

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

HELIO COELHO JUNIOR

COMUNICAÇÃO DE DADOS UTILIZANDO LUZ VÍSEL

Niterói
(2011)

HELIO COELHO JUNIOR

Comunicação de dados utilizando luz visível

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações , da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicação.

ORIENTADOR: Dr. Andrés Pablo López Barbero

CO-ORIENTADOR : Dr. Ricardo Marques Ribeiro

**NITERÓI
(2011)**

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

C672 Coelho Junior, Helio

Comunicação de dados utilizando luz visível / Helio Coelho Junior. – Niterói, RJ : [s.n.], 2011.
62 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) -
Universidade Federal Fluminense, 2011.

Orientadores: Andrés Pablo López Barbero, Ricardo Marques Ribeiro.

1. Sistema de telecomunicação. 2. Iluminação inteligente. 3.
Comunicação de dados. 4. Diodo emissor de luz. I. Título.

CDD 621.382

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

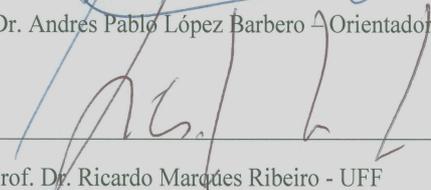
Comunicação de Dados Utilizando Luz Visível

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Aprovada em 09 de fevereiro de 2012 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero - Orientador



Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro - UFF



Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos, UFJF



Prof. Dra. Maria Cristina Quesnel Frias Ramos, UCP

NITERÓI
2011

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Helio Coelho e a minha mãe, Maria da Gloria Lopes Coelho, por seu apoio incondicional. Sem eles eu não chegaria até aqui. Agradeço também a minha esposa, Patrícia Cunha Coelho e meus filhos Vinícius Cunha Coelho, Marina Cunha Coelho e Luísa Cunha Coelho pelo apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos meus orientadores, prof. Dr. Andrés Pablo e prof. Dr. Ricardo Marques, que me acompanham e sempre me apoiaram desde o meu projeto final de graduação em Engenharia de Telecomunicações na Universidade Católica de Petrópolis.

Agradecimento especial a prof. Dra. Paula Brandão Harboe pelo apoio incondicional e os valiosos ensinamentos recebidos em suas aulas. Seus ensinamentos foram valiosos, não só na sua disciplina especificamente, mas como um despertar para como devemos encarar a vida acadêmica na pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Thomas Little da Boston University em Massachusetts, EUA, que conheci pessoalmente durante a conferência Smart Spaces, em fevereiro de 2011. Nos forneceu um dos protótipos para que fizéssemos estudos no Brasil. Agradeço também ao Prof. Dr. Shinichiro Haruyama por sua boa vontade e cordialidade ao discutir assuntos relacionados a VLC na conferencia Smart Spaces. E ao Dr. Joachim Walewski por nos fornecer gratuitamente cópia de seu artigo [3].

A empresa Linear Technologies que me forneceu algumas unidades do amplificador operacional LT1363 para os testes.

RESUMO

Este documento trata da tecnologia conhecida como 'Comunicação de dados utilizando luz visível' , em inglês VLC (Visible Light Communication). Trata-se da utilização da mesma luz que ilumina o ambiente , devidamente modulada, para transportar dados. Isso se tornou possível devido a incrível evolução dos LEDs (diodos emissores de luz), que tornam-se a cada dia mais potentes, baratos e energeticamente eficientes. Por isso os LEDs estão substituindo as fontes de iluminação convencionais, em grande escala, no Mundo todo. Devido a suas características LEDs podem ser chaveados muito rapidamente então é possível modulá-los em altas frequências, permitindo transmissão de dados em altas taxas. A tecnologia visa aliar a crescente necessidade de economia de energia a enorme demanda por comunicação na ultima milha em alta velocidade, aproveitando-se da ubiquidade da rede elétrica.

Nesse trabalho serão discutidos os aspectos fundamentais da tecnologia, bem como as dificuldades técnicas a serem enfrentadas para implementá-la. Protótipos foram desenvolvidos para mostrar que a tecnologia é viável, bastando apenas refiná-la.

Palavras-chaves: Engenharia de Telecomunicações. Transmissão de dados usando luz visível. VLC. Smartlighting.

ABSTRACT

This document presents the technology known as Visible Light Communication (VLC). That technology encompasses the use of the light from ambient illumination, properly modulated, to transport data. Today that feat is possible due to enormous advances in LED technology. LEDs are becoming cheaper, more powerful and energetically efficient. That's why LEDs are replacing conventional lighting, in large scale, all over the World. Due to its characteristics, LEDs can be switched very fast to produce modulated light in high frequencies, allowing data transmission in high speed. The technology aims to address the growing need for energy savings and high speed network data transmission in the last mile, taking advantage of the ubiquity of the electrical power grid.

In this work not only the fundamental aspects of the technology will be discussed but also the technical hurdles that must be addressed. Prototypes were developed to demonstrate that the technology is viable, it just need to be refined.

Keywords: Telecommunication Engineering. Data transmission using visible light. VLC. SmartLighting.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	14
2 CARACTERÍSTICAS E COMPONENTES DE UM SISTEMAS VLC.....	18
2.1 Características	18
2.2 Aplicações.....	21
2.3 Padrões para VLC.....	31
3 COMPONENTES DE UM SISTEMA VLC.....	32
3.1 Transmissor.....	32
3.1.1 Tipos de LEDs	33
3.1.2 O problema do link de subida (uplink).....	35
3.2 Receptores.....	36
3.2.1 Otimização do receptor	40
3.3 Estudo do canal	43
3.3.1 O canal óptico indoor	44
3.4 Técnicas para obtenção de taxas elevadas.....	46
4 EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	47
4.1 Transmissor.....	47
4.2 Receptor.....	51
4.3 Resultados obtidos.....	58
5 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS	61

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 LEI DE HAITZ	14
FIGURA 2 COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS SEM FIO	16
FIGURA 3 SISTEMA VLC.	18
FIGURA 4 ESQUEMA DE REDE	21
FIGURA 5 COMUNICAÇÃO INTER VEICULAR	22
FIGURA 6 SINALIZAÇÃO E DADOS SIMULTANEAMENTE	22
FIGURA 7 APLICAÇÃO DE VLC EM SISTEMA DE TRANSPORTE INTELIGENTE.....	23
FIGURA 8. GEO LOCALIZAÇÃO.....	23
FIGURA 9 COMUNICAÇÃO UNIDIRECIONAL.....	24
FIGURA 10 SISTEMA GUIA HIKARI.....	24
FIGURA 11 UM SUPERMERCADO USANDO VLC	25
FIGURA 12 SOUND SPOT.....	26
FIGURA 13 SOUND SPOT.....	26
FIGURA 14 REALIDADE AUMENTADA.....	27
FIGURA 15 DESLOCAMENTO DE UMA PONTE.....	28
FIGURA 16 COMUNICAÇÃO SOB A ÁGUA.....	29
FIGURA 17 DRIVER DE LED TÍPICO EM SISTEMA VLC.	33
FIGURA 18 TIPOS DE LED BRANCO.....	34
FIGURA 19 REFLETOR CORNER CUBE.....	35
FIGURA 20 ENLACE BIDIRECIONAL COM REFLETOR CORNER CUBE.....	35
FIGURA 21 MODELO DE RECEPTOR VLC.....	36
FIGURA 22 DETEÇÃO DE DADOS COM UM SENSOR DE IMAGEM.....	37
FIGURA 23 IDENTIFICANDO FLUXOS SIMULTÂNEOS NUM SENSOR DE IMAGEM.....	38
FIGURA 24 MÚLTIPLOS TRANSMISSORES E DETEÇÃO COM SENSOR DE IMAGEM.....	38
FIGURA 25 PONTO CEGO	39
FIGURA 26 MATRIZ DE RECEPTORES	39
FIGURA 27 MODELO SIMPLES DE UM FOTODETETOR	40
FIGURA 28 AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDÂNCIA.....	41

FIGURA 29 AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDÂNCIA SINTONIZADO.....	42
FIGURA 30 DISTRIBUIÇÃO TÍPICA DE LUMINÁRIAS.....	43
FIGURA 31 DISTRIBUIÇÃO SNR TÍPICA.....	44
FIGURA 32 CONJUNTO DE 50 LEDS.....	47
FIGURA 33 LED OSRAM OSTAR.....	48
FIGURA 34 LED E MONTAGEM DO DISSIPADOR.....	48
FIGURA 35 TRANSMISSOR E RECEPTOR VLC UNIVERSIDADE BOSTON.....	49
FIGURA 36 O TRANSMISSOR EM PROTOBOARD.....	50
FIGURA 37 DIAGRAMA DE BLOCOS DO TRANSMISSOR.....	51
FIGURA 38 DIAGRAMA DE BLOCOS DO RECEPTOR.....	51
FIGURA 39 MONTAGEM DO FOTODETETOR COM LENTE.....	52
FIGURA 40 RESPOSTA COM FILTRO AZUL.....	53
FIGURA 41 INCIDÊNCIA DE LUZ NO FOTODETETOR.....	53
FIGURA 42 FOTODETETOR HAMAMATSU S6036.....	54
FIGURA 43 FOTODETETOR HAMAMATSU S6967.....	54
FIGURA 44 FOTODETETOR VISHAY BPV10.....	55
FIGURA 45 LENTE ARTICULADA.....	55
FIGURA 46a RESPOSTA DO FOTODETETOR VISHAY BPV10.....	56
FIGURA 46b RESPOSTA DO FOTODETETOR HAMAMATSU S6036.....	57
FIGURA 46c RESPOSTA DO FOTODETETOR HAMAMATSU S6967.....	57
FIGURA 47 RECEPTOR NA PROTOBOARD.....	58
FIGURA 48 RECEPTOR EM PLACA WIRE UP.....	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 LED X RF.....	30
TABELA COMPARATIVA DOS FOTODETETORES.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

- APD: Avalanche Photodiode, fotodiodo avalanche
- DMT: Discrete multitone modulation, modulação com múltiplas portadoras.
- FIR: Fast Infrared , infravermelho rápido, 4Mbit/s
- GIGAIR: Gigabit Infrared, infravermelho gigabit, 1000Mbit/s
- FOV: Field of View, campo de visão
- IRDA: Infrared Data Association
- ISM: Industrial, Scientific and Medical wireless band
- JEITA: Japan Electronics and Information Technology Industries Association.
- LCD: Liquid crystal display
- LED: Light Emitting Diode, diodo emissor de luz
- LTE: Long Term Evolution
- MAC: Media access control
- MIMO: multiple-input multiple-output
- MIR: Medium Infrared, infravermelho médio, 0.5 a 1.5Mbit/s
- MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico
- NTP: network time protocol
- OFDM: orthogonal frequency-division multiplexing, modulação com múltiplas portadoras ortogonais
- OOK: on-off keying, modulação liga-desliga.
- PIN: Positive-intrinsic-negative semicondutor
- PAN: Personal Area Network
- PDA: personal digital assistant
- PHY: physical layer
- PLC: Power Line Communication
- SC-4PPM: subcarrier 4 pulse position modulation (modulação por posição de pulso)
- SIR: Serial Infrared. Infravermelho serial, 9600bit/s a 115.2Kbit/s
- SNR: Relação sinal-ruído

1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

1.1 HISTÓRICO E APLICABILIDADE DE UM SISTEMA VLC

Os LEDs evoluíram de forma acelerada nos últimos 40 anos. Enquanto o fluxo aumenta 30X por década, o custo cai 10X por década. Essa é conhecida com o a Lei de Haitz.

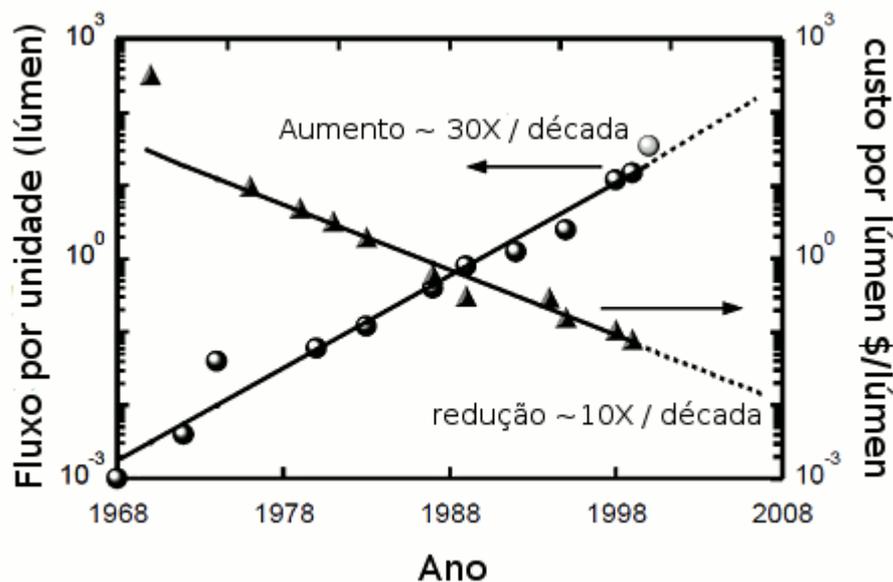


Figura 1 – Lei de Haitz [HAITZ, 2000]

Essa evolução, aliada com a crescente necessidade de eficiência energética provocou o aparecimento de um mercado de iluminação de estado sólido onde lâmpadas incandescentes e fluorescentes estão sendo substituídas por lâmpadas compostas por LEDs. Lâmpadas incandescentes estão sendo banidas em diversos países e há esforços nos EUA, na Europa e na Ásia para que cidades sejam totalmente iluminadas por LEDs, isto é, não só uso doméstico, mas também em empresas e na iluminação pública.

VLC foi concebido na universidade de Keio, Japão, em 2003 pelos professores Masao Nakagawa e Shinichiro Haruyama. Os pesquisadores demonstraram taxas de 100Mbits/s usando LEDs comuns.

LEDs podem ser modulados em altas frequências. Tal modulação da luz visível em altas taxas é imperceptível ao olho humano. A ubiquidade da rede elétrica, e também dos LEDs, que estão sendo usados cada vez mais em iluminação, torna atraente a ideia de usá-las em conjunto para transporte de dados.

As redes sem fio locais do futuro podem ser baseadas em luz ao invés de RF. Enquanto em RF temos cerca de 300GHz disponível, na faixa do visível temos 300Thz. Porém, segundo (COLLINS, 2010) [1] a princípio não existe a pretensão de substituir os padrões em RF existentes (como WI-FI, Bluetooth, WiMax, LTE) mas que seja empregada em locais onde não for desejado o uso de RF (de hospitais a aviões, onde RF possa interferir em equipamentos de missão crítica). Outra possibilidade são nas redes de curtíssima distância, *Personal Area Networks* ou PANs, na interligação de dispositivos multimídia próximos em altíssimas taxas.

Um grupo de trabalho do IEEE atualmente trabalha na padronização da camada física (PHY) e da camada de acesso (MAC) para comunicação em curta distância usando luz visível. O grupo é o 802.15.7 , que faz parte do 802.15, o grupo de trabalho em redes de curtíssima distância.

Há perspectivas de altas taxas de dados com VLC , sem o inconveniente de interferência que se observa em RF. O sinal de RF do seu ponto de acesso WI-FI atravessa paredes e pode interferir ou sofrer interferência do equipamento de seu vizinho. Já uma célula VLC não sai do ambiente. São possíveis várias pico células de alta velocidade no mesmo ambiente. Segundo (WALEWSKI et al, 2010) [3], taxas de 513Mbit/s foram obtidas em laboratório na Alemanha com LED branco numa distância de 5 metros.

A empresa coreana SAMSUNG está fazendo estudos para inserir VLC nas suas telas de LCD, aproveitando a luz de fundo (backlight) para transmitir dados, de forma que o usuário possa fazer download de informações na tela, como endereços de sites na Internet ou informações sobre produtos que estão sendo apresentados.

Como veremos adiante, fotodetetores normalmente são usados como receptores em sistemas VLC. Mas de acordo com SHINICHIRO [13] também podemos usar um sensor de imagem (CCD ou CMOS) e receber não só dados mas também informações precisas do vetor de direção do transmissor para o receptor, permitindo outras aplicações, que o RF não pode prover, como por exemplo navegação indoor (GPS indoor), realidade aumentada, controle preciso de robôs e veículos e medição precisa de posição.

Na figura 2 podemos observar precisamente onde se localiza a tecnologia VLC no que diz respeito a alcance, em metros, e taxa de bits. É possível também observar as outras tecnologias sem fio existentes. Podemos ver claramente o nicho de mercado da tecnologia VLC. Enquanto as tecnologias de infravermelho UFIR (Ultra-Fast Infra Red), VFIR (Very Fast Infra Red), FIR (Fast Infrared) e SIR (Serial Infrared) tem um range máximo de 1 metro, a tecnologia VLC cobre praticamente toda a faixa com um range de até 3 metros. A figura não mostra a tecnologia GIGAIR, que é a comunicação em infravermelho na faixa de Gigabit. A tecnologia WIFI em 5.7Ghz (802.11a) chega a 50Mbit/s, mas como é uma tecnologia baseada em frequência não licenciada (ISM) é sujeita a interferência, só obtendo essa taxa em condições ideais (ausência de outros transmissores nas proximidades). O mesmo ocorre com a tecnologia WIFI 802.11n. Com o uso de MIMO (múltiplos transmissores e múltiplos receptores) pode atingir taxas de até 300Mbit/s, usando canais de 40Mhz de largura. Mas do mesmo modo a taxa é severamente afetada por dispositivos próximos operando na mesma frequência não licenciada (2.4Ghz e 5.7Ghz). As tecnologias bluetooth e zigbee operam com baixas potencias, sendo a zigbee mais voltada para uso em sensores e aquisição de dados em baixas taxas.

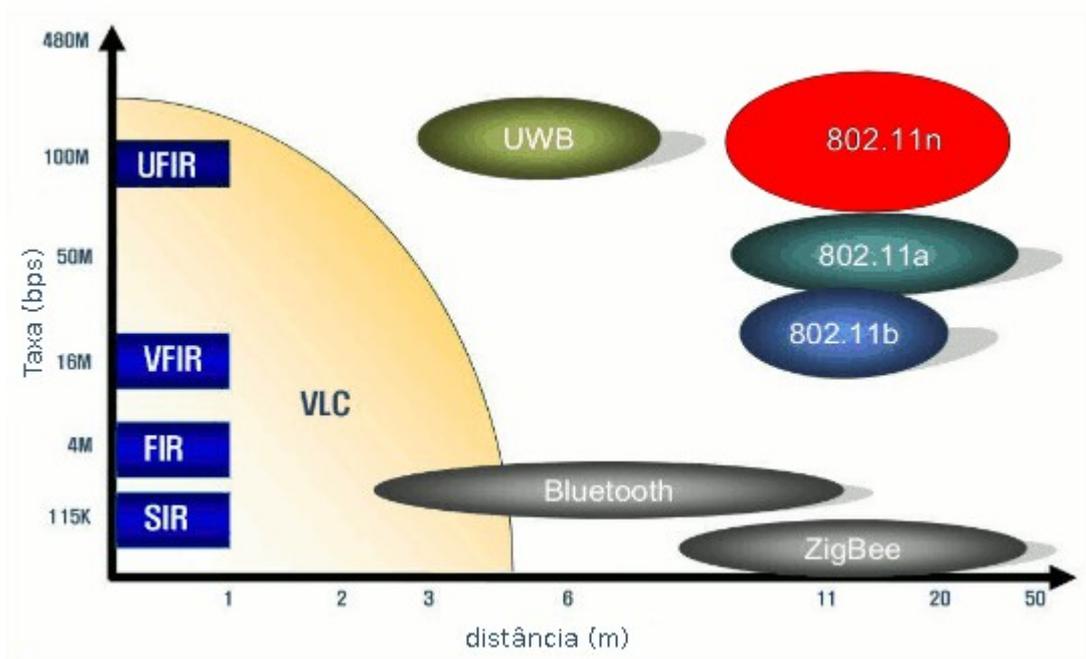


Figura 2 – comparativo de tecnologias sem fio [19]

1.2 MOTIVAÇÃO

A tecnologia Visible Light Communication (VLC) é bastante nova. Desde o início dos estudos na área até o presente momento, não encontrei publicações em português tratando o assunto. O Brasil precisa criar mais linhas de pesquisa nessa área. Os EUA, a Europa e o Japão tem grandes investimentos nela. Só a Universidade de Boston, nos EUA, recebeu uma verba de dezoito milhões de dólares para a pesquisa de smartlighting, iluminação inteligente, que engloba a tecnologia VLC. A tecnologia não é nova, tem mais de dez anos. Mas tudo conspira, no momento atual, para seu crescimento e implementação: a enorme redução do custo de componentes eletrônicos, a grande evolução dos LEDs , a enorme demanda por comunicação de dados em altas velocidades nas redes domésticas e a necessidade crescente de economia de energia. Chegamos a um ponto em que ela pode ser comercialmente implementada. É apenas uma questão de tempo para que isso aconteça. Na verdade diversas aplicações já foram implementadas e testadas, e há algumas pouquíssimas implementações comerciais. Mas é fundamental a padronização (e para tal já há grupos de trabalho do IEEE) para que os futuros produtos de diferentes fabricantes sejam compatíveis.

2 CARACTERÍSTICAS E COMPONENTES DE UM SISTEMA VLC

2.1 CARACTERÍSTICAS

Num sistema VLC típico teremos um conjunto de luminárias LED onde cada uma delas cobre uma área de cerca de 2 metros quadrados, aproximadamente. As luminárias poderão estar ligadas diretamente a uma rede ethernet cabeada ou podem usar tecnologia de banda larga sobre a rede elétrica (BPL), aproveitando-se assim do cabeamento elétrico utilizado para a alimentação das próprias luminárias. Temos na figura 3 um modelo de um sistema VLC. É possível verificar que não só dispositivos de acesso a redes (locais ou mesmo a Internet), mas também sensores podem se beneficiar da tecnologia. Acesso a Internet em geral, download de fluxos de vídeo em alta definição, sincronização de dados em PDAs e smartphones, controle remoto de sensores e termostatos e sincronização de relógios, onde o relógio local é precisamente ajustado em relação a um relógio atômico remoto (NTP), são alguns exemplos mostrados na figura. Até as aplicações de geolocalização, que hoje são apenas disponíveis em ambientes externos, com visibilidade do céu, através dos satélites do sistema de posicionamento global (GPS) podem se beneficiar do VLC. Já existem estudos e protótipos de sistemas de posicionamento global dentro das edificações usando a tecnologia.

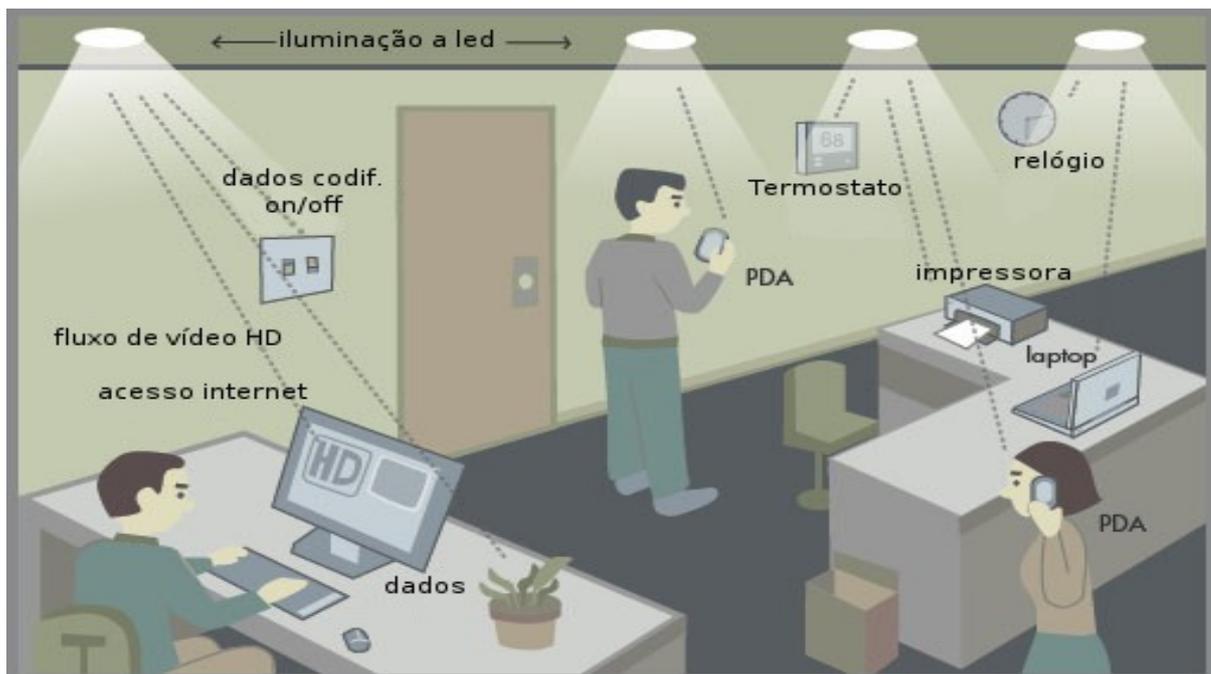


Figura 3 – Sistema VLC [UNIVERSIDADE DE BOSTON,2008]

Dentre as vantagens de um sistema VLC podemos citar:

– **Altíssimas taxas são possíveis**

Taxas de mais de 500Mbits, em distancia de 5 metros, já foram obtidas em laboratório [3]. Com o desenvolvimento de LEDs e fotodetetores especialmente destinados a aplicações de VLC, uso de técnicas de equalização e modulação mais sofisticada, a barreira de 1Gbps será superada.

– **inerente segurança pois a transmissão fica confinada ao ambiente**

Enlaces em radio frequência sofrem com a possibilidade de captura por terceiros já que, na maioria dos casos, o sinal escapa do ambiente. A iluminação proporcionada por uma luminária fica confinada ao ambiente.

– **mobilidade no ambiente interno**

Devido a ubiquidade da rede elétrica e da iluminação, um sistema VLC baseado em banda larga sobre a rede elétrica (BPL) irá proporcionar acesso em todos os ambientes que tiverem as luminárias especiais. Em uma residência, por exemplo.

– **espectro não regulado**

O espectro de RF (até 60Ghz) é estritamente regulado para que o meio compartilhado possa ser usado de forma eficiente. Dependendo da frequência de operação, potência do transmissor e antenas utilizadas, sua propagação pode se estender por enormes distâncias. Mas no caso da luz em ambiente interno ela fica confinada, sua operação efetiva se dá em uma distância muito curta.

– **células em salas contíguas não se interferem**

Múltiplas células não-interferentes dentro de uma sala são possíveis devido a alta diretividade dos enlaces.

– **Com filtragem espectral adequada enlaces ao ar livre são possíveis**

Como normalmente o transmissor e o receptor estão a curtas distancias, poucos metros, a relação sinal-ruído é muito alta. Com filtragem das componentes não desejadas da luz e devido a característica pulsátil do sinal modulado, em contraste com a luz natural, é possível recuperar o sinal mesmo em ambiente externo.

Como desvantagens podemos apontar:

– **necessidade de visada**

Os enlaces são extremamente diretivos. Não pode haver qualquer obstáculo entre o transmissor e o receptor. Se o receptor não tiver um rastreamento ativo da fonte luminosa (um servomecanismo que faça um alinhamento fino do fotodetector com o transmissor) pode ser necessário reposicionar o receptor para obter condição ideal. Fora da condição ideal a taxa máxima de transmissão pode não ser obtida. E há ainda o problema do enlace de subida, ou seja, os dados que vão do nó de rede na direção da luminária.

– **luz ambiente intensa provoca interferência**

Luz ambiente intensa, como a incidência solar direta, poderá saturar o fotodetector ou reduzir muito a relação sinal-ruído, forçando a redução na taxa de transmissão ou mesmo inviabilizando a comunicação.

– **é preciso limitar a potência da fonte para evitar ofuscamento**

A intensidade luminosa da fonte não pode ser excessiva, pois trará desconforto aos usuários. Logo há um limite de potência luminosa, o que impacta diretamente a relação sinal-ruído.

– **multi percurso devido a reflexão da luz, causando alargamento do pulso e interferência inter-simbólica em altas taxas.**

A refletividade das paredes do ambiente e presença de superfícies espelhadas fará com que a sinal originado da luminária chegue em instantes de tempo diferentes no receptor. Um sinal direto chegará mais rapidamente que um sinal refletido. Isso provoca dispersão temporal (alargamento do pulso), Um pulso mais largo obriga a redução na taxa de bits para que não haja interferência inter-simbólica (um pulso que se alonga demais afetando o pulso seguinte, por exemplo). Isso sem falar na interferência entre luminárias próximas, pois apesar da diretividade da luz, a reflexão pode fazer com que pulsos indesejáveis atinjam um outro receptor adjacente.

Na figura 4, no quadro HOJE, podemos observar um sistema típico de distribuição de acesso local a rede, sem fio, usando WIFI. A ponte sem fio (bridge) é conectada a rede por um cabo ethernet e permite que dispositivos compatíveis acessem a rede cabeada através dela. No quadro FUTURO, a proposição de um sistema VLC onde a rede cabeada está disponível através de um sistema de banda larga que a usa a rede elétrica (BPL , *broadband over power lines*) . A luminária tem dupla função: transmissão de dados e iluminação.

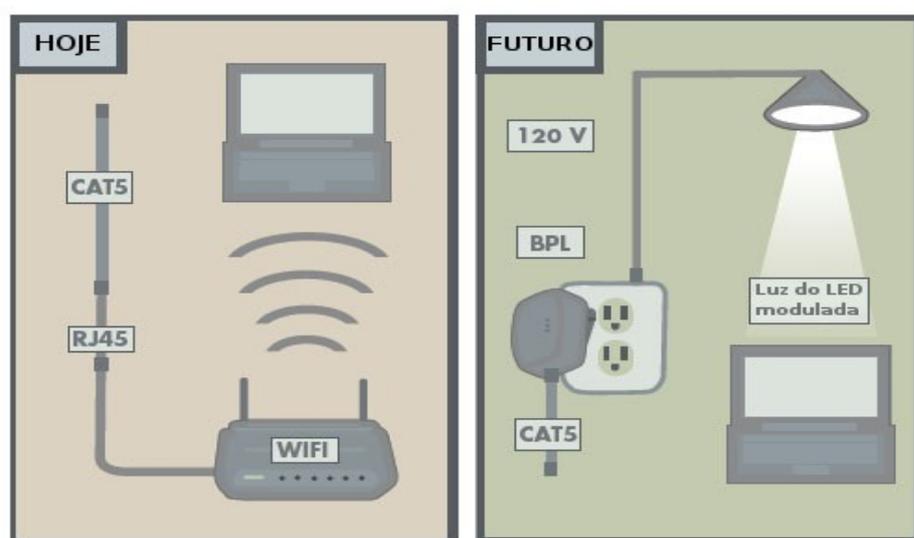


Figura 4 – Esquema de Rede [UNIVERSIDADE DE BOSTON, 2008]

2.2 APLICAÇÕES

Algumas aplicações que podemos citar, além do simples ponto de acesso a rede, são a comunicação inter-veicular, permitindo que veículos troquem mensagens entre si, por exemplo, sobre condições de tráfego. Uma rede adhoc pode ser formada, onde cada carro serve como um nó e repassa os dados para o carro seguinte. Os dados podem então ser continuamente propagados de veículo para veículo. Outra possibilidade, mais simples, é a detecção da frenagem do carro logo a frente, evitando engavetamentos, como mostrado na figura 5.

O veículo poderá obter informações do próprio semáforo. O uso de VLC para comunicação dos automóveis com a infraestrutura das rodovias é uma das aplicações mais promissoras. É evidente que isso envolverá uma enorme padronização. Mas como pode ser visto na figura 8, os semáforos podem ser usados para transmitir informações para o veículo e

seus ocupantes. O Japão é o primeiro país a usar ativamente a tecnologia e já criou dois padrões para ela.

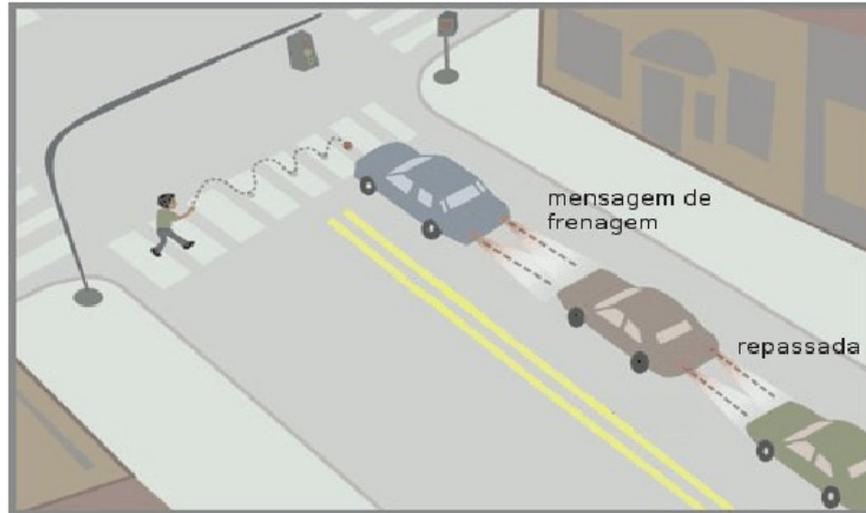


Figura 5 – comunicação inter-veicular [UNIVERSIDADE DE BOSTON, 2008]

Na figura 6 vemos a transmissão de dados a partir dos LED de sinalização de um semáforo. A transmissão é baseada no padrão japonês Jeita CP-1222. Os padrões são discutidos mais adiante. No exemplo da figura 6 podemos observar que o semáforo passa informações de localização ao computador portátil. As possibilidades são inúmeras, como situação do trânsito, tempo de chegada dos veículos de transporte de massa àquele local, informações que podem ser obtidas se todos os elementos envolvidos estiverem interligados em rede.



The Nippon Signal Co., Ltd. and VLCC, at Japan Shop 2006

Figura 6 – sinalização e dados simultaneamente [13]

Com o uso de sensores de imagem, detalhados mais adiante, a aplicação de VLC para sistemas de transporte inteligente (ITS) é possível. Na figura 7 podemos observar que cada um dos semáforos emite dados que são capturados em posições diferentes de um sensor de imagem. Múltiplos fluxos de dados simultâneos são possíveis.

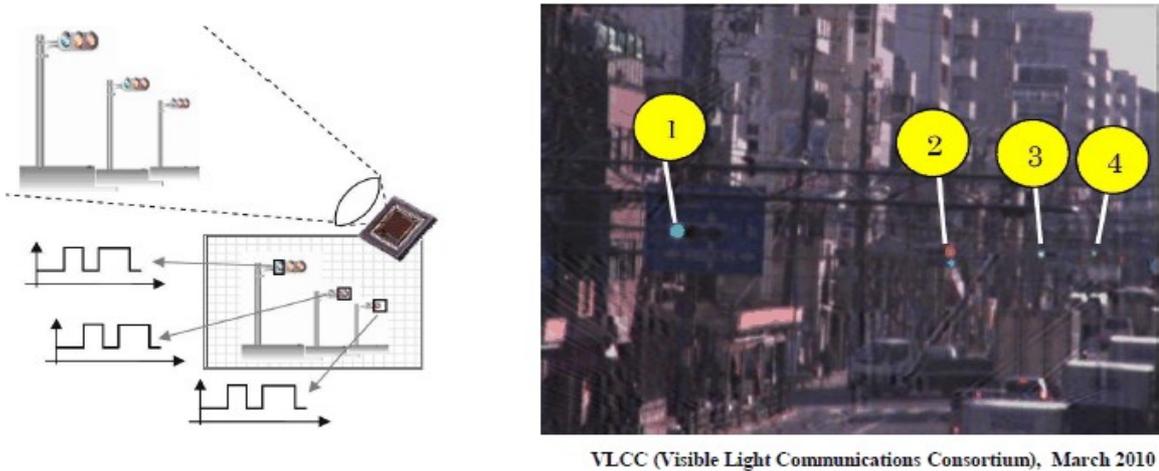


Figura 7- Aplicação de VLC em Sistema de Transporte Inteligente [13]

Na figura 8 são mostrados alguns exemplos de geolocalização, que permite conhecer a localização de uma pessoa ou objeto com precisão de centímetros. Um servidor conectado a Internet contém as coordenadas de cada luminária, semáforo, enfim qualquer fonte emissora de luz que transmita sua posição usando VLC. Cada um desses objetos possui uma identificação única (visible light ID). Essa informação de localização é continuamente atualizada, enviada através do sistema VLC e mantida armazenada, permitindo o rastreamento do objeto.

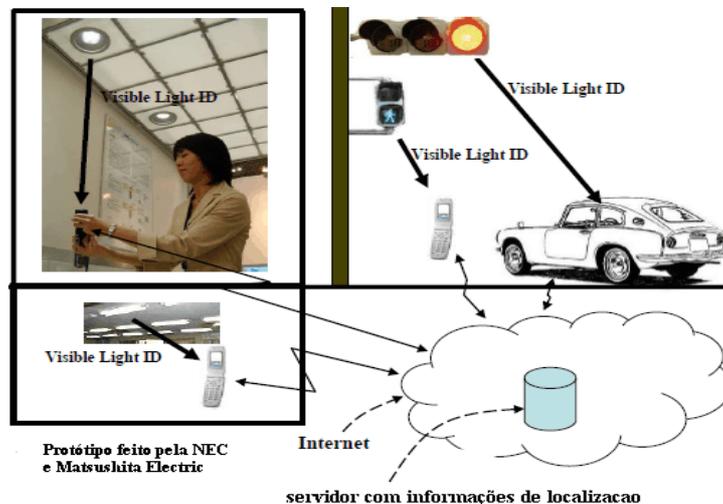


Figura 8 – Geo Localização [13]

Uma outra aplicação interessante é vista nas figuras 9 e 10 : onde, em um museu, uma obra de arte é iluminada por LEDs e esses transmitem informações sobre a obra de arte para o visitante, que usa um fone de ouvido com receptor óptico. O sistema já existe comercialmente no Japão. A vantagem do sistema é permitir visitas com um guia virtual, com diversas opções de áudio. O sistema é unidirecional, as informações fluem da luminária para o receptor, que fica numa espécie de crachá. O áudio é então encaminhado para os fones de ouvido. É mais prático que o sistema em uso em muitos museus em que o usuário precisa digitar um código que fica junto a obra de arte num PDA para então ouvir as informações relacionadas.



Figura 9



Figura 10

Figura 9 – comunicação unidirecional (KOMINE et all,2003) [4]

Figura 10 – sistema guia Hikari, Shimizu Corporation, Japão [13]

Outro exemplo semelhante e visto na figura 11. Informações sobre produtos em um supermercado são obtidas diretamente no carrinho de compras, equipado com um receptor de luz visível. Um protótipo criado pela NEC e Matsushita Electric Works, membros do Visible Light Communication Consortium. O carrinho tem um leitor de código de barras e é interconectado à rede do mercado através das luminárias. Assim consultas de preço e também de características adicionais do produto são possíveis. O sistema ainda rastreia o deslocamento ao carro de compras ao longo do mercado, permitindo ao lojista avaliar o fluxo de clientes e detectar áreas com pouco ou muito tráfego. Esse mapeamento permite uma distribuição mais efetiva das mercadorias, aumentando as vendas e otimizando a disposição dos produtos.



Figura 11 – um supermercado usando VLC [13]

A transmissão de dados em várias portadoras em comprimentos de onda (cores) diferentes é possível. Um exemplo seria o uso de LEDs RGB, onde utilizamos cada componente de cor em separado para uma portadora. Um exemplo de aplicação é o Sound Spot, criado pela Universidade de Keio no Japão e a JVC. Cores diferentes enviam fluxos de áudio diferentes. Veja a figura 12. Na figura 13 é apresentada uma versão em que três spots (vermelho, verde, azul) transmitem diferentes instrumentos de um grupo musical. Se o fotodetector recebe apenas uma portadora, somente aquele fluxo de áudio correspondente será

ouvido. Assim a justaposição dos fluxos de áudio irá gerar um áudio multicanais. Cada instrumento pode estar presente em um dos fluxos de áudio. É o exemplo mostrado na figura 13.



Joint project of Keio University and JVC

Figura 12 – Sound Spot [13]



By Sony and Agilent at CEATEC 2004, Japan

Figura 13 – Sound Spot [13]

Há também as aplicações de realidade aumentada. A realidade aumentada é uma visão em tempo real de um ambiente onde a percepção dos elementos que compõem a cena é aumentada através do uso de dados captados por sensores e interpretados por computadores. Um exemplo na figura 14 desenvolvido pela empresa Casio. Um sensor de imagem (câmera) captura não só a cena, mas também dados sobre a pessoa na cena. No caso apresentado o sensor lê também o crachá, que permite identificar a pessoa na imagem. Os crachás tem LEDs que transmitem a informação de cada individuo. Esse tipo de informação adicional facilita enormemente a localização de uma pessoa num fluxo de vídeo, por exemplo. Um sistema de circuito fechado de vídeo de um empresa que registre também essas dados adicionais permitirá localizar facilmente os indivíduos nas filmagens sem que seja necessário assistir a toda a gravação (o que pode ser impraticável se levado em conta o tempo necessário) e também dispensar o uso de recursos computacionais complexos, como reconhecimento de face, que pode ser computacionalmente intensivo e demorado.



Figura 14 – Realidade Aumentada.

Outra aplicação possível encontra-se na construção civil para o monitoramento do deslocamento de grandes estruturas. Na figura 15 uma ponte é monitorada por sensores de imagem que recebem e detectam a direção da luz emitida em diversos pontos da ponte. O erro de posição para um objeto de 100 metros é de 5mm com um sensor de imagem não muito complexo.

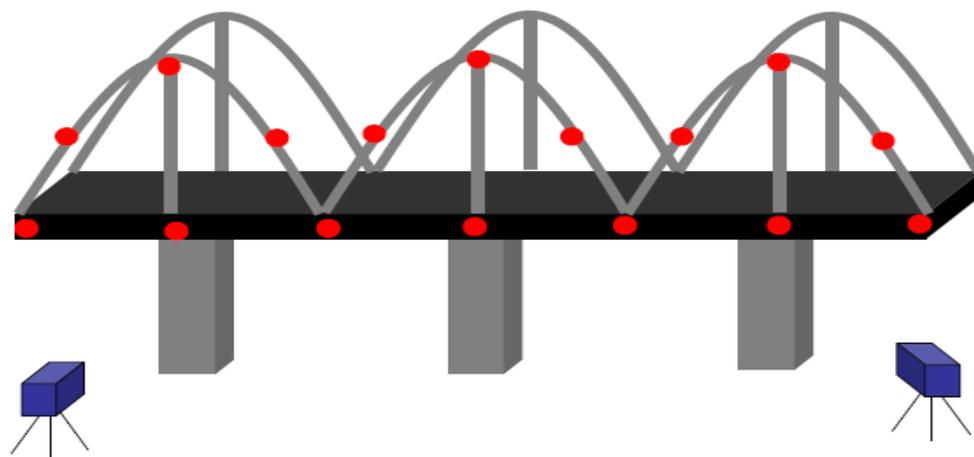


Figura 15 – Monitoramento do deslocamento de uma ponte [15]

Na figura 15 o sensor de imagem de cada uma das câmeras, que são fixas, monitora um grupo de LEDs. A precisão do deslocamento que se deseja monitorar irá definir a resolução do sensor de imagem, bem como a lente a ser empregada e a distância que a câmera ficará do objeto monitorado.

Para finalizar os exemplos de aplicações, temos a comunicação sob a água. Ondas de rádio não se propagam por grandes distâncias sob a água. Em outubro de 2010 a Universidade de Keio, os laboratórios Nakagawa e a empresa Rise Underwater demonstraram um transmissor VLC em forma de lanterna foi capaz de transmitir áudio a 30 metros de distância sob a água. Assim mergulhadores podem comunicar-se com voz. A luz produzida pelos LEDs da lanterna é modulada por intensidade. Um fotodetector fica ao lado do LED e funciona como receptor. A empresa Rise pretende comercializar o produto em 2012. Uma imagem do equipamento é mostrada na figura 16. Essa transmissão de dados sob a água é chamada pelos laboratórios Nakagawa de UVLC (Underwater Visible Light Communication). Também está em estudo o uso de VLC para identificar navios a distância. A guarda costeira do Japão e a Toshiba criaram o projeto Lighthouse (farol). Um binóculo especial consegue

captar um código na luz modulada a 1200 bps emitida por um navio, permitindo identificá-lo. Num teste foi possível identificar um navio a 2 km de distancia do porto de Yokohama.



Figura 16 – Comunicação sob a água [13]

Em seguida é apresentada uma tabela comparativa de acesso sem fio baseado em RF (na frequência de 2.4Ghz, livremente disponível em diversos países) e a tecnologia VLC..

Atributo	RF @ 2.4Ghz	LED Link óptico	Leva vantagem
Segurança/Privacidade	Atravessa paredes	Não atravessa paredes	LED
Capacidade de banda	Sinais na mesma frequência/canal geram interferência e disputa do meio	Luz pode ser direcionada, células pequenas e não interferentes entre si	LED
Custo de espectro adicional	alto	nenhum	LED
Interferência	Múltiplos usuários na mesma frequência	Luz natural e luz artificial (não LED)	Depende do caso
Atenuação multi percurso	Interferência destrutiva, ondas refletidas podem estar fora de fase	Interferência aparece como ruído, não há cancelamento de sinal	LED
Redundância de caminho	Múltiplos pontos de acesso	Múltiplos LEDs	LED
Velocidade	100Mbit/s	Comparável, mas com agregado maior devido ao reuso	LED
Custo	\$20	\$2 (baseado em Infravermelho)	LED

Tabela 1 – LED x RF (JOHNSON,2010) [1]

2.3 PADRÕES PARA VLC

Em 2009, resultado do comum acordo de cooperação entre VLCC e IrDA, o VLCC cria sua primeira especificação que incorpora e amplia o núcleo da especificação IrDA (que trata de comunicações de dados em infravermelho) para incluir o espectro de comprimentos de onda de luz visível. Ao modificar a especificação IrDA, módulos já existentes para aplicações em infravermelho podem - com pequenas alterações - ser utilizados para transmissão de dados VLC. Isso proporciona redução de custos de desenvolvimento pois a especificação IrDA já é amplamente utilizado na tecnologia portátil.

Segundo [POHLMANN, 2010] o Jeita CP-1221 e o subsequente Jeita CP-1222 surgiram no Japão de um esforço para padronizar essa tecnologia emergente e evitar a fragmentação devida a criação de diversos protocolos proprietários. O padrão Jeita CP1221 [Haruyama et al. 2008] restringe o comprimento de onda emitido a faixa de 380nm até 750nm, que é a faixa da luz visível. Outro detalhe é que o fabricante de um produto VLC tem uma tolerância de 1 nanômetro, para mais ou para menos, nas faixas que ele especificou para transmissão em seu produto. Recomenda também o uso de modulação em sub-portadoras. A CP-1221 define três faixas de frequências para uso em sistemas de comunicação: de 15kHz a 40kHz (taxa média de 4.8Kbits/s com frequência de sub-portadora de 28.8kHz), de 40kHz a 1MHz e finalmente maiores que 1MHz, para transmissão em altas taxas usando LEDs. Inicialmente o padrão Jeita CP-1221 foi pensado para transmissão de informações de localização (como uma coordenada de um sistema GPS interno a uma construção, onde não se capta sinal dos satélites de geolocalização). O Jeita-CP1222 difere pelo fato de ser usado especificamente para comunicação de dados. Restringe a frequência da sub-portadora em 28kHz e sugere SC-4PPM com esquema de modulação. Recomenda também o uso de CRC para detecção e correção de erros.

Além dessas duas tentativas de padronização japonesas, o IEEE 802.15 (*Wireless Personal Area Networks* ou WPAN) , no grupo de trabalho 7 está empenhando em definir um PHY (camada física do modelo OSI) e um MAC (controle de acesso ao meio) para a tecnologia VLC.

3 COMPONENTES DE UM SISTEMA VLC

3.1 TRANSMISSOR

Um transmissor VLC completo é composto de LEDs, o circuito de controle dos LEDs (que pode incluir inclusive o controle de intensidade luminosa do ambiente) e de módulos para interligá-lo a uma rede ethernet ou a um rede BPL, ou seja, uma rede que usa o cabeamento de energia elétrica como meio de transporte.

O transmissor mais especificamente é composto de um LED branco, que pode ser um LED RGB (que possui as três componentes vermelho, azul e verde que combinadas produzem o branco) ou então um LED azul encapsulado com uma camada de fósforo. O LED RGB demanda um controle mais complexo, mas há a possibilidade de modular três comprimentos de onda separadamente, com três fluxos de dados separados. No caso do LED RGB pode ser necessário um controle baseado em realimentação (malha fechada) devido a variação da cor com a temperatura do LED. Observe que são necessárias três intensidades distintas de corrente, uma em cada LED de cor básica, para produzir a cor branca. O LED azul com fósforo é comum em iluminação devido a simplicidade de seu uso. O fósforo porém torna-o mais lento para transmissão de dados. Isso se deve ao fato do fósforo absorver a luz azul, em um comprimento de onda menor e emití-la em um comprimento de onda maior. O LED por causa do processo de absorção/emissão do fósforo passa a ter um tempo maior para atingir a luminosidade máxima e apagar-se. Diversos experimentos tem sido conduzidos com filtros ópticos azuis e operando os fotodetetores na faixa do azul, melhorando em muito as taxas obtidas com LEDs com fósforo (WALEWSKI et al, 2010) [3] . No capítulo 4 serão apresentadas algumas medições efetuadas com e sem filtros, usando LEDs brancos comuns de 10000 mcd e os LEDs OSTAR, da Siemens, também utilizados em [3].

Na figura 17 temos um diagrama típico de um controlador de LED em um sistema VLC usando modulação interna, ou seja, modulando diretamente a fonte de luz. O uso de corrente de BIAS permite que o sinal modulante seja de menor intensidade e torna mais fácil a operação do LED em sua região linear. Devido a capacitância dos LEDs, por serem dispositivos de grande área, o uso de buffer de baixa impedância (um amplificador

operacional na forma de um amplificador de transimpedância) pode melhorar a constante de tempo do circuito. Essa questão é abordada na seção que trata da otimização do receptor.

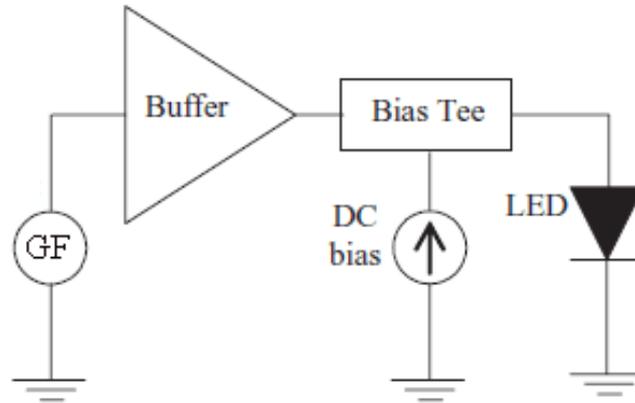


Figura 17 – Driver de LED típico em sistema VLC [2]

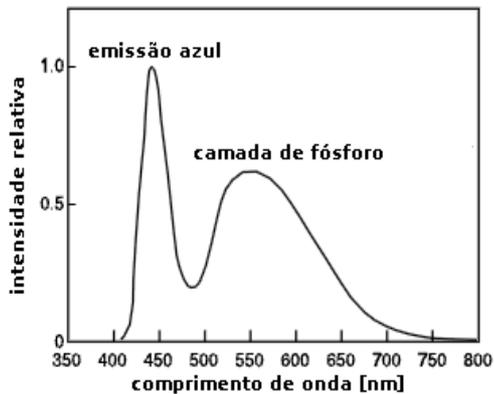
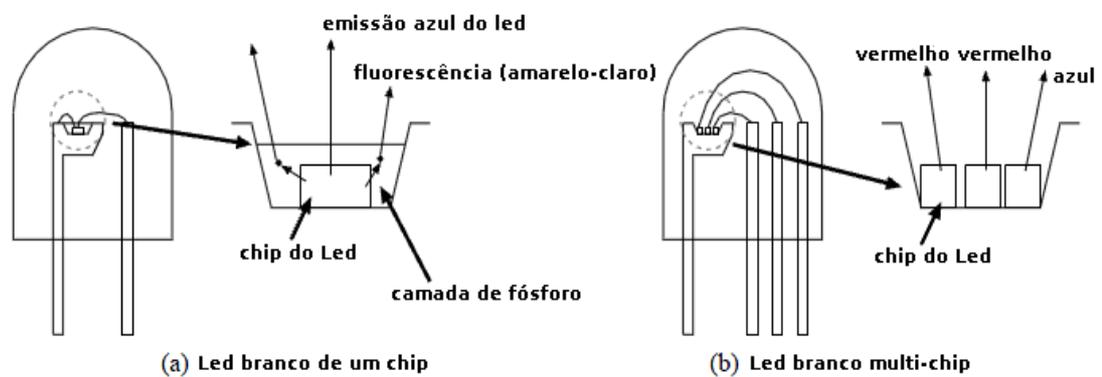
3.1.1 TIPOS DE LEDs

Um transmissor VLC deve atuar também na iluminação. Segundo a recomendação da norma ISO e da norma NBR, a iluminância para um escritório deve ficar entre 200 e 1000 lúmens. Os LEDs de alto brilho proporcionam iluminância adequada, porém operam com correntes elevadas (mais de 500mA) o que traz exigências de uso de dissipadores de calor adequados e exigem circuitos de controle mais complexos.

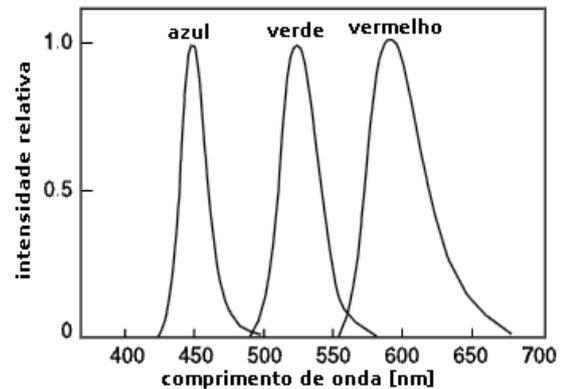
Na escolha do LED é importante considerar o ângulo de emissão da fonte para que ele otimize a transmissão. Um ângulo demasiado grande ($\gg 100$ graus) poderá tornar muito baixo o nível de sinal no receptor. Outra consideração é a resposta em frequência do LED. Como os fabricantes ainda não produzem LEDs no visível especificamente para aplicações de comunicação, é preciso realizar testes em bancada para verificar as características de resposta.

A potência óptica produzida versus a corrente de entrada no LED é um dos fatores mais importantes. A dependência linear da potência óptica produzida com a corrente de entrada facilita a operação com LEDs. Essa dependência tem relação direta com a capacidade de modulá-los [20].

Na figura 18 podemos ver a constituição física e o espectro dos LEDs brancos mais comuns: led azul com encapsulamento revestido por fósforo e o LED branco onde sua luz é produzida pela combinação de 3 chips: vermelho, verde e azul. O LED RGB tipicamente tem a emissão do vermelho em 625nm, do verde em 525nm e do azul em torno de 470nm. É possível modular cada chip em separado, mas é necessário um circuito de controle bem mais complexo, pois tratam-se de três correntes independentes para produzir a cor branca.



(a) Led de um chip
InGaN azul + fósforo YAG



(b) Led de múltiplos chips
InGaN Azul + AlInGaP Verde + AlGaAs vermelho

Figura 18 - Tipos de Leds brancos [7]

3.1.2 O PROBLEMA DO ENLACE DE SUBIDA (UPLINK)

Vimos nas aplicações alguns exemplos de comunicação unidirecional, como o Museu (figuras 9 e 10) e o Sound Spot (figuras 12 e 13). As aplicações unidirecionais são mais fáceis de implementar e compreender. Como só há fluxo de dados da luminária (no teto) para o receptor, que sem encontra alguns metros abaixo, a situação é favorável: o transmissor produz com a luz um tronco de cone que representa a área efetiva de atuação, que podemos facilmente localizar pela presença da luz emitida. Basta manter o receptor dentro da área de atuação. Porém para acesso a redes dependemos de comunicação bidirecional. Isso significa que o receptor sobre a mesa, por exemplo, deverá também transmitir para a luminária no teto. Possibilidades para o link de subida são o uso de IR (infravermelho), WIFI (na banda ISM, 2.4Ghz ou 5.7Ghz) ou então a reflexão da própria luz emitida, usando um modulador corner cube (KOMINE, HARUYAMA, NAKAGAWA,2003)[4]. O corner cube tem a característica de refletir a luz incidente de volta para a fonte. Com o uso de um obturador ótico, que pode ser um LCD (dependendo de sua polarização um LCD pode permitir ou bloquear a passagem de luz) é possível modular um sinal OOK, em frequência bem mais baixa, para ser detetado na luminária. Diagramas esquemáticos são mostrados nas figuras 19 e 20. Isso permite uma solução totalmente ótica.

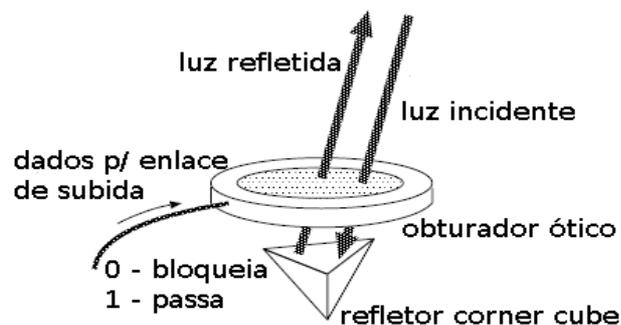


Figura 19 – refletor corner cube

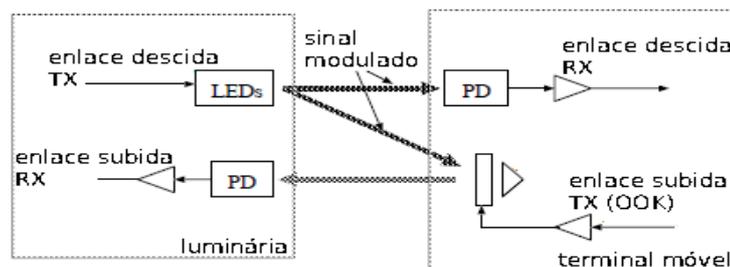


figura 20 – enlace bidirecional com refletor corner cube

3.2 RECEPTORES

Um receptor VLC é composto de elementos ópticos que incluem filtros, lentes, fotodetetores, amplificadores e circuito de recuperação do sinal, bem como módulos para interligá-lo a uma rede ethernet ou a um rede BPL, ou seja, uma rede que usa o cabeamento de energia elétrica como meio de transporte.

A filtragem é importante no receptor para eliminar componentes DC indesejáveis, como luz solar e outras fontes de luz.

O circuito de recepção irá contatar com um pré-amplificador (amplificador de transimpedância) e um amplificador com ganho variável, para acomodar variações da intensidade do sinal recebido.

Na figura 21 temos um diagrama típico de um receptor em um sistema VLC com fotodetetores. A luz é coletada pelas lentes e pode ser submetida a um filtro óptico. As lentes aumentam a área efetiva de captura para o FOV desejado.

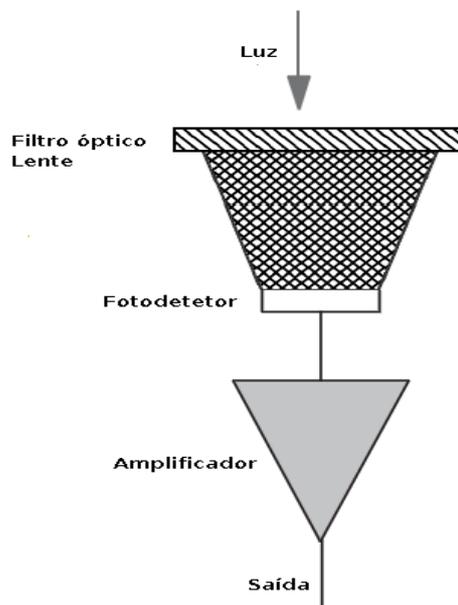


Figura 21 – Modelo de Receptor VLC [2]

Os fotodetetores podem ser PIN ou APD. Os fotodetores APD tem a desvantagem de demandar tensões altas de operação e também custo elevado, porém são mais sensíveis. A área do fotodetetor é crítica no projeto, pois quanto maior a área maior será a capacitância do fotodetetor, o que tem impacto direto na banda passante. Trata-se de uma relação de

compromisso velocidade versus área de captura do fotodetector. Equalização no receptor pode aumentar significativamente a banda passante. Em [6] uma taxa de dados de mais de 40Mb/s foi obtida com um LED não filtrado com banda de 3Mhz, mas isso aumenta a complexidade e custo do receptor. Tipicamente pode se esperar uma taxa máxima na recepção em torno de 1Gbps com os fotodetetores disponíveis no mercado atualmente.

Além dos fotodetetores também existe a possibilidade de uso de sensores de imagem (CCD/CMOS) que podem simultaneamente adquirir imagens e transmitir dados. O princípio de comunicação com o sensor de imagem é que o mesmo faz contínuas capturas de imagem de uma cena onde há um transmissor, que pode ser um LED ou grupo de LEDs modulados. Temos uma representação na figura 22. Obviamente as taxas vão depender muito da velocidade de captura do sensor. Mas dados podem ser enviados simultaneamente a pontos distintos do sensor. Ou seja, ele pode receber e demodular diversos fluxos de dados simultâneos.

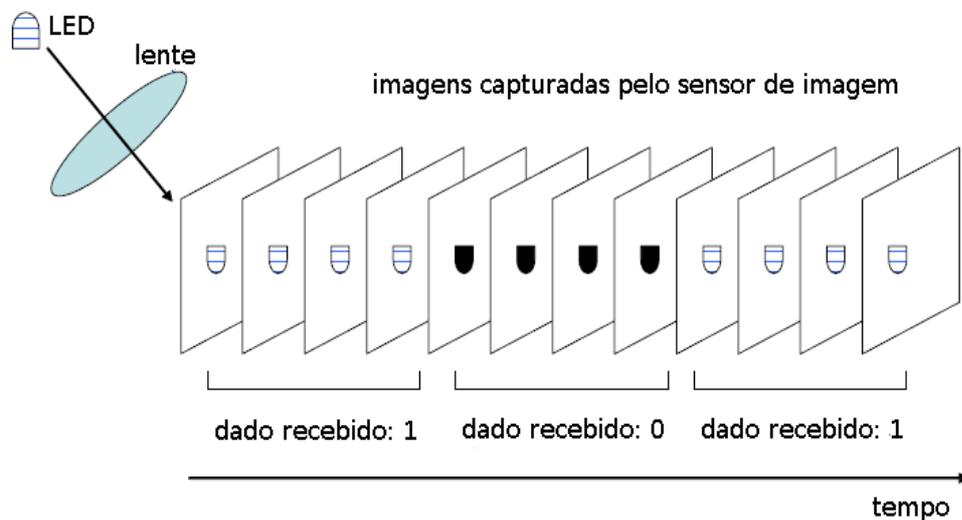


Figura 22 – Detecção de dados com sensor de imagem [13]

Na figura 23 pode-se observar o envio de 4 fluxos simultâneos, que são diferenciados pela sequência inicial no trem de pulsos.

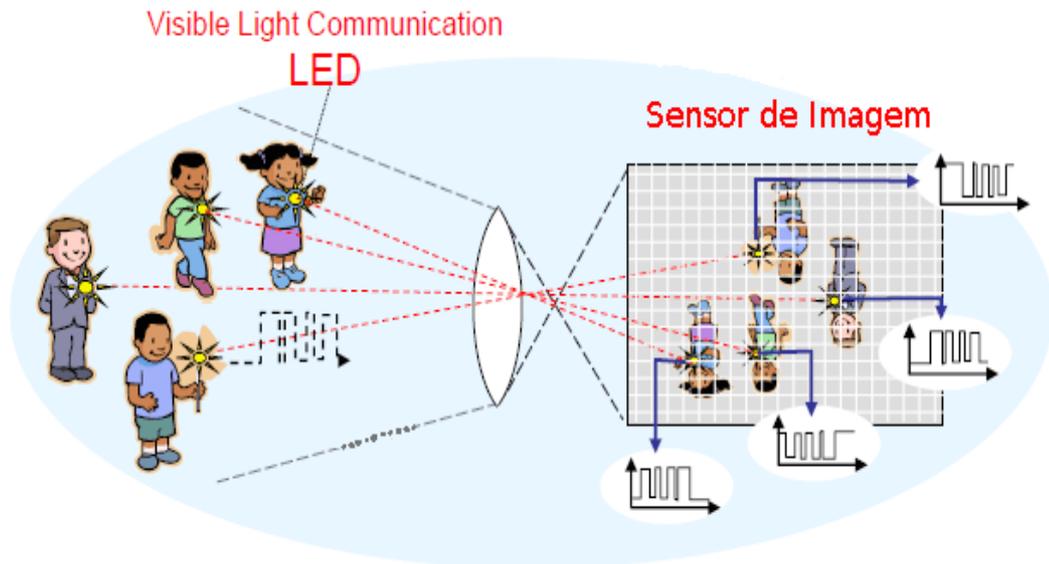


Figura 23 – identificando fluxos simultâneos num sensor de imagem [13]

Na figura 24 é mostrado um exemplo de uso de múltiplos LEDs sendo detectados por um sensor de imagem. São 64 LEDs (uma matriz 8 x 8) transmitindo simultaneamente para um pixel diferente de um sensor de imagem de alta velocidade. O sistema foi desenvolvido na Universidade de Keio em conjunto com o laboratório da Sony em Kihara, ambos no Japão. Foi obtido um ganho de 50 vezes na taxa (o ganho teórico seria de 64 vezes, mas o overhead do próprio sistema não o permitiu.)

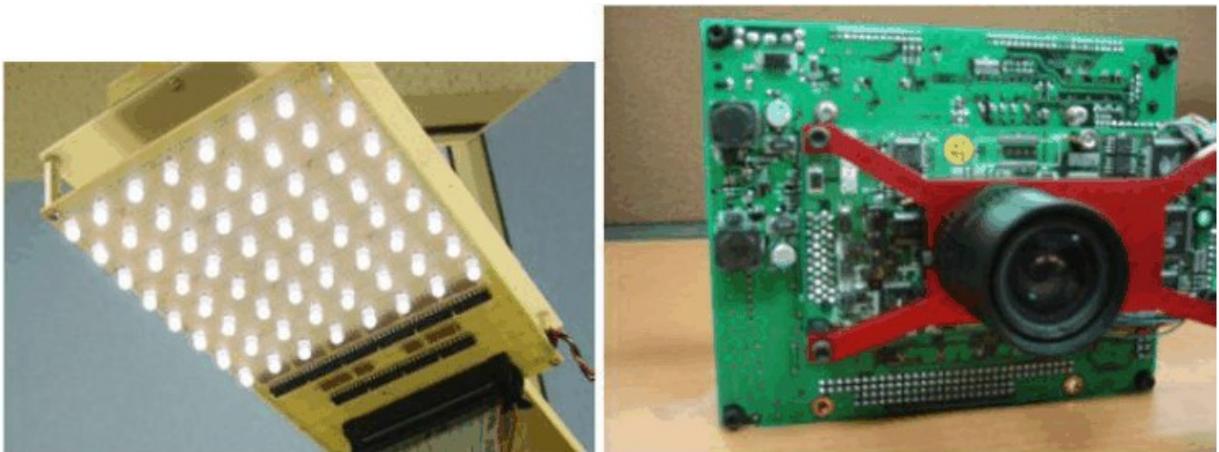


Figura 24 – Múltiplos transmissores e detecção com sensor de imagem [14]

Um ponto muito importante no projeto dos receptores é considerar os pontos cegos que podem surgir devido a junção do fotodetector e lentes. É interessante observar o setup da figura 25 que mostra situações de pontos cegos, conforme demonstrado por NAKAGAWA [11]. Essa questão pode levar a necessidade de uso de múltiplos fotodetectors, como mostrado na figura 26. O uso de múltiplos fotodetectors pode permitir então o uso de mecanismos dinâmicos de ajuste da posição da lente (servomecanismos) para otimizar a recepção.

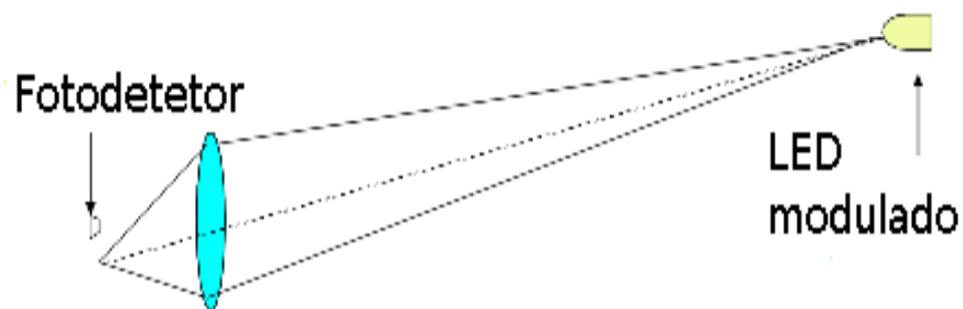


Figura 25 – Ponto cego [12]

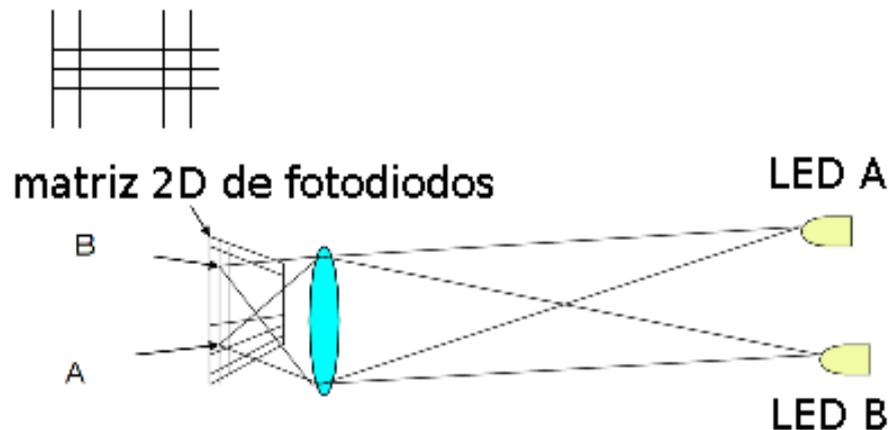


Figura 26 – Matriz de receptores [12]

3.2.1 OTIMIZAÇÃO DO RECEPTOR

A capacitância de um capacitor de placas paralelas é:



(1)

Onde ϵ é a permissividade do dielétrico e d a distancia entre as placas e A a área das placas. Em um fotodetector a separação de cargas na região de depleção é equivalente a um capacitor de placas paralelas através da junção em bias reverso. A área das placas do capacitor corresponde a área da região de depleção. A separação entre as placas é a largura da região de depleção. Então temos a capacitância aproximada de um fotodetector:



(2)

Onde ϵ_0 é a permissividade do vácuo e ϵ_r a permissividade relativa do semiconductor.

A capacitância total na entrada de um receptor óptico



(3)

Onde C_d é a capacitância do fotodetector e C_p as capacitâncias parasitas.

É preciso minimizar C_p para aumentar a banda passante. Como o circuito de um detector é basicamente um circuito RC temos, conforme a figura 27:



(4)

Logo também é interessante diminuir o valor de R_L , resistência da carga.

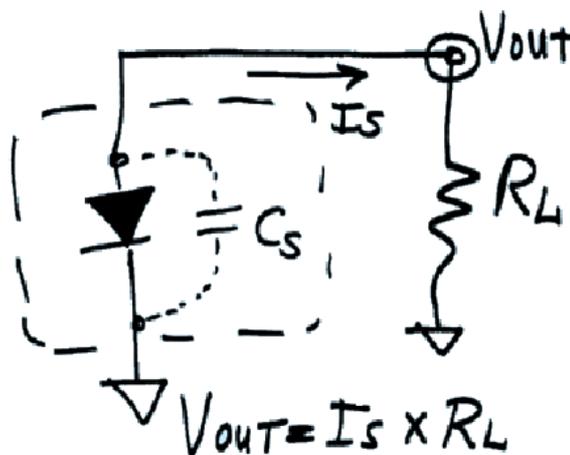


Figura 27 – Modelo simples de um detetor [8]

Aumentar R_F aumenta o ganho (aumento de $A_{v(f)}$) mas também diminui a banda passante já que f_{-3dB} é inversamente proporcional a R_F . Porém a redução de R_F também implica no aumento do ruído térmico:



(5)

Onde k é a constante de Boltzmann, T a temperatura em Kelvin do resistor, f é a faixa de frequência em hertz onde o ruído está sendo medido.

Uma forma que se destaca para resolver esse tipo de problema é o uso de amplificadores de transimpedância (com ou sem uso de bootstrap, bootstrap é o processo que permite diminuir ainda mais a capacitância de entrada do fotodetector usando um amplificador adicional como buffer).

Na figura 28 vemos um modelo simplificado de um amplificador de transimpedância.

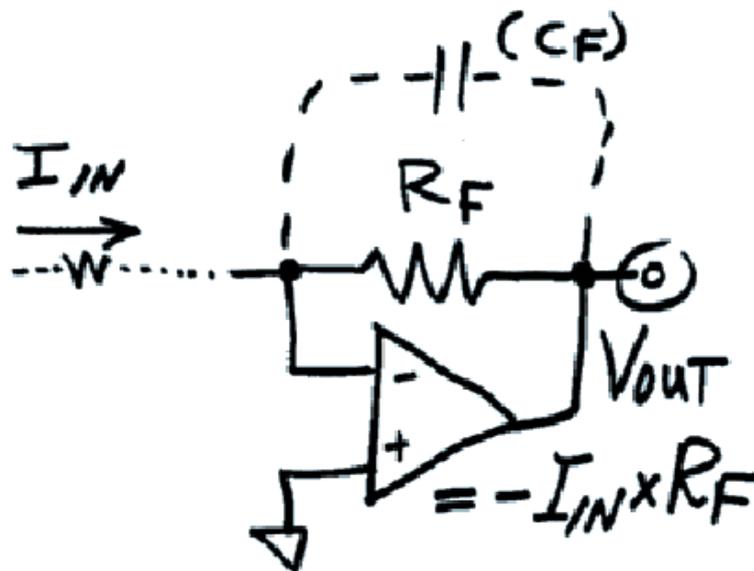


Figura 28 – amplificador de transimpedância [8]

Um amplificador operacional, ligado com um resistor de feedback R_F funciona como um inversor, mas também como um “conversor de corrente para tensão”. O ganho, ou transimpedância, é definido por $A_{v(f)}$. Para evitar oscilação, precisamos do capacitor C_F .

O tempo de resposta nesse caso já não depende mais da constante de tempo e o ganho pode ser mais alto pois não é preciso limitar o resistor. O único problema é que a configuração pode oscilar, por isso é necessário o capacitor C . Um valor inicial para C é:



(6)

Onde C é a capacitância de entrada, R_{in} a resistência de entrada e R_f a resistência de feedback. Um ajuste nesse capacitor pode ser necessário devido a outras capacitâncias envolvidas, provenientes de outros componentes e das trilhas do circuito.

Em adição ao amplificador de transimpedância visto na figura 28, uma variação possível é vista na figura 29:

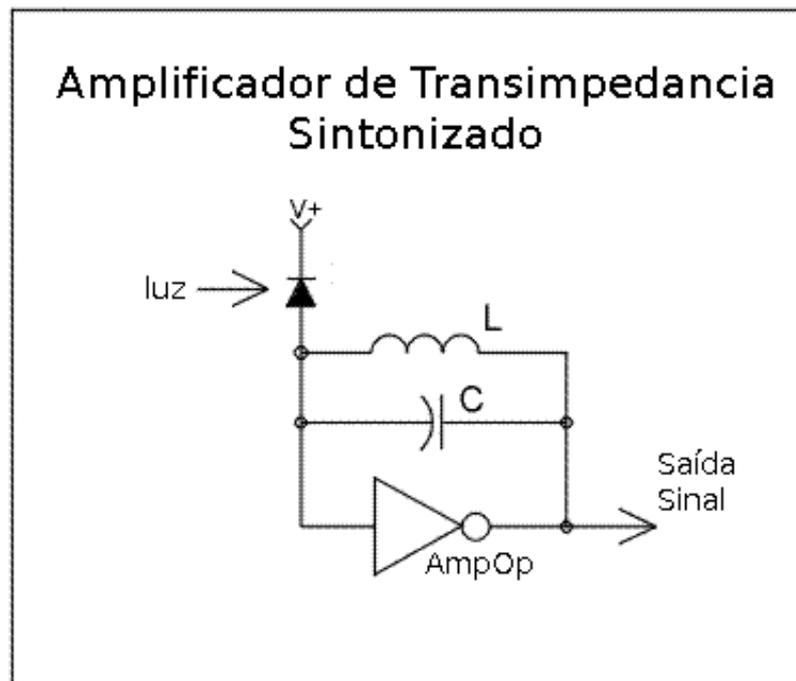


figura 29 – Amplificador de transimpedância sintonizado [12]

O circuito acima é um técnica utilizada em receptores de RF para receber sinais fracos. Observe que o resistor de retroalimentação foi substituído por um indutor. Um indutor passa sinais DC sem afetá-los, porém oferece reatância a sinais AC. Quanto mais alta a frequência, mais alta a reatância. Sinal DC proveniente da luz ambiente não modulada irão provocar uma baixa conversão de tensão para corrente, ao passo que sinal de alta frequência modulado irá

proporcionar uma alta conversão de tensão para corrente, melhorando sua detecção. Isso ajuda a minimizar o problema de saturação do fotodetector por outras fontes de luz que não a proveniente do sistema VLC.

3.3 ESTUDO DO CANAL

Num sistema VLC temos uma ou mais componentes diretas vindas da fonte de iluminação e componentes indiretas compostas pela reflexão nos objetos e paredes do ambiente. Na figura 30 temos uma distribuição típica de luminárias LED no teto [2].

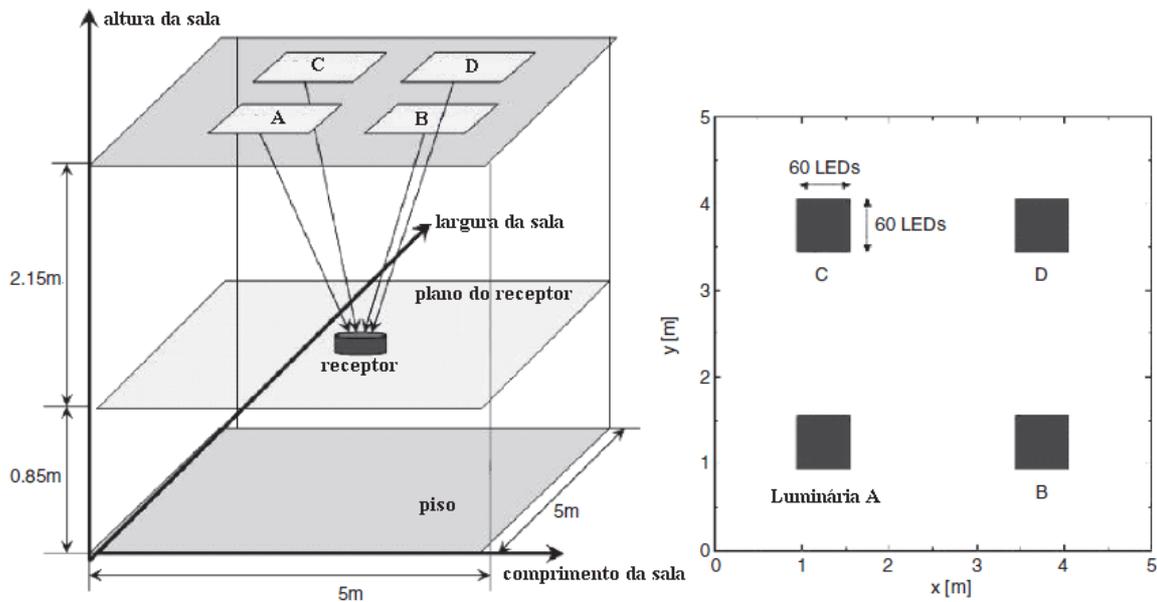


Figura 30 – Distribuição de luminárias [2]

Em taxas acima de 100Mbit/s o atraso relativo do sinal chegando de diferentes luminárias começa a ser relevante. Modulações como OFDM podem então ser interessantes [2]. A componente difusa, entretanto, é relativamente pequena comparada com a forte componente em visada direta provenientes das luminárias. Normalmente o requerimento de 200 a 500 lux para propósito de iluminação garantirá níveis muito altos de sinal, favorecendo a relação sinal-ruído. Uma distribuição típica está representada na figura 31.

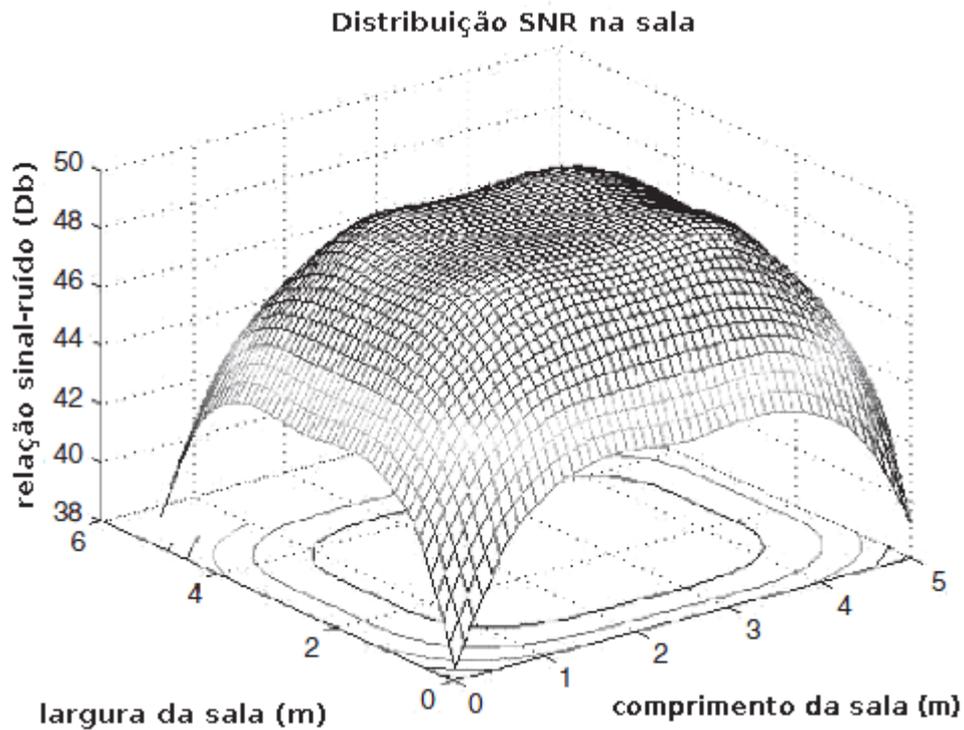


Figura 31 – Distribuição SNR típica [2]

Não podemos deixar de citar a interferência da luz ambiente. Sistemas VLC para transmissão de dados em alta velocidade são mais apropriados para uso indoor já que a luz solar provocará saturação no receptor pois é extremamente intensa e de amplo espectro. A luz incandescente não representa grande problema pois as componentes geradas são de baixa frequência. As lampadas fluorescentes são mais problemáticas e podem gerar componentes em até 1Mhz. Mas o ideal é que não haja coexistência de iluminação natural , incandescente ou mesmo fluorescente em ambientes com VLC.

3.3.1 O CANAL ÓPTICO INDOOR

Como a ideia é iluminar o ambiente e transmitir dados simultaneamente, múltiplas luminárias se fazem necessárias, como vimos na figura 30. A reflexão nas paredes e objetos ocorrerá provocando o multi percurso, alargamento de pulso e interferência inter-simbólica. O sinal recebido $r(t)$ é definido por NAKAGAWA [9] como:



(7)

onde $s(t)$ é o sinal transmitido, (X) representa a convolução, $F(r)$ é a resposta impulsional usada para definir a dispersão por multi percurso e $n(t)$ é o ruído branco Gaussiano aditivo. GFELLER e BAPST [10] modelaram a resposta impulsional do canal da seguinte forma:



(8)



Onde t_{FOV} é o tempo para que a luz percorra a distância L e FOV é o campo de visão do receptor.

O sistema é composto de LEDs brancos, com padrão de emissão Lambertiano. Numa emissão desse tipo de padrão a intensidade de radiação $I(\theta)$ depende do ângulo de irradiação θ e é descrito por NAKAGAWA [9] como:



(9)

Onde P_{LED} é a potência total transmitida pelo LED e D denota a diretividade do padrão de emissão derivado do semi ângulo de meia potência $\theta_{1/2}$.



(10)

quanto maior for m , mais diretivo é o feixe na origem.

O ganho DC segundo NAKAGAWA [9] é dado por:



(11)

Onde A_{fd} é a área física do fotodetector, r é a distância entre o transmissor e o receptor, θ_i é o ângulo de incidência, θ_r é o ângulo de irradiação, G_{opt} é o ganho do filtro óptico e G_{con} é o ganho do concentrador óptico. Observe que $G_{con} = \frac{1}{\sin^2 \theta_r}$.

O concentrador óptico pode ser definido como:



(12)



Onde n é o índice de refração.

3.4 TÉCNICAS PARA OBTENÇÃO DE TAXAS ELEVADAS

Segundo O'Brien [17], o uso de LEDs como transmissores, considerando os LEDs atuais disponíveis, nos dá uma margem de poucos MHz para os LEDs brancos (baseados em fósforo) e cerca de 10MHz com LEDs brancos usando a parte azul do espectro (filtrando a emissão do fósforo). Temos também uma relação sinal ruído muito alta (> 50 dB) devido a proximidade do transmissor e do receptor. O caminho então para obtenção de altas taxas passa pelo uso de modulações complexas (como OFDM e DMT), o uso de equalização e o uso de múltiplos transmissores simultâneos (vide figura 24). Com uso de componentes de prateleira (LEDs e fotodetetores PIN), numa distância de 1.4m e com 500 Lux de intensidade luminosa foi obtido por O'Brien uma taxa de 100Mbps usando DMT com 31 sub-portadoras, cada uma usando modulação 16QAM. Essa trabalho foi desenvolvido pela Siemens, Universidade de Athenas, France Telecom, Apside e Heinrich Hertz Institute. O presente trabalho não trata da implementação de modulações complexas, mas apenas sinaliza essa possibilidade para implementações futuras.

4 – EXPERIMENTOS REALIZADOS

4.1 – O TRANSMISSOR

Para os experimentos inicialmente optamos por um conjunto de 50 LEDs brancos (led azul com fósforo, facilmente encontrados no mercado), em série, cada led com intensidade luminosa de 20000 milicandelas cada (figura 32) . A ligação em série é devida ao fato da necessidade de modular a corrente. Mas tal ligação em série implica numa fonte DC de mais de 60Volts (1.2Volts por LED). Aliado a baixa intensidade luminosa (o que vai contra a ideia de uso simultâneo de iluminação e transmissão de dados) e os resultados práticos obtidos (taxa de 2Mhz em distância de 1 metro) levaram-nos a optar por LEDs de alta intensidade luminosa.



Figura 32 – conjunto de 50 LEDs

Foi escolhida a linha de LEDs da Osram , conhecida com OSTAR, utilizada com sucesso por WALESKI [3]. O modelo do LED é o LE CW 3EB. Ele deve ser acondicionado em um dissipador adequado – sem o mesmo ele opera apenas por alguns segundos e é danificado por superaquecimento. Na figura 33 temos o LED OSTAR. O modelo utilizado tem temperatura de cor de 3000K. Opera com no máximo 1000mA e tensão de 24.5V DC. É interessante

observar que os 6 chips que compõem o LED são recobertos por uma lente. O ângulo de visão do LED é de 130 graus.

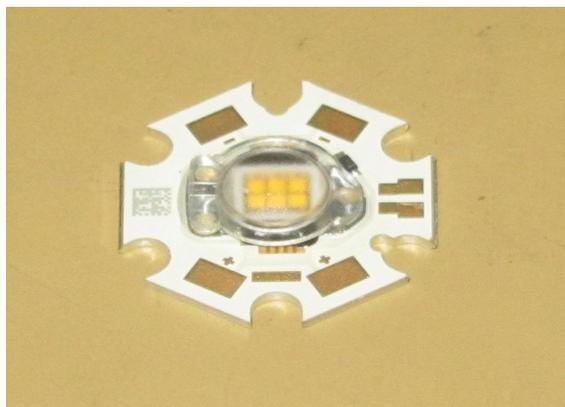


Figura 33 – LED Osram Ostar

Na figura 34 o LED é montado no dissipador. Observe que a lente do dissipador também funciona como um colimador para a luz produzida., reduzindo sua abertura para cerca de 70 graus.



Figura 34 – LED e montagem do dissipador

Em Fevereiro de 2011 foi feita uma visita a Universidade de Boston, que têm um laboratório dedicado a VLC, obtivemos do Dr. Thomas Little um protótipo desenvolvido por eles (figura 35). Do protótipo surgiu a ideia do uso de sinalização TTL. Através do uso de um cabo USB-TTL, a interface com computadores, para testes, fica muito facilitada. O único

detalhe de tal uso é que a taxa de bits máxima em tal montagem é de 3Mbits, devido a limitações da porta USB e do cabo/conversor utilizado (Cabo TTL-232R-5V da FTDI Chip, TTL de 0-5 volts). O protótipo da Universidade de Boston suporta a transmissão de uma onda quadrada de frequência 2Mhz.

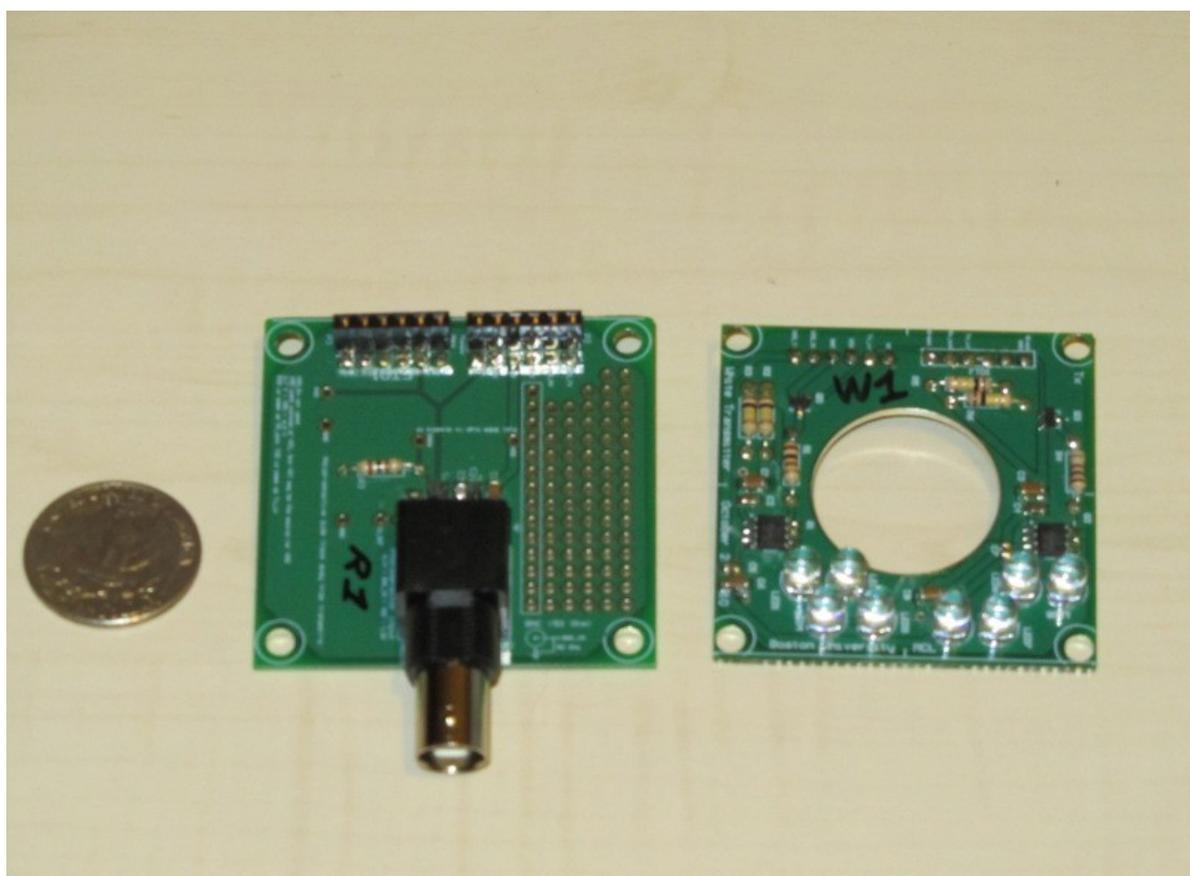


Figura 35 – transmissor e receptor VLC da Universidade de Boston

O problema com os LEDs de alta potência e alta intensidade luminosa são os requerimentos de corrente. O LED utilizado (LE CW E3B) tem um requerimento de tensão de 24.5Volts e corrente máxima de 1A. Controladores eletrônicos (em inglês, “drivers”) de LEDs são bastante comuns mas são utilizados simplesmente para manter os LEDs acesos, para “*dimming*”, que é o controle da intensidade da iluminação, ou mesmo para modula-los liga/desliga em baixas frequências. A aplicação desejada implica na modulação de LEDs em taxas de megaHertz. Tais conversores eletrônicos foram descartados. A solução veio então no uso de transistores de potência atuando como chaves liga/desliga para obter as taxas de modulação desejadas[18][20]. Os transistores MOSFET são transistores muito baratos, tem grande capacidade de corrente e são largamente utilizados na industria eletrônica. Os

requisitos então para a escolha do MOSFET nesse caso particular são que ele tenha uma tensão de limiar menor que 5 volts (ou seja, permanecerá desligado até que 5 V seja sinalizado, ou seja, transmitir um bit 1), suporte a uma tensão de mais de 24 Volts e suporte a uma corrente de pelo menos 1 ampere. Além disso deve ter um tempo de resposta suficientemente rápido. O transistor selecionado foi o 40N10 que tem tensão de ruptura de 100V, suporta uma corrente no dreno de 40A e tem tempo de resposta de 30ns. Porém há um outro problema: um MOSFET de potência tem uma capacitância parasita muito alta entre a base e o coletor/emissor. Quando o pulso chega a base, esse “capacitor” terá que ser carregado para que a tensão de limiar seja atingida. Por isso normalmente MOSFETs de potência são associados a drivers de MOSFET, elementos que conseguem suprir a corrente necessária em menos de 30ns, reduzindo o problema da capacitância, e permitindo um chaveamento mais eficiente do MOSFET. O parâmetro mais importante na escolha do driver do MOSFET é o tempo de resposta. No caso foi utilizado o TC4427. Ele consegue carregar 1000pf em 25ns e tem tempo de resposta de 40ns. A figura 36 mostra o circuito montado numa protoboard.

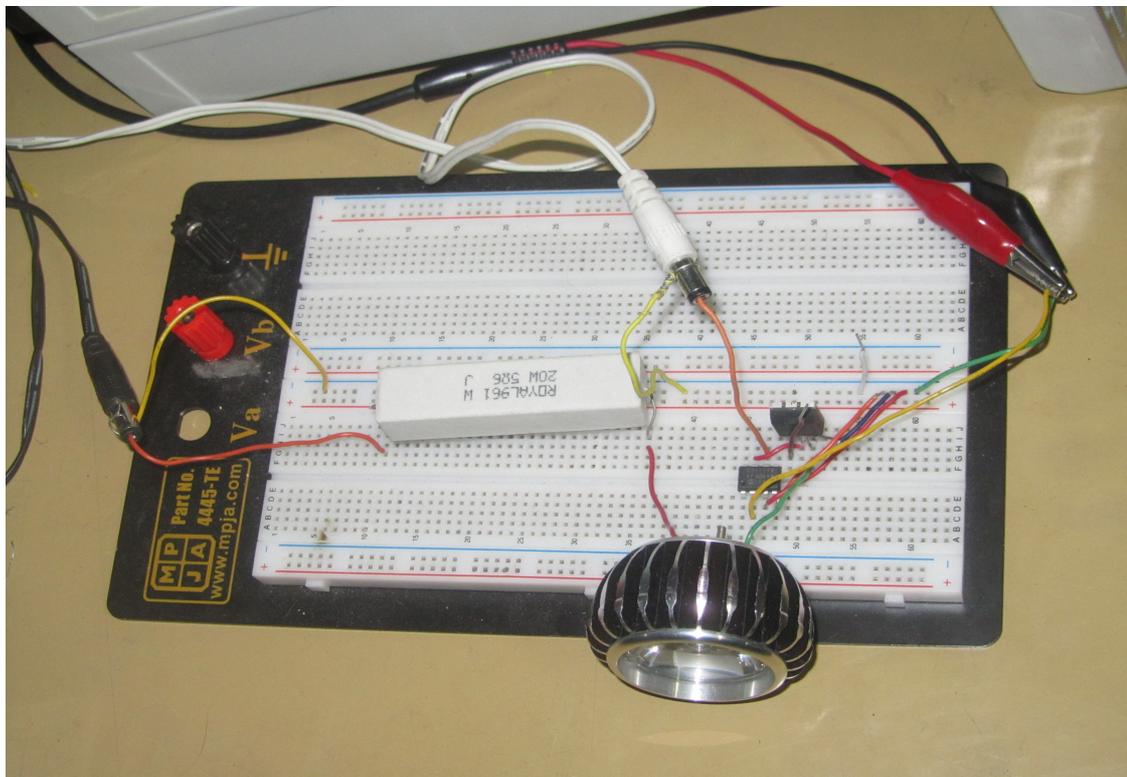


Figura 36 – o transmissor em protoboard

Na figura 37 temos um diagrama de blocos do transmissor.

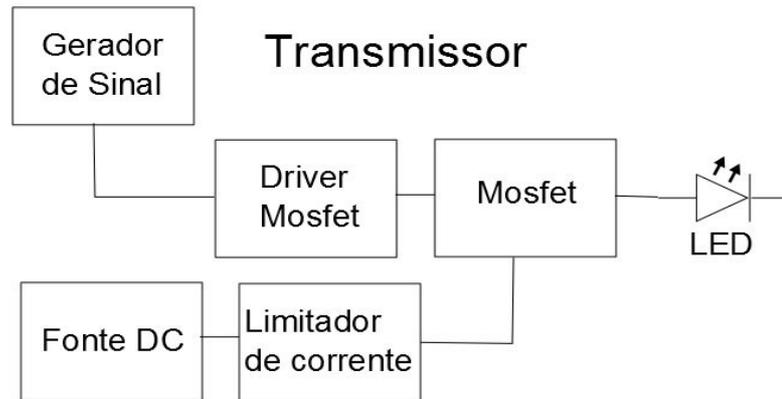


Figura 37 – diagrama de blocos do transmissor

4.2 - O RECEPTOR

O circuito de recepção é basicamente um amplificador de transimpedância, como visto na seção 3.2.1, um amplificador de tensão e um comparador de tensão. O comparador de tensão irá deixar o nível na saída entre 0 e 5 Volts, dependendo da saída do amplificador de tensão. Com o uso de um divisor de tensão no comparador de tensão podemos ajustar sua sensibilidade de acordo com a condição do sinal (quanto maior a distancia entre transmissor e receptor, mais fraco será o sinal na saída do amplificador). Além de todo o exposto acima, um sinal de saída com tensão uniforme facilita em muito a análise do sinal produzido. Na figura 38 é mostrado o diagrama de blocos do receptor. É interessante observar que um bias reverso é aplicado ao catodo do fotodiodo, aumentando sua sensibilidade. Um aumento demasiado dessa tensão também aumenta o ruído no fotodetector.

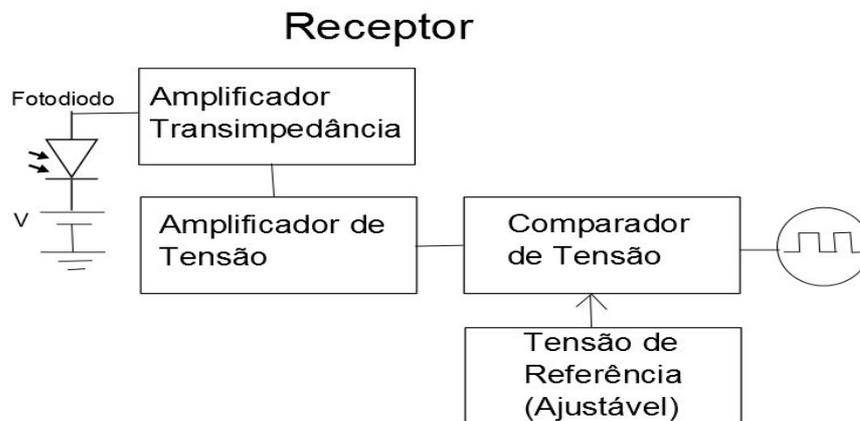


Figura 38 – diagrama de blocos do receptor

O resistor e o capacitor de realimentação do amplificador de transimpedância foram calculados e depois ajustados manualmente devido as capacitâncias parasitas da protoboard. O amplificador operacional utilizado no amplificador de transimpedância é o LT1363 da Linear Technologies (que gentilmente me enviou algumas unidades para teste). Possui velocidade de varredura (“*slew rate*”) de 1000V/microsegundo, que é a máxima taxa de variação na saída do operacional. Isso é determinante para a máxima frequência que pode ser aplicada a um operacional. Observar que há uma relação de compromisso importante entre o ganho e a banda disponível: quanto maior o ganho do operacional (definido pela relação dos resistores, como veremos a seguir), menor será a banda disponível para resposta sem que haja corte. O mesmo operacional foi utilizado no amplificador de tensão, com mudança apenas nos resistores de feedback. O estágio final, é o comparador de tensão, que resultará na saída em 5V (bit 1) e 0V (bit zero), sinal esse oriundo da saída TTL do gerador de função, que foi transmitido e recuperado no receptor. O comparador utilizado é um AD790 da Analog Devices. O LM311 da National também é um comparador de tensão, mas muito mais lento que o AD790. Há os comparadores da MAXIM, MX9201, por exemplo, que são muito rápidos, mas não estão disponíveis em pinagem DIP (para montagem em protoboard, por exemplo).

Foi observado nos testes que uma lente seria necessária para melhorar a recepção do fotodetector. Foram utilizadas duas lente convergente com fundo plano, sendo que a uma delas foi aplicado um filme azul (figura 39). A ideia é comprovar a melhora da eficiência descrita em experimentos anteriores eliminando a componente do fósforo que gera a luz branca.



Figura 39 – montagem do fotodetector com lente

Para tal foi feito um comparativo das taxas atingidas em uma distância de 2 metros com e sem o uso do mesmo. Sem o filtro azul a máxima modulação de onda quadrada que o receptor conseguiu recuperar foi de 1.7Mhz. Com o filtro azul atingiu-se facilmente os 5Mhz. Na figura 40 vemos o resultado no fotodetector do LED modulado TTL em 5000Hz. Observe que o sinal na primeira imagem do osciloscópio é quase irreconhecível. Na segunda imagem ele está perfeitamente delineado.

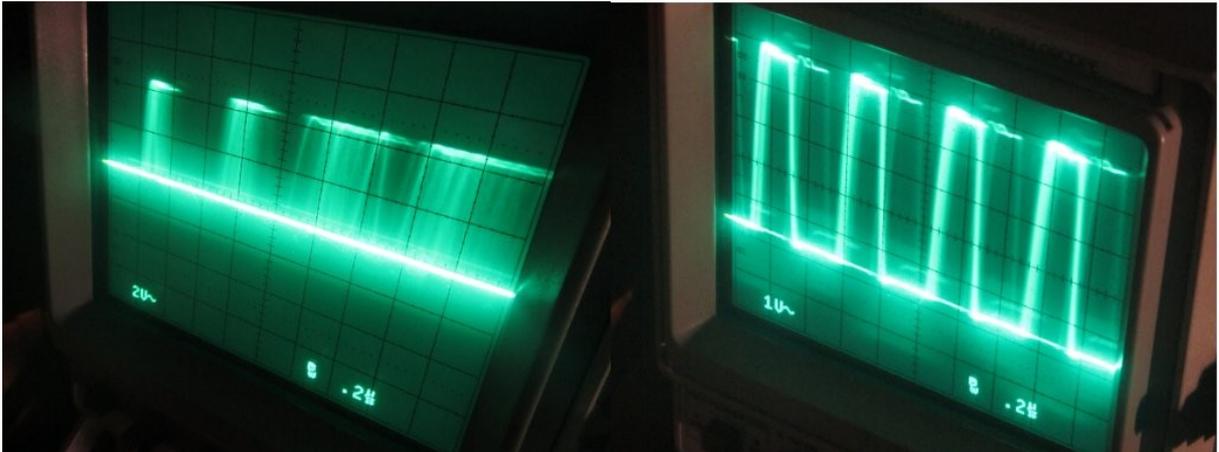


Figura 40 – resposta sem filtro e com filtro azul

Outra característica da lente utilizada é visível na figura 41: com a distancia focal adequada a luz é concentrada no fotodetector, mesmo que haja um desalinhamento da fonte de luz e do receptor, ou seja, mesmo que eles não estejam exatamente em linha.



Figura 41 – incidência de luz no fotodetector

Um aspecto fundamental no receptor é o fotodetector. Ele transforma o sinal ótico recebido em corrente elétrica que deve ser tratada de acordo para produzir os níveis de sinal

desejados. Haja vista que para obtenção de elevadas taxas é preciso eliminar a influência do fósforo usado para produzir a luz branca, o fotodetector deve ser sensível na faixa do azul. Para tal obtivemos fotodetectors da japonesa Hamamatsu. Os modelos testados foram o S6036 e o S6967. Também fizemos testes com um fotodetector da Vishay, o BPV10, porém sua sensibilidade no azul é um pouco mais limitada. De qualquer modo nenhum dos fotodetectors utilizados tem centro (ou seja, sua eficiência máxima) no azul. Fotodetectors centrados no azul são difíceis de obter no momento e mais caros. Nas figuras 46a, 46b e 46c temos testes de uma onda quadrada de 2000Hz em cada um dos fotodetectors. Devido as diferenças físicas dos fotodetectors, um ajuste foi necessário. No caso do fotodetector S6036, figura 42, o mesmo já possui uma lente, porém ela se mostrou insuficiente. Foi utilizada lente articulada da figura 45 e uma placa plana de vidro com o mesmo filtro azul da lente na figura 39.

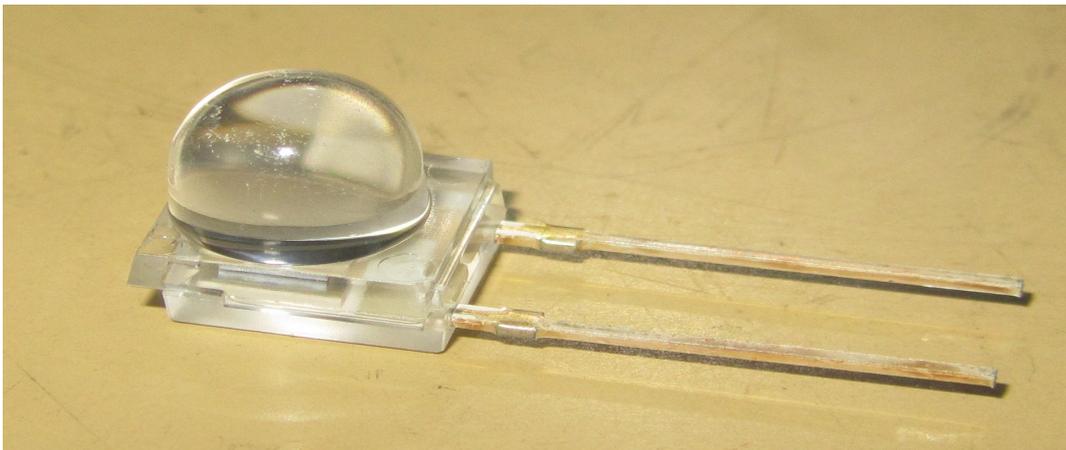


Figura 42 – fotodetector Hamamatsu S6036

O fotodetector S6967 da Hamamatsu, figura 43, não possui lente.

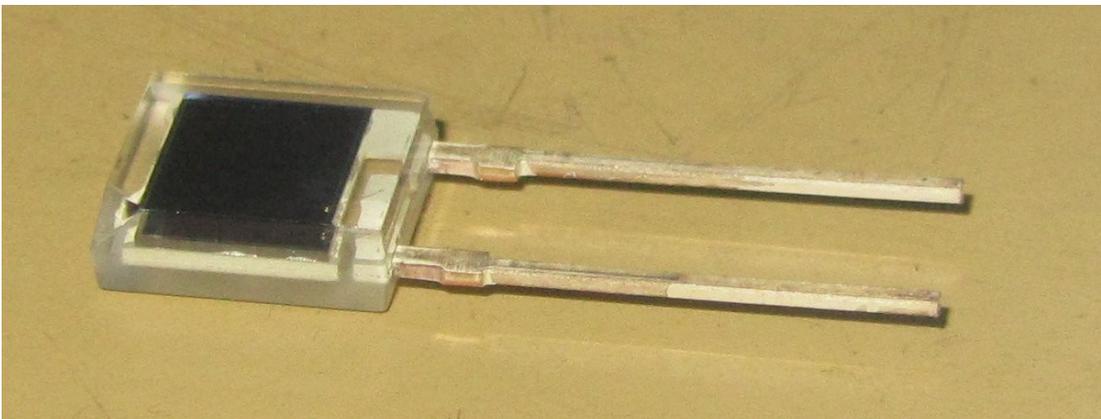


Figura 43 – fotodetector Hamamatsu S6967

Nele foi usada a lente mostrada na figura 39, com filtro azul.

O fotodetector BPV10, figura 44, também não possui lente, para o teste foi utilizada uma lente articulada (figura 45) e também a placa plana de vidro com filtro azul.

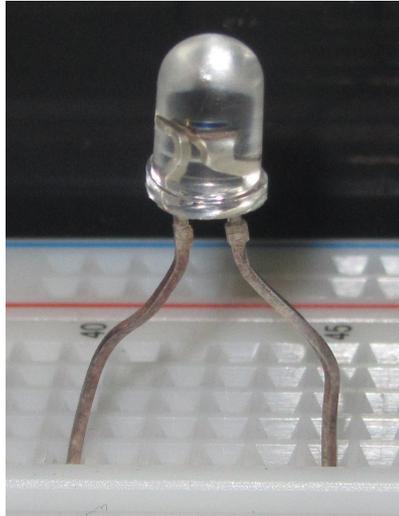


Figura 44 – fotodetector Vishay BPV10

Na figura 45 temos a lente articulada que foi utilizada para focar a luz no fotodetector BPV10 e também para sustentar o conjunto lente + fotodetector mostrado na figura 39.



Figura 45 – lente articulada

A ideia do teste foi de observar a resposta de cada fotodetector. Há diferença na intensidade do sinal recebido devido a diferença das lentes, obviamente. Mas isso não afeta o tempo de resposta. Para gerar a onda quadrada foi utilizado um gerador de função de 20Mhz da Madell (CA1640P-20). Para capturar o resultado no fotodetector foi usado um osciloscópio Tektronix modelo 2246 de 100Mhz. Abaixo temos uma tabela comparativa dos fotodetectores:

Fotodetector	Resposta Espectral (nm)	Sensibilidade (W/A)	Frequência de corte (Mhz)	Capacitância (pf)	Área efetiva (mm ²)	Tensão reversa máxima (V)	Custo – 2011 (\$)
BPV10	380-1100	0.55	40	11	19,6	60	1
S6967	320-1060	0.65	50	50	26,4	35	18,5
S6036	320-1110	0.56	25	15	16	35	6,95

Tabela 2 – Comparativo dos fotodetectores

Os três fotodetectores, afastados de 2 metros da fonte emissora tiveram uma performance com uma senoide muito semelhante até 2000Hz. Mas em 4000Hz já existem diferenças. O problema com os fotodetectores BPV10 e S6036 é que o apontamento precisa ser muito preciso devido a sua geometria e área efetiva menor. O fotodetector S6967 por ser plano e ter maior área funciona bem com a lente da figura 39, permitindo uma variação maior no alinhamento do transmissor e do receptor. As imagens 42a, 42b e 42c mostram a tela do osciloscópio no teste dos três fotodetectores.

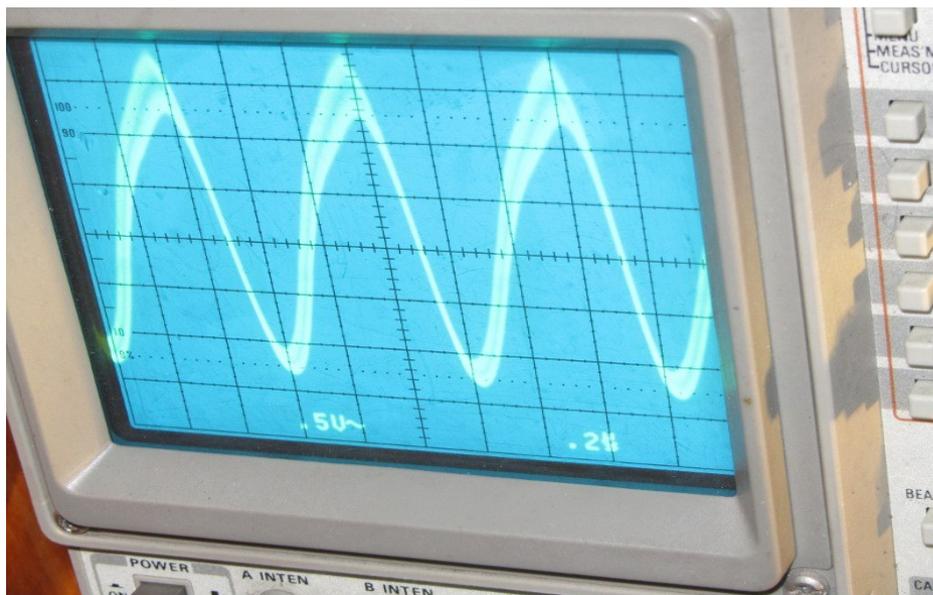


Figura 46a – fotodetector Vishay BPV10

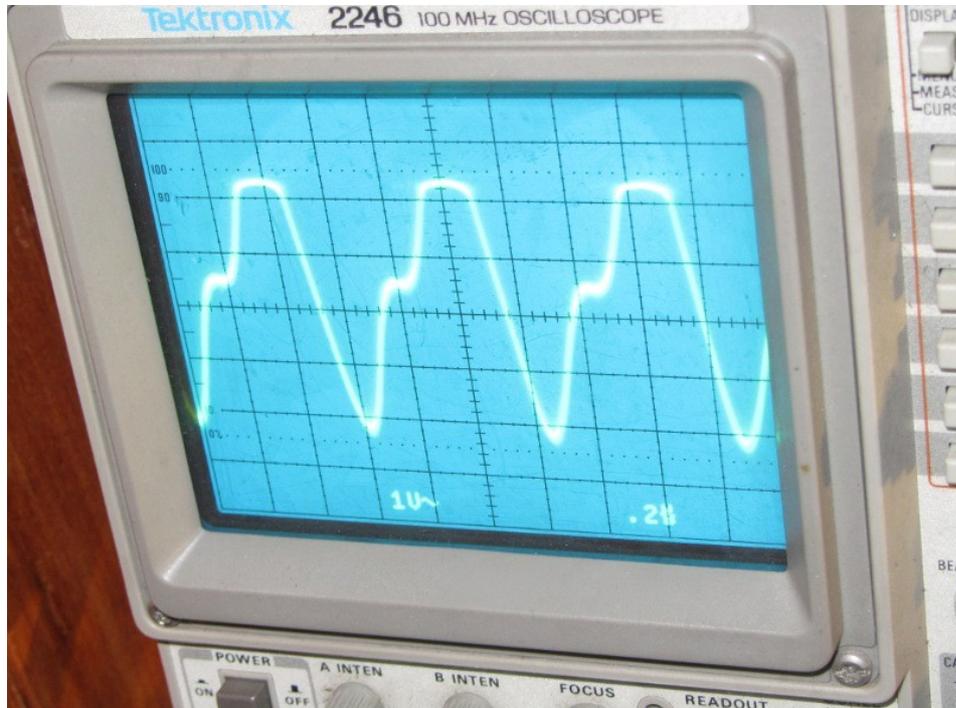


Figura 46b – fotodetector Hamamatsu S6036

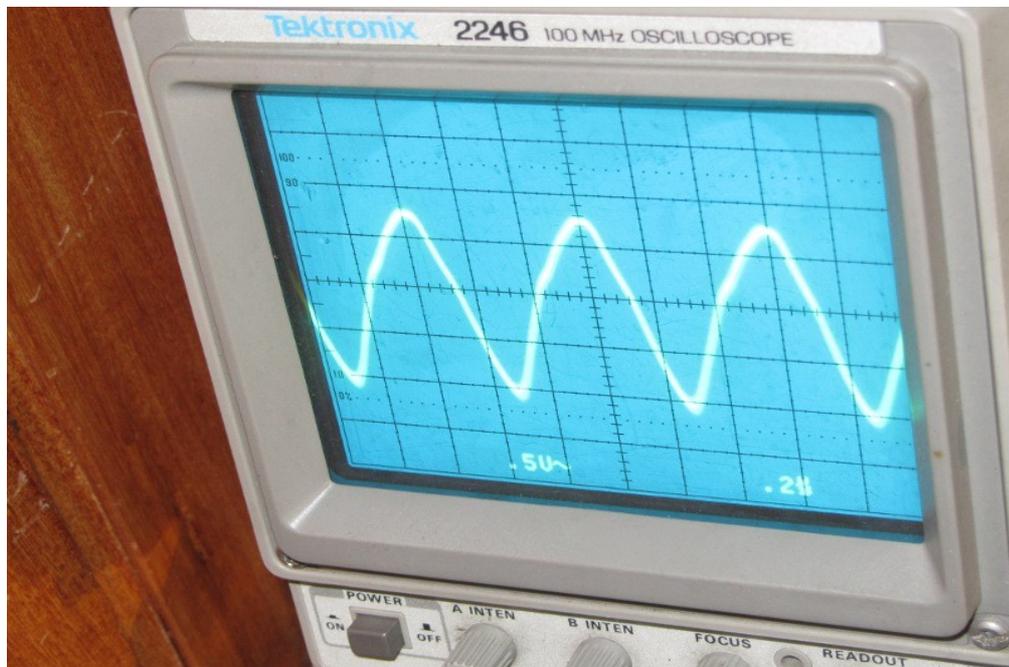


Figura 46c – fotodetector Hamamatsu S6967

4.3 RESULTADOS OBTIDOS

Os circuitos foram inicialmente montados em protoboards (figura 47), porém a inerente capacitância parasita de tais placas é alta (devido a construção das mesmas, com grandes cadeias de portas conectadas em comum e paralelas entre si). Mesmo assim a taxa máxima obtida foi próxima a resposta máxima do fotodetecor, mostrando que há um distância de até 3 metros, mesmo com incidência de luz natural (da janela) e luz artificial (lâmpadas fluorescentes) a aplicação é viável.



Figura 47 – receptor na protoboard

Para observar a diferença de resposta, o mesmo circuito foi duplicado em uma placa soldada (figura 50). Porém não se observou grande diferença nos resultados. O motivo é que a placa do tipo “*wire up*” ou “*wire wrap*”, onde fios são usados para fazer as pontes entre os componentes, acaba também por ter uma capacitância um pouco elevada. O ideal é realmente a montagem em uma placa de circuito, sem o uso de componentes dip, mas sim de

componentes soldados diretamente a superfície (pinagem SOIC, por exemplo). Isso sem sombra de dúvida trará resultados ainda melhores. Outro ponto que precisa de atenção é a lente que fica diante do fotodetector. Ela deverá ser construída de forma a direcionar a luz da fonte ao fotodetector de maneira otimizada e com o mínimo de distorção.

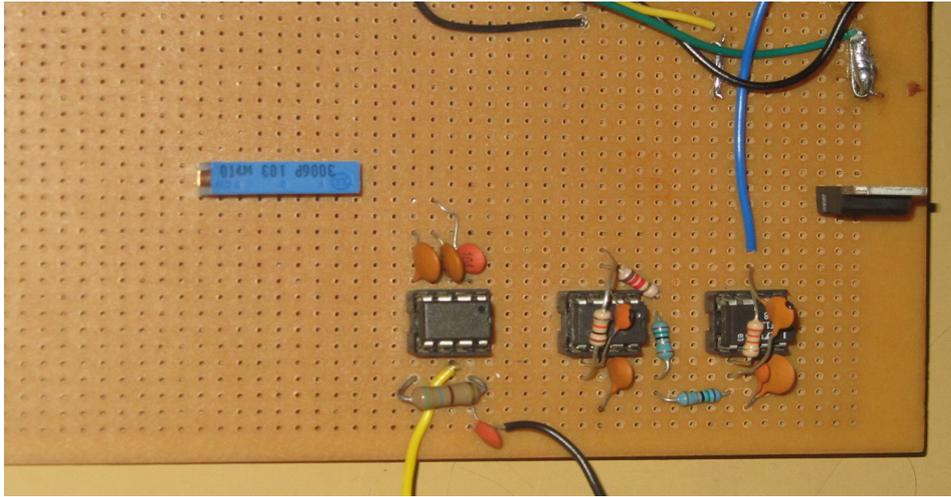


Figura 48 – receptor em placa wire up

5 - CONCLUSÃO

O objetivo de construir um protótipo mostrando a viabilidade de um sistema VLC de baixo custo, com alcance de 2 a 3 metros (distância média do teto ao topo de uma mesa) e com taxa de descida de pelo menos 10Mbits, o que se mostrou possível. Velocidades muito maiores já foram atingidas em sistemas VLC [3], porém com dispositivos e componentes muito mais caros e em condições de laboratório. A tecnologia é sem dúvida viável e promete ser uma forma de suprir a demanda por células de ultra banda larga a custos baixos e com poucas modificações de infraestrutura.

Alguns pontos para desenvolvimentos futuros:

- O ajuste de ganho do comparador de tensão foi feito com um potenciômetro, manualmente para simplificar o circuito. Porém esse controle obviamente tem que ser automático.
- A lente utilizada está longe de ser ideal: a margem de erro no apontamento ficou muito pequena, principalmente quando a taxa de transmissão aumenta. É preciso desenvolver uma lente especial para a aplicação.
- Para evitar pontos cegos e permitir mais liberdade de apontamento será interessante fazer o uso de uma matriz de fotodetetores ao invés de um fotodetector isolado.

REFERÊNCIAS

- [1] JOHNSON, R. COLLIN . “*Visible light illuminates a new approach for wireless comms*” em: Electronic Engineering Times, Maio de 2010, disponível em: <http://www.eetimes.com/electronics-news/4199569/Visible-light-illuminates-a-new-approach-for-wireless-comms-item-1> , acesso em Maio de 2010.
- [2] O’BRIEN, DOMINIC; ZENG , LUBIN; LE-MINH , HOA; FAULKNER , GRAHANE; BOUCHET , OLIVIER; RANDEL , SEBASTIEN, WALEWSKI , JOACHIM; BORGES , JOSE A. RABADAN; LANGER , KLAUS-DIETER; GRUBOR , JELENA; LEE , KYUNGWOO; WON, EUN TAE. Visible Light Communication em “*Short Range Wireless Communications Emerging Technologies and Applications*”, John Willey and Sons, Inglaterra, 2009 , capítulo 25, p 329-342.
- [3] WALEWSKI, J.W. et all, “*513Mbit/s Visible Light Communication Link Based on DMT-modulation of a White Led*”. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2010, volume 28 issue 24.
- [4] KOMINE, TOSHIHIKO; HARUYAMA, SHINICHIRO; NAKAGAWA, MASAO. “*Bi-Directional Visible-Light Communication Using Corner Cube Modulator*”, Proceedings of the 3rd IASTED International Conference, Canada, 2003.
- [5] KOMINE, TOSHIHIKO; NAKAGAWA, MASAO. “*Performance Evaluation of Visible-Light Wireless Communication System using White LED Lightings*”, Proceedings. ISCC 2004. Ninth International Symposium on Computers and Communications, 2004. , Alexandria, Egypt.
- [6] ZENG, L.; LE-MINH, H.; O’BRIEN, D.C. et al. “*Improvement of Data Rate by using Equalization in an Indoor Visible Light Communication System*”. presentation at IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, 2008, Shanghai, China.
- [7] TANAKA, YUICHI; KOMINE, TOSHIHIKO; HARUYAMA, SHINICHIRO; NAKAGAWA, MASSAO, “*Indoor Visible Light Data Transmission utilizing white led lights*” , IEICE Communication Society: Transactions on Communications Volume E86-B, Número 8, Agosto 2003.
- [8] PEESE, BOB; “**What is all this transimpedance stuff, anyhow ?**”,

Disponível em : <http://electronicdesign.com/Articles/ArticleID/4346/4346.html>

acesso em maio 2009.

- [9] NAKAGAWA, MASSAO , “*Wireless Home Link*” , IEICE Communication Society: Transactions on Communications Volume E82-B, Número 12, pp 1893-1896, 1999.
- [10] GFELLER, R. F. ; BAPST, U., “*Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation*” , Proceedings of the IEEE, vol 67, no. 11, pp 1147-1486, 1979
- [11] NAKAGAWA, MASAO, “*Visible Light Communications*”, Apresentação Keio University, 25 outubro de 2007, pp 38-39
- [12] GRAEME, JERALD G., “*Photodiode Amplifiers OP AMP solutions*”, McGraw Hill, 1996
- [13] HARUYAMA, SHINICHIRO, “**Visible Light Communications: Recent Activities in Japan**”. Smart Spaces: A Smart Lighting Industry – Academia Day , BU Photonics Center, Boston University, February 8, 2011
- [14] ISHIDA, MASANORI; MIYAUSHI, SATORI; KOMINE, TOSHIHIKO; HARUYAMA, SHINICHIRO; NAGAGAWA, MASSAO , “*An Architecture for High-Speed Parallel Wireless Visible Light Communication System using 2D Image Sensor and LED transmitter*” , Simposio Internacional em Wireless Personal Multimedia Communication (WPMC) (CDROM), 2005.
- [15] UCHIYAMA; YOSHINO; SAITO; NAKAGAWA; HARUYAMA; KAKEHASHI; NAGAMOTO , “*Photogrammetric system using Visible Light Communication*”, IEEE 34th Annual Conference of Industrial Electronics (IECON), pp 1771-1776, 2008, USA.
- [16] POHLMANN, CHRISTIAN , “*Visible Light Communication*” , Seminar Kommunikationsstandards in der Medizintechnik, Junho de 2010, Lubeck, Alemanha.
- [17] O'BRIEN, DOMINIC, “**Visible Light Communications: Achieving high data rates**”. Smart Spaces: A Smart Lighting Industry – Academia Day , BU Photonics Center, Boston University, February 8, 2011
- [18] BRUNDAGE, HEATHER, “**Designing a Wireless Underwater Optical System**”, Massachusetts Institute of Technology, January 2010.
- [19] POHLMAN, CHRISTIAN, “**Visible Light Communication: Seminar Kommunikationsstandards in der Medzintechnik**”, Junho , 2010
- [20] LEE, CHUNG GHIU, “**Advanced Trends in Wireless Communications: Visible Light Communication**”, publicado por InTech, Fevereiro, 2011
- [21] RAMIRO-INIGUEZ, RAMIRO; IDRUS, SEVIA M;SUN, ZIRAN, “**Optical Wireless Communication, IR for wireless connectivity**”, Auerbach Publications, 2008