



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Comunicação por Luz Visível

Maíra Leite Conceição

Brasília, Agosto de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
Comunicação por Luz Visível

Maíra Leite Conceição

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia  
Elétrica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Engenheiro de Redes de Comunicação*

Banca Examinadora

Prof. Leonardo Aguayo,  
*Orientador*

---

Prof. Leonardo R. A. X. Menezes,  
Examinador

---

---

# RESUMO

*Visible Light Communication* tem se tornado uma alternativa para a transmissão de dados, visto que o espectro de ondas de rádio está se tornando escasso e insuficiente para atender as demandas de comunicação. O VLC oferece baixo custo e alta disponibilidade de banda, além de fazer o aproveitamento da estrutura de iluminação. Com isso obtém-se também economia de espaço e não há alterações na estrutura do ambiente. Pode ser utilizada em vastas aplicações, tanto em ambientes internos como externos. Este trabalho apresenta o VLC e conceitos relevantes para seu desenvolvimento em ambientes *indoor*, agregando informações de diversos artigos científicos e apresentando os recentes progressos da comunicação por luz visível.

---

# ABSTRACT

Visible Light Communication is becoming an alternative for data transmission, since the radio wave spectrum is becoming scarce and insufficient to meet communication demands. VLC offers low cost, high bandwidth availability and makes use of the ambient light structure. Thus, it also saves space and there are no changes in environmental structure. It can be used in a lot of applications in both indoor and outdoor environments. This work presents VLC and relevant concepts for its development for indoor environments, aggregating information from several scientific articles and presenting the recent developments in visible light communication.

# SUMÁRIO

Introdução .....	3
1.1 Motivação.....	3
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Estrutura do texto .....	4
Fundamentos de Comunicação por Luz Visível.....	5
2.1 História do VLC.....	5
2.2 Características.....	7
2.2.1 VLC vs. Radiofrequência .....	7
2.2.2 Aplicações VLC .....	8
2.2.3 Desvantagens do uso de VLC.....	10
Arquitetura de um sistema VLC.....	11
3.1 Estrutura geral.....	11
3.2 Transmissor.....	12
3.2.1 LED de luz branca .....	12
3.2.2 LED Funcionamento.....	14
3.3 Modulação.....	18
3.3.1 CSK .....	18
3.3.2 OFDM.....	20
3.3.3 Simetria Hermitiana .....	22
3.4 Códigos Corretores.....	23
3.4.1 Códigos Convolucionais .....	24
3.4.1 Algoritmo de Viterbi.....	26
3.4.2 Interleaver .....	27
3.5 Canal.....	27
3.6 Receptor.....	29
3.6.1 Detectores Ópticos .....	29
3.6.1.1 Fotodiodo PIN .....	30
3.6.1.2 Corrente escura (Dark current).....	32
3.6.1.3 Noise-equivalent power .....	32

3.6.2	Técnicas de detecção .....	32
3.5.2.1	Detecção Direta .....	33
3.5.2.2	Responsividade .....	33
3.6.3	Ruído em Fotodetectores .....	34
3.6.3.1	Ruído de quantização (Shot Noise) .....	34
3.6.3.2	Radiação de fundo .....	34
3.6.3.3	Ruído Térmico .....	35
	Conquistas Recentes .....	36
4.1	Pesquisas atuais .....	36
4.2	Padronização .....	38
4.3	Últimas Aplicações VLC .....	39
4.3.1	Transmissão de áudio com receptor de célula solar .....	39
4.3.2	VLC na comunicação Estrada-Veículo .....	40
4.3.3	VLC utilizando displays de televisão e câmeras de vídeo .....	41
4.3.4	Visible Light Communication no 5G .....	41
4.3.5	Li-Fi .....	42
4.3.6	Iluminação Inteligente .....	42
4.3.7	Localização com VLC .....	43
4.3.8	VLC e robô .....	44
4.3.9	Conexão de brinquedos com VLC .....	44
	Conclusões .....	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Taxa de uso de dados móveis por mês (Eb/mês). Fonte: GBI Research.....	3
Figura 2.1: Transmissor e receptor. Fotofone de Graham Bell [1].....	6
Figura 2.2: Espectro Eletromagnético [2].....	8
Figura 2.3: Aplicações do VLC no dia a dia. [3].....	10
Figura 3.1: Diagrama de blocos simplificado VLC.....	11
Figura 3.2: Espectro de emissão teórico de um LED. Adaptado de [11] .....	15
Figura 3.3: Diagrama cromático CIE 1931 para dados da tabela 3.1. [25] .....	19
Figura 3.4: Coordenadas de cada fonte de luz do LED RGB no diagrama CIE 1931 [25]. ....	20
Figura 3.5: Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM).....	21
Figura 3.6: Diagrama de um transmissor OFDM.....	22
Figura 3.7: Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência (OFDM).....	22
Figura 3.8: Símbolos com simetria Hermitiana.[15] .....	23
Figura 3.9: Codificador convolucional [171 133] $R=1/2$ .....	25
Figura 3.10: Treliça codificador convolucional [7,5]......	26
Figura 3.11: Fotodiodo .....	31
Figura 4.1: BER x Distância caso OFDM [34]. .....	38
Figura 4.2: BER x Distância caso OOK[8]. .....	38
Figura 4.3: Transmissão VLC com uso de painel solar como receptor [44]. .....	40
Figura 4.4: Comunicação carro-estrada com uso de semáforo e câmera de alta velocidade [48]. .....	40
Figura 4.5: Esquema de transmissão utilizando display de televisão e câmera de smartphone. [45] .....	41
Figura 4.6: Lâmpadas LED e carrinho com receptor VLC[43].....	43
Figura 4.7: Aplicação mostrando o menor caminho para o item com desconto e para o cupom[43].....	43
Figura 4.8: Controle de robô com VLC. [49].....	44
Figura 4.9: Uso de LEDs para conexão de brinquedos com smartphone. ....	45

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Valores coordenadas (x,y).[25] .....	18
Tabela 3.2: Tabela de transição codificador [7,5]. .....	26
Tabela 4.1: Taxas obtidas com LEDs transmissão VLC. ....	37

# Lista de Siglas

k (constante de Boltzmann)	$1,3806503 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ (Joules/kelvin)
h (constante de Planck)	$6,6206957 \cdot 10^{-34} m^2 \cdot kg/s$



# Lista de Siglas

ARQ	Automatic Repeat Request
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
CRC	Cyclic Redudancy Check
DMT	Discrete Multi-Tone
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transfer
FDM	Frequency Division Multiplexing
FSO	Free Space Optical
GPS	Global Positioning System
ICI	Inter Carrier Interference
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IM	Intensity Modulation
IrDA	Infrared Data Association
ISI	Intersymbol Inteference
ISM	Instrumentation, Scientific and Medical
JEITA	Japan Electronics and Enformation Technology Industries Association
LED	Light Emitting Diode
LOS	Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLED	Organic Light Emitting Diode
OOK-NRZ	On-off Keying Non-Return-to-Zero
PAR	Peak to Avarage Ratio
PSD	Power Spectral Density
PSK	Phase Shifting Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
SSL	Solid State Lightning)
SNR	Signal Noise Ratio)
TI	Tecnologia da Informação
VLC	Visible Light Communication
VLCC	Visible Light Communication Consortium

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

O crescimento anual das taxas de uso de dados aumentou consideravelmente nos últimos anos. Em 2011 a GBI Research estimava que o uso mensal de dados por dispositivos móveis, anual, cresceria em 80% em 2015, figura 1.1. Uma solução seria a liberação de espectros adicionais para comunicações móveis, porém a maior parte do espectro de radiofrequência que é mais adequado para esse tipo de transmissão já está em uso (1GHz-10GHz). O ideal seria aumentar o ganho do espectro com as novas tecnologias, porém a eficiência do espectro está entrando em saturação.

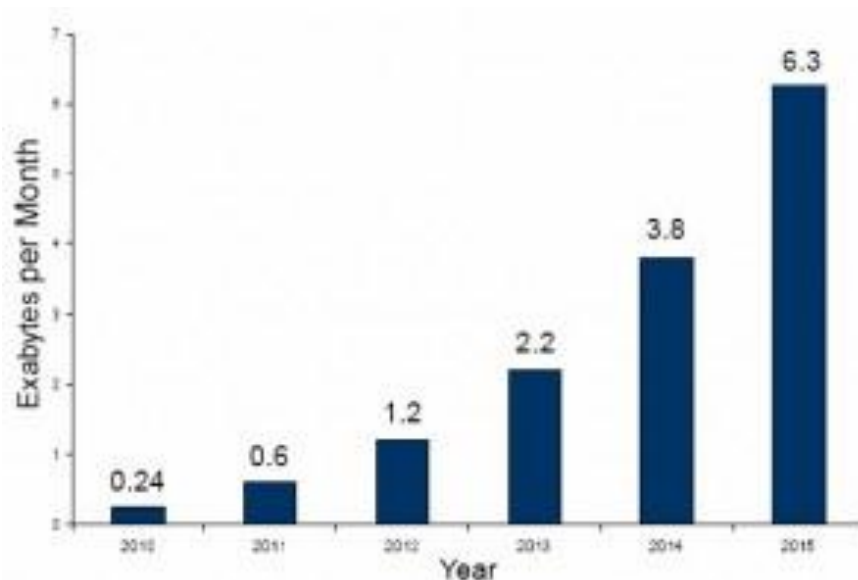


Figura 1.1: Taxa de uso de dados móveis por mês ( $E_b$ /mês). Fonte: GBI Research

Dessa forma, o VLC surge como uma solução para o problema. O VLC tem baixo custo comparado com a comunicação por espectro de radiofrequência. E ainda aproveitamos o LED

transmissor na iluminação do ambiente, que possui alta qualidade em relação a uma lâmpada fluorescente ou incandescente, por exemplo.

O LED ainda possui como característica a variação da corrente ser rápida, diferente das fontes de luz incandescentes e fluorescentes, possibilitando a modulação de informação.

Como sinais ópticos não atravessam meios opacos, o VLC se torna um meio de comunicação seguro, pois para interceptar a comunicação o intruso deve se encontrar no mesmo ambiente que o sistema. Assim podemos encarar o VLC como um complemento à transmissão em radiofrequência, disponibilizando maiores velocidades e possibilitando economia de energia, além do aproveitamento do espaço.

## **1.2 Objetivos**

Neste trabalho é apresentado o sistema VLC e suas características. É feita uma pesquisa que busca agregar informações de artigos científicos, trazendo o que há de recente nessa tecnologia, englobando os principais aspectos necessários para a Comunicação por Luz visível no ambiente indoor. São feitas comparações com a comunicação por radiofrequência, diferentes tipos de LEDs e outras variáveis envolvidas neste tipo de comunicação.

## **1.3 Estrutura do texto**

No Capítulo 2 é apresentada a história e descrição de características do VLC, diferenças quanto à comunicação por radiofrequência e aplicações. O Capítulo 3 descreve os componentes envolvidos na comunicação por luz visível, como a técnicas de modulação, características dos LEDs, tipos de ruídos. No Capítulo 4 são apresentados os desenvolvimentos mais recentes na Comunicação por luz visível. No Capítulo 5 são apresentadas aplicações recentes.

## Capítulo 2

# Fundamentos de Comunicação por Luz Visível

### 2.1 História do VLC

O uso de luz visível para comunicação pode ser observado há milhares de anos atrás. O fogo foi utilizado como primeira fonte luminosa para esses fins. Homens de diferentes culturas usavam fogo para gerar sinais de fumaça. Pipas em chamas eram usadas em campos de batalha para comunicação. Faróis eram utilizados para orientar navios em regiões costeiras perigosas ou emergências, através do envio de feixes de luz visíveis em intervalos periódicos. Em 280 a.C., foi construído o Farol de Alexandria, que foi a primeira torre que serviu de farol e foi uma das Sete Maravilhas do Mundo[4]. Na atualidade empregamos a luz de forma mais simples nas sinalizações, como em semáforos, controlando o fluxo de veículos e pedestres e na comunicação entre navios por meio de código Morse.

Em 1880 foi feita a primeira tentativa sofisticada de aproveitamento da luz visível na comunicação sem fio, o fotofone (figura 2.1). A criação, atribuída ao cientista e inventor escocês Alexander Graham Bell e seu assistente Charles Tainter, permitia a transmissão de dados pelos raios de sol. A luz solar é focada através de uma lente sobre um espelho fino. Esse espelho é feito para vibrar com a voz de uma pessoa canalizada através de um bocal. Os feixes de luz refletidos da vibração espelho contêm o sinal de voz modulado. Esta luz passa então por outra lente para um espelho parabólico que contém no seu ponto focal uma célula de selênio que converte a luz de volta em som. Graham Bell e seu assistente conseguiram se comunicar com o aparelho a 213 metros de distância um do outro [1]. Podemos observar que a ideia é bem parecida com a do VLC, mas este com modulação digital, diferentes fonte de luz e receptor, sem contar as maior taxa de transmissão e alcance. Outro exemplo é o heliógrafo, um instrumento simples usado nos séculos XIX e XX que usava a luz do sol

refletida em um espelho para comunicação por sinais por até 40km de distância (em geral, código Morse)[5].

Apesar do sucesso na transmissão de Graham Bell, a implementação de um sistema utilizando luz visível só começou a ser feita após o surgimento de equipamentos mais adequados para isso. Até 1993 só existiam dois dos três tipos necessários para produção de LED branco, LEDs nos comprimentos de onda vermelho(GaAsP) e verde (InGan), logo não podia-se obter um LED de luz branca. Depois disso, o japonês Shuji Nakamura desenvolveu o LED azul (GaN) e o verde de forma mais eficiente. A partir daí, utilizando a mistura das três cores primárias (vermelho, azul e verde) de LED, foi possível construir o LED emissor de luz branca. Este LED permite obter uma elevada largura de banda, o que o torna adequado para comunicação com alta taxa de transmissão.

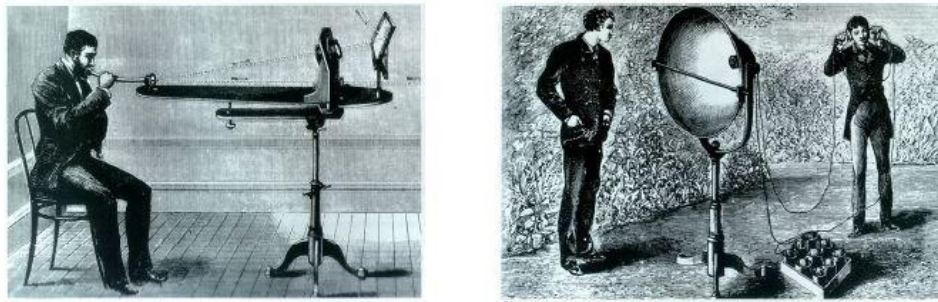


Figura 2.1: Transmissor e receptor. Fotofone de Graham Bell [1]

O uso de LED como forma de transmitir dados foi apresentado primeiramente por Grantham Pang em 1999[23]. Ele utilizou LED de semáforo modulado para transmitir mensagens de áudio. A utilização do LED combinando a transmissão de dados com a iluminação se deu pioneiramente no Japão por Yuichi Tanaka no ano 2000[24]. Foi criado em 2003 o VLCC (*Visible Light Communication Consortium*), composto por grandes empresas no Japão, com o objetivo de padronizar e divulgar a tecnologia VLC. Em 2011 foi publicado o padrão IEEE 802.15.7 [25], desenvolvido pelo grupo tarefa IEEE 802.15 que inclui membros do VLCC.

## 2.2 Características

### 2.2.1 VLC vs. Radiofrequência

O número de usuários que utilizam comunicações por radiofrequência aumentou drasticamente nos últimos anos, graças ao crescimento de redes celulares e popularização de redes WiFi. Os serviços de comunicação sem fio se tornaram tão essenciais no dia-a-dia quanto eletricidade e água. Mas apesar da comunicação por radiofrequência ser a tecnologia mais utilizada atualmente, ela possui desvantagens.

Um dos problemas é a capacidade. O espectro de ondas de rádio é relativamente pequeno, seu uso é limitado (figura 2.2) e o licenciamento é caro. A banda ISM (*Instrumentation, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz, que é utilizada por diversos aparelhos eletroeletrônicos como micro-ondas, telefones sem fio e roteadores WiFi, está congestionada [5]. Como possível solução, temos o espectro de luz visível. A VLC é uma modalidade de comunicação sem fio onde os dados são modulados na porção de luz visível do espectro eletromagnético, que compreende a faixa de comprimento de onda de aproximadamente 380nm até 780nm. Com a VLC os problemas da tecnologia por radiofrequência são minimizados. Comparando o espectro de ondas de rádio com o tamanho do espectro visível, percebemos que a VLC fornece uma faixa de frequências 10 mil vezes maior. Além disso podemos fazer uso da infraestrutura existente, pois utilizamos lâmpadas nas residências e instalações industriais, restando trocar as lâmpadas convencionais por lâmpadas LED.

O VLC é energeticamente eficiente. Lâmpadas LED consomem pouca energia em comparação com outros tipos de lâmpadas e servem os propósitos de iluminar e transmitir dados ao mesmo tempo. Além disso, transmissores e receptores VLC são dispositivos baratos.

Existe o problema da disponibilidade, pois em certas situações não é recomendável utilizar ondas de rádio, como em voos e hospitais, devido a possibilidade de interferência com outros aparelhos. Podemos usar VLC onde há luz e não haverá interferência com sistemas baseados em radiofrequência. Há também o fator segurança, já que ondas de rádio atravessam paredes e podem ser detectadas e usadas por usuários maliciosos. Com a VLC, transmitimos dados apenas para

onde a luz está direcionada, não havendo chance para alguém escutar a comunicação estando em outra sala.

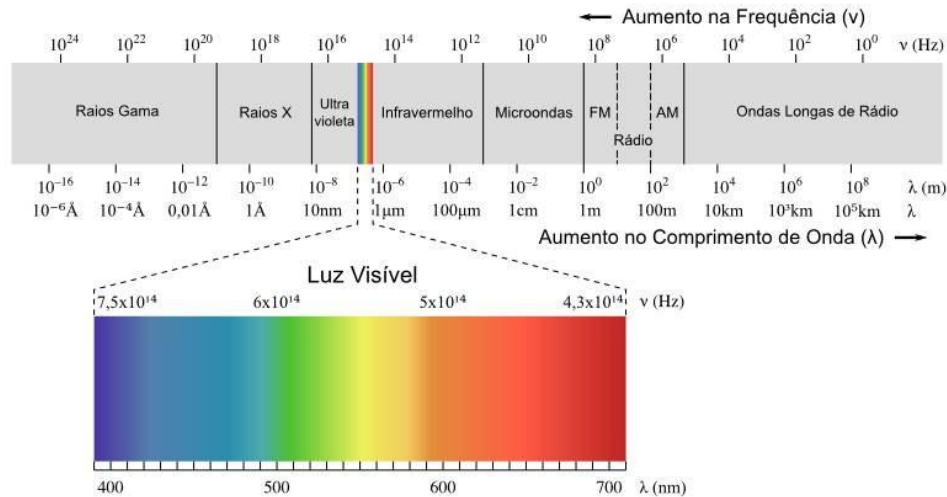


Figura 2.2: Espectro Eletromagnético [2]

## 2.2.2 Aplicações VLC

O uso de luz visível em comunicações pode melhorar aplicações que utilizam atualmente a tecnologia de radiofrequência e cria novas soluções onde o uso de RF não é suficiente, não desejado ou não possível. Serviços baseados em localização, como o GPS, não funcionam bem em ambientes internos, pois o sinal GPS não atravessa paredes. As lâmpadas utilizadas para iluminar esses ambientes podem distribuir informações sobre localização, uma vez que lâmpadas são objetos fixos e isso pode ser usado como referência de uma posição. Isso é especialmente útil para que um usuário se localize, tendo serviço de navegação em ambientes internos grandes e com diversas salas (shoppings, hospitais) ou saídas (metrô), servindo de ajuda principalmente para deficientes visuais.

Ambientes sensíveis à interferência eletromagnética, como cabines de aviões e hospitais podem fazer uso da VLC. Passageiros em um avião não podem fazer uso de equipamentos que emitem ondas de rádio, como celulares e notebooks, pois podem causar interferência com os aparelhos de comunicação do avião. Esse problema poderia ser eliminado usando os LEDs que já são utilizados para iluminar a cabine de

passageiros. Os LEDs serviriam ao propósito tanto de iluminar quanto ao de transmitir dados, acabando com o uso de ondas de rádio pelos passageiros. Em hospitais alguns aparelhos também sofrem interferência eletromagnética, e o uso de VLC pode trazer vantagens nesses ambientes.

VLC pode ser utilizado debaixo d'água, onde tecnologias que usam RF não funcionam adequadamente. É de interesse da Marinha o uso de VLC, mesmo com o alcance sendo limitado pela atenuação da água. É possível atingir taxas de centenas de Mbps no espectro azul/verde para distâncias de até 100 metros. LEDs podem prover a comunicação sem fio entre mergulhadores ou máquinas submarinas.[21]

Em locais de trabalho perigosos, como minas, o uso de radiofrequência é evitado devido ao risco de explosão. O uso de VLC nesse caso é muito interessante, visto que essa tecnologia pode proporcionar a iluminação do ambiente e comunicação ao mesmo tempo.

Alguns estudos mostram a VLC sendo usada no trânsito de cidades. LEDs já são usados em semáforos e carros, portanto são candidatos ao uso de VLC para transmitir informação. Isso pode ser usado, por exemplo, para que seja transmitido mensagens *broadcast* com informações relativas ao trânsito, para controle de tráfego ou mensagens de urgência, transmitindo uma informação de emergência sobre possíveis acidentes (figura 2.3)

Com o crescente desenvolvimento da “Internet das coisas”, VLC é um ótimo candidato para ser utilizado nesta tecnologia. A lâmpada dentro de uma geladeira poderia enviar informações sobre prazos de validade de alimentos próximos da expiração, por exemplo. Ou poderia informar que certo alimento acabou ou está próximo de acabar e perguntar se o indivíduo quer adicionar o produto à lista de compras.

VLC acaba sendo útil em aplicações relacionadas à segurança de TI, protegendo a informação contra pessoas mal intencionadas, uma vez que fica difícil para um invasor fazer uso do sinal transmitido sem ser detectado, já que ele deve ficar onde os LEDs iluminam.



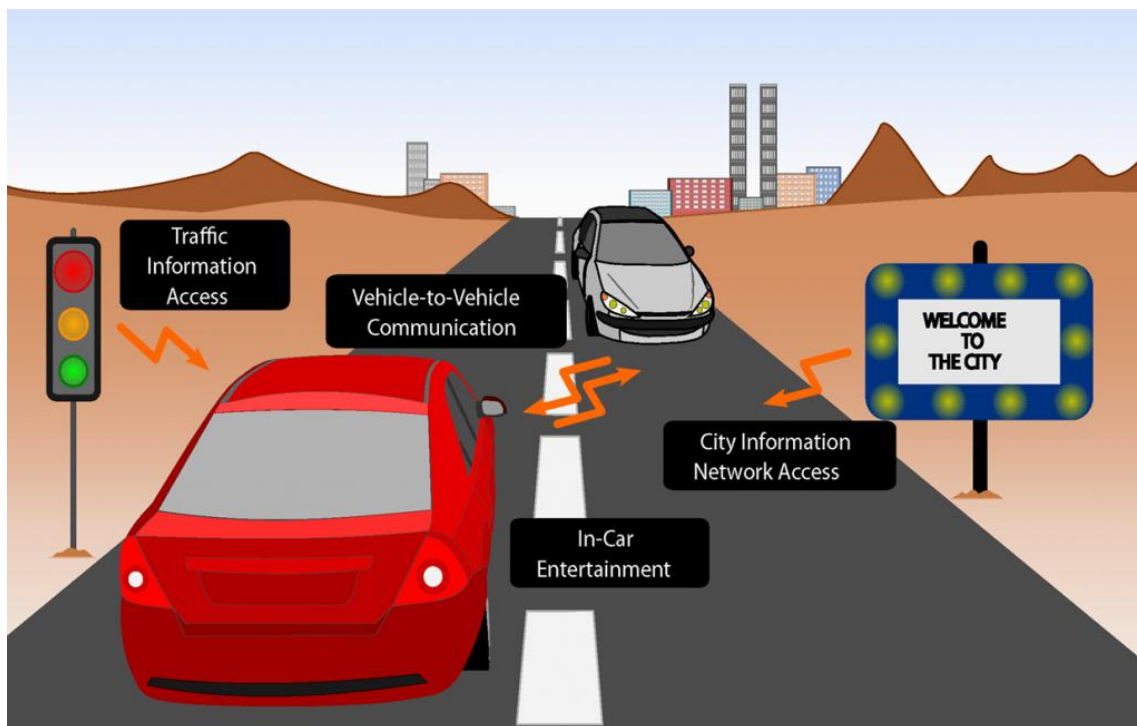


Figura 2.3: Aplicações do VLC no dia a dia. [3]

### 2.2.3 Desvantagens do uso de VLC

Apesar da sua proposta inovadora, a tecnologia de comunicação por luz visível possui desvantagens que limitam seu uso. Um dos seus principais problemas é seu pequeno alcance. A distância utilizada para links VLC são tipicamente de alguns metros, o que é uma distância relativamente pequena se comparado às comunicações de radiofrequência. A intensidade da luz se atenua rapidamente ao aumentar a distância entre o transmissor e o receptor, como também fica mais sujeita a interrupções na transmissão, visto que qualquer objeto que estiver entre os comunicantes impedirá o recebimento da informação. Apesar da comunicação por linha de visada ser boa para incrementar a segurança da comunicação ou fornecer informações sobre localização, se torna um empecilho quando existem objetos que podem bloquear os feixes de luz.

A VLC também tem seu desempenho comprometido ao se ter várias fontes de luz no mesmo ambiente. Luzes de lâmpadas fluorescentes e incandescentes ou luz do sol são capazes de induzir ruídos no receptor [21], aumentando a taxa de erros ou mesmo impedindo completamente a comunicação, pois provoca a saturação do fotodetector.

## Capítulo 3

# Arquitetura de um sistema VLC

### 3.1 Estrutura geral

Um link VLC é composto por um transmissor e um receptor e utiliza o meio FSO como canal. O transmissor é o responsável por receber os bits de informação, codificar a mensagem e modular os dados utilizando alguma técnica de modulação. Os dados então podem ser transmitidos por um LED na ponta de saída. No meio FSO a informação está sujeita a diversos tipos de interferência, como a luz solar, luz de outras fontes luminosas, como lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Essas geram ruído no receptor. O receptor recebe o sinal transmitido e distorcido pelo canal. Realiza então o processo de demodulação. A figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos simplificado de um sistema VLC.

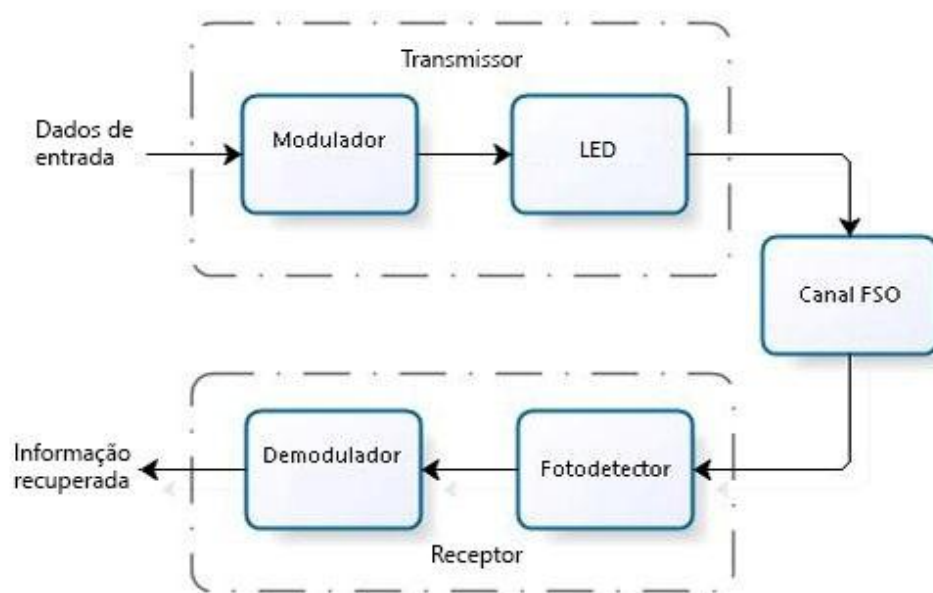


Figura 3.1: Diagrama de blocos simplificado VLC

## 3.2 Transmissor

Para transmitir informação utilizando luz visível, se faz necessário que o transmissor tenha capacidade de ser ligado e desligado rapidamente, pois a informação transmitida será modulada com base na intensidade da luz emitida (IM – Intensity Modulation). Lâmpadas incandescentes quebram rapidamente se forem ligadas e desligadas várias vezes, e como possuem baixa eficiência energética, estão sendo substituídas por fontes de luz mais eficientes. Sendo assim, não são utilizadas para transmitir informação. Lâmpadas fluorescentes estão instaladas em várias residências e instalações industriais e são capazes de transmitir informação a uma taxa razoável. Contudo, quando se deseja uma alta taxa de transmissão, são utilizados LEDs.

Um LED é um semicondutor de estado sólido (SSL) capaz de transformar energia elétrica em energia luminosa. É bastante vantajoso em relação às outras formas de iluminação pois apresenta maior eficiência energética, maior tempo de vida (em torno de 25.000-50.000 horas, enquanto uma lâmpada incandescente tem duração em torno de 6.000-15.000 horas) e gera menos calor, podendo reduzir em até 80% o consumo de energia[33][40].

O LED opera em três regiões: a região de corte, região linear e região de saturação. [41] Idealmente não há emissão de luz na região de corte, o comportamento na região de saturação é assintótico, então o melhor ponto de operação é na região linear.

Para comunicação por luz visível, utiliza-se LEDs de luz branca, pois podem ser modulados em grandes velocidades e servem tanto para o propósito de transmitir informação como o de iluminador de ambiente.

### 3.2.1 LED de luz branca

Os LEDs que geralmente são utilizados para transmissão de informação são os LEDs RGB, que são fontes tricromáticas (emitem as luzes vermelho, verde e azul), e LEDs fosforescentes (baseados em conversores de comprimento de onda). Com o avanço da tecnologia, outros tipos de LED também vem sendo utilizados para transmissão.

- Os pc-LEDs (fosforescentes) são baseados em conversores de comprimento de onda. Para produzir a luz branca é utilizado um LED azul (InGaN) para excitar

um revestimento de fósforo amarelo. O fósforo converte parte da luz emitida pelo LED em vermelho, verde e amarelo, produzindo assim a luz branca. Os tons de branco dependem da quantidade de fósforo, podendo ser classificados em quente, neutro e frio. São mais utilizados tanto para iluminação como para transmissões VLC, dado o baixo custo.

- Os LEDs RGB utilizam a mistura de três LEDs nas cores vermelho, verde e azul para produzir o branco. São mais caros e complexos que os LEDs fosforescentes, porém produzem maiores taxas de transmissão dada a largura de banda. Os LEDs fosforescentes apresentam uma limitação de banda dada a baixa eficiência de conversão do fósforo.
- Os OLED (*Organic Light Emitting Diodes*) são formados por uma camada orgânica entre as portadoras positivas e negativas. A luz é emitida dada uma corrente elétrica. A largura de banda é bem menor comparado aos outros tipos de LED, aproximadamente 1Mhz. Porém é possível aumentar a resposta em frequência através do uso de equalizadores [36].
- Os  $\mu$ LED foram produzidos em prol do VLC e POF (Polymer Optical Fiber). São vetores de micro diodos compostos de AlGaIn que emitem luz tipicamente entre 370-520nm, porém pode-se converter o comprimento de onda para emitir luz branca. Cada vetor pode atingir 450Mhz. Isso é possível da a baixa capacitância nesses LEDs. Em um LED comum cabem até 1000  $\mu$ LED.
- Os rcLEDs (*resonant cavity LEDs*) foram criados para melhorar a extração de luz próximo do comprimento de onda de IR. O seu desenvolvimento beneficia displays coloridos para o VLC. Pode ser modulado em 100MHz e operam em altas temperaturas.

### 3.2.2 LED Funcionamento

LEDs são fontes ópticas formados por uma união p-n polarizada com tensão direta e funcionam por meio de emissão espontânea. Podemos citar suas características como:

- Podem ser modulados sem dificuldade até altas velocidades;
- Sua estrutura é mais simples, são de fácil fabricação e seu custo é baixo, sobretudo em comparação com lasers.

Ao aplicar tensão direta na união p-n, os elétrons entram num estado de excitação que é instável. Quando os elétrons energizados retornam ao estado estável, eles liberam energia na forma de fóton. Os fótons podem ser da faixa infravermelha, visível ou ultravioleta do espectro eletromagnético, dependendo do gap de energia do material semiconductor. A energia do fóton emitido é aproximadamente igual a diferença entre a banda de condução e a banda de valência, isto é, o gap de energia. A taxa de emissão de fótons (*Emission Intensity*) para o caso de emissão radiativa espontânea é [11]:

$$I(E) \propto \sqrt{E - E_g} e^{-\frac{E}{kT}} \quad (3.1)$$

onde  $E_g$  é o gap de energia do material semiconductor,  $E$  é o nível de energia,  $k$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é o valor absoluto da temperatura. Podemos ver pela figura (3.2) que a emissão espontânea tem um limiar de energia  $E_g$  e largura de meia potência (FWHM)  $\Delta E = 1,8kT$ , o que nos dá uma largura espectral de

$$\Delta\lambda = \frac{1,8kT\lambda^2}{hc} \quad (3.2)$$

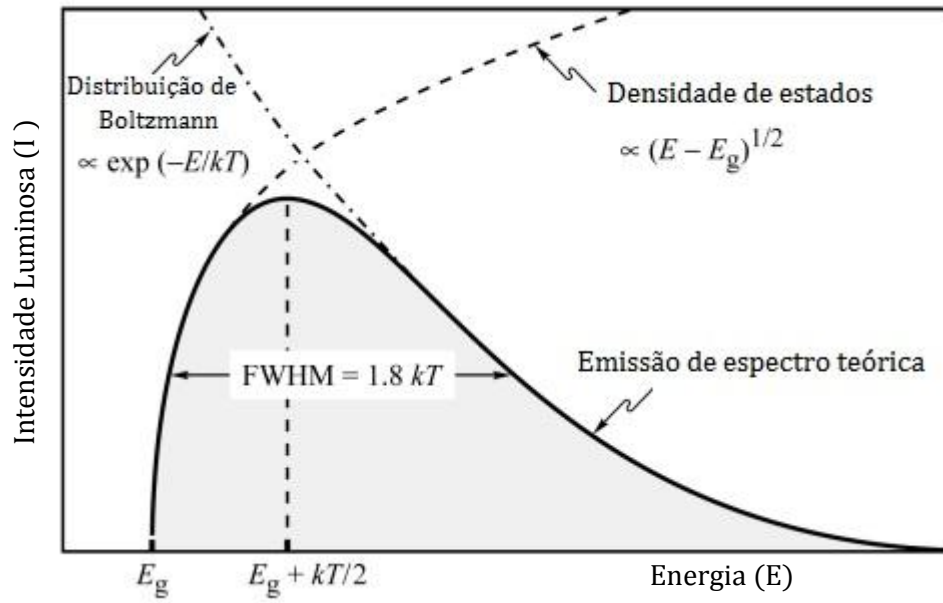


Figura 3.2: Espectro de emissão teórico de um LED. Adaptado de [11]

onde  $c$  é a velocidade da luz. A eficiência quântica interna do LED é relacionada com a conversão de portadores em fótons no dispositivo. Pode ser expressa como a razão do número de fótons que são emitidos internamente com o número de portadores passando pela junção p-n, ou seja [12]:

$$\eta_{in} = \frac{\text{nº de fótons emitidos internamente}}{\text{nº de portadores passando pela junção}} \quad (3.3)$$

Também pode ser relacionada como a fração de portadores injetados que se recombinam radiativamente (elétrons se combinam com buracos na camada de valência emitindo fótons) com o total da taxa de recombinação, e é diretamente ligada ao tempo de vida dos portadores pela equação[12]:

$$\eta_{in} = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} = \frac{T_r}{T_r + T_{nr}} = \left(1 + \frac{T_{nr}}{T_r}\right)^{-1} \quad (3.4)$$

onde  $R_r$  e  $R_{nr}$  representam as combinações radiativas e não radiativas, respectivamente, enquanto  $T_r$  e  $T_{nr}$  representam os tempos de vida das recombinações radioativas e não radioativas. LEDs possuem altos valores de eficiência quântica interna, entre 50%-80%.

Podemos descrever a potência gerada na união p-n de um LED a partir da concentração de elétrons injetados. De fato, se dividimos a corrente elétrica ( $I$ ) utilizada na polarização da união p-n pela carga de um elétron ( $e$ ), teremos os elétrons injetados por unidade de tempo. Os elétrons injetados por unidade de tempo multiplicados pela eficiência quântica interna ( $\eta_{in}$ ) nos dará a recombinação radioativa por unidade de tempo, e se a multiplicamos pela energia de um fóton ( $h\nu$ ), teremos a energia total gerada por unidade de tempo, ou seja, a potência óptica total gerada em uma união p-n. Isto é:

$$P_i = \eta_{in} \left( \frac{h\nu}{e} \right) I \quad (3.5)$$

Teremos que multiplicar essa potência total gerada por uma nova eficiência quântica externa, que será a proporção que nos dará a quantidade de luz que sai ao exterior. O material semiconductor tem um índice de refração, e como tal, a luz que incide sobre a interface do material semiconductor com ângulos inferiores a um ângulo crítico saem ao exterior, e a luz que incide com ângulos superiores a ângulo crítico é refletida totalmente no material semiconductor e não poderá ser usada para a comunicação. Ângulo crítico pode ser definido como  $\theta_c = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ , onde  $n_2$  é o menor índice de refração e  $n_1$  o maior. [12] A potência óptica que sai ao exterior é dada por

$$P_e = \eta_i \eta_e \left( \frac{h\nu}{e} \right) I \quad (3.6)$$

e a eficiência quântica externa é [12]

$$\eta_{ex} = \frac{\text{nº de fótons emitidos externamente}}{\text{nº de portadores passando pela junção}} = \eta_i \eta_t \quad (3.7)$$

A eficiência óptica  $\eta_t$ , denota a razão de fótons que são emitidos externamente do LED pelo que são emitidos internamente. A expressão para estimar a eficiência óptica é dada por [12]

$$\eta_{ex} = \frac{1}{2} (1 - \cos\theta_c) \approx \frac{1}{4} \frac{n_0}{n_s} \quad (3.8)$$

onde  $\Theta_c$  é o ângulo crítico,  $n_o$  e  $n_s$  são, respectivamente, o índice de refração do material semicondutor do LED e o índice de refração do meio para o qual a luz está sendo emitida. A iluminância se refere ao brilho de uma superfície iluminada, e no caso de uma iluminação por lâmpada LED, é assumido que sua distribuição seja Lambertiana. Na emissão Lambertiana a máxima intensidade  $I(0)$  é uma radiação perpendicular ao plano da superfície, mas reduz nos lados dependendo ângulo de irradiação  $\phi$ , de acordo com a expressão[1]:

$$I(\phi) = I(0)\cos^m(\phi) \quad (3.9)$$

A iluminância horizontal  $E_{hor}$  no ponto  $(x, y)$  é dada por

$$E_{hor} = \frac{I(0)\cos^m(\phi)}{D_d^2 \cos(\Psi)} \quad (3.10)$$

onde o ângulo de incidência é  $\Psi$ ,  $D_d$  é a distância entre o LED e o detector,  $m$  é a ordem de emissão Lambertiana, que é dado pelo semiângulo de meia potência de um LED,  $\Phi_{1/2}$ , pela equação:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})} \quad (3.11)$$

A razão entre a potência óptica de saída com a potência elétrica de entrada no LED é chamada de potência efetiva (*Power Efficiency*), dada por

$$\eta_p = \frac{P_e}{P_i} \quad (3.12)$$



### 3.3 Modulação

#### 3.3.1 CSK

Foi definida para o VLC em 2011 no padrão IEEE 802.15.7[25]. Ela é utilizada com LEDs RGB. A modulação é feita relacionando-se cada bit à uma cor das coordenadas CIE 1931. Existem sete bandas de comprimento de onda a partir do qual as possíveis fontes RGB podem ser escolhidas, e as bandas de comprimento de onda escolhidas determinam os vértices de um triângulo no interior do qual os pontos da constelação dos símbolos CSK se encontram. Como pode-se observar na tabela 3.1, escolhendo-se a fonte de luz com pico espectral no meio de cada banda, vamos obter um símbolo para associar ao diagrama CIE 1931 (figura 3.3). O ponto de cor para cada símbolo é gerado modulando a intensidade dos chips RGB. Se O LED mais utilizado na iluminação (e por consequencia nas transmissões VLC) é o fosforescente, porém ele não pode ser utilizado na modulação CSK.. e aplicação de CSK requer uma estrutura de circuito complexo. Um ciclo de feedback opcional a partir do receptor pode ser implementada para a calibração de cores e evitando a interferência de outras fontes de luz [25].

Band (nm)	Code	Center (nm)	(x,y)
380–478	000	429	(0.169, 0.007)
478–540	001	509	(0.011, 0.733)
540–588	010	564	(0.402, 0.597)
588–633	011	611	(0.669, 0.331)
633–679	100	656	(0.729, 0.271)
679–726	101	703	(0.734, 0.265)
726–780	110	753	(0.734, 0.265)

Tabela 3.1: Valores coordenadas (x,y).[25]

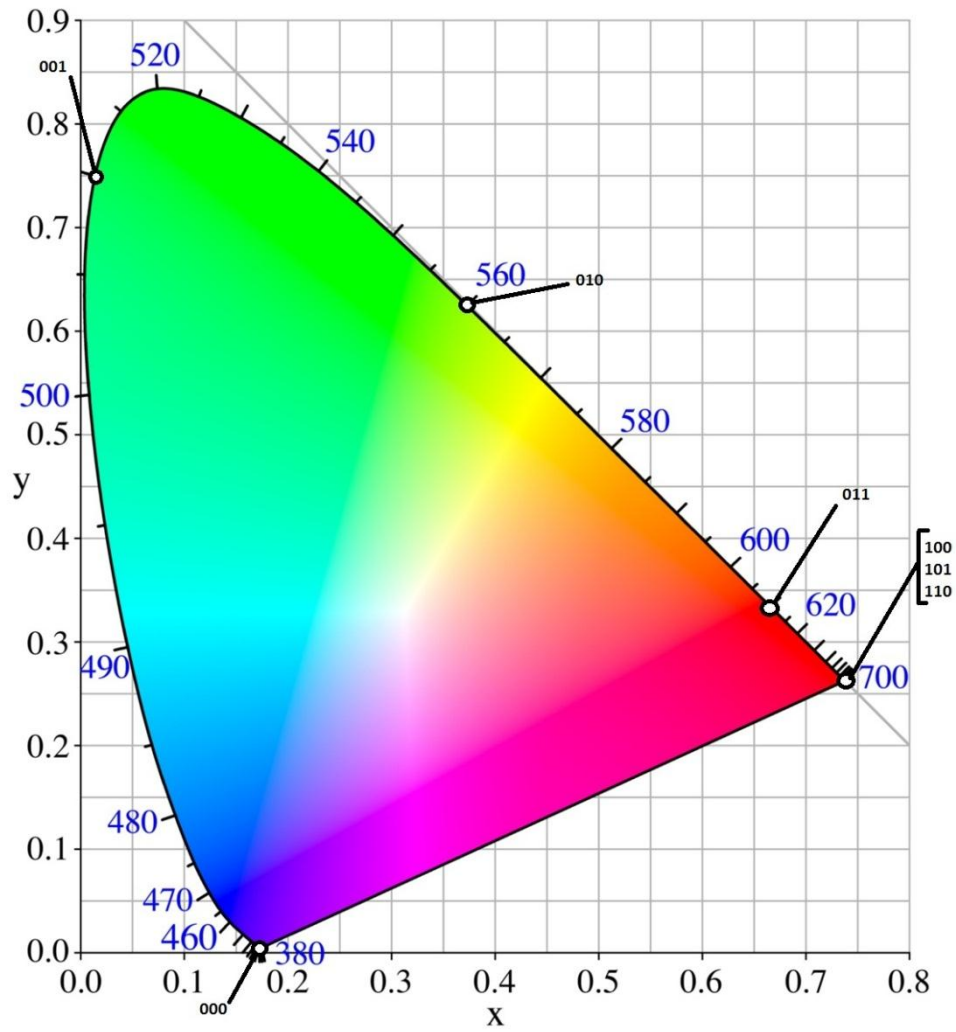


Figura 3.3: Diagrama cromático CIE 1931 para dados da tabela 3.1. [25]

Cada ponto na figura 3.4 ( $G(x_j, y_j)$ ,  $R(x_i, y_i)$ ,  $B(x_k, y_k)$ ) indica uma fonte de luz do LED RGB. O ponto  $(x_p, y_p)$  é gerado pela intensidade das três fontes de luz. Essa relação é indicada pelas equações 3.13, 3.14 e 3.15.

$$x_p = P_i \cdot x_i + P_j \cdot x_j + P_k \cdot x_k \quad (3.13)$$

$$y_p = P_i \cdot y_i + P_j \cdot y_j + P_k \cdot y_k \quad (3.14)$$

$$P_i + P_j + P_k = 1 \quad (3.15)$$

Onde  $P_i$ ,  $P_j$  e  $P_k$  é o valor da potência (intensidade) de cada luz no LED RGB.

Quando esses dados chegam no receptor o valor das coordenadas são calculados pela potencia das três cores recebidas. O valor das coordenadas é então decodificado no bits de informação.

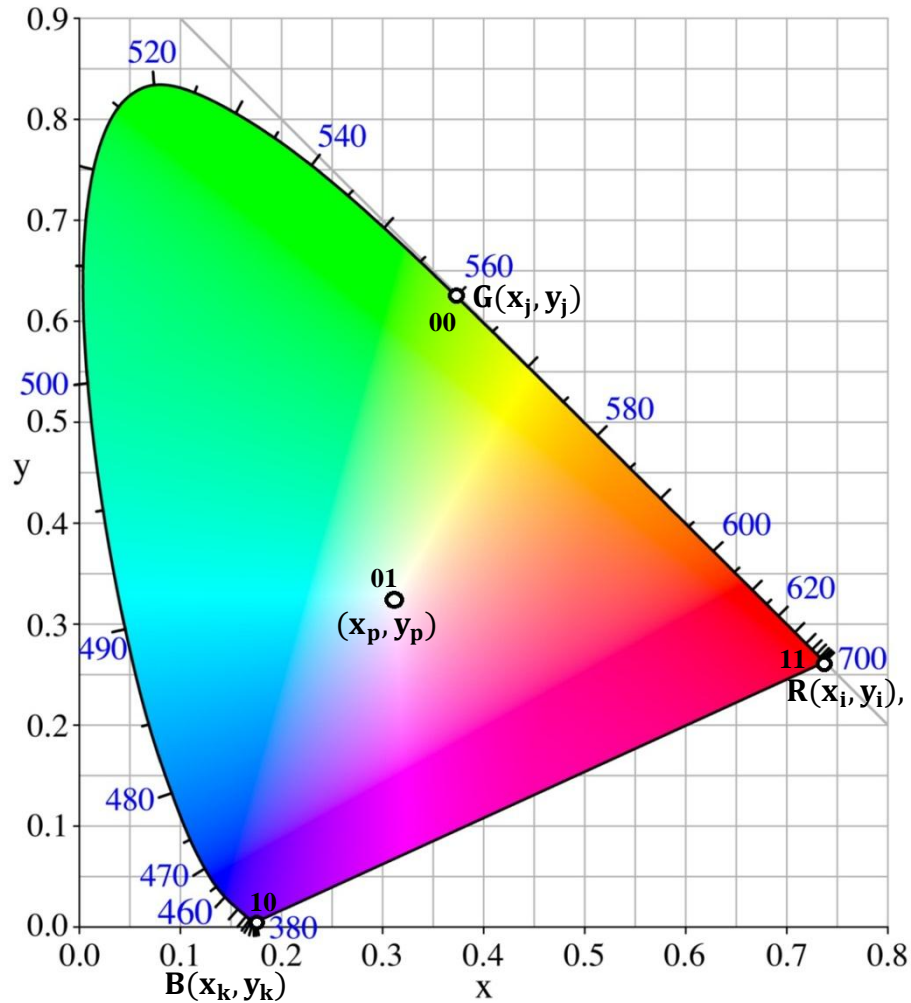


Figura 3.4: Coordenadas de cada fonte de luz do LED RGB no diagrama CIE 1931 [25].

### 3.3.2 OFDM

OFDM é um tipo de modulação onde são utilizadas múltiplas portadoras, diferentemente dos esquemas tradicionais de modulação usando uma única portadora. OFDM é uma alternativa espectralmente eficiente onde é possível alcançar

altas taxas de transmissão e minimizar os efeitos da dispersão do canal, causadores de interferência intersimbólica (ISI).

Para entender como OFDM funciona, é interessante relembrar FDM (*Frequency Division Multiplexing*). Em sistemas FDM, sinais de múltiplos transmissores são transmitidos simultaneamente (no mesmo slot de tempo) em múltiplas frequências. Cada faixa de frequência (subportadora) é modulada separadamente por diferentes fluxos de dados e um espaçamento (banda de guarda) é colocado entre cada subportadora para evitar a sobreposição do sinal (figura 3.5).

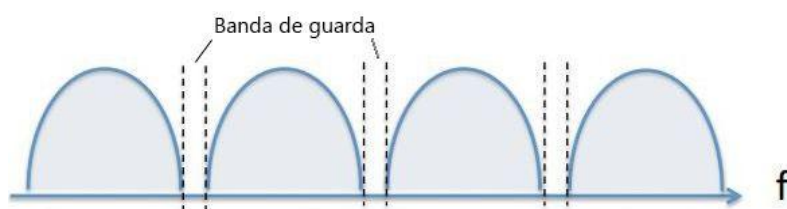


Figura 3.5: Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM)

OFDM também utiliza múltiplas subportadoras, mas a banda de guarda é reduzida e as subportadoras ficam bem próximas umas das outras. O fluxo de dados de entrada é repartido em vários fluxos de dados paralelos de baixa velocidade e são utilizadas subportadoras ortogonais em relação as outras (figura 3.7). Dessa forma é possível economizar a banda significativamente, em relação ao FDM [13]. Dados OFDM são gerados ao utilizar símbolos no espaço espectral usando geralmente modulações M-PSK ou M-QAM. O espectro é convertido para o domínio do tempo utilizando a Transformada Inversa de Fourier de Tempo Discreto (IDFT). O cálculo da IDFT é feito através da IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*), pois esta possui uma melhor eficiência computacional, o que torna possível a implementação prática do sistema. Na figura 3.6 tem-se o diagrama de blocos de um transmissor OFDM. Após os dados serem modulados, eles são convertidos série-paralelo (S/P) e então passam pela IFFT, onde são transformados para sinais de tempo. Nesse momento adiciona-se o prefixo cíclico e todas as subportadoras transmitem em paralelo, para que a banda disponível seja totalmente ocupada. A conversão S/P aumenta a duração de cada símbolo, o que contribui para a ISI (*Intersymbol Interference*). A ISI, porém pode ser eliminada através da inserção do intervalo de guarda. O intervalo de guarda poderia ser criado com a ausência

de sinal, porém seria gerada uma ICI (*Interchannel Interference*), pois o sinal deixaria de ser ortogonal. Dessa forma o intervalo de guarda é feito como uma extensão cíclica do símbolo OFDM, ou seja, acrescenta-se ao início do símbolo um pedaço do final do mesmo (prefixo cíclico).

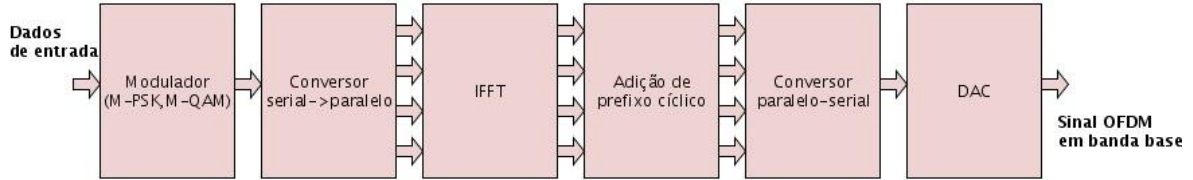


Figura 3.6: Diagrama de um transmissor OFDM

O efeito da ISI é eliminado devido ao maior período de símbolo das subportadoras paralelas do que em uma única portadora e do uso de prefixo cíclico.

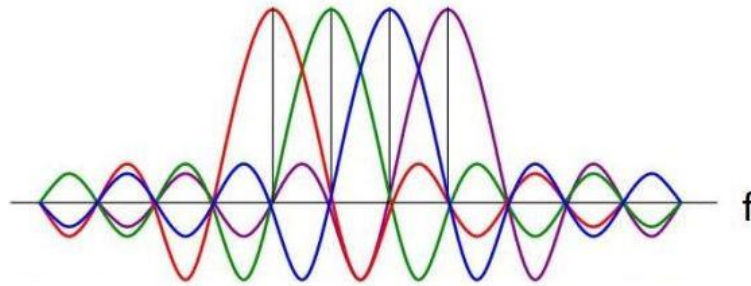


Figura 3.7: Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência (OFDM)

### 3.3.3 Simetria Hermitiana

A saída da IFFT tem valores complexos e, para transmissão óptica faz-se necessário que o sinal seja real. Assim, aproveita-se a propriedade da DFT em que, para uma sequência de  $N$  subportadoras, são necessários  $2N$  pontos para o cálculo da IFFT. Metade desses pontos corresponde aos símbolos complexos da informação e a outra metade corresponde ao conjugado complexo desses símbolos. Isso é obtido através da simetria Hermitiana que define:

$$X_{2N-n} = X_n^* , \quad (3.16)$$

para  $n = 1, \dots, N-1$ . Os símbolos ficam então espelhados, a exemplo do mostrado na figura 3.8. Nesse momento o sinal está preparado para passar pela IFFT que resultará numa saída

real. No receptor não é realizado um processo para desfazer a simetria Hermitiana, pois no próprio cálculo da FFT a simetria é desfeita pelas propriedades da transformada [14].

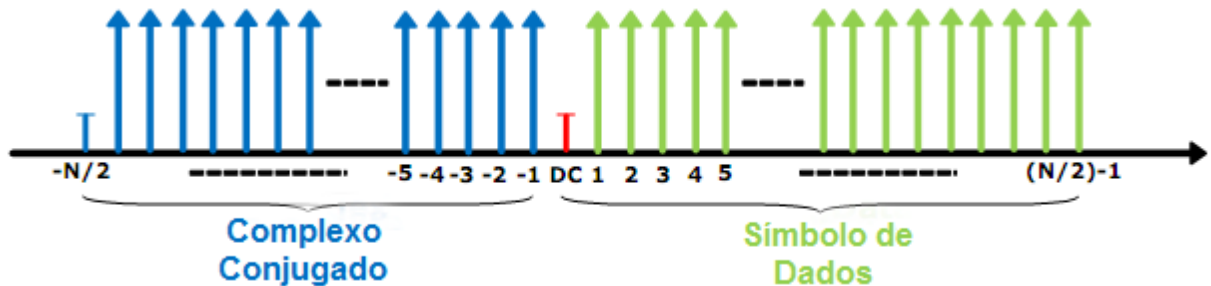


Figura 3.8: Símbolos com simetria Hermitiana.[15]

### 3.4 Códigos Corretores

O canal de comunicação é responsável pela corrupção da informação transmitida, pois é nele que a mensagem recebe a adição de ruído, passa por interferências e esvanecimento. Assim, podem aparecer erros nos bits no receptor e a mensagem chegar corrompida. Para minimizar esse problema e proteger a mensagem de ruídos e interferências, utilizam-se técnicas de Codificação de Canal.

Essas técnicas visam reduzir a SNR (*Signal Noise Rate*), dada uma certa taxa de erro, de forma a melhorar o uso da potência. Logo, a probabilidade de erro é reduzida e a qualidade da transmissão é melhorada. Para isso é feita a adição de bits redundantes que não transportam informação, porém permitem detectar e corrigir erros de transmissão.[16]

Há dois métodos de Codificação de Canal: Códigos de detecção ou Códigos Corretores de Erros. No primeiro caso, pode-se citar código de verificação de paridade, soma de verificação (*Checksum*), redundância cíclica (CRC – *Cyclic Redudancy Check*) e ARQ (*Automatic Repeat Request*), sendo o último mais utilizado. Os códigos FEC (*Foward Error Correction*) podem ser divididos em códigos de blocos e códigos convolucionais.

### 3.4.1 Códigos Convolucionais

Os códigos convolucionais são códigos com memória, ou seja, dependem não só dos bits de entrada, mas também da informação armazenada na memória do código. Cada  $k$  bits de informação é transformado em  $n$  bits, sendo a taxa do código dada por:

$$R = \frac{k}{n} \quad (3.17)$$

O comprimento da memória é definido por  $L$  (*Constraint Length*) e representa a dependência da saída em relação aos bits de entrada. É definido por:

$$L = M + 1 \quad (3.18)$$

onde  $M$  é o número de registradores.

Cada saída pode ser definida por um polinômio gerador. Os polinômios geradores são definidos de acordo com os registradores e a forma com que cada bit de entrada contribui para cada bit de saída. Ou seja, para cada parcela da soma módulo 2 é associada uma potência de  $X$ , definida para cada registrador. Para o código convolucional ilustrado na figura 3.9, podemos definir:

$$G_1 = 1 + X^1 + X^2 + X^3 + X^6 \quad (3.19)$$

$$G_2 = 1 + X^2 + X^3 + X^5 + X^6 \quad (3.20)$$

pois para ser gerado o bit de saída  $C^0$  estão conectados ao somador apenas os registradores  $X^1, X^2, X^3$  e  $X^6$  e para gerar o bit de saída  $C^1$  estão conectados ao somador apenas os registradores  $X^2, X^3, X^5$  e  $X^6$ . Assim,  $G_1 = 1 + 1X^1 + 1X^2 + 1X^3 + 0X^4 + 0X^5 + 1X^6 = 1111001 = 171$  em octal e  $G_2 = 1 + 0X^1 + 1X^2 + 1X^3 + 0X^4 + 1X^5 + 1X^6 = 1011011 = 133$  em octal.

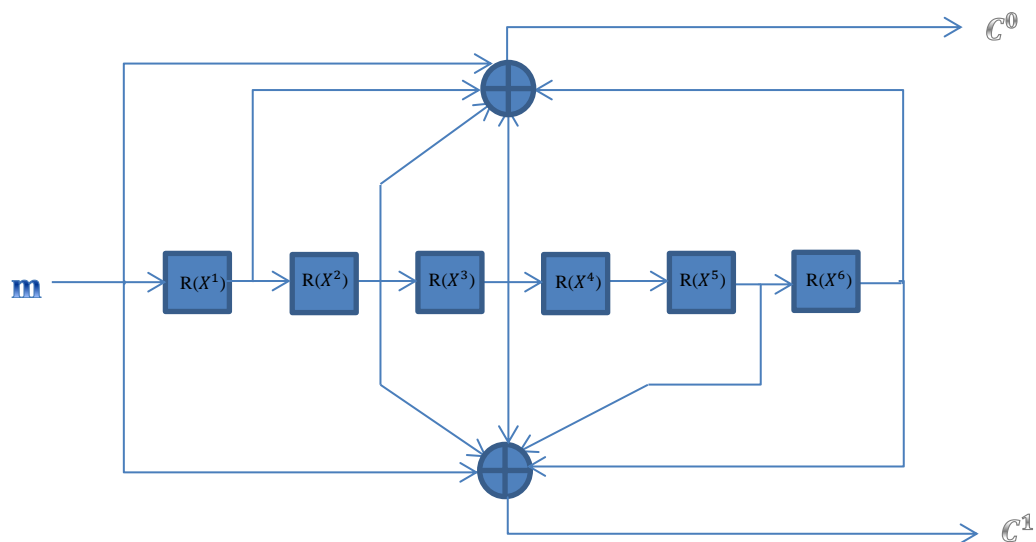


Figura 3.9: Codificador convolucional [171 133] R=1/2

Outra forma de representar o codificador convolucional é através da tabela de transição de estado. Ela permite relacionar os estados de inicial e final com os dados de entrada e saída. O número de estados é dado por  $2^N$ , onde N é o número de registradores (memória). Para um codificador com  $G_1 = X^2 + 1$  e  $G_2 = X^2 + X^1 + 1$ , temos a tabela de transição descrita na tabela 3.2.

Mais uma alternativa é a representação na forma de treliça. Ela permite ver em cada instante todas as transições de estado possíveis. Na figura 3.10 tem-se a treliça para o codificador [7,5]. Cada estado é representado por um nível horizontal e as entradas e saídas são definidos na forma  $m/C^0C^1$  em cada passo da treliça (seta), que representa uma transição.

Estado Inicial - $X^2X^1$	m (bit de entrada)	Estado Final - $X^1X^0$	$C^0C^1$ (bits de saída)
0-00	0	0-00	00
0-00	1	1-01	11
1-01	0	2-10	01
1-01	1	3-11	10
2-10	0	0-00	11
2-10	1	1-01	00
3-11	0	2-10	10



3-11	1	3-11	01
------	---	------	----

Tabela 3.2: Tabela de transição codificador [7,5].

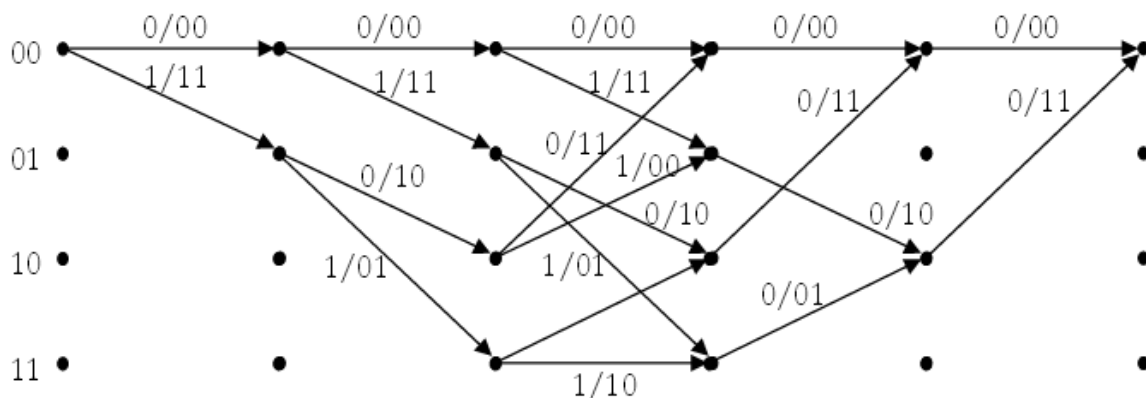


Figura 3.10: Treliça codificador convolucional [7,5].

### 3.4.1 Algoritmo de Viterbi

A decodificação do código convolucional é feita através do algoritmo de Viterbi. [17] Este algoritmo é um algoritmo de máxima verossimilhança que utiliza do diagrama de treliça descrito anteriormente. Diferente do método de decodificação por força bruta, o algoritmo de Viterbi é função de uma medida de similaridade (distância) entre o sinal recebido no tempo  $t_i$  e todos os braços da treliça no tempo  $t_i$ . Ele possui baixa carga computacional e possui a vantagem de ter um tempo de decodificação fixo. Porém, quanto maior o valor do *constraint length* (L), maiores os requisitos computacionais. Geralmente limita-se esse valor a  $L=9$ .

Existem dois tipos de distância usados no nesse algoritmo: distância de Hamming e distância Euclidiana. O processo de decisão utilizando a distância de Hamming é chamado *Hard Decision* e o que utiliza a distância Euclidiana, *Soft Decision*.

Define-se a distância de Hamming como sendo o número de bits que diferem entre duas palavras código. Ela é calculada como:

$$d_h = |r_t - y_t| \quad (3.21)$$

onde  $r_t$  são os bits recebidos no instante  $t$  e  $y_t$  corresponde aos bits de cada transição válida no tempo  $t$ .

Para decodificação com algoritmo de Viterbi, primeiramente deve-se definir a treliça, com o estado inicial sempre igual a 00. A partir daí, para cada transição da treliça é calculada a distância de Hamming. Em seguida é feito um cálculo de escore:

$$V(t, i) = V(t - 1, j) + |r_t - y_t| \quad (3.22)$$

onde  $t$  são os tempos,  $i$  os estados e  $j = i-1$ . Define-se  $V(0,i)=0$ . Assim, se mais de uma transição convergir para o mesmo estado, a de menor escore define o estado. Depois de se obter todos os escores, a sequência mais provável será a que apresentar os menores escores do primeiro estado ao último.

### 3.4.2 Interleaver

Interleaving(entrelaçamento) é o processo de reorganizar os bits dos dados a serem transmitidos de forma que bits consecutivos fiquem espaçados, diminuindo erros de rajadas. Interleaving aumenta a capacidade dos códigos corretores de corrigir erros de rajadas, pois não se perde grandes pedaços de informação.

## 3.5 Canal

O canal óptico de sistemas de comunicação por luz visível consiste de um número de componentes de linha de visada (*Line of Sight*, LOS), que correspondem aos caminhos das fontes luminosas até o receptor, e componentes difusos criados por reflexões nas paredes ou objetos de uma sala. O canal VLC pode ser afetado por ruídos causados por outras fontes luminosas, que podem ser lâmpadas incandescentes, fluorescentes ou mesmo o sol. Lâmpadas incandescentes emitem altos níveis de radiação infravermelha. A perda do caminho óptico (*Optical Path Loss*) é a quantidade mais importante que caracteriza o canal e relata a potência transmitida e recebida por:

$$P_r = H(0)P_t \quad (3.23)$$

onde  $P_t$  é a potência óptica transmitida,  $P_r$  é a potência óptica recebida e  $H(0)$  é a perda do caminho óptico. Essa aproximação é bastante precisa para enlaces LOS. A perda do caminho LOS é definido por:

$$H(0)_{LOS} = \frac{A}{d^2} R_0(\phi) T_s(\phi) g(\Psi) \cos(\Psi) \quad (3.24)$$

onde  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor,  $\phi$  é o ângulo em relação ao transmissor,  $\Psi$  é o ângulo em relação ao receptor,  $T_s(\phi)$  é o ganho do filtro,  $g(\Psi)$  é o ganho do concentrador e  $R_0(\phi)$  é a intensidade radiante do transmissor, dado por

$$R_0(\phi) = \frac{m+1}{d^2} \cos^m \phi \quad (3.25)$$

A equação 3.26 relaciona a potência transmitida com a corrente recebida. O sinal de entrada  $x$  é um sinal de potência, a função de transferência  $h$  é sem dimensão, e o fator de responsividade do receptor  $r$  representa a razão de conversão entre a potência óptica recebida e a corrente do fotodiodo no receptor. Consequentemente, o sinal recebido  $y$  e o ruído gaussiano AWGN são correntes. Nos canais ópticos a qualidade da transmissão é dominada pelo ruído shot; a luz ambiente incidindo no detector leva à um ruído shot que pode ser considerado como um ruído gaussiano. O pré-amplificador do receptor também é um sinal independente e gaussiano. [18]

$$y = r(x * h) + \tilde{n} \quad (3.26)$$

## 3.6 Receptor

### 3.6.1 Detectores Ópticos

Primeiramente é interessante ressaltar a diferença entre a detecção de sinais de rádio e a detecção de sinais ópticos. Em um sistema de comunicação por rádio, temos o campo eletromagnético que oscila em frequências de até alguns GHz, que incide sobre a antena receptora e vai para a etapa receptora elétrica, onde podemos recuperar uma corrente que segue as flutuações temporais do campo eletromagnético irradiado. Na detecção óptica o campo eletromagnético oscila frequências na ordem de vários THz. É essa a diferença entre os sistemas de comunicações por rádio e sistemas de comunicações ópticas, pois no caso óptico, devido à frequência elevada do sinal, onde os elétrons em um circuito elétrico não vão poder seguir essas flutuações instantâneas do campo. Por isso, uma vez que o sinal óptico chega ao detector, atravessando uma lente acoplada ao detector, a fotocorrente recuperada no circuito será proporcional à potência média da onda propagada, o que é o mesmo que falar do quadrado da envoltória do sinal transmitido. Existem dois tipos de fotodetectores que são comuns: os detectores térmicos e os fotodetectores. Os detectores térmicos possuem tempo de resposta lento, por isso não são usados para comunicações.

Para VLC são usados fotodetectores. Fotodetectores são detectores que absorvem a potência de entrada em forma de fluxo de fótons e a transformam em uma fotocorrente em sua saída. Esses componentes têm velocidades maiores e são adequadas para sistemas de comunicações. O fotodiodo é o fotodetector mais típico utilizado em sistemas de comunicação. Pode-se utilizar o fotodiodo PIN (PIN PD) ou avalanche (APD). O fotodiodo PIN é baseado em uma junção p-n polarizada inversamente e por isso pode utilizar materiais semicondutores, onde suas características são adequadas para os sistemas de comunicações ópticas.

Para falar da absorção dos sinais ópticos que incidem sobre o detector é importante termos em conta um resultado da mecânica quântica. Este diz que a mecânica quântica estabelece a dualidade entre o carácter de onda e de partícula, tanto para os átomos e elétrons que constituem o material, quanto para a radiação

eletromagnética. Disso, podemos falar de um sinal em termos de seu campo eletromagnético, da qual o podemos descrever como uma função envolvente  $E(t) = f(t)\cos(2\pi t)$ , que é função do tempo e da frequência. O sinal é função do tempo e podemos calcular a potência média desse sinal,  $P(t)$  como proporcional à envolvente ao quadrado do sinal transmitido. Isso é equivalente a falar da radiação eletromagnética em termos de partículas, ou seja, podemos considerar um fluxo de fótons por unidade de tempo, fótons por segundo, a que podemos chamar  $Q(t)$ . O fluxo médio  $Q(t)$  corresponde a um número médio de fótons transmitidos por unidade de tempo. Podemos calcular a potência  $P(t)$  com o número de fótons por unidade de tempo, pela energia de cada fóton. A potência média no tempo pode ser calculada como o fluxo médio de fótons pela energia de cada fóton, que é o produto da constante de Planck  $h$  pela frequência  $\nu$ :

$$\overline{P(t)} = \overline{Q(t)}h\nu \quad (3.27)$$

Essa quantização de radiação será a razão pela qual a própria radiação é intrinsicamente ruidosa. Este ruído que trataremos mais tarde é o ruído conhecido como ruído de quantização, ou ruído shot.

### 3.6.1.1 Fotodiodo PIN

O princípio de funcionamento de um fotodiodo PIN é o mesmo que de uma junção p-n com polarização inversa. Se lembrarmos do funcionamento de uma junção p-n, podemos recordar que um material semiconductor tipo P possui buracos como portadores majoritários e o material tipo N possui elétrons como portadores majoritários. Produz-se uma difusão de buracos na zona N e de elétrons a zona P de forma que uma acumulação de carga negativa na zona P e positiva na zona N. Quando esses materiais estão em equilíbrio, aparece uma barreira de potencial que evita que esta difusão continue. Em uma junção p-n polarizada com tensão inversa, o que temos é aumento da barreira potencial, ao contrário do que temos quando polarizamos com tensão direta. Neste caso, se aumenta a barreira potencial para que apareça um campo elétrico muito intenso nessa zona intermediária entre os materiais tipo P e N. Esta zona é chamada de Zona de Carga Espacial ( $Z_{ce}$ ). É uma zona desprovida de

portadores livres, e cujo largura total é soma de  $W_p + W_n$ , como se vê na figura (3.11).

Essa largura depende da tensão aplicada a união p-n. Pode-se observar como a união p-n polarizada com tensão inversa é nosso detector óptico encarregado de

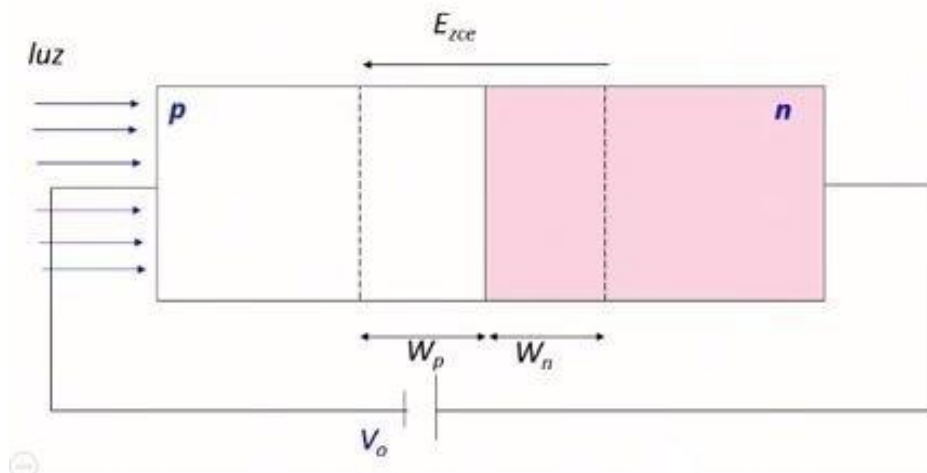


Figura 3.11: Fotodiodo

recuperar a informação a partir do sinal óptico recebido: a luz incide em uma película em cima do material tipo P, sendo que essa película deve estar provida de material antirreflexo para que um mínimo de luz seja refletido, conseguindo que o máximo de luz entre no material tipo P. O material tipo P deve ser transparente a luz incidente, porque o que se deseja é que a maior parte de luz chegue à zona desprovida de portadores livres, que é a zona de carga espacial. Os fótons atravessarão a zona P sem sofrer absorção e chegarão à zona de carga espacial, onde serão absorvidos. A energia de um fóton excita um elétron na banda de valência para passar à banda de condução, dessa forma gerando um buraco na banda de valência e aparecendo como elétron portador livre na banda de condução. Cada fóton, portanto, dá lugar a um par elétron-buraco nessa zona de carga espacial, onde, devido ao campo elétrico presente, os portadores livres são arrastados para formar parte da corrente no circuito elétrico.

Num fotodiodo ideal teremos que cada fóton incidente sobre o fotodetector dará lugar a um elétron que vai contribuir à corrente gerada, que vai permitir recuperar os

dados transmitidos no enlace óptico. Na realidade não será assim, pois nem todos os fótons incidentes no detector darão lugar a elétrons correspondentes à corrente.

### **3.6.1.2 Corrente escura (Dark current)**

Corrente escura é a corrente que atravessa o fotodiodo na falta de luz, quando ele opera no modo fotocondutor. A corrente escura inclui fotocorrente gerada pela radiação de fundo e a corrente saturada da junção do semicondutor. A corrente escura define um piso do menor sinal detectável, pois o sinal deve produzir mais corrente que a corrente escura, para ser detectada. A corrente escura depende da temperatura de operação, bias voltage e do tipo de detector. Corrente escura deve ser levada em conta pela calibração se o fotodiodo é usado para fazer uma medida acurada de potência óptica, e ele também é fonte de ruído quando o fotodiodo é usado em um sistema de comunicações ópticas.

### **3.6.1.3 Noise-equivalent power**

NEP é a menor potência óptica inserida para gerar fotocorrente, igual ao valor eficaz (RMS) de corrente de ruído em uma banda de 1Hz. Isso mensura o menor sinal detectável mais diretamente pois compara o ruído diretamente com a potência óptica. NEP depende da frequência do sinal modulado, da banda na qual o ruído é medido, a área do detector e a temperatura de operação.

## **3.6.2 Técnicas de detecção**

Fotodetecção é o processo de receber a radiação óptica no detector óptico e converter para o correspondente sinal elétrico, recuperando a informação transmitida. No transmissor, a informação pode ser codificada na frequência, fase ou intensidade por uma fonte óptica. A informação codificada é então transmitida para o receptor pelo canal de campo aberto (*Free-Space Optical - FSO*). No receptor, existem dois possíveis esquemas de detecção que são largamente usados nas comunicações ópticas: modulação por intensidade-detecção direta(IM-DD) e detecção coerente. IM-DD é o mais simples e mais comumente usado.

### 3.5.2.1 Detecção Direta

Na modulação por intensidade, apenas a intensidade da luz emitida pelo LED é usada para transmitir informação. No esquema de detecção direta, um oscilador local não é usado no processo de conversão, e para esse tipo de receptor recuperar a informação codificada é essencial que a informação transmitida seja associada com a variação de intensidade do campo transmitido. Logo, esse tipo de detecção também é conhecido como detecção de envelope. Para uma intensidade de potência incidente  $P(t)$  instantânea, a corrente  $i(t)$  instantânea fotodetector é dada por:

$$i(t) = \frac{\eta_{qe} q \lambda}{hc} MP(t) \quad (3.28)$$

onde  $M$  é o fator de ganho do fotodetector e seu valor é a unidade para o fotodetector PIN.

### 3.5.2.2 Responsividade

A responsividade de um fotodetector associa a corrente elétrica  $I_p$  correndo pelo dispositivo e a potência óptica incidente. A responsividade é linearmente proporcional tanto para a eficiência quântica  $\eta$  quanto para o comprimento de onda em campo aberto (*Free-Space Wavelength*).

$$R = \frac{I_p}{P} = \frac{\eta \lambda}{1.24} \quad (3.29)$$

A eficiência quântica (eficiência quântica externa)  $\eta$  de um fotodetector é a probabilidade de um único fóton incidente no dispositivo gere um par fotoportador que contribua para a corrente no detector.

$$\eta(\lambda) = \zeta(1 - R)[1 - e^{-\alpha(\lambda)d}] \quad (3.30)$$



### 3.6.3 Ruído em Fotodetectores

#### 3.6.3.1 Ruído de quantização (Shot Noise)

As fontes de luz emitem fótons aleatoriamente. Por isso, o número de fótons emitidos pela fonte não é constante, sendo possível observar flutuações estatísticas. O *shot noise* é o ruído decorrente dessa aleatoriedade. Para o fotodetector ideal, esse seria o único ruído significativo. Pela natureza da luz, esse ruído é inevitável.

#### 3.6.3.2 Radiação de fundo

Esse tipo de ruído é causado pela detecção de fótons gerados pelo ambiente. Dois tipos de fontes contribuem para o ruído de fundo: fontes pontuais localizadas (sol) e fontes estendidas (céu). Radiação de fundo de outros corpos celestiais como estrelas e radiações de fundo refletidas são assumidas como muito fracas para serem consideradas em links FSO. Entretanto, elas contribuem significativamente em ruídos de fundo de links FSO espaciais (*Deep Space*). As expressões a seguir são a irradiância (potência por unidade de área) para ambos os casos de fontes estendidas e localizadas de radiação de fundo .

$$I_{ceu} = \frac{N(\lambda)\pi\Omega^2}{4} \quad (3.31)$$

$$I_{sol} = W(\lambda)\Delta\lambda \quad (3.32)$$

onde  $N$  e  $W$  são as brilho espectral (*Spectral Radiance*) do céu e emitância espectral radiante, respectivamente.  $\Delta\lambda$  é a largura de banda do filtro óptico passa-faixa (OBPF) que precede o fotodetector, e  $\Omega$  é o ângulo do campo de visão (FOV) do detector, em radianos.

Escolhendo cuidadosamente um receptor com um FOV e  $\Delta\lambda$  bem estreito, o impacto do ruído de fundo pode ser drasticamente reduzido. Valores empíricos de  $N$  e  $W$  em diferentes condições de observação estão disponíveis na literatura em [18]. A radiação de fundo é um ruído de quantização com variância.

$$\sigma_{Bg}^2 = 2qB\Re(I_{ceu} + I_{sol}) \quad (3.33)$$

Combinando esses dois processos de ruído resulta num total de ruído de quantização cujo variância  $\sigma_{Bg}^2$  é a soma individual da variância dos ruídos. Entretanto, isso é dominado pela radiação de fundo, pois os outros são normalmente mais fracos (Dark Current e Excess Noise).

### 3.6.3.3 Ruído Térmico

Esse ruído é causado pelas flutuações térmicas de elétrons em qualquer circuito receptor de resistência equivalente  $R_L$  e temperatura  $T_e$ . O ruído térmico é considerado como um ruído branco, pois sua densidade espectral de potência (PSD) é independente da frequência. Além disso, o ruído térmico obedece uma distribuição Gaussiana com média zero e variância definida por [19]

$$\sigma_{Th}^2 = \frac{4kT_eB}{R_L} \quad (3.34)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann.

## Capítulo 4

# Conquistas Recentes

### 4.1 Pesquisas atuais

Vários grupos de pesquisa têm demonstrado o potencial de lâmpadas LED para comunicações de alta velocidade. Um estudo de VLC utilizando uma simples modulação OOK (On-off keying) com LED RGB alcançou velocidades de até 477 Mbps [8]. Para velocidades mais altas, modulações mais espectralmente eficientes são necessárias. Para cenários LOS (*Light-of-Sight*), taxas de até 1.1 Gbps foram reportadas utilizando LEDs fosforescentes e modulação OFDM, por meio de processamentos offline [9]. Usando LEDs RGB grupos alcançaram taxas de 1.25 Gbps [10], 1.42Gbps[27] e 3.4 Gbps [11]. Na tabela 4.1 são comparadas diversas pesquisas definindo o tipo de LED, modulação utilizada e as taxas atingidas. Porém são utilizadas algumas técnicas para melhorar a taxa de transmissão em alguns casos, como pré-ênfase e pré-equalização, permitindo o aumento da taxa de transmissão.

Ano	LED	Modulação	Taxa	Grupo de Pesquisa
2015	RGB	OFDM	1.42 Gbps	Xingxing Huang - Fudan University [27]
2014	RGB	QAM	3.25 Gbps	Yuanquan Wang - Fudan University [26]
2014	$\mu$ LED	OFDM	3 Gbps	Dobroslav Tsonev - The University of Edinburgh [35]
2013	$\mu$ LED	OOK	1.5 Gbps	S. Zhang – University of Strathclyde [30]
2013	Fosforescente	OFDM	1.1 Gbps	Ahmad Helmi Azhar - University of Oxford [29]
2013	RGB	OOK-NRZ	477 Mbps	N. Fujimoto – Kinki University [8]
2012	Fosforescente	DMT	1 Gbps	M. Khalid - Istituto TeCIP - Scuola Superiore Sant'Anna [9]
2012	RGB	DMT	1,25 Gbps	Christoph Kottke - Fraunhofer Heinrich Hertz Institute [10]

2012	RGB	OFDM	3,4 Gbps	G. Cossu- , Istituto TeCIP, Scuola Superiore Sant'Anna [11]
2011	Fosforescente	DMT	513 Mbps	Klaus-Dieter Langer -Fraunhofer Institute for Telecommunications [32]
2011	RGB	OFDM	803 Mbps	J. Vučić - Fraunhofer Institute for Telecommunications [28]

Tabela 4.1: Taxas obtidas com LEDs transmissão VLC.

É possível fazer a comparação e observar como o tipo de modulação tem grande influência na taxa de erro de um sistema. Para maior detalhamento, foram escolhidos dois dos modelos mostrados para comparação. No primeiro caso [34] a transmissão é feita num ambiente *indoor* sob luz solar difusa, utilizando um LED fosforescente com modulação OFDM e código corretor de erro convolucional, com taxa  $R = \frac{1}{2}$  e interleaver. No receptor é utilizado fotodetector PIN e a decodificação é feita pelo algoritmo de Viterbi com hard decision. No segundo caso [8] a transmissão é feita por um LED RGB com modulação simples OOK-NRZ e fotodetector PIN. Pela figura 4.1 pode-se observar que, para uma distância de 60 cm entre o transmissor e o receptor, o sistema VLC que utiliza QPSK codificado na modulação OFDM apresenta melhor desempenho em relação ao sistema que utiliza modulação OOK-NRZ. O primeiro confere uma BER de aproximadamente  $10^{-7}$  enquanto o sistema com modulação OOK-NRZ apresenta uma taxa de aproximadamente  $10^{-4}$  (figura 4.2). Pode-se observar também que a codificação faz uma enorme diferença na taxa de erros pois, para transmissão com QPSK sem codificação, a taxa de erros aumenta para aproximadamente  $10^{-4}$ , à mesma distância.

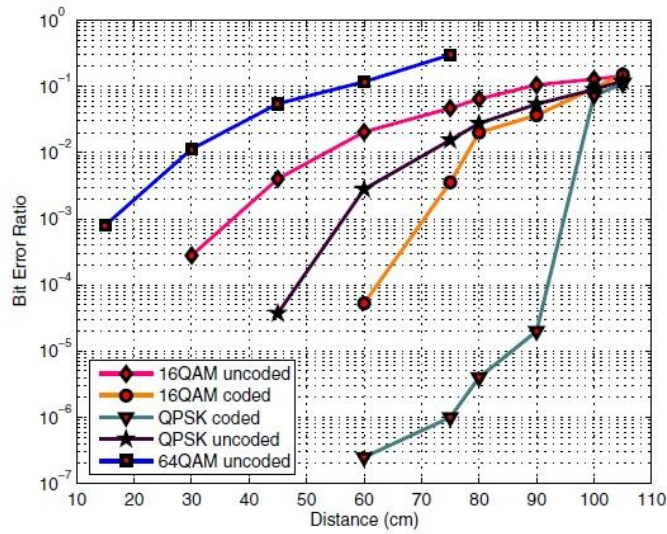


Figura 4.1: BER x Distância caso OFDM [34].

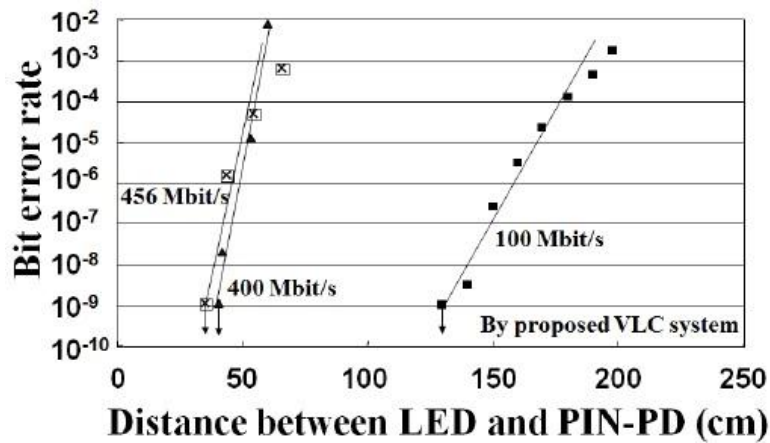


Figura 4.2: BER x Distância caso OOK[8].

## 4.2 Padronização

Com o advento da Comunicação por luz visível espera-se que venham a surgir diversos produtos e aplicações. Por ser uma novidade, podem aparecer vários problemas com relação a tecnologias antigas, como foi verificado anteriormente. Problemas como a permutabilidade entre diferentes tipos de comunicação (como WiFi), interferência entre aparelhos (como ocorreu com o telefone e a internet banda larga) e ainda a interferência entre aparelhos infravermelhos. Para evitar e minimizar esses problemas era necessário criar um padrão.

As primeiras tentativas de criação desse padrão foram feitas no Japão pelo VLCC. Eles criaram, a princípio, dois padrões para o VLC e ofereceram para a JEITA (*Japan Electronics*

*and Information Technology Industries Association*) em 2007. JEITA aceitou e foram então criados os padrões CP-1221 e CP-1222. Em seguida o VLCC se uniu ao IrDA (*Infrared Data Association*) em 2008 para produzir um padrão VLC para esta organização, este publicado em 2009 [38]. Em 2011 foi publicado o padrão IEEE 802.15.7[25] para o VLC, produzido pelo seu grupo tarefa TG7 que inclui componentes do VLCC. Em 2015 foi criado um novo grupo tarefa TG7r1 para revisar o padrão IEEE 802.15.7, considerando infravermelho e comprimentos de onda próximos ao ultravioleta. A publicação está prevista para 2017 [39].

### **4.3 Últimas Aplicações VLC**

#### **4.3.1 Transmissão de áudio com receptor de célula solar**

Com a ideia de ser ecologicamente correto e levar a comunicação a lugares onde a comunicação por radiofrequência não é possível ou é limitada (como hospitais e aviões), um estudo em [44] utiliza um painel solar no lugar do fotodiodo, como receptor (figura 4.3).

No experimento é feita a transmissão por LED de luz branca, modulado por um sinal de áudio enviado de um notebook. No receptor um painel solar está conectado a um aut falante. A distância máxima entre o transmissor e o receptor alcançada para o som ser audível foi de 65 cm. Além da economia já esperada de um sistema VLC, a substituição do fotodiodo pelo painel solar eliminou a necessidade de alimentação dos aut falantes, apresentando assim uma maior economia.

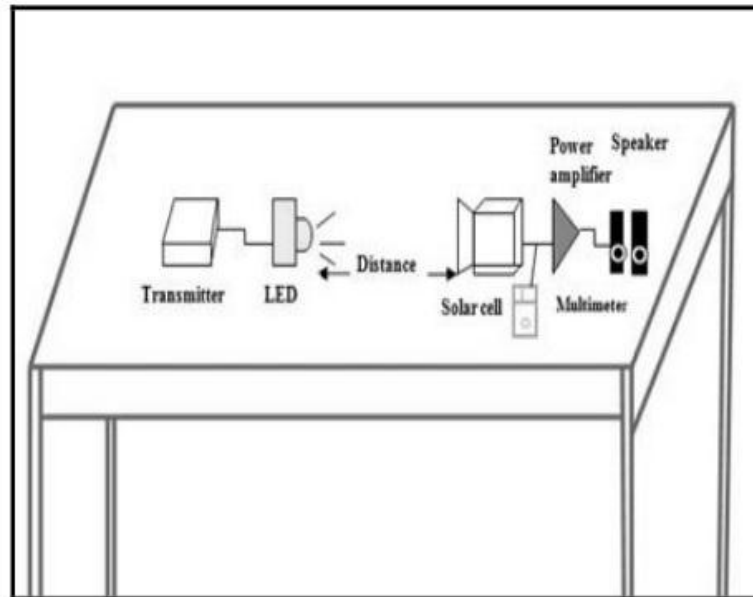


Figura 4.3: Transmissão VLC com uso de painel solar como receptor [44].

### 4.3.2 VLC na comunicação Estrada-Veículo

Neste estudo [48] do Japão, é proposta a comunicação entre veículos e estrada, utilizando semáforo como transmissor e uma câmera de alta velocidade instalada no veículo como receptor. Conseguiu-se receber informação com o veículo a uma velocidade de 30km/h, com distância entre 20 e 60 metros do transmissor. Uma ótima solução para controle de congestionamentos e acidentes.

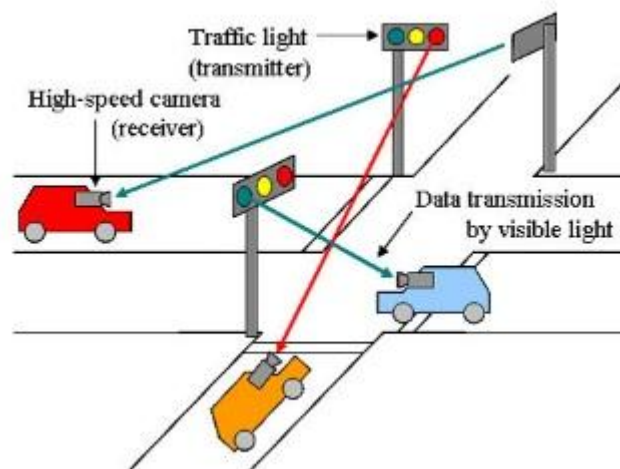


Figura 4.4: Comunicação carro-estrada com uso de semáforo e câmera de alta velocidade [48].

### 4.3.3 VLC utilizando displays de televisão e câmeras de vídeo

Uma das ideias da Comunicação por luz visível é utilizar fontes de luz já existentes no ambiente para transmissão, de forma a também economizar energia. Com isso aproveitar a luminosidade emitida por aparelhos eletrônicos é uma boa abordagem. Um estudo de 2015 [45], utiliza tela de televisão LCD ou OLED para transmissão e uma câmera de vídeo (de celular, por exemplo) para recepção dos dados, como na figura 4.4. Essa transmissão é feita modulando-se os pixels do vídeo transmitido na televisão e a câmera grava o vídeo e demodula. Utilizando-se uma tela full-HD por exemplo, seria possível obter taxas de transmissão de 51,9Mbps.

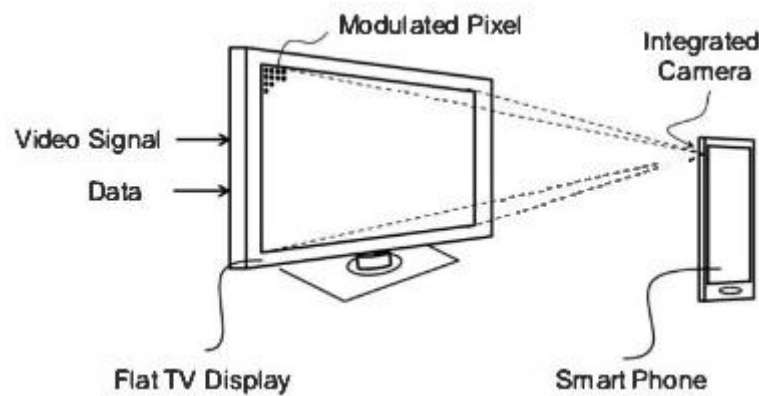


Figura 4.5: Esquema de transmissão utilizando display de televisão e câmera de smartphone. [45]

### 4.3.4 Visible Light Communication no 5G

O 5G está em desenvolvimento com o objetivo de atingir uma capacidade até 1000 vezes maior que o 4G europeu. Essa tecnologia pretende apresentar eficiência espectral, taxas de transmissão (atualmente 25,5 Mbps), e eficiência energética até 10 vezes maior e ser onipresente, conectando qualquer pessoa e qualquer coisa. Será um sistema confiável, disponível 99,999% do tempo[46]. O 5G será a comunicação por trás da “Internet das Coisas”(IoT).

Com essa ideia, o 5G atingiria cenários hoje não possíveis pelo 4G. Por exemplo, trens em alta velocidade atingem até 500 km/h. Redes 4G atendem cenários moveis de até 250 km/h.



A ideia para o 5G é desenvolver uma arquitetura de células onde se separe os cenários de ambientes *indoor* do *outdoor*. Essas células seriam compostas por MIMO e sistemas de antenas distribuídos, contendo dezenas ou centenas de antenas [47]. Estações base externas serão equipadas com várias antenas e conectadas a essas células por fibra óptica. Nos prédios também seriam instaladas várias antenas conectando-se às estações base externas e ao provedor. Assim no cenário *indoor* apenas será necessário utilizar tecnologias wireless, aí entra a comunicação por luz visível como ponto de acesso nesses ambientes. Isso minimiza o uso das ondas de radiofrequência, o que permite melhorar a utilização do espectro.

Os padrões 5G tem previsão de sair entre 2016 e 2018 e comercialização a partir de 2020.

#### **4.3.5 Li-Fi**

Com o potencial de apresentar maior largura de banda e resposta rápida no tempo, surgiu a ideia de conectar dispositivos à internet através de luz de LEDs, de forma similar ao Wi-Fi. Pesquisadores estão buscando a comunicação luz visível ultra-paralelo, que iria usar várias cores da luz para fornecer conexões de banda larga a distâncias de alguns metros. Esse sistema Li-Fi poderia complementar ou de alguns casos substituir as redes Wi-Fi [51]. No Instituto Heinrich Hertz de Berlin, conseguiu-se atingir taxas de transmissão de mais de 500 MBps. Com esse tipo de transmissão é possível levar a comunicação a lugares onde não é possível o uso de ondas de rádio, como hospitais e aviões.

#### **4.3.6 Iluminação Inteligente**

Recentemente a Philips lançou um sistema de iluminação batizado de Hue que permite controlar a intensidade e a cor da luz utilizando um *smartphone*[42]. Dessa forma é possível criar diversos cenários, como um ambiente romântico com a luz com cores quentes e baixa intensidade. Com o sistema é possível programar quando a lâmpada será ligada ou desligada, podendo ser usada como despertador.

A lâmpada utilizada é um LED RGB e tem vida útil de 15.000 horas. O sistema vendido com três lâmpadas e uma “bridge” (gateway WiFi) que se conecta à rede WiFi local e liga às lâmpadas ao smartphone.

#### 4.3.7 Localização com VLC

Como o GPS não funciona em ambientes internos as lâmpadas VLC podem ajudar nessa tarefa. Como estão fixas, é possível utilizá-las como referência e definir o posicionamento de um objeto ou de alguém. Com essa ideia, um supermercado na Coreia realizou um evento onde se utilizava a comunicação por luz visível para achar produtos come desconto pela loja [43]. Foram instalados nos carrinhos de compras receptores VLC e smartphones (figura 4.5). Pela loja haviam 18 lâmpadas de LED instaladas e quando o consumidor passava por uma delas, recebia a informação pelo receptor VLC instalado no carrinho e passava para o smartphone (figura 4.6) . No smartphone era então mostrado o menor caminho para o item com desconto e em seguida para o cupom desconto.

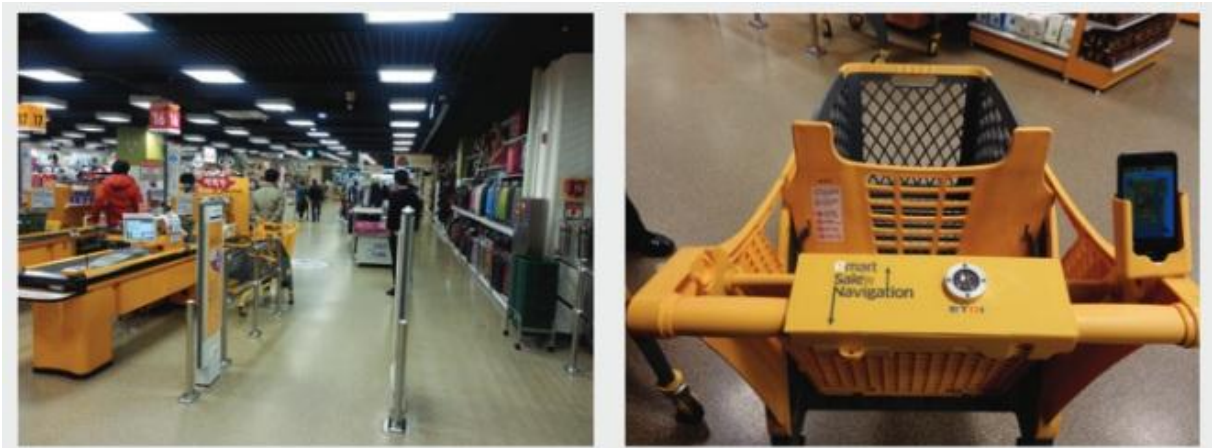


Figura 4.6: Lâmpadas LED e carrinho com receptor VLC[43].



Figura 4.7: Aplicação mostrando o menor caminho para o item com desconto e para o cupom[43].

#### 4.3.8 VLC e robô

Em [49] o VLC é utilizado para navegação e estimação de localização por um robô. A ideia do grupo é desenvolver um sistema que no futuro permita determinar de forma eficiente e precisa a localização de insumos, pessoas e serviços. Foi utilizado como meio de transmissão uma rede local conectada a cada lâmpada fluorescente, distribuídas pelo ambiente. São utilizados três fotosensores com diferentes ângulos para estimar a localização do robô. No projeto é deixado claro que o estudo do padrão de distribuição da luz é bastante importante, pois influencia na área de detecção.



Figura 4.8: Controle de robô com VLC. [49]

#### 4.3.9 Conexão de brinquedos com VLC

Em [50] é mostrado como a comunicação por luz visível pode ser utilizada para conectar brinquedos a *smartphones*, melhorando a experiência do usuário. Utiliza-se o LED da câmera do celular para transmitir e receber dados (figura). A taxa de dados possível em ambas as direções é de alguns bits por segundo, o que é suficiente para aplicações de brinquedo, de forma geral. A principal vantagem do VLC nesse cenário é a facilidade de uso, pois, sem qualquer autenticação, e apenas apontando a luz para o brinquedo, o brinquedo pode

ser reconfigurado de modo que o padrão de jogo possa evoluir ao longo do tempo. A conexão do LED com o *smartphone* pode ser usado para transmitir pontos de localização para a realidade aumentada ou deixar o telefone tocar sons durante o jogo. Como os usuários podem ver onde a luz é dirigida, escutas podem ser evitadas, permitindo que o usuário controlar a direção do feixe de luz.



Figura 4.9: Uso de LEDs para conexão de brinquedos com smartphone.

# Conclusões

Foi apresentado neste trabalho o conceito de Visible Light Communications, agregando-se informações de diversos artigos científicos com o que há de recente no VLC, dessa forma foram descritas as suas aplicações, vantagens, desvantagens e suas possibilidades.

A iluminação em ambientes *indoor* e *outdoor* em pouco tempo será dominada pelos LEDs, dado o advento dessa tecnologia, a cada dia com menor custo. Foi verificado que o LED possui a capacidade de ligar e desligar rapidamente, o que permite seu uso na comunicação com luz visível. Ao se unir a grande disponibilidade do LED e suas características, a Visible Light Communication se torna extremamente promissora para o futuro. O VLC oferece muitas vantagens dadas suas diversas possibilidades de utilização e superação de limitações da transmissão por radiofrequência, como é o caso da comunicação em aviões e a geolocalização em ambientes fechados. Apesar de possuir desvantagens, não são grandes limitantes do uso dessa tecnologia.

Na discussão também foi definida a arquitetura de um sistema de transmissão VLC, onde foi explicado o porquê do LED ser o transmissor ideal para esta tecnologia, as técnicas de modulação, em especial o OFDM e sua adaptação para este tipo de transmissão, pois deve ser assegurado o envio de dados reais, pela simetria hermetiana. Ainda foram definidos os tipos de ruídos que influenciam a qualidade da comunicação.

A comunicação por luz visível hoje já consegue taxas de 3 Gbps utilizando modulações e codificações mais complexas. Para o futuro, a Visible Light Communication é um grande promissor para o 5G.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KOMINE, T.; NAKAGAWA, M. Fundamental Analysis for Visible- Light Communication System using LED Lights. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, v. 50, n. 1, p. 100 107, Feb 2004. ISSN 0098-3063.
- [2] ONDAS Eletromagnéticas. In: . [s.n.]. Disponível em: <<http://luztecnologiaearte.weebly.com/luz-natural-e-luz-cecircnica.html>>.
- [3] VEHICLE & TRANSPORTATION. In: . [s.n.]. Disponível em: <<http://visiblelightcomm.com/top-10-visible-light-communications-applications/>>
- [4] POHLMANN, C. Visible Light Communication. In: NOTES OF SEMINAR KOMMUNIKATIONS STANDARDS IN DER MEDIZINTECHNIK. [S.l.: s.n.], 2010.
- [5] BOUCHET, O. Free-Space Optics Propagation and Communication. França. ISTE Ltd. 2006.
- [6] BLOEM, J.-W. van et al. Spectrum Utilization and Congestion of IEEE 802.11 Networks in the 2.4 Ghz ISM Band. Journal of Green Engineering, River Publishers, v. 2, n. 4, p. 401 430, July 2012. Disponível em: <<http://doc.utwente.nl/81459/>>.
- [7] CONTE, A. Power Consumption of Base Stations. In: . [S.l.]: TREND plenary meeting, 2012.
- [8] FUJIMOTO N.; MOCHIZUKI H. 477 Mbit/s visible light transmission based on OOK-NRZ modulation using a single Commercially Available Visible LED and a practical LED Driver with a pre-emphasis circuit. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE AND EXPOSITION AND THE NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE (OFC/NFOEC), Anaheim, California, USA, 2013, p. 1-3.
- [9] KHALID, A.M. et al. 1-Gb/s Transmission over a Phosphorescent White LED by using rate- adaptive Discrete Multitone Modulation. Photonics Journal, IEEE, v. 4, n. 5, p. 1465-1473, Oct 2012. ISSN 1943-0655.
- [10] KOTTKE, C. et al. 1.25 Gbit/s Visible Light WDM Link based on DMT Modulation of a Single RGB LED Luminary. In: EUROPEAN CONFERENCE AND EXHIBITION ON OPTICAL COMMUNICATION. Optical Society of America, 2012.p.We.3.B.4.Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ECEOC-2012-We.3.B.4>>.

- [11] COSSU, G. et al. 3.4 gbit/s Visible Optical Wireless Transmission based on RGB LED. *Opt. Express*, OSA, v. 20, n. 26, p. B501-B506, Dec 2012. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-20-26-B501>>.
- [12] SCHUBERT, E. Light-Emitting Diodes. Cambridge University Press, 2006. (Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering). ISBN 9781139455220. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=0H4bWIpaXb0C>>.
- [13] SZE, S.; NG, K. Physics of Semiconductor Devices. Wiley, 2006. ISBN 9780470068304. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=o4unkmHBHb8C>>.
- [14] PINTO, L. E.; ALBUQUERQUE, C. P. A Técnica de Transmissão OFDM. *Revista Científica Periódica - Telecomunicações*, v. 5, n. 1, 2002.
- [15] ROCHA, E.; SILVA, L. A. J. Implementação em VHDL de um Modem OFDM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBrT'08, 26., 2008. RIO DE JANEIRO, RJ.
- [16] BARROS, B. O.; ROLIM, F. A. S. Comunicação por Luz Visível e Suas Aplicações. 2011.
- [17] SOUZA, F. J.; PINTO, M. M. J. Evolução dos códigos detectores e corretores de erro de bit. 2005.
- [18] ROCHOL, J. Comunicação de Dados - Vol. 22. Rio Grande do Sul. Bookman Companhia Editora LTDS. 2012.
- [19] AFGANI, M. et al. Visible Light Communication using OFDM. In: TEST BEDS AND RESEARCH INFRASTRUCTURES FOR THE DEVELOPMENT OF NETWORKS AND COMMUNITIES, 2006. TRIDENTCOM 2006. 2nd International Conference on. [S.l.: s.n.], 2006. p. 6 pp. 134.
- [20] POPOOLA, W. Subcarrier Intensity Modulated Free-Space Optical Communication Systems. Tese (Doutorado) - Northumbria University, 2009.
- [21] RAJAO, D. G. Descrição e Implementação de um Simulador de Enlace VLC. 2012.
- [22] JUNIOR, C. H. Comunicação de Dados utilizando Luz Visível. 2011. Disponível em: <<http://www.lacop.uff.br/wp-content/uploads/2014/08/HelioCoelhoJunior.pdf>>
- [23] PANG, G. et al. LED Traffic Light as a Communications Device. In: Proceedings 1999 IEEE/IEEE/JSAP International Conference on Intelligent Transportation System, IEEE, p. 788-793, 1999. DOI: 10.1109/ITSC.1999.821161
- [24] TANAKA, Y. et al. Wireless Optical Transmissions with white colored LED for Wireless Home Links. In: Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. PIMRC 2000, IEEE, p. 1325-1329, 2000. DOI: 10.1109/PIMRC.2000.881634
- [25] Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, 2011. DOI: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195

- [26] WANG Y. et al. 3.25-Gbps visible light communication system based on single carrier frequency domain equalization utilizing an RGB LED. In: Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), IEEE, p. 1-3, 2014. DOI: 10.1364/OFC.2014.Th1F.1
- [27] HUANG X. et al. A Gb/s VLC Transmission Using Hardware Preequalization Circuit. In: Photonics Technology Letters, vol. 27, no. 18, p. 1915-1918, 2015. DOI: 10.1109/LPT.2015.2445781
- [28] VUCIC J. et al. 803 Mbit/s Visible Light WDM Link based on DMT Modulation of a Single RGB Led Luminary. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE AND EXPOSITION AND THE NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE (OFC/NFOEC), Los Angeles, USA, 2011, p. 1-3.
- [29] AZHAR A. et al. A gigabit/s indoor Wireless Transmission using MIMO-OFDM Visible Light Communications, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 25, no. 2, p. 171-174, 2013.
- [30] ZHANG S. et al. 1.5 Gbit/s multi-channel Visible Light Communications using CMOS-controlled GaN-based LEDs," Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 8, p. 1211-1216, 2013.
- [31] FUJIMOTO N; MOCHIKUZI H. 614 mbit/s OOK-based transmission by the duobinary technique using a single commercially available Visible LED for high-speed Visible Light Communications. In: EUROPEAN CONFERENCE AND EXHIBITION ON OPTICAL COMMUNICATION (ECEOC). Amsterdam Netherlands: Optical Society of America, 2012.
- [32] LANGER, K.-D. et al. Exploring the Potentials of Optical-Wireless Communication using White LEDs. In: TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), 2011. 13th International Conference on. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1-5. ISSN 2161-2056.
- [33] HECHT J. Changing the lights: Are LEDs ready to become the market standard?, Optics and Photonics News, vol. 23, no. 3, p. 44-50, 2012.
- [34] ELGALA H. et al. OFDM Visible Light Wireless Communication Based on White LEDs. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, Dublin, 2007, p. 2185-2189. DOI: 10.1109/VETECS.2007.451
- [35] TSONEV D. et al. A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride  $\mu$ LED. Photonics Technology Letters, vol. 26, no. 7, p. 637-640.
- [36] GHASSEMLOOY Z. Oled-based Visible Light Communications. In: IEEE PHOTONICS SOCIETY SUMMER TOPICAL MEETING SERIES, Seattle, Washington, USA, 2012, p. 102-104.
- [37] KELLY A. et al. High-speed GaN micro-LED arrays for Data Communications. In: 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), Coventry, UK, 2012, p. 1-5.
- [38] LANGER K, et al. Advances and Prospects in High-Speed Information Broadcast using Phosphorescent White-Light LEDs. In: 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), Azores, Portugal, 2009, p. 1-6.



- [39] IEEE 802.15 WPAN TM 15.7 Revision: Short-Range Optical Wireless Communications Task Group (TG 7r1). Disponível em:  
<[http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802\\_15%20WPAN%2015\\_7%20Revision1%20Task%20Group.htm](http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802_15%20WPAN%2015_7%20Revision1%20Task%20Group.htm)>
- [40] COLE M.; DRISCOL T. The Lighting Revolution: If We Were Experts Before, We're Novices Now. *Industry Applications*, vol. 50, no 2, 2013, p. 1509-1520.
- [41] RAVAZI B. *Fundamentals of Microelectronics*, 1<sup>st</sup> edition, Wiley, 2006. 883p.
- [42] Philips Hue. 2014. Disponível em: <<http://www2.meethue.com/en-us/>>
- [43] LIM S., Entertainment Lighting Control Network Standardization to Support VLC Services, *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, p. 42-48, 2013.
- [44] SINDHUBALA K.; VIJAYALAKSHMI B. Ecofriendly Data Transmission in Visible Light Communication. In: *COMPUTER, COMMUNICATION, CONTROL AND INFORMATION TECHNOLOGY (C3IT)*, Hooghly, Índia, 2015, p. 1-4.
- [45] KAYS R. Visible light communication using TV displays and video cameras, *CONSUMER ELECTRONICS (ICCE)*, Las Vegas, USA, 2015, p.554-555.
- [46] OSSEIRAN A. Mobile and Wireless Communications system for 2020 and beyond (5G). In: *RESEARCH VIEWS ON IMT BEYOND 2020*, Vietnam, 2014.
- [47] WANG C. et al. Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks. *IEEE Communications Magazine*, vol 52, no 2, 2014, p.122-130.
- [48] IWASAKI S. et al. Visible Light Road-To-Vehicle Communication Using High-Speed Camera. In : *INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM*, Eindhoven , 2008
- [49] LIU X. et al. Basic Study on Robot Control in an Intelligent Indoor Environment using Visible Light Communication. In: *IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SIGNAL PROCESSING*, Budapest, 2009.
- [50] CORBELLINI G et al. Connecting Networks of Toyss and Smartphones with Visible Light Communication, *IEEE Communications Magazine*, vol.57, no7, p.72-78, 2014.
- [51] LOAIZA J. Brief review and main issues of Li-Fi. In: *ANDESCON*, Cochabamba, 2014