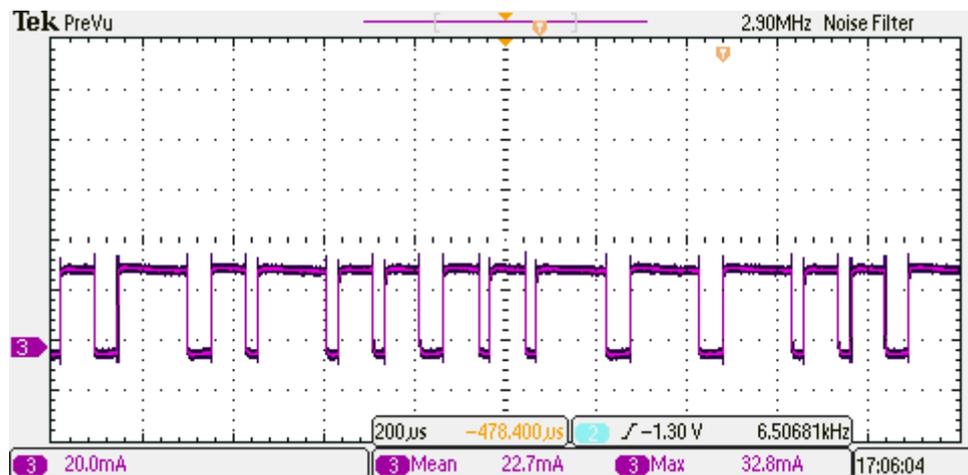
Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 31 mostra o esquemático para medir corrente em uma *string* de LEDs de X_1 até X_N durante a transmissão onde $N = 25$. Para isso foi utilizado um Osciloscópio Tektronix DPO 2014 em que a corrente nos LEDs (I_{LEDs}) representa o canal 3 da Figura 32.

Figura 32 – Corrente e tensão nos LEDs

(a) $d=0,25$

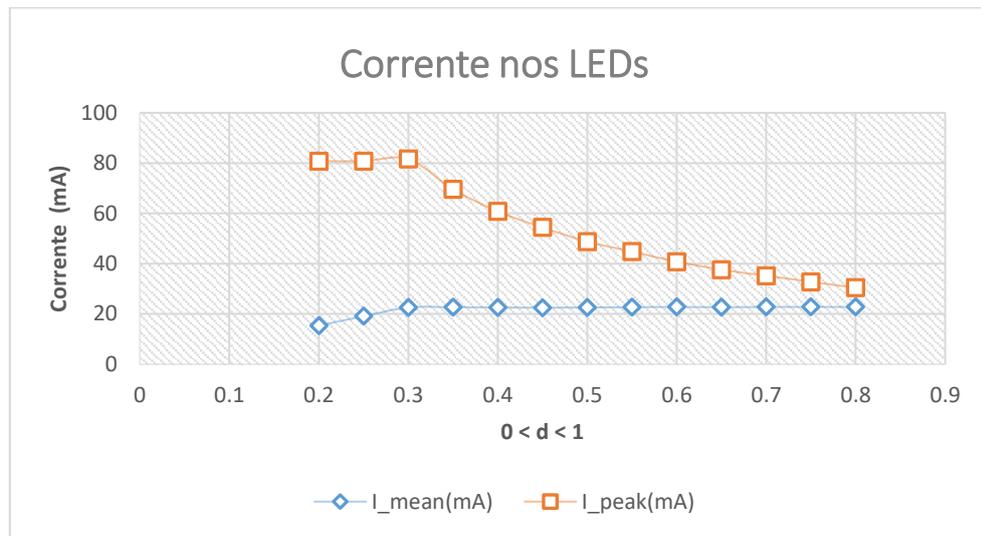


(b) $d=0,5$ (c) $d=0,75$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 32 (a), (b) e (c) mostra a corrente dos LEDs (I_{LEDs} da Figura 31) para diferentes variações de razões cíclicas ‘d’, ou seja, diferentes posições dos bits dentro das janelas de transmissão de acordo com a modulação VPPM desenvolvida no capítulo 4. Para observar o aumento do fluxo luminoso levando em conta o aumento da razão cíclica em 25% conforme a Figura 32 (a), (b) e (c), respectivamente, a corrente média dos LEDs deveria aumentar, demonstrando de forma prática o processo de *dimming* proposto por esse tipo de modulação. Porém, o que se obteve foi o gráfico da Figura 33.

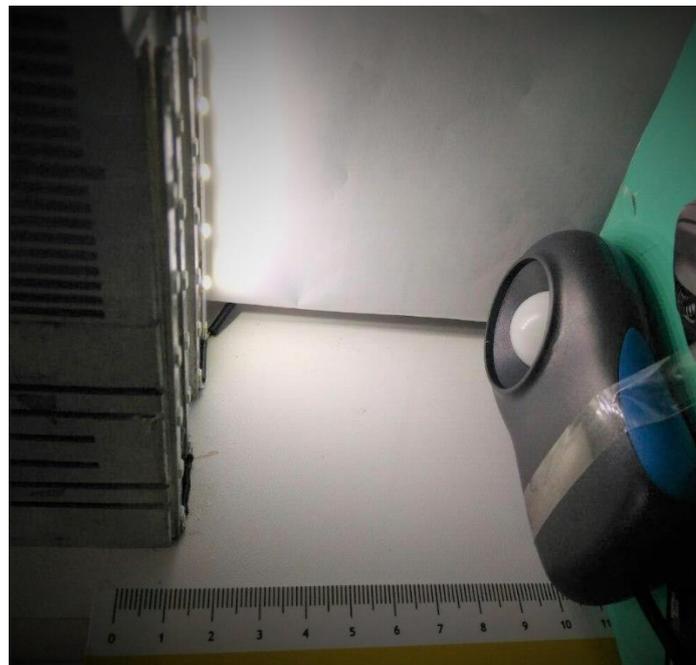
Figura 33 – Corrente no LEDs (T_x) para diferentes razões cíclicas



Fonte: Elaborada pelo autor

A corrente média permanece constante a partir de $d=0,3$ devido a limitação de ambas as fontes utilizadas que, ao invés de limitar a corrente máxima, limitam a corrente média resultando em um problema de procedimento experimental. Portanto optou-se por utilizar medidas de iluminância (lux) para observar o efeito da modulação, como mostra a Figura 34.

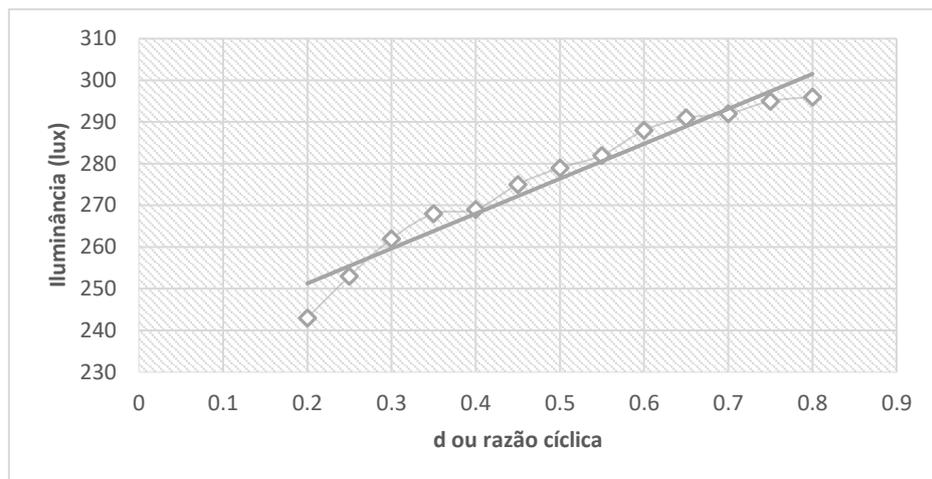
Figura 34 – Teste de iluminância dos LEDs



Fonte: Elaborada pelo autor

Para observar a variação do fluxo luminoso da modulação VPPM, reduziu-se a quantidade de LEDs para $n = 7$ devido às limitações de corrente, anteriormente citadas, das fontes utilizadas. Posicionou-se um luxímetro digital Minimpa modelo MLM-101 à aproximadamente 10 cm do transmissor T_X , como mostra a Figura 34 para detectar a variação de iluminância provocada por diferentes razões cíclicas da modulação. O gráfico da Figura 35 mostra o aumento da intensidade luminosa com o aumento da razão cíclica.

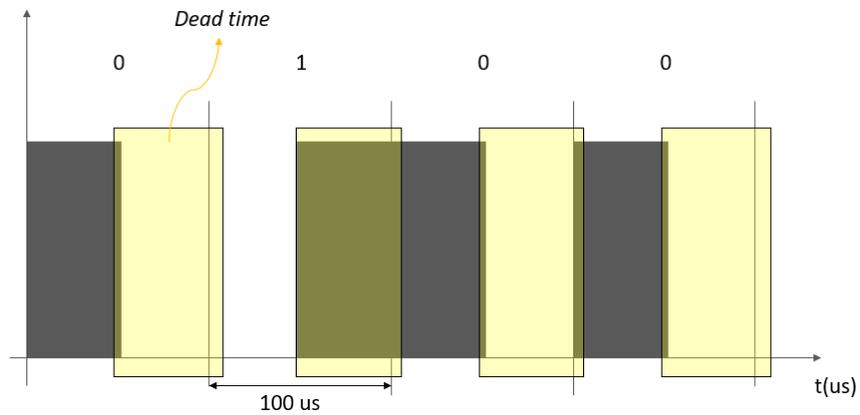
Figura 35 – Gráfico de *dimming* resultado da modulação VPPM



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a recepção dos dados, foi proposto um código, disponível do Anexo 10.2, em que há a detecção das bordas de subida e descida, de acordo com a seção 5.2.3. Porém, para evitar a detecção de bordas em transição de janelas de transmissão, gerou-se um tempo morto capaz de cancelar a detecção das boras em início de janela, como mostra a Figura 36. Dessa forma, o microcontrolador realiza a leitura apenas da borda que equivalem a um dado válido. A elaboração do código e os testes de recepção levaram em conta apenas uma razão cíclica de 0.5.

Figura 36 – Demodulação dos dados transmitidos em VPPM

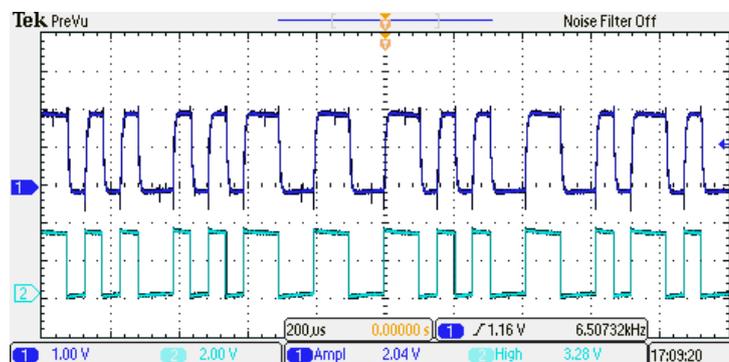


Fonte: Elaborada pelo autor

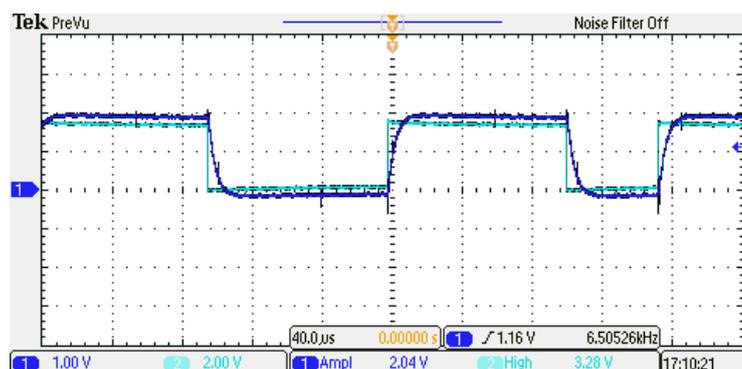
A Figura 37 mostra a comparação entre os sinais de transmissão e recepção em cada microcontrolador. O canal 2 (transmissor) refere-se ao pino PIN_Tx e o canal 1 (receptor) ao pino S1_Rx da figura 29.

Figura 37 – Sinal de transmissão e recepção com $d=0,5$

(a)



(b)

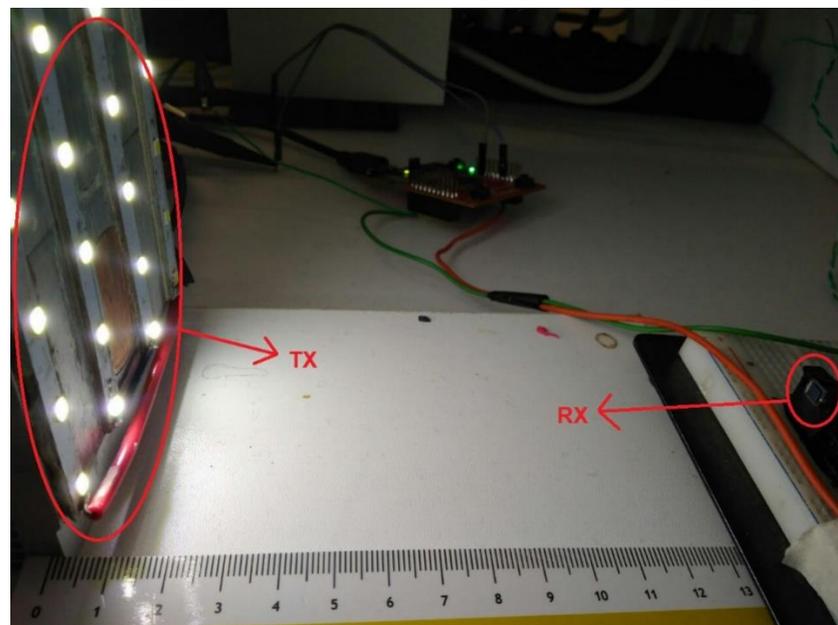


Fonte: Elaborada pelo autor

Ao ampliar a Figura 37 (a), obtemos a Figura 37 (b) onde os sinais de transmissão e recepção estão sobrepostos. Percebe-se que há um atraso significativo de comutação nos dados recebidos causados, principalmente, pelo filtro-amplificador. Isso implica em limitações na frequência de transmissão e também na razão cíclica 'd' do sinal VPPM pois devido ao atraso nas bordas de subida e descida, a decodificação e sincronia propostas nesse trabalho começam a apresentar falhas, além disso, razões cíclicas elevadas acabam ocasionando o encontro das bordas.

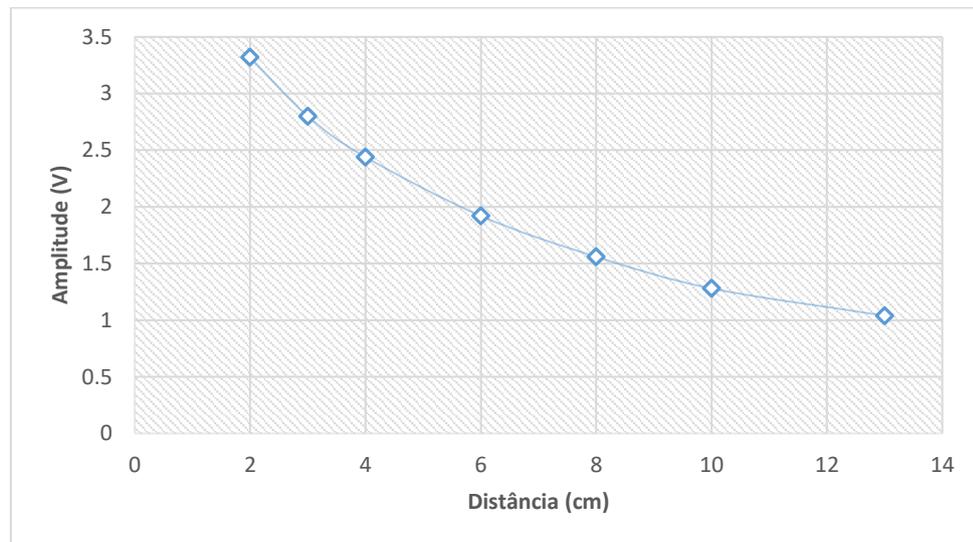
A fim de determinar/observar a resposta do receptor mediante a variação de distância entre transmissor e receptor realizaram-se testes variando essa distância.

Figura 38 – Protótipo emissor/receptor de comunicação por luz visível



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 38 mostra o transmissor T_X e receptor R_X , onde foram realizados testes variando a distância indicadas através de uma régua, com $d = 0.5$, até onde garantia-se a recepção íntegra dos dados transmitidos. Como resultado obteve-se o gráfico da Figura 39.

Figura 39 – Tensão de recepção vs. distância por $d=0,5$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 39 mostra os resultados medindo-se a tensão no pino da plataforma de recepção (S1_Rx da figura 29) versus distância entre receptor e transmissor, em que se observou uma relação não linear em que para distância maiores torna-se mais difícil decodificar o sinal. Logo, a operação em malha fechada do receptor, pode tornar a recepção mais estável em distâncias menores, pois a tensão iria ter um nível fixo contornando a característica dinâmica da recepção. Isso não iria alterar a distância limite de recepção, porém a decodificação e sincronia se tornariam mais estáveis.

A fim de ilustrar a transmissão e recepção de dados, a Figura 40 mostra a detecção dos dados onde o canal 1 representa o *frame* transmitido e o canal 4, de forma ilustrativa, representa a função de decodificação. O algoritmo de recepção detecta o cabeçalho do *frame* de bits, conhecido previamente pelo receptor e atribuído de forma padrão no código, e então recebe a sequência de dados, ilustrados pelo canal 4.

7 CONCLUSÃO

Embora VLC seja um tema já abordado na literatura, a transmissão de dados empregando LEDs ainda se constitui um desafio seja para fins de *download* de informações de forma a integrar a eficiência energética e qualidade de transmissão, tanto para fins de *upload* com a sincronia dos dados recebidos e retransmissão *full-duplex*.

Nesse trabalho realizou-se uma revisão bibliográfica para inteirar-se do tema e a partir disso entender os princípios e os desafios relacionados a transmissão e recepção de dados através da comunicação por luz visível (VLC) realizado através da implementação de um protótipo contendo as principais características para o entendimento desse sistema.

Para o desenvolvimento do trabalho, além da construção de um protótipo, foram realizados projetos, testes, simulações, programação em plataforma de desenvolvimento, utilização de critérios de seleção visando cumprir os objetivos propostos para fins de teste e compreensão.

O protótipo foi implementado para transmissão de dados através da utilização da modulação VPPM onde-se pode verificar de maneira prática sua função de dimerização na iluminação. Os testes e estudos realizados indicam que a transmissão através dessa modulação é condizente com as informações prévias obtidas na literatura.

O receptor fotodiodo BPW 34 apresentou características adequadas, porém sua operação com o filtro amplificador em malha aberta mostrou-se inadequado quando há variação de distância entre emissor e receptor. No entanto, para aplicações em que não há variação de distância é aceitável, pois ajustes podem ser realizados para tal de forma a calibrar adequadamente os sinais entre emissor e receptor.

Por fim, através deste trabalho de conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica permitiu ampliar o conhecimento sobre a temática VLC e como consequência o desenvolvimento de um protótipo funcional permitindo a introdução do tema no grupo de pesquisa no qual desenvolveu-se o trabalho.

TRABALHOS FUTUROS

O protótipo pode ser otimizado através da realização de estudos envolvendo:

- o dimensionamento de um driver;

Dessa forma, a os resultados seriam encontrar melhores taxas de transmissão alinhado à eficiência e eficiência energética elaborando algo compatível com modelos comerciais.

- dimensionamento de um filtro em malha fechada;

Com um filtro adequado capaz de cancelar os ruídos provenientes de iluminação natural e artificial provenientes de diferentes tipos de lâmpadas a fim de facilitar a decodificação dos dados.

- elaboração de novos códigos;

Trabalhos voltados ao desenvolvimento de algoritmos mais eficientes para a transmissão dos dados e também para sincronia e recepção.

- aplicação da modulação em conversores para LEDs;

Estudo do sinal modulado em VPPM observando seu comportamento em diferentes tipos conversores.

- taxa de transmissão (testes em diferentes frequências);

Observação do comportamento do sistema de comunicação com modulação VPPM ao elevar as taxas de transmissão além da elaboração e confecção de placas capaz de operarem em altas frequências.

- Integração com outros protocolos para transmissão e recepção de dados.

Integrar as camadas VLC em um sistema completo de comunicação, tornando a transmissão e recepção intuitiva, elaborando terminais IHM (Interface Homem-Máquina) capaz de alterar os parâmetros, como a intensidade luminosa, de acordo com a necessidade.

8 REFERÊNCIAS

ADIONO, Trio; FUADA, Syifaul. Investigation of Optical Interference Noise Characteristics in Visible Light Communication System. [s. l.], v. 126, n. 126, 1990.

AKHTMAN, Jos; HANZO, Lajos. Power versus bandwidth - efficiency in wireless communications: The economic perspective. **IEEE Vehicular Technology Conference**, [s. l.], p. 1–5, 2009.

ARNON, Shlomi. **Visible Light Communication**. [s.l: s.n.].

BELL, Alexander Graham et al. Discussion on of the photophone and the conversion of radiant Energy into Sound. **J. Soc. Telegraph Engineers**, [s. l.], v. 9, n. 34, p. 375–383, 1880.

BYUN, Kibeom et al. Performance comparison of RS-CC concatenated codes using NSC and RSC codes. **Proceedings - 2010 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, IC-NIDC 2010**, [s. l.], p. 992–994, 2010.

CA, Alin-mihai. Impact of IEEE 802 . 15 . 7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications. [s. l.], n. April, p. 169–175, 2017.

COLIN, Jean Yves; MATHIEU, Herve; NAKECHBANDI, Moustafa. A proposal for an open logistics interconnection reference model for a Physical Internet. **Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Logistics Operations Management, GOL 2016**, [s. l.], 2016.

GEORGE, Jacqueline J. et al. A Survey on Visible Light Communication. **International Journal of Engineering and Computer Science**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 3905–3908, 2014. Disponível em: <<http://ijecs.in/issue/v3-i2/15 ijecs.pdf>>

HAAS, Harald et al. What is LiFi? **Journal of Lightwave Technology (Volume: 34, Issue: 6, March15, 15 2016)**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 1533–1544, 2016.

HARUYAMA, Shinichiro. **Visible Light Communications**. [s.l: s.n.].

ILUMINAÇÃO e controle da cor – propriedades de lâmpada LED. Disponível em: <<http://sensing.konicaminolta.com.br/2015/11/iluminacao-e-controle-da-corpropriedades-de-lampada-led/>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

JOVICIC, Aleksandar; LI, Junyi; RICHARDSON, Tom. Visible light communication: Opportunities, challenges and the path to market. **IEEE Communications Magazine**, [s. l.], v.

51, n. 12, p. 26–32, 2013.

JR, Angelo A. Beltran. On Ph . D . in Electronics and Electrical Engineering : A Perspectives. [s. l.], n. DECEMBER 2015, 2016.

KARUNATILAKA, Dilukshan et al. LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 1649–1678, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7072557>>

KUROSE, James F.; ROSS, Keith W. C. N. TK5105. 875. I5. K88 2013. **Computer networking: a top-down approach**. [s.l: s.n.].

LATHI. **Modern Digital and Analog Communication Systems**. Third Edit ed. [s.l: s.n.].

LEE, Y. C. et al. The high-efficiency LED driver for visible light communication applications. **2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)**, [s. l.], p. 56–58, 2016.

LI, Yadong et al. Research based on OSI model. **2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks, ICCSN 2011**, [s. l.], p. 554–557, 2011.

LIN, Yuan Chih; KARLSSON, Maths; BETTINELLI, Marco. Inorganic phosphor materials for lighting. **Topics in Current Chemistry**, [s. l.], v. 374, n. 2, p. 374–421, 2016.

MA, Hao; LAMPE, Lutz; HRANILOVIC, Steve. Integration of indoor visible light and power line communication systems. **IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications**, [s. l.], p. 291–296, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6525866>>

NOTO, Luyanda L. et al. The Dynamics of Luminescence. **Luminescence - An Outlook on the Phenomena and their Applications**, [s. l.], n. December, 2016. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/luminescence-an-outlook-on-the-phenomena-and-their-applications/the-dynamics-of-luminescence>>

PAMPANELLI, Giovana Azevedo. A Evolução do Telefone e uma Nova Forma de Sociabilidade : O Flash Mob. **Razón y palabra, ISSN-e 1605-4806**, [s. l.], v. N°. 41, 20, p. 1–9, 2004.

PINTO, Rafael Adaime. Diodos Emissores De Luz (Leds) Alimentados. [s. l.], 2012.

RAHAIM, Michael B.; VEGNI, Anna Maria; LITTLE, Thomas D. C. A hybrid Radio Frequency and broadcast Visible Light Communication system. **2011 IEEE GLOBECOM Workshops, GC Wkshps 2011**, [s. l.], p. 792–796, 2011.

RAJAGOPAL, Sridhar; ROBERTS, Richard D.; LIM, Sang Kyu. IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support. **IEEE Communications Magazine**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 72–82, 2012.

RUFO, J. et al. Considerations on modulations and protocols suitable for visible light communications (VLC) channels: Low and medium baud rate indoor visible light communications links. **2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC'2011**, [s. l.], n. Vlc, p. 362–364, 2011.

SCHAF, Frederico Menine. *Redes Industriais*. 12 mar. 2018, 03 jul. 2018. Notas de Aula.

SCHUBERT, E. FRED. **LIGHT-EMITTING DIODES**. SECOND EDI ed. [s.l: s.n.].

SHEET, Data. 0 . 6 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler ANODE CATHODE. [s. l.], p. 1–16, [s.d.].

SINGH, Dilpreet et al. Design and Implementation of Wireless Communication System for Toll Collection Using. [s. l.], [s.d.].

SKLAR, Bernard. Reed-Solomon Codes. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 646–56, 2001. Disponível em: <http://hscc.cs.nthu.edu.tw/~sheujp/lecture_note/rs.pdf>

ST, Asoke Nath. Latest advancement in Light Fidelity (Li-Fi) Technology International Journal of Advance Research in Latest advancement in Light Fidelity (Li-Fi) Technology. [s. l.], n. January, 2018.

STEPNIAK, Grzegorz; SCHUPPERT, Manuel; BUNGE, Christian Alexander. Advanced Modulation Formats in Phosphorous LED VLC Links and the Impact of Blue Filtering. **Journal of Lightwave Technology**, [s. l.], v. 33, n. 21, p. 4413–4423, 2015.

SUNG, Jiun-Yu; CHOW, Chi-Wai; YEH, Chien-Hung. Is blue optical filter necessary in high speed phosphor-based white light LED visible light communications? **Optics Express**,

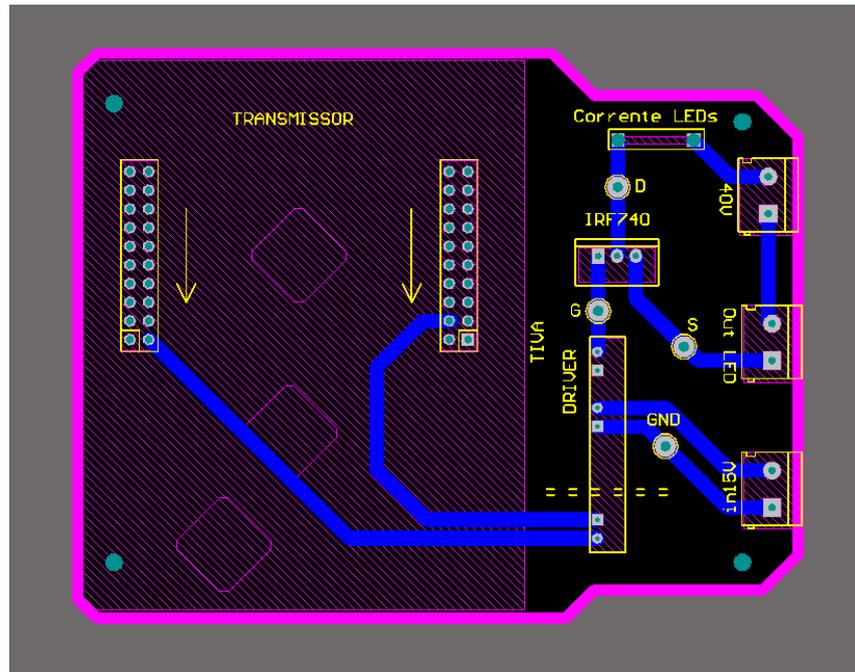
[s. 1.], v. 22, n. 17, p. 20646, 2014. Disponível em:
<<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-17-20646>>

TANAKA, Y.; HARUYAMA, S.; NAKAGAWA, M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links. **11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No.00TH8525)**, [s. 1.], v. 2, p. 1325–1329, 2000. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/881634/>>

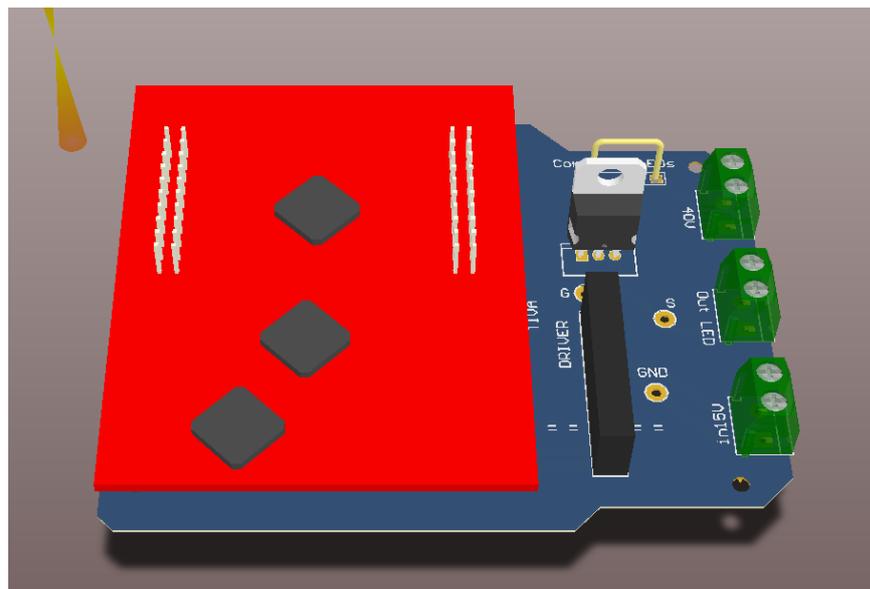
9 ANEXO A

Figura 42 – Placa desenvolvida para a transmissão

(a) Circuito



(b) Visão em 3D



Fonte: Elaborada pelo autor

10 ANEXO B

10.1 Código do Transmissor

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>
#include "driverlib/interrupt.h"
#include "inc/hw_memmap.h"
#include "inc/hw_types.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
// Macros that define the interrupt assignment on Tiva devices
#include "inc/hw_ints.h"
// Macros defining the memory map of the Tiva device
#include "inc/hw_memmap.h"
//Defines common types and macros
#include "inc/hw_types.h"
// Defines and Macros for GPIO hardware
#include <inc/hw_gpio.h>
// Defines and Macros for System Control hardware
#include "inc/hw_sysctl.h"
// Defines and Macros for Timer hardware
#include "inc/hw_timer.h"
#include "driverlib/timer.h"
#include "driverlib/timer.c"
#include "inc/hw_ints.h"
#include "inc/hw_memmap.h"
#include "inc/hw_types.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
#include "driverlib/interrupt.h"
#include "driverlib/gpio.h"
#include "driverlib/timer.h"
#include "driverlib/systick.h"
#include "inc/hw_ints.h"
#include "inc/hw_memmap.h"
#include "inc/hw_types.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
#include "driverlib/interrupt.h"
#include "driverlib/gpio.h"
#include "driverlib/timer.h"
#include "driverlib/interrupt.h"
// General Pourpose Input Output Module
#include "driverlib/gpio.h"
////////////////////////////////////

////////////////////////////////////

//////////////////////////////////////VARIABLES GLOBAIS////////////////////////////////////

unsigned long period;           //periodo de interrupC'C#o.

float d = 0.50;                // Duty cycle para VPPM

int bit = 0;                   //variavel auxiliar incrementada
int bitt = 0;                  //recebe cada bit do vetor para a modulacao

unsigned timeone;              //tempo ligado
unsigned timetwo;              // tempo desligado

int data[36];                  //vetor de dados a serem transmitidos

```

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
void
vetores_dados ()
{

    //int begin [16] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
    // cabeC'alto

    //vetor para testes
    int begin[6] = { 0, 1, 0, 1, 0, 1 };
    //int end[16] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
    //rodapC)

    //vetor para testes
    int end[6] = { 0, 1, 1, 1, 0, 0 };    //0x0A = 011100
    //end sendo header
    //int end [6] = {0,1,0,1,0,1};
    //int info[32] =
    {1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1};
    //informacao
    //vetor para testes      Hex value: 0x07 = 110100 0x0B= 110010 0x0F =
    100101 0x00 = 011010
    int info[24] =
        { 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0,
        1, 0 };

    // info sendo header
    //int info [24] = {0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1};
    int a = 0;                //variavel auxiliar
    for (a = 0; a <= 5; a++)
    {

        data[a] = begin[a];    //vetor de dados recebe cabeC'alto

    }

    for (a = 6; a <= 29; a++)
    {

        data[a] = info[a - 6]; //vetor de dados recebe a informaC'ao

    }
    for (a = 30; a <= 35; a++)
    {

        data[a] = end[a - 30]; //vetor de dados recebe o rodapC)

    }

}

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////MODULACAO////////////////////////////////////
void

```

```

modvppm (int a)
{
    if (a == 0)
        {
            //borda de subida

            GPIOPinWrite (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_2, 0x00); //DESLIGA LED

            SysCtlDelay (timetwo); //tempo desligado
            //SysCtlDelay(10000);
            //SysCtlDelay(time);

            GPIOPinWrite (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_2, 0xFF); //LIGA LED

            //SysCtlDelay(time);

            //SysCtlDelay(timeonfinal);
            //SysCtlDelay(10000);
            SysCtlDelay (timeone); //tempo ligado

            /*
            SysCtlDelay( - Pega o perC-odo do clock
            - Multiplica pelo nC:mero que estC! dentro
            - Multiplica por 3 (3 ciclos de clock para a funC'C#o)
            )
            exemplo Clock = 10 Mhz
            1/10 000 000 * 3 * delay

            */

        }

    if (a == 1)
        {
            //borda de descida

            GPIOPinWrite (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_2, 0xFF); //LIGA LED

            SysCtlDelay (timeone); //tempo ligado
            //SysCtlDelay(10000);
            //SysCtlDelay(time);

            GPIOPinWrite (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_2, 0x00); //DESLIGA LED

            //SysCtlDelay(timeofffinal);
            //SysCtlDelay(10000);
            //SysCtlDelay(time);

            SysCtlDelay (timetwo); //tempo desligado

        }

}

////////////////////////////////////

////////////////////////////////////INTERRUPT////////////////////////////////////

void

```

```

Timer0IntHandler (void)
{
    TimerIntClear (TIMER0_BASE, TIMER_TIMA_TIMEOUT); // limpa a flag de
    interrupC'C#o

    bitt = data[bit];          //variavel recebe apenas 1 bit do vetor de
    dados

    modvppm (bitt);           //modula segundo seu valor '1' ou '0'

    bit++;                     //incrementa

    /////reinicializaC'C#o do processo/////
    if (bit == 36)
        {
            //tamanho do vetor de dados

            bit = 0;

        }
}

////////////////////////////////////

/////////MAIN/////////
int
main ()
{
    // Configure clock - 10 MHz - 200 MHz (PLL) / 20
    SysCtlClockSet (SYSCTL_SYSDIV_5 | SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_XTAL_16MHZ
|
                SYSCTL_OSC_MAIN);

    // Enable peripheral clock
    SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOF);

    // Power up delay
    SysCtlDelay (10);

    // Configure pins as outputs
    GPIOPinTypeGPIOOutput (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_2);

    // Set output state - Off
    GPIOPinWrite (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_2, 0x00);

    ////////////CRIAR VETOR DE DADOS//////////
    vetores_dados ();

    ////////////TIMER VARIABLES//////////

```


10.2 Código do receptor:

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>

#include "inc/hw_memmap.h"
#include "inc/hw_types.h"
#include "driverlib/sysctl.h"

#include "inc/hw_memmap.h"
// #include "inc/hw_ssi.h"
// #include "inc/hw_types.h"
// #include "driverlib/ssi.h"
#include "driverlib/gpio.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
#include "utils/uartstdio.h"
#include "utils/uartstdio.c"
#include "driverlib/uart.h"
#include "inc/hw_uart.h"

// Defines and Macros for Timer hardware
// #include "inc/hw_timer.h"
// #include "driverlib/timer.h"
// #include "driverlib/timer.c"
#include "inc/hw_ints.h"
// #include "inc/hw_memmap.h"
// #include "inc/hw_types.h"
// #include "driverlib/sysctl.h"
#include "driverlib/interrupt.h"
#include "driverlib/gpio.h"
// #include "driverlib/timer.h"
// #include "driverlib/systick.h"
// #include "inc/hw_ints.h"
// #include "inc/hw_memmap.h"
// #include "inc/hw_types.h"
// #include "driverlib/sysctl.h"
// #include "driverlib/interrupt.h"
// #include "driverlib/gpio.h"
// #include "driverlib/timer.h"

// Defines and Macros for GPIO hardware
#include "inc/hw_gpio.h"
// General Purpose Input Output Module
#include "driverlib/gpio.h"
// Mapping of peripherals to pins
#include "driverlib/pin_map.h"
#include "driverlib/uart.h"
// Analog Comparator Module
#include "driverlib/comp.h"

#include "driverlib/gpio.h"
#include "driverlib/pin_map.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
#include "driverlib/uart.h"
#include "driverlib/debug.h"
#include "utils/uartstdio.h"

```

```

#include "utils/uartstdio.c"
#include "driverlib/rom.h"

////////////////////////////////////
uint32_t compget = 0;
int header[6] = { 0, 1, 0, 1, 0, 1 };
int headercapture[6] = { };
int data[30] = { };

int i = 0;

///teste para d =0,75 0=520 1=1040
///teste para d =0,5 0=
uint32_t time0 = 750;
uint32_t time1 = 750;

extern void interrupt1 (void);

////////////////////////////////////
void
print_data (void)
{
    //SysCtlDelay(3000);

    UARTprintf ("\nDATA RECEIVED:\n");

    for (i = 0; i <= 29; i++)
    {

        UARTprintf ("%d", data[i]);

    }
    i = 0;
}

////////////////////////////////////
void
interrupt2 (void)
{

    compget = ComparatorValueGet (COMP_BASE, 0);

    data[i] = compget;
    i++;

    if (i == 30)
    {

        print_data ();

        IntRegister (INT_COMP0, interrupt1);

        ComparatorIntClear (COMP_BASE, 0);    // limpa flag

```

```

    return;

}

///delays apropriados
if (compget == 0)
{
    SysCtlDelay (time0);
}
if (compget == 1)
{
    SysCtlDelay (time1);
}

ComparatorIntClear (COMP_BASE, 0);    // limpa flag
}

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
void
interrupt1 (void)
{
    ///captura cabeC'elho

    GPIOPinWrite (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_3, 0xFF);
    compget = ComparatorValueGet (COMP_BASE, 0);    /// caputra o valor

    //garante que vai comeC'ar em uma borda de descida
    /*
        if (i == 0 & compget == 1){
            GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_3, 0x00);
            return;
        }
    */
    headercapture[i] = compget;

    if (compget == header[i])
    {
        ///compara com cabeC'elho
        i++;    ///se for igual incrementa
    }

    else
    {
        ///se nao, iguala a zero e volta
        i = 0;
    }

    if (i == 6)
    {
        ///capturou o cabeC'elho
        i = 0;
        IntRegister (INT_COMP0, interrupt2);    /// muda a funC'cao de
        interrupC'cao para capturar os dados
    }

    ///delays apropriados
    if (compget == 0)
    {

```

```

        SysCtlDelay (time0);
    }
    if (compget == 1)
    {
        SysCtlDelay (time1);
    }

    GPIOPinWrite (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_3, 0x00);

    ComparatorIntClear (COMP_BASE, 0);    // limpa flag
}

////////////////////////////////////
void
ledsfortest (void)
{

    SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOF);
    // Configure pins as outputs
    GPIOPinTypeGPIOOutput (GPIO_PORTF_BASE,
                           GPIO_PIN_1 | GPIO_PIN_2 | GPIO_PIN_3);
    // RED          BLUE          GREEN

    // Set output state - Off
    GPIOPinWrite (GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1 | GPIO_PIN_2 | GPIO_PIN_3,
0x00);

}

////////////////////////////////////

void
interrupt_controller (void)
{

    //
    // The interrupt handler function.
    //
    //extern void interrutp1(void);
    //
    // Register the interrupt handler function for comp0.
    //
    IntRegister (INT_COMP0, interrutp1);
    //
    // Enable the interrupt.
    //
    IntEnable (INT_COMP0);
    //
    // Enable .
    //
    IntMasterEnable ();

}

////////////////////////////////////
void
```

```

enable_analog_compare (void)
{
    SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOC);

    //GPIOPinTypeGPIOInput (GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_7);
    GPIOPinTypeComparator (GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_6 | GPIO_PIN_7);

    //GPIOPinTypeComparator (GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_7);
    //GPIOPinTypeGPIOInput (GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_6);

    //
    // Enable the COMP module.
    //
    SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_COMP0);
    //
    // Wait for the COMP module to be ready.
    //
    while (!SysCtlPeripheralReady (SYSCTL_PERIPH_COMP0))
        {
            }
    //
    // Configure the internal voltage reference.
    //
    ComparatorRefSet (COMP_BASE, COMP_REF_0_55V);
    //
    // Configure comparator 0.
    //
    ComparatorConfigure (COMP_BASE, 0,
                        (COMP_TRIG_NONE | COMP_INT_BOTH | COMP_ASRCR_REF |
                         COMP_OUTPUT_NORMAL));
    //
    // Delay for some time...
    //
    //
    // Enable interrupt.
    //
    //ComparatorValueGet (COMP_BASE, 0);
    ComparatorIntEnable (COMP_BASE, 0);

}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
void
Inituart (void)
{
    //
    // Enable GPIO port A which is used for UART0 pins.
    // TODO: change this to whichever GPIO port you are using.
    //
    SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_GPIOA);

    //
    // Configure the pin muxing for UART0 functions on port A0 and A1.
    // This step is not necessary if your part does not support pin
    muxing.

```

```

// TODO: change this to select the port/pin you are using.
//
GPIOPinConfigure (GPIO_PA0_U0RX);
GPIOPinConfigure (GPIO_PA1_U0TX);

//
// Enable UART0 so that we can configure the clock.
//
SysCtlPeripheralEnable (SYSCTL_PERIPH_UART0);

while (!SysCtlPeripheralReady (SYSCTL_PERIPH_UART0))
{
}

//
// Use the internal 16MHz oscillator as the UART clock source.
//
UARTClockSourceSet (UART0_BASE, UART_CLOCK_PIOOSC);

//
// Select the alternate (UART) function for these pins.
// TODO: change this to select the port/pin you are using.
//
GPIOPinTypeUART (GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);

//
// Initialize the UART for console I/O.
//
UARTStdioConfig (0, 115200, 16000000);

//
// Display the setup on the console.
//
//UARTprintf(" \n\n\n\n\n\n Teste para comunicacao VLC\n\n");
//UARTprintf(" Sensor: Potenciometro 5K\n");
//UARTprintf(" Entrada: Porta E, Pino 2 (PE2)\n");
//UARTprintf(" Instant Update\n");
// UARTprintf(" Updates on PF4/SW1 press");
//UARTprintf(" Input Pin: PE2\n\n");
UARTprintf (" \n\n\n U\nA\nR\nT\n INITIATED\n\n");

}

////////////////////////////////////

int
main ()
{
SysCtlClockSet (SYSCTL_SYSDIV_5 | SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_XTAL_16MHZ
|
SYSCTL_OSC_MAIN);

ledsfortest ();

enable_analog_compare ();

```

```
interrupt_controller ();

/*
  ///UART///

  SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA);

  GPIOPinConfigure(GPIO_PA0_U0RX);
  GPIOPinConfigure(GPIO_PA1_U0TX);

  SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART0);

  UARTClockSourceSet(UART0_BASE, UART_CLOCK_PIOSC);

  GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);

  UARTStdioConfig(0, 115200, 16000000);

  */
//////////

Inituart ();

UARTprintf (" \n\n\n \n\n\n\n Start scanning for
data...\n\n\n\n\n\n\n");

//Inituart();
//UARTprintf("\n\n");

while (1)
{

}

}
```