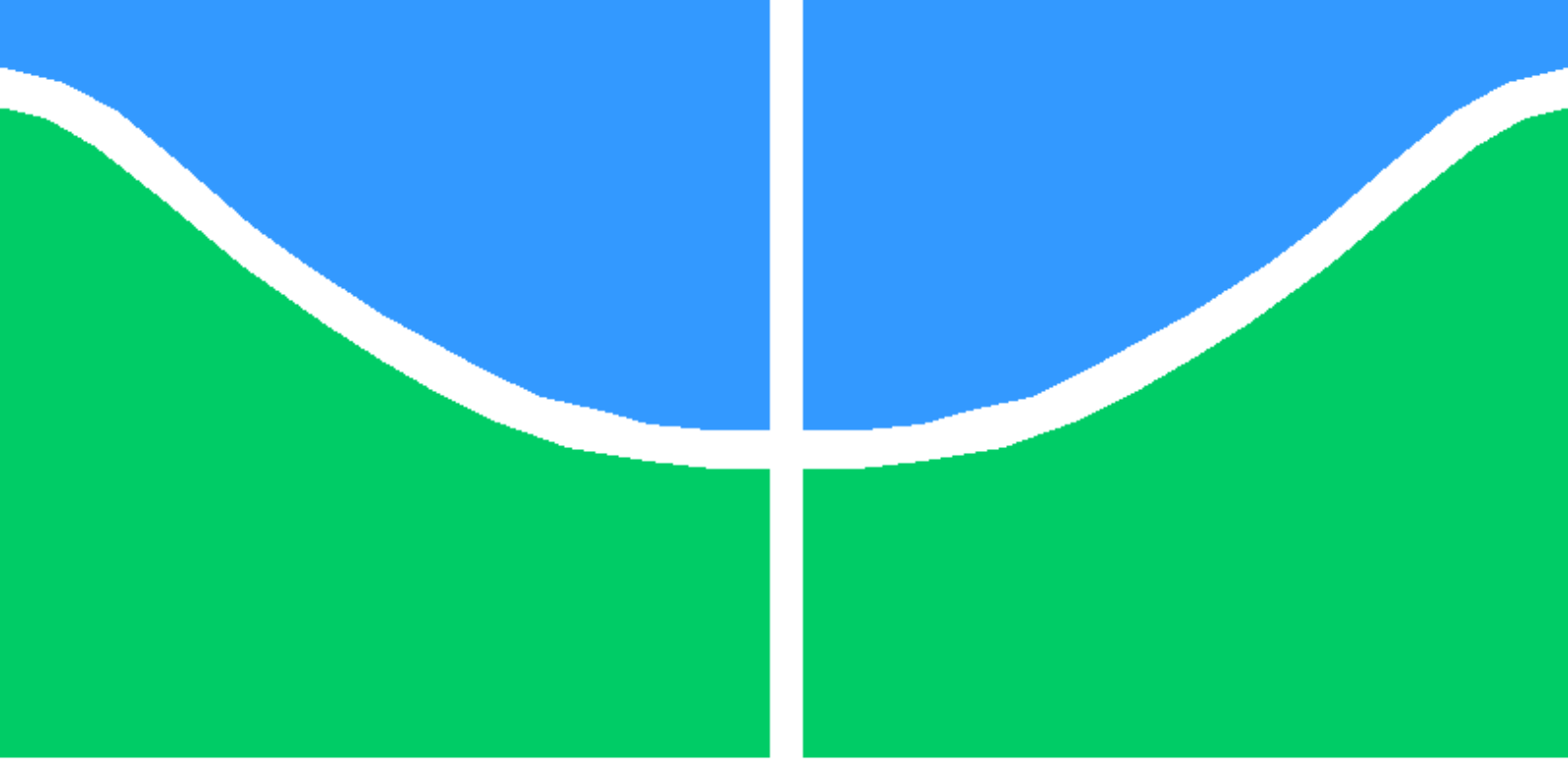




TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Descrição e Implementação de
um Simulador de Enlace VLC

Gabriel Damázio Rajão

Brasília, setembro de 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Descrição e Implementação de
um Simulador de Enlace VLC

Gabriel Damázio Rajão

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

Banca Examinadora

Prof. Leonardo Aguayo, FGA/UnB _____
Orientador

Prof. Alexandre Ricardo Soares Romariz, _____
ENE/UnB
Examinador interno

Prof. André Noll Barreto, ENE/UnB _____
Examinador interno

Agradecimentos

Agradeço aos colegas de curso que durante essa etapa da minha vida estiveram ao meu lado mesmo em tempos de dificuldade, aos meus pais que acreditaram no meu potencial e se esforçaram para nunca me deixar faltar nada, aos professores que me cobraram severamente para que me tornasse cada vez melhor e, acima de todos, a Deus, por ter me guiado nesse caminho tão glorioso e ter permitido que se completasse mais esse desafio em minha vida.

Gabriel Damázio Rajão

RESUMO

Este trabalho foi elaborado para detalhar um simulador de transmissão de dados através da iluminação difusa. Para tal se faz necessário apresentar a motivação do trabalho e explicar conceitos relevantes para o bom entendimento. Com os conceitos esclarecidos, é feita a modelagem teórica dos parâmetros envolvidos, levando em conta os conceitos explicados anteriormente e, após essa modelagem, o simulador é apresentado. A validade dos parâmetros e resultados teóricos é confirmada logo após pela parte experimental, que testa os valores teóricos empiricamente. Na sequência são feitos alguns cálculos para mostrar, dependendo dos parâmetros escolhidos, qual a capacidade do sistema de transmissão simulado. A possibilidade de novas pesquisas na área é explorada nas conclusões do trabalho, indicando pontos que podem servir como base para estudos futuros que utilizem como base o mesmo simulador.

ABSTRACT

This paper was elaborated to detail a simulator of data transmission through diffuse lighting. For this purpose it is necessary to present the motivation of the paper and explain relevant concepts for better understanding. With the concepts explained a theoretical modeling of the involved parameters considering the concepts previously explained is made and after this the simulator is presented. The validity of the parameters and theoretical results is confirmed by the following experimental part, which empirically tests the theoretical values. Furthermore some calculations are made to show depending on the parameters chosen the capability of the simulated transmission system. The possibility of new research in the area is explored in the conclusions of the work by indicating points that can be used as a basis for future studies based on the same simulator.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3	DESENVOLVIMENTOS RECENTES	3
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO	3
2	CONCEITOS BÁSICOS DE OFDM, RADIOMETRIA E FOTOMETRIA	4
2.1	TÉCNICAS DE MULTIPLEXAÇÃO EM OFDM E O-OFDM	4
2.1.1	MOTIVAÇÕES PARA ESCOLHA DA OFDM	8
2.2	RADIOMETRIA E FOTOMETRIA	9
2.2.1	RADIOMETRIA	10
2.2.2	FOTOMETRIA	11
2.2.3	FONTES PONTUAIS	12
2.2.4	FONTES EXTENSAS	13
2.2.5	IRRADIÂNCIA DE UMA IMAGEM	14
3	MODELAGEM SIMPLIFICADA DE UM SISTEMA VLC	16
3.1	MODELAGEM DO AMBIENTE	16
3.2	MODELAGEM DA INTERFERÊNCIA	17
3.3	MODELAGEM DO LED	19
3.4	MODELAGEM DO ENLACE	22
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	27
4.1	EXPERIMENTOS REALIZADOS	27
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DOS INTERFERIDORES	27
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO LED TRANSMISSOR	28
4.1.3	SUPERPOSIÇÃO	29
4.2	CÁLCULO DA SNR EXPERIMENTAL	30
4.3	ESTUDO DE CASO	31
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

ANEXOS.....	35
I C3DIGO UTILIZADO PARA SIMULA33O EM MATLAB - ILUMINA33O.....	36
II C3DIGO UTILIZADO PARA SIMULA33O EM MATLAB - APROXIMA33O DAS CUR- VAS DO LED	39
III C3DIGO UTILIZADO PARA SIMULA33O EM MATLAB - O-OFDM UTILIZANDO LED.....	41
IV DATASHEET DO LED MODELO FD-5TW-2 DA FEDY TECHNOLOGY	45

LISTA DE FIGURAS

1.1	Espectro de multiplexações TDM WDM e OFDM, adaptado de [1].....	2
2.1	Transmissor OFDM.	5
2.2	OFDM retangular no domínio do tempo e da frequência, adaptado de [2].	5
2.3	Curva suavizada da interpolação de componentes.....	6
2.4	receptor OFDM.	6
2.5	Banda economizada em relação à FDM, adaptado de [3].....	8
2.6	Vantagens da subdivisão em bandas, adaptado de [4, 5].....	8
2.7	Interferência Intersimbólica e Extensão cíclica do símbolo OFDM, adaptado de [6, 7].	9
2.8	Emissão diferencial de fonte pontual e extensa [8].	10
2.9	Curva de eficiência luminosa relativa ao olho humano, adaptado de [9].	11
2.10	Superfície diferencial emissora LdS.....	14
3.1	Distribuição de luminárias na sala do exemplo.....	16
3.2	Esquema de emissão, recepção e interferência.	17
3.3	Resposta de um pulso de luz, adaptado de [10].	17
3.4	Irradiância em pontos diferentes da sala (valores da Tabela 3.1).....	19
3.5	Curvas fornecidas pelo fabricante e geradas pelo MATLAB.	20
3.6	Característica não linear de transmissão do LED, adaptado de [11].	21
3.7	Tratamento do simulador sobre o sinal de entrada.....	22
3.8	Resultado da simulação para região linear.	23
3.9	Sinal distorcido pelo LED.	24
3.10	Primeiro resultado da simulação para sinal distorcido (aproximação=0 V).	26
3.11	Segundo resultado da simulação para sinal distorcido (aproximação=1.4 V).....	26
3.12	Terceiro resultado da simulação para sinal distorcido (aproximação=2.8 V).....	26
4.1	Luxímetro analógico.....	27
4.2	Perfil lateral de Irradiância na sala.....	28
4.3	Irradiância do LED por distância.....	29
4.4	SNR do LED pela distância.....	30
4.5	Vetor de LEDs emissor, retirado de [12].	30

LISTA DE TABELAS

2.1	Medidas radiométricas e fotométricas mais importantes	12
3.1	Parâmetros da simulação	18
3.2	Valores fornecidos pela FEDY Technology	22
4.1	Distância limite para transmissão a uma BER máxima de 10^{-4}	31

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	$[m^2]$
S	Área	$[m^2]$
I	Intensidade radiante	$[W/sr]$
L	Radiância	$[W/m^2sr]$
E	Irradiância	$[W/m^2]$
f	Frequência	$[Hz]$
T	Período	$[s]$
R	Raio	$[m]$
Q	Energia radiante	$[J]$
M	Emitância	$[W.m^{-2}]$
D	Diâmetro	$[m]$

Símbolos Gregos

ϕ	Potência radiante	$[W]$
Ω	Ângulo sólido	$[sr]$
θ	Ângulo	$[graus]$
λ	Comprimento de onda	$[m]$
ν	Frequência	$[Hz]$

Subscritos

e	Energia
v	Visual
c	Portadora (carrier)

Grupos Adimensionais

n	Índice do somatório
N	Número total de subportadoras
k	Índice do somatório
G_k	Componente do sinal transmitido
g_n	N-ésimo subsinal

Siglas

4G	Quarta Geração
ADC	Conversor Analógico para Digital (Analog to Digital Converter)
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Taxa de Erro de Bit (Bit Error Rate)
DAC	Conversor Digital para Analógico (Digital to Analog Converter)
DAB	Radiodifusão de Áudio Digital (Digital Audio Broadcasting)
DC	Corrente Contínua (Direct Current)
DSP	Processamento Digital de Sinal (Digital Signal Processing)
DSL	Linha Digital de Assinante (Digital Subscriber Line)
DTV	Televisão Digital (Digital Television)
DVB	Radiodifusão de Vídeo Digital (Digital Video Broadcasting)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transfer)
ICI	Interferência entre Portadoras (Inter Carrier Interference)
IFFT	Transformada Rápida de Fourier Inversa (Inverse Fast Fourier Transform)
ISI	Interferência Intersimbólica (Intersymbol Inteference)
LED	Diodo Emissor de Luz (Light Emitting Diode)
OFDM	Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
O-OFDM	Multiplexação Ótica por Divisão de Frequências Ortogonais (Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
PAR	Razão Pico-Média (Peak to Avarage Ratio)
PSK	Modulação por Deslocamento de Fase (Phase Shift Keying)
SBTVD	Sistema Brasileiro de TV Digital
QAM	Modulação de Amplitude em Quadratura (Quadrature Amplitude Modulation)
SSL	Iluminação de Estado Sólido (Solid State Lightning)
SNR	Relação Sinal Ruído (Signal Noise Ratio)
ToV	Tensão de acionamento (ToV - Turn On Voltage)
VLC	Visible Light Communication (Comunicação por Luz Visível)

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta a contextualização do trabalho, os objetivos e, ao final, a disposição de cada assunto ao longo do texto.

1.1 Motivação

A emissão de luz em estado sólido (SSL - Solid State Lightning) observada pela primeira vez em 1907 por Henry Joseph Round ao passar corrente em um cristal de Carbetto de Silício (SiC) [13, 14] já chegou a ser considerada uma fonte ineficiente de luz nas décadas de 30 a 50 após a invenção do primeiro Diodo Emissor de Luz (LED - Light Emitting Diode) por Oleg Vladimirovich Losev [13, 14] e estava fadada a ser deixada de lado nas pesquisas sobre emissão de luz [14]. Ao contrário das expectativas, a tecnologia de SSL praticamente esquecida durante duas décadas [13] se desenvolveu tendo grandes contribuições no início da década de 60. Embora registros mostrem que em 1955 já se tinha conhecimento de ligas de arsênico emitindo radiações na faixa do infravermelho [15], somente no ano de 1962 os pesquisadores americanos Bob Biard e Gary Pittman publicaram que haviam descoberto que o diodo de arsênico de gálio (GaAs) emitia radiações na faixa do infravermelho quando submetido a um campo elétrico [16], recebendo assim as patentes pela descoberta. Ainda em 1962, Nick Holonyak Jr. considerado atualmente o "pai" do LED [14], conseguiu desenvolver o primeiro diodo voltado especificamente para emissão de luz [14, 13] abrindo assim caminho para as pesquisas na área que viriam a aperfeiçoar o LED e torná-lo o que é hoje.

A produção do LED se torna cada vez mais barata. Quando se iniciou a produção em massa, custava US\$200,00 por unidade em 1968 [17]. Nos anos 70 o sucesso da produção comercial já permitia produzir LEDs a um preço de menos de US\$0,05 por unidade [17]. Atualmente o custo por unidade já se encontra abaixo de US\$0,01 para alguns modelos e as aplicações vêm se diversificando cada vez mais. As mais usuais são iluminação, display de aparelhos digitais, sinalizadores de semáforos, painéis eletrônicos, flashes de câmeras, entre outros. O LED comparado a outros tipos de fontes de luz possui alta qualidade e já está substituindo as fontes incandescentes e fluorescentes porque sua eficiência energética média atual é de 30% e já supera a da luz incandescente (que é de 5%) e a da lâmpada fluorescente (que é de 20%), dissipa menos calor que as outras fontes para uma mesma luminosidade e é mais resistente a impactos por ser mais robusta, além de ser menor [18, 19, 20].

As fontes de iluminação de estado sólido possuem resposta a variação de corrente rápida o suficiente para transmitir sinais de alta frequência modulados em intensidade, o que não era praticável utilizando lâmpadas fluorescentes ou incandescentes. Em decorrência disso e dos constantes avanços na tecnologia de diodos emissores de luz, os LEDs podem constituir a base de sistemas de comunicação sem fio de altas taxas de transmissão de dados.

A partir dessa nova possibilidade é criado um canal de comunicação utilizando a própria iluminação ambiente, gerando assim uma nova forma de comunicação em locais onde a comunicação por radiofrequência não pode ser empregada, além da possibilidade de substituí-la ou até mesmo complementá-la [10].

As técnicas de comunicações sem fio vêm sofrendo constante evolução para suprir a demanda cada vez mais exigente, não só de número de usuários cada vez maior, como a de aparelhos modernos que trabalham com taxas de transmissão cada vez maiores. Quanto maior a taxa de transmissão e número de conexões simultâneas desejadas, maior deve ser a largura de banda ocupada por um sistema de transmissão [21]. Alternativas que foram elaboradas no passado para solução parcial do problema como a divisão no tempo (TDM - Time Division Multiplexing) e/ou no comprimento de onda (WDM - Wavelength Division Multiplexing / OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) estão representadas na Figura 1.1. É necessário abordar novas táticas para o problema que se forma devido às limitações tecnológicas como banda disponível, capacidade de processamento ou potência de sinal emitido à um custo praticável, por exemplo.

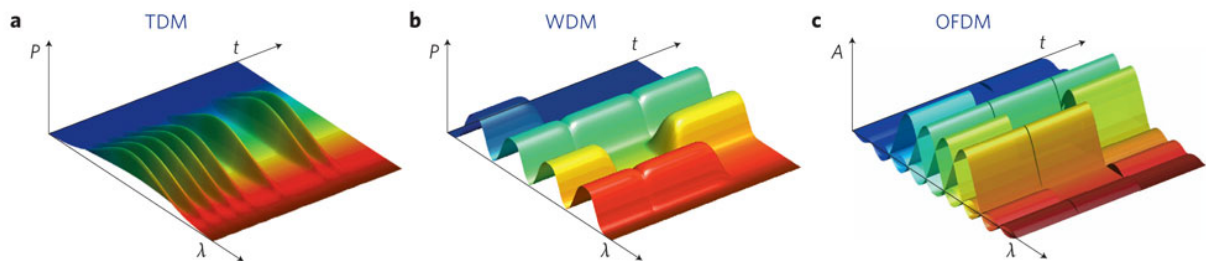


Figura 1.1: Espectro de multiplexações TDM WDM e OFDM, adaptado de [1].

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho apresenta um estudo sobre as características da emissão de luz de maneira difusa e em ambiente fechado, para reunir informações e elaborar um modelo do meio com enfoque na possibilidade de transmissão de informações embutidas na luz, tornando possível a implementação de um simulador capaz de testar os diversos parâmetros descritos ao longo do texto. Uma descrição completa dos parâmetros englobados pelo simulador elaborado é apresentada para o entendimento dos resultados, que devem, ao final do texto, ser comparados com resultados de experimentos realizados visando validar os resultados do simulador elaborado.

1.3 Desenvolvimentos recentes

Na Universidade de Brasília os alunos Bruno Oliveira Barros e Felipe Augusto Soares Rolim começaram a estudar o tema comunicação por luz visível com enfoque em suas aplicações [22]. O estudo destes alunos levou em consideração modelos prontos de canal e de curvas do LED desenvolvidos em [10] e [11]. Este trabalho tem o objetivo de simular o enlace utilizando dados fornecidos por fabricantes para ser mais próximo à realidade. Os resultados obtidos são comparados aos de [23] e [12] de grupos da International University Bremen que implementaram o enlace em kits de processamento digital de sinais (DSP - Digital Signal Processing).

1.4 Estrutura do texto

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica de tópicos pertinentes para um bom entendimento do trabalho. Em seguida, o Capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do projeto e apresenta os resultados das simulações elaboradas de acordo com o modelo empregado. Resultados experimentais são comparados com teóricos e discutidos no Capítulo 4, seguido das conclusões no Capítulo 5. Os Anexos contêm material complementar utilizado para originar dados empregados na metodologia apresentada.

Capítulo 2

Conceitos Básicos de OFDM, Radiometria e Fotometria

Este capítulo aborda temas relevantes para o entendimento do projeto de um enlace VLC utilizando LEDs e O-OFDM

2.1 Técnicas de multiplexação em OFDM e O-OFDM

OFDM (Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais)

A multiplexação em OFDM é uma das técnicas mais utilizadas atualmente, seja em meios cabeados (wireline) como utilizado pelo modem de acesso por Linha Digital de Assinante (DSL - Digital Subscriber Line), seja em meios sem fio (wireless) como nos protocolos IEEE 802.11 a, g, n, em Radiodifusão de Vídeo Digital (DVB - Digital Video Broadcasting) e de Áudio Digital (DAB - Digital Audio Broadcasting) e na tecnologia celular 4G [24].

A OFDM é uma evolução da técnica convencional FDM em que no lugar de bandas de guarda para evitar interferência entre portadoras (ICI - Inter Carrier Interference) na recepção do sinal, utiliza-se uma particular sobreposição espectral de subportadoras ortogonais. A OFDM foi desenvolvida para se trabalhar com as técnicas Modulação por Deslocamento de Fase (PSK - Phase Shift Keying) ou Modulação de Amplitude em Quadratura (QAM - Quadrature Amplitude Modulation). O sistema OFDM foi proposto em 1968 [25] e patenteado nos Estados Unidos em 1970, tendo sua primeira avaliação para aplicação da técnica OFDM para comunicações móveis em 1985 [26].

Estão representados nas Figuras 2.1 e Figura 2.4 respectivamente esquemáticos de um sistema de multiplexação e demultiplexação utilizando OFDM e uma explicação sobre a técnica passo a passo se dá adiante.

Ao receber um sinal serial em alta taxa a ser transmitido na entrada do dispositivo transmissor é interessante dividir a taxa de informação desse sinal em subsinais, pois com taxas menores reduzem-se erros de detecção no receptor devido à redução de interferência intersimbólica (ISI - Intersymbol Interference), dando mais confiabilidade para o sistema de transmissão. A primeira etapa do processo de transmissão então consiste em transformar esse sinal serial da entrada em

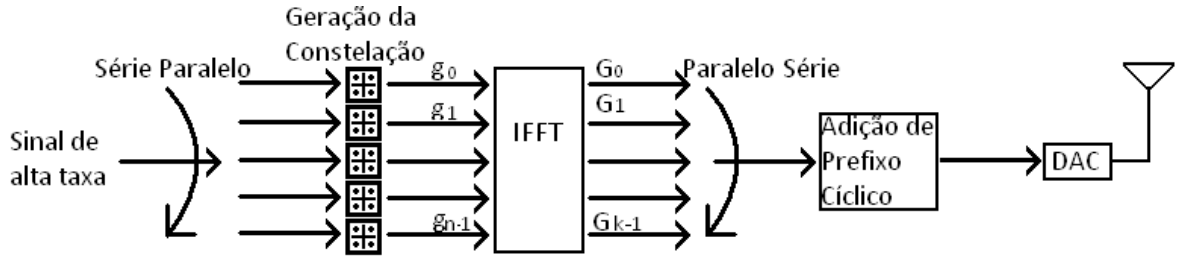


Figura 2.1: Transmissor OFDM.

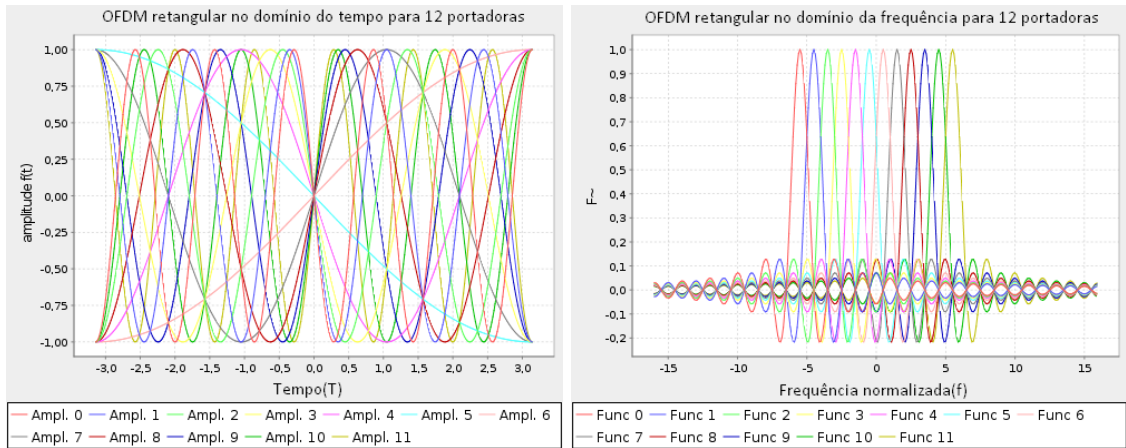
paralelo alocando-o em quantos subsinais forem desejados.

Os subsinais devem ser distribuídos na constelação escolhida, seja QAM ou PSK, a fim de se representar o que deve ser transmitido em símbolos que podem ser descritos por um número complexo.

Os símbolos provenientes da distribuição na constelação devem ser multiplicados pelas subportadoras ortogonais e somados a fim de se gerar as componentes do símbolo OFDM a ser enviado. Convenientemente a operação IDFT descrita por

$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g_n e^{j \frac{2\pi}{N} nk} \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.1)$$

em que N é o número de subdivisões do sinal original, faz exatamente a operação necessária com os símbolos da constelação, gerando assim as componentes a serem transmitidas. Para cada subsinal, proveniente da divisão do sinal original na etapa da transformação série-paralelo, existe uma componente por símbolo OFDM a ser transmitida. Essas componentes devem ser serializadas novamente para constituir o sinal a ser enviado. Componentes de um símbolo OFDM estão representadas no tempo na Figura 2.2(a) e na frequência na Figura 2.2 (b).



(a) OFDM no domínio do tempo

(b) OFDM no domínio da frequência

Figura 2.2: OFDM retangular no domínio do tempo e da frequência, adaptado de [2].

Para agregar mais confiabilidade ao sistema de transmissão cada símbolo é transmitido com um intervalo de guarda no tempo para evitar ISI. Contudo, se a fonte parasse de emitir sinal

durante um determinado período de tempo cíclico haveria perda de ortogonalidade na frequência caso haja multipercursos. Para contornar esse problema adiciona-se um prefixo cíclico a cada símbolo OFDM, repetindo o final do símbolo no seu início a cada ciclo.

O sinal que se forma após a serialização e adição de prefixo cíclico ainda é discreto no tempo e para tornar o sinal contínuo utiliza-se um Conversor Digital Analógico (DAC - Digital Analogic Converter). O resultado do processo para gerar um símbolo OFDM é apresentado na Figura 2.3.

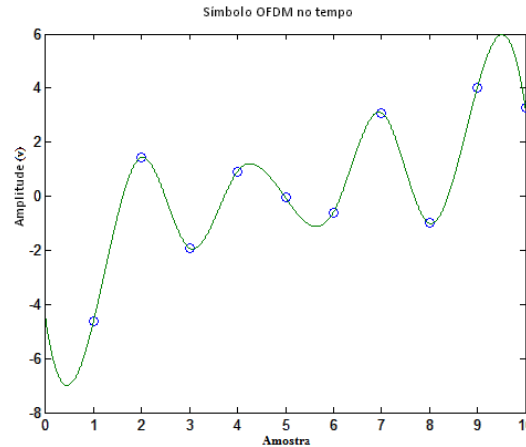


Figura 2.3: Curva suavizada da interpolação de componentes.

Caso a transmissão desejada seja em banda base, basta transmitir o sinal gerado após esse processo, porém levando em conta a simetria hermitiana que será explicada mais adiante. Caso seja necessário modular o sinal, deve-se multiplicá-lo por uma portadora de frequência f_c antes de transmiti-lo.

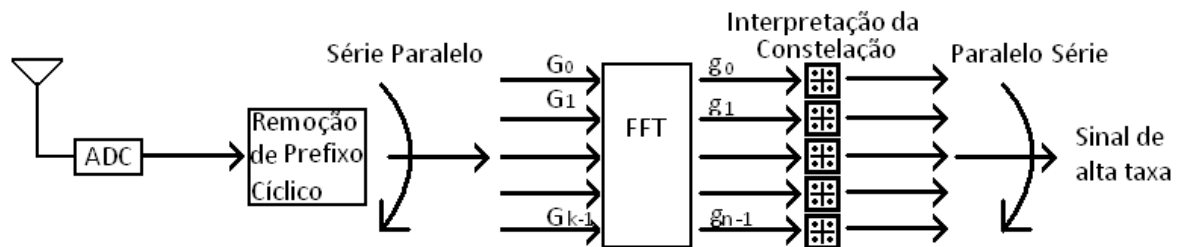


Figura 2.4: receptor OFDM.

O sinal transmitido deve receber um tratamento inverso no receptor, a fim de recuperar a mensagem enviada. Caso o sinal enviado no transmissor tenha sido modulado, deve-se demodulá-lo multiplicando o sinal recebido pela portadora de mesma frequência f_c e filtrando o sinal resultante, pois neste caso o espectro apresenta repetições do sinal transmitido na banda base e replicado em $2f_c$.

O sinal analógico obtido deve passar por um Conversor Analógico Digital (ADC - Analogic Digital Converter) para recuperar o formato digital que tinha antes de ser transmitido. O resultado dessa conversão analógica-digital representa a amostragem das componentes, o que equivale a recuperar as componentes que formaram o sinal no transmissor.

Com a recuperação das componentes originais transmitidas, a remoção dos prefixos cíclicos que se segue deve ser compatível com a adicionada na emissão, descartando-se as componentes que representam a cópia do final do símbolo OFDM a cada ciclo.

As componentes restantes em série devem ser paralelizadas novamente para receber tratamento análogo ao da transmissão. Utiliza-se convenientemente o algoritmo da DFT descrito por

$$g_n = \sum_{k=0}^{N-1} G_k e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.2)$$

em que N é o número total de subdivisões do sinal original, para extrair das subportadoras os números complexos que representam os símbolos das constelações PSK ou QAM, de acordo com o que foi selecionado no transmissor.

Após a FFT os subsinais de taxa reduzida são reconstruídos de acordo com a interpretação dos números complexos por constelações semelhantes às escolhidas na etapa de transmissão (PSK ou QAM).

Para a obtenção do sinal em alta taxa basta serializar novamente os subsinais provenientes das interpretações das constelações. Assim, o sinal de saída é, caso não haja erros na transmissão, fielmente igual ao sinal enviado.

O-OFDM

A Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais Óptica (O-OFDM - Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing) é semelhante à OFDM, porém em comunicações óticas têm-se certas restrições para trabalhar com o sinal. A frequência da luz emitida é, idealmente, constante e depende somente do material usado na construção do LED, ou seja, não conseguimos alterá-la. Por este motivo escolhe-se a intensidade como parâmetro variável para emitir a informação a partir da fonte de luz [27].

Ao se projetar um circuito para inserir uma determinada mensagem na variação de intensidade de uma fonte de luz, deve-se utilizar um sinal completamente real nos terminais dessa fonte. Utiliza-se uma técnica em conjunto com a IFFT para que toda informação contida na mensagem complexa vinda das constelações, na entrada da transformada, apareça com valores reais na saída. Essa técnica é um recurso da transformada que utiliza a mensagem de entrada refletida em $\frac{N}{2}$ com simetria hermitiana ($X_n = X_{N-n}^*$) dobrando o tamanho da mensagem a ser enviada porém transformando-a completamente em valores reais. Desta maneira perde-se metade da banda de frequência originalmente disponibilizada mas consegue-se que todos os valores na saída da transformada sejam reais.

O sinal transmitido pela técnica O-OFDM pode ser transmitido em banda base, logo após a conversão digital para analógica do sinal vindo da IFFT, ou modulado por uma portadora para levar o sinal da banda base para a faixa de frequência desejada.

2.1.1 Motivações para escolha da OFDM

Existem fortes motivos que levam à escolha da Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais como técnica para transmissão de dados, principalmente em meios sem fio.

Há economia de banda em relação a Multiplexação por Divisão de Frequências (FDM - Frequency Division Multiplexing) de aproximadamente 50%. Onde há subportadoras espaçadas por intervalos de guarda na FDM (Figura 2.5(a)) na OFDM existem subportadoras sobrepostas de maneira ortogonal (Figura 2.5(b)), isto é, as subportadoras são posicionadas de uma maneira peculiar tal que uma não interfira na outra. Um espaçamento espectral adequado faz com que o valor de uma determinada subportadora seja máximo quando todas as outras serão a menor possível, idealmente igual a zero.

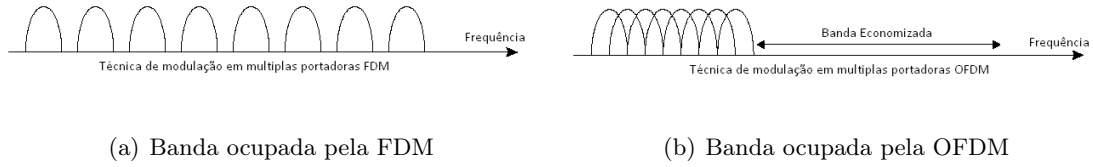


Figura 2.5: Banda economizada em relação à FDM, adaptado de [3].

Equalização mais rápida e de mais fácil implementação. Independente do tipo de interferência que a mensagem transmitida sofra, é muito mais rápido e prático equalizar diferentes subbandas com características específicas para cada uma que equalizar o canal para uma banda larga com diferentes interferências para cada faixa do espectro do sinal. A subdivisão da mensagem em diferentes bandas, como representado na Figura 2.6(a,b) também encontra problemas como interferência seletiva em determinadas frequências como na Figura 2.6(c), que pode vir a destruir o sinal por completo caso não seja tratada no receptor. No caso da OFDM a mensagem fica comprometida pelo fato de esta interferência ser capaz de eliminar uma determinada subportadora necessária para a OFDM.

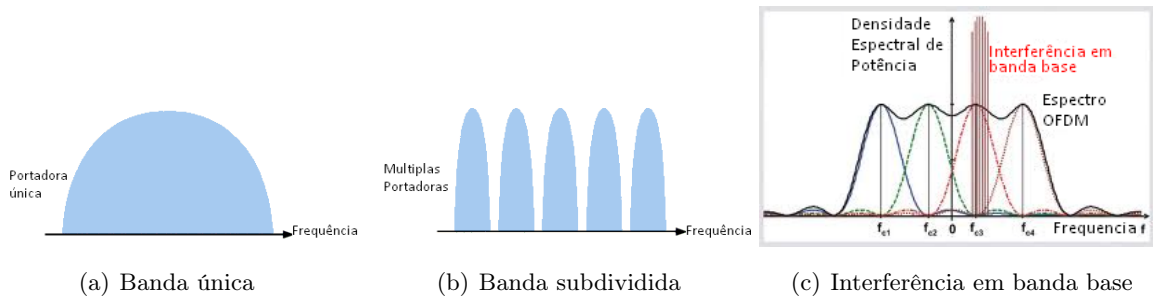


Figura 2.6: Vantagens da subdivisão em bandas, adaptado de [4, 5].

Técnicas como a utilização de intervalo de guarda tornam a OFDM ainda mais robusta. Esta técnica é utilizada para evitar interferência inter simbólica (ISI - Intersymbol interference), representada na Figura 2.7(a). Em outras multiplexações como FDM pode ser implementada simplesmente não transmitindo o sinal durante o intervalo de guarda, no entanto isso causaria perda de ortogonalidade na OFDM. Para resolver esse problema, estende-se o início do símbolo OFDM

enviado por um intervalo de guarda com valores iguais aos do final do mesmo símbolo, como representado na Figura 2.7(b). Desta maneira, não ocorre perda de ortogonalidade e a técnica se torna mais robusta à ISI.

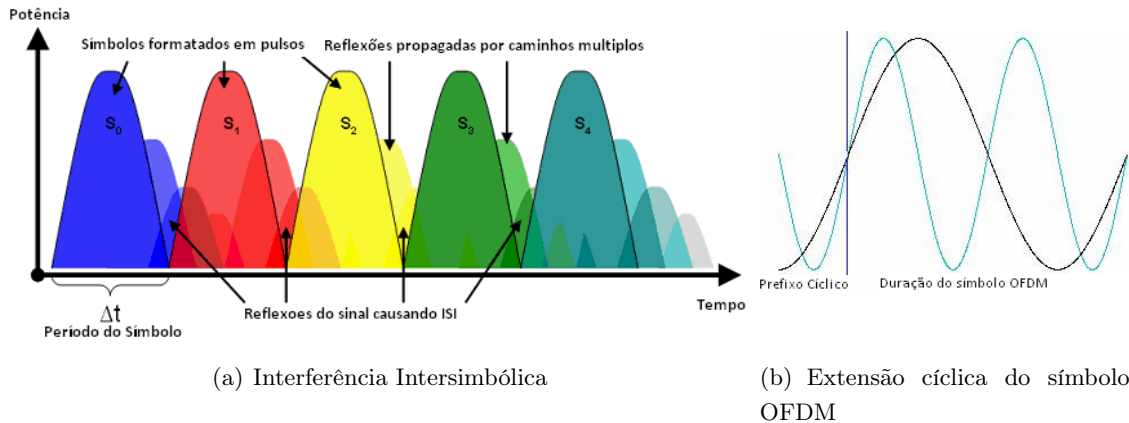


Figura 2.7: Interferência Intersimbólica e Extensão cíclica do símbolo OFDM, adaptado de [6, 7].

A existência de algoritmos que permitem a implementação a um custo reduzido. Utilizar a Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT - Inverse Fast Fourier Transform) e a Transformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform) permite respectivamente inserir e recuperar a mensagem embutida em cada subportadora sem a necessidade de osciladores coerentes para cada parte da mensagem original quando subdividida.

Para elaborar um modelo de como os raios de luz se propagam, será feito um estudo de simplificações possíveis a serem adotadas para criar um modelo de simulação relativamente próximo à realidade.

2.2 Radiometria e Fotometria

Embora há muito tempo já se tenha distinguido a diferença entre radiometria e fotometria ainda existe uma grande confusão no que se refere à definição de unidades, pois essas apresentam uma variedade enorme de conceitos. A fotometria estuda a propagação e medição da radiação visível e suas unidades, portanto suas medidas são relacionadas à capacidade da radiação ser detectada pelo olho humano. As radiações na faixa do infravermelho e ultravioleta têm potência luminosa idealmente igual a zero para a fotometria. A radiometria é um assunto mais amplo e estuda a propagação e medição das radiações de todas as faixas do espectro, visível ou não [8].

As unidades de fotometria são precisamente análogas às da radiometria e nos últimos anos tem-se feito um esforço para definir um conjunto de unidades específicas para cada vertente do estudo [8].

2.2.1 Radiometria

Para melhor compreensão das discussões feitas nesta seção é preciso definir as principais unidades utilizadas. As grandezas mais importantes são:

- ϕ Potência radiante [W];
- I Intensidade radiante [W/sr];
- L Radiância [W/m²sr];
- E Irradiância [W/m²];

onde a unidade [sr] (Estéreo-radianos) é o ângulo sólido calculado por $d\Omega = \frac{dA}{R^2}$ (sendo dA [m²] um elemento infinitesimal de área de uma esfera de raio R [m]).

A potência radiante diferencial $d\phi$ é a medida de potência que uma fonte emite, dada pela equação (2.3a), no caso de uma fonte pontual ou pela equação (2.3b), no caso de uma fonte extensa. A potência de uma fonte pontual se relaciona com a intensidade radiante I (termo reservado para fontes pontuais) enquanto a fonte extensa se relaciona com a radiância L .

$$d\phi = I d\Omega; \quad (2.3a)$$

$$d^2\phi = L dS \cos(\theta) d\Omega. \quad (2.3b)$$

O ângulo θ é o ângulo entre a normal à superfície emissora e o segmento que liga a superfície emissora ao elemento de área dA como pode ser visto na Figura (2.8). O termo $\cos(\theta)$ aparece em conjunto com a radiância L devido a inclinação da superfície emissora com relação a superfície irradiada, representando a área enxergada pela superfície irradiada analogamente à intensidade radiante da fonte pontual. A notação $d^2\phi$ se deve ao fato de a potência de um emissor extenso depender tanto de dS (que é um elemento infinitesimal da área da superfície emissora) quanto de $d\Omega$ (que é o ângulo sólido de emissão da fonte), representados na Figura (2.8b). A irradiância E é a potência total que chega à superfície irradiada por unidade de área, independe do ângulo θ de incidência, e pode ser calculada pela equação (2.4):

$$d\phi = E dA. \quad (2.4)$$

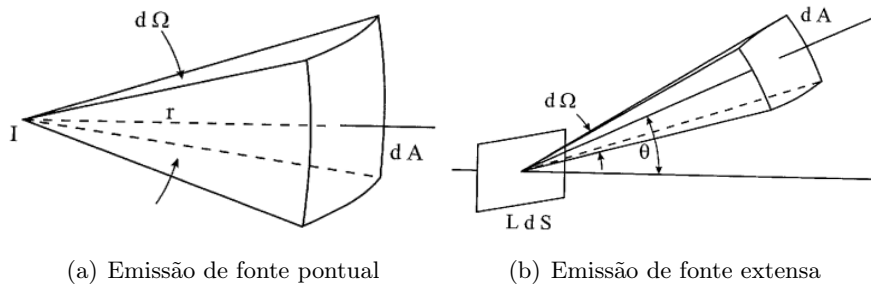


Figura 2.8: Emissão diferencial de fonte pontual e extensa [8].

Dessas principais grandezas derivam-se as demais. Dentre elas uma de grande importância é a Emitância M [W/m²] que representa a totalidade da potência emitida por uma superfície, sendo definida como a integral da radiância em todas as direções de emissão possíveis. Caso se queira obter a emitância para um determinado valor de frequência ou de comprimento de onda utiliza-se L_ν ou L_λ respectivamente em vez de L :

$$M = \int L d\Omega. \quad (2.5)$$

2.2.2 Fotometria

A fotometria é um caso específico da radiometria que estuda as ondas na faixa do espectro visível, isto é, que estão na faixa de frequências de aproximadamente 400 a 790 THz, correspondendo à faixa de comprimento de onda (λ) de 390 a 750 nm [10]. Os estudos da fotometria são importantes por exemplo para luminotécnica em que o brilho ou a cor das fontes de luz são variáveis importantes a serem consideradas.

Da necessidade de medidas que relacionem parâmetros da fonte com estímulos visuais foram definidas unidades para fotometria, semelhantes às da radiometria, baseadas na resposta do olho humano ao estímulo da luz. A potência visível foi definida em lúmen [lm] e não em watt [W] para indicar a percepção de brilho da luz. Caso seja necessário diferenciar potência luminosa de potência radiada, utiliza-se o subíndice v para visual ou e para energia [8].

A melhor resposta da visão ao brilho se dá em uma faixa próxima ao comprimento de onda de 555 nm (luz verde) na visão fotópica (com luminosidade suficiente para distinguir as cores), como pode ser visto na Figura(2.9). A relação entre o lúmen e o watt foi estabelecida de acordo com a

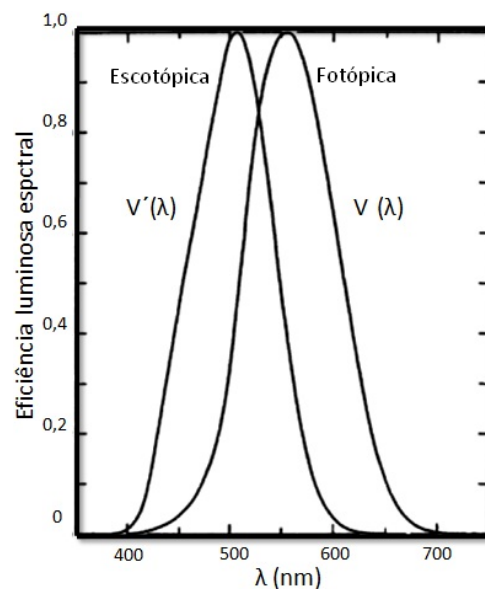


Figura 2.9: Curva de eficiência luminosa relativa ao olho humano, adaptado de [9].

resposta do olho à excitação eletromagnética de cada frequência. Para o maior valor, próximo de

$\lambda = 555 \text{ nm}$, definiu-se a sensação visual de 1 watt sendo igual a 683 lúmens [8].

$$E_{v(\lambda=555)} = (683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}). \quad (2.6)$$

Para todos os outros valores de λ a sensação visual produzida por 1 watt é aproximada pela multiplicação da irradiância total recebida E_e por 683 e pela eficiência luminosa do olho (V_λ) normalizada, como mostrado na equação (2.7) [8].

$$E_{v\lambda} = (683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1})V_\lambda. \quad (2.7)$$

Caso a emissão não seja monocromática o cálculo deve ser adaptado, motivado pela diferente eficiência luminosa do olho para cada comprimento de onda. Neste caso utiliza-se a expressão (2.8) no lugar de (2.7), onde $E_{e\lambda}$ é a irradiância recebida para cada λ [8].

$$E_v = 683 \int_{390}^{750} E_{e\lambda} V_\lambda d\lambda. \quad (2.8)$$

Para melhor entendimento do que foi discutido apresenta-se a seguir uma tabela com as medidas radiométricas e fotométricas mais importantes.

Tabela 2.1: Medidas radiométricas e fotométricas mais importantes

Símbolo (Unidades do SI)	Unidades Fotométricas	Unidades Radiométricas	Definição
ϕ	Potência Luminosa, lm	Potência Radiante, W	Potência total transmitida em todas as direções
I	Intensidade Luminosa, $\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$ (cd)	Intensidade Radiante, $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	Potência radiada por uma fonte pontual por ângulo sólido
L	Luminância, $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	Radiância, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	Potência radiada por unidade de área por ângulo sólido
E	Iluminância, $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ (lx)	Irradiância, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Potência total irradiada por área
Q	Energia Luminosa, lm.s	Energia Radiante, J(W.s)	Potência total transmitida vezes o tempo
M		Emitância, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Potência total transmitida em todas as direções por área

2.2.3 Fontes pontuais

Uma das técnicas para modelar fontes de luz é considerar a fonte muito pequena ou muito distante em relação à dimensão do sistema de modo a ser aproximada por pontos emissores de luz, ou fontes pontuais.

Para fontes de luz pontuais, utiliza-se a equação (2.3a) para calcular a potência total irradiada. Como para fontes pontuais a intensidade radiante I não varia com o ângulo de emissão ($I_\theta = I$) para toda a esfera de radiação, tem-se:

$$\begin{aligned}
\int d\phi &= \int I d\Omega \\
\phi &= \int I_\theta \frac{dA}{R^2} \\
\phi &= \frac{I}{R^2} \int dA \\
\phi &= \frac{I}{R^2} 4\pi R^2 \\
\phi &= 4\pi I.
\end{aligned} \tag{2.9a}$$

Considerando que a incidência da luz não seja perpendicular à superfície irradiada, adiciona-se um fator $\cos(\theta)$ para representar o valor aparente do ponto de vista da superfície irradiada. Utilizando a equação (2.4) e a equação (2.9) chega-se a

$$E = \frac{I}{R^2} \cos(\theta), \tag{2.10}$$

conhecida como *Lei do inverso do quadrado* [8]. A equação (2.10) diz que a potência total que chega à superfície irradiada (Irradiância) depende da intensidade radiante, do ângulo que a normal à superfície faz com a linha que liga a superfície à fonte e do quadrado da distância entre a fonte e a superfície.

2.2.4 Fontes extensas

Outra técnica para modelar fontes de luz é considerar que a fonte tenha uma determinada dimensão S , mas que ainda assim consiga irradiar igualmente para todos os pontos de um plano ($L_\theta = L$) a uma distância qualquer. Essa aproximação é a definição de uma fonte lambertiana [8].

Com auxílio da Figura 2.10 e a representação de uma fonte emissora diferencial dS , representada na Figura 2.8, utiliza-se a equação (2.3b) para calcular a potência total emitida por uma fonte extensa.

$$\begin{aligned}
dA &= 2\pi(R\sin(\theta))Rd\theta \\
d\Omega &= \frac{2\pi(R\sin(\theta))Rd\theta}{R^2} = 2\pi(\sin(\theta))d\theta \\
\int \int d^2\phi &= \int \int L dS \cos(\theta) (2\pi \sin(\theta) d\theta) \\
\int \int d^2\phi &= \int 2\pi L dS \int \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \\
\int d\phi &= \int \pi \sin^2(\theta_0) L dS \\
\phi &= \pi \sin^2(\theta_0) LS.
\end{aligned} \tag{2.11a}$$

Para a semi-esfera $\theta_0 = 90^\circ$, então

$$\phi = \pi LS. \quad (2.12)$$

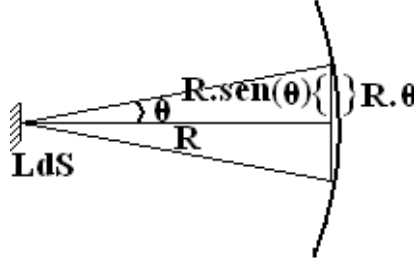


Figura 2.10: Superfície diferencial emissora LdS.

Considerando uma superfície circular A irradiada por uma superfície emissora perpendicular ao segmento que liga o ponto à superfície, segue da equação (2.11) e da equação (2.4), por simetria, que a irradiância é dada por

$$E = \frac{\pi LS \sin^2(\theta_0)}{A}, \quad (2.13)$$

onde θ_0 é o ângulo formato entre os limites da região circular irradiada e a fonte.

2.2.5 Irradiância de uma imagem

Ainda como forma de se modelar uma fonte, pode-se optar por considerar que a luz passe por uma lente antes de iluminar determinada superfície. Desta forma, para a superfície irradiada, a fonte de luz é aparentemente a própria lente.

Considerando uma superfície irradiada de área diferencial dA iluminada perpendicularmente por uma fonte que passa em uma lente circular de diâmetro D e distância focal R , utilizando as equações (2.4) e (2.3b) e o fato de que a iluminância aparente de um objeto extenso não muda ao passar por um conjunto de lentes, provado em [8], chega-se a

$$\begin{aligned} \int d^2\phi &= \int L dS \cos(\theta) d\Omega \\ d\Omega &= \frac{dA \cos(\theta)}{\left(\frac{R}{\cos\theta}\right)^2} \\ \int d^2\phi &= \int L dS \cos(\theta) \frac{dA \cos(\theta)}{\left(\frac{R}{\cos\theta}\right)^2} \\ d\phi &= L \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \frac{dA \cos^2(\theta)}{\frac{R^2}{\cos^2\theta}} \\ d\phi &= \frac{\pi L}{4} \frac{dA \cos^4(\theta)}{\frac{R^2}{D^2}} \\ E &= \frac{d\phi}{dA} \\ E &= \frac{\pi L}{4} \frac{\cos^4(\theta)}{\frac{R^2}{D^2}}, \end{aligned} \quad (2.14a)$$

conhecida como *Lei do cosseno à quarta* [8]. A equação (3.2) diz que a potência total que chega à superfície irradiada (Irradiância) depende da radiância, da relação entre a distância focal e diâmetro da lente e do ângulo que a normal à lente faz com a linha que liga a superfície irradiada e a lente.

Capítulo 3

Modelagem simplificada de um sistema VLC

Neste capítulo são feitas hipóteses para o sistema de transmissão criando um modelo e simulações capazes de testar os parâmetros selecionados.

3.1 Modelagem do ambiente

Para iniciar a modelagem do sistema é necessário descrever as características do meio. O ambiente utilizado para a modelagem, como mostrado na Figura 3.1, tem dimensões 10m x 10m x 3m. No exemplo descrito neste texto a superfície irradiada encontra-se a 1m do solo e as luminárias rentes ao teto, ou seja, a fonte de luz está a 3m do solo. A distribuição de luminárias na sala do exemplo é conforme a Figura 3.1. Cada luminária tem dimensões 1m x 0,2m e contém 2 lâmpadas tubulares fluorescentes de 60W.

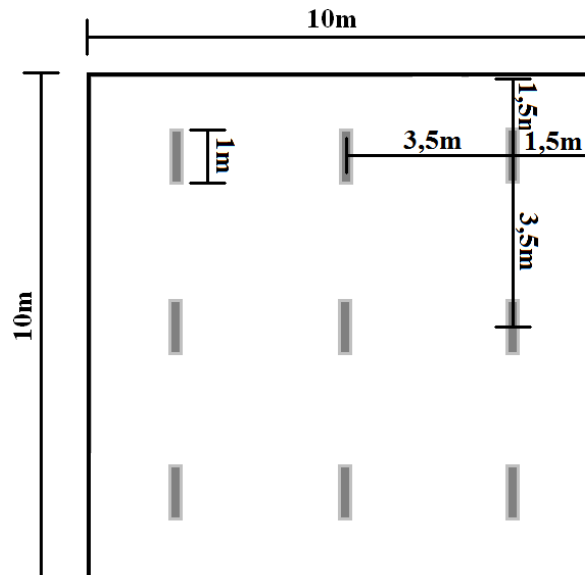


Figura 3.1: Distribuição de luminárias na sala do exemplo.

O sistema de transmissão se encontra a exatamente 1 metro do solo e utiliza um LED comum para enviar informações e um fotodetector com tempo de subida e descida inferior a 0.1 ms, suficiente para taxas de transmissões de algumas dezenas de MHz, típica de LEDs comuns. A Figura 3.2 representa como o sistema de transmissão é utilizado e afetado pela interferência das lâmpadas da sala.

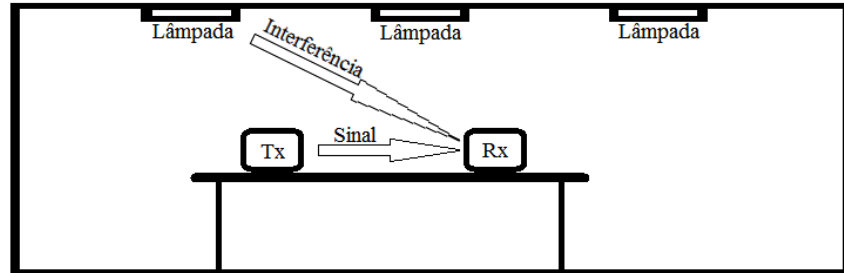


Figura 3.2: Esquema de emissão, recepção e interferência.

Com o objetivo de incluir o maior número de parâmetros possíveis na simulação do sistema descrito acima, modela-se separadamente cada componente que possa vir a interferir nos resultados da simulação.

3.2 Modelagem da Interferência

Um estudo apresentado em [10] mostra, por meio da Figura 3.3, a intensidade das reflexões de um pulso de luz em um ambiente fechado (de dimensões 5m x 5m x 3m), onde a fonte se encontra a 2,5m do solo e a superfície irradiada a 0,85m do solo. Considera-se a partir desta análise que a luz recebida na superfície irradiada é igual a parcela da luz que chega pelo caminho direto, sendo o erro cometido por esta aproximação menor que 5% e, portanto, pequeno suficiente para os objetivos deste trabalho.

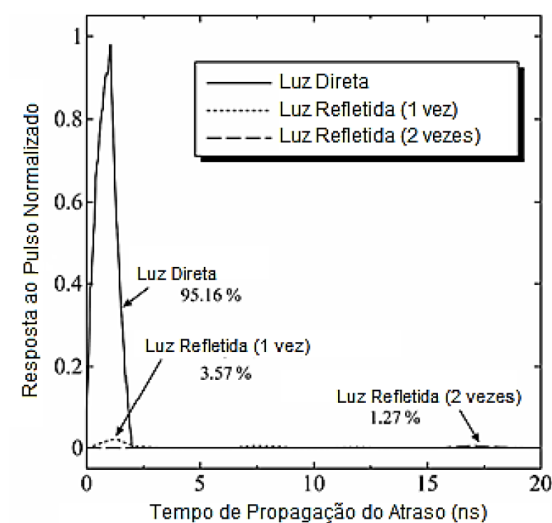


Figura 3.3: Resposta de um pulso de luz, adaptado de [10].

Com o intuito de se obter o valor da irradiância em um determinado lugar do ambiente, deve-se somar a contribuição de cada lâmpada para achar a irradiância total neste local específico. Esta técnica conhecida como superposição pode ser aplicada supondo-se que a contribuição luminosa de cada fonte apresenta comportamento linear. Pressupondo-se isso, a própria fonte poderia ser tratada como a soma de diversas superfícies menores ou até mesmo pontos.

Para fins computacionais, utilizam-se posições pontuais para cálculos de distância e ângulos, portanto quanto menor for a subdivisão das lâmpadas e maior o número de superfícies diferenciais, mais preciso será o resultado da simulação.

Para descrever a contribuição diferencial de cada parte da lâmpada tubular, utiliza-se o conjunto de equações (3.1) que é uma extensão das equações desenvolvidas no capítulo anterior, considerando uma fonte pontual e uma fonte extensa emitindo para uma semi-esfera.

$$I = \frac{\phi}{2\pi} \quad (3.1a)$$

$$L = \frac{\phi}{\pi S} \quad (3.1b)$$

Considerando que o número de pontos em que se divide a lâmpada para fins computacionais seja n , a intensidade radiante diferencial (I_n) e a radiância diferencial (L_n) são dadas por

$$I_n = \frac{\phi}{n2\pi}, \quad (3.2a)$$

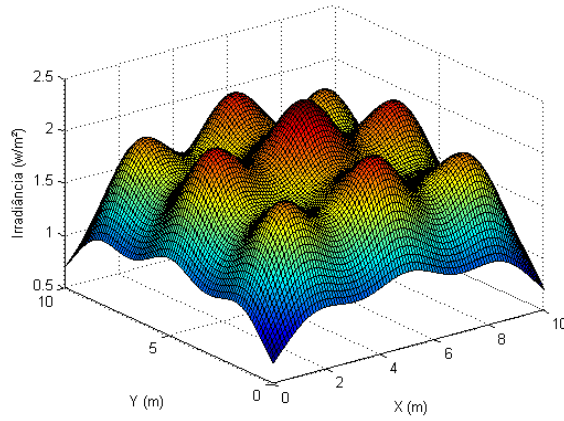
$$L_n = \frac{\phi}{n\pi S}. \quad (3.2b)$$

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros utilizados pelo código presente no Anexo I para gerar as Figuras 3.4(a,b) em software MATLAB, representando a irradiância recebida a uma certa altura em diferentes pontos da sala.

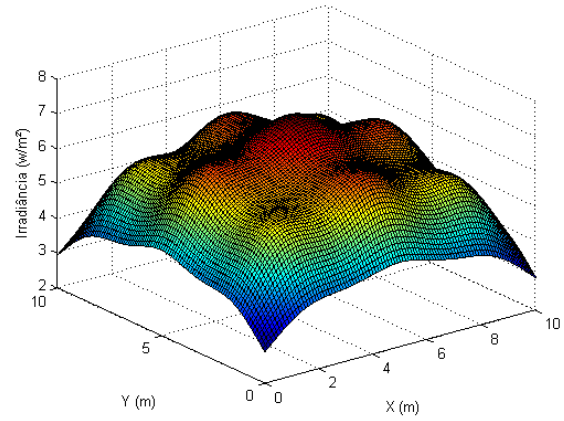
Tabela 3.1: Parâmetros da simulação

Potência da luminária	60	[W]
Eficiência luminosa	30	%
Número de pontos	20	
Comprimento da Lâmpada	1	[m]
Altura das Luminárias	3	[m]
Altura da medição	1	[m]

Uma avaliação experimental será feita no Capítulo 4 para verificar qual dos modelos se encontra mais coerente com a realidade, para os parâmetros escolhidos.



(a) Irradiância para fonte pontual



(b) Irradiância para fonte extensa

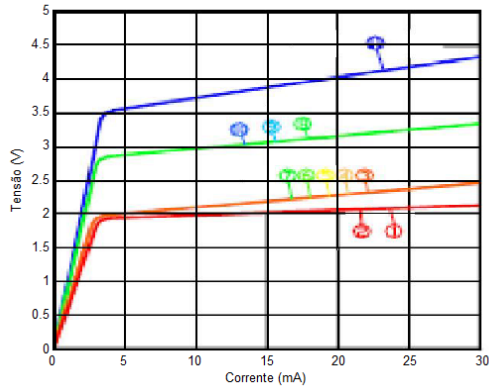
Figura 3.4: Irradiância em pontos diferentes da sala (valores da Tabela 3.1).

3.3 Modelagem do LED

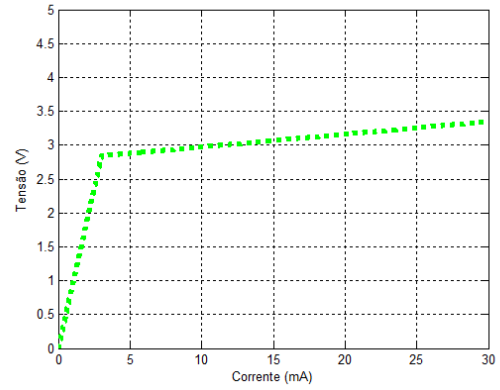
A corrente que passa pelo LED tem uma relação muito próxima à linear com relação à luminosidade. Contudo, a corrente não apresenta a mesma linearidade com relação à tensão. A curva de corrente por tensão em um LED genérico apresenta algumas características padrão, são elas a região de corte, a região linear e a região de saturação. A região de corte se encontra abaixo da tensão de acionamento do diodo (ToV - Turn On Voltage), considera-se idealmente que não há emissão de luz nesta região de operação. Na chamada região linear o comportamento da corrente em relação à tensão no LED se assemelha a de uma resistência, tendo assim seu nome justificado. Entre a região linear e a região de saturação a curva de corrente por tensão sofre uma nova variação, na qual a curva deixa de se comportar linearmente e passa a se comportar assintoticamente ao entrar na região de saturação. O LED também não emite igualmente para todas as direções, portanto deve-se incluir como parâmetro da simulação o ângulo que o receptor faz com o emissor, devendo assim ser reduzida a luminosidade do sinal transmitido de acordo com o aumento do ângulo formado.

Para cada material de produção, tipo de LED ou ainda método de fabricação, a curva característica do LED se altera, tornando necessário consultar o manual de cada fabricante para se obter os parâmetros característicos do componente que se deseja utilizar. Para que este estudo tenha maior credibilidade, utiliza-se na modelagem do LED o manual referente ao modelo escolhido para testes (InGaN), presente no Anexo IV, fornecido pela FEDY Technology, fabricante do modelo de LED escolhido para a parte experimental.

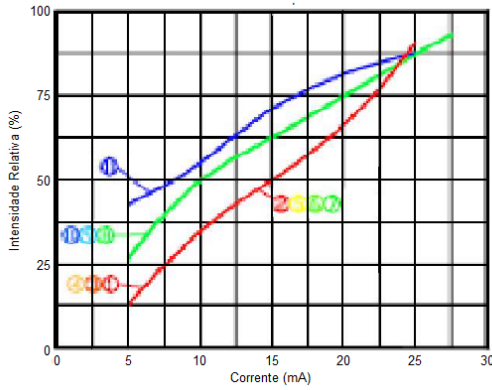
Com o auxílio do código presente no Anexo II, foi feita uma aproximação a partir das curvas presentes no manual fornecido pelo fabricante, reproduzindo as curvas de Tensão por Corrente, Intensidade relativa por Corrente e Intensidade por ângulo. As aproximações foram inseridas manualmente e utilizando o software MATLAB foi possível obter a interpolação dos pontos marcados. O resultado das aproximações das curvas do LED selecionado apresentam-se na Figura 3.5.



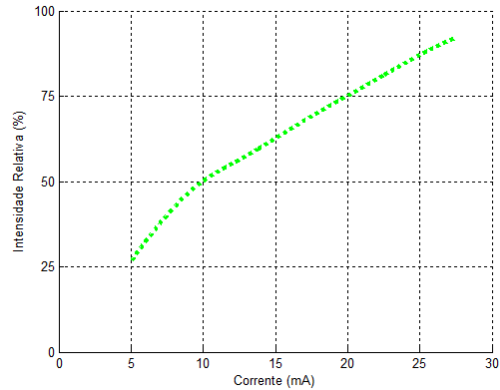
(a) Tensão por Corrente (Fabricante)



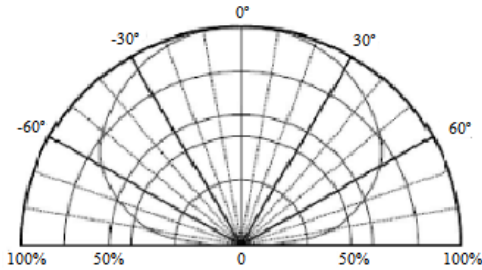
(b) Tensão por Corrente (Aproximada)



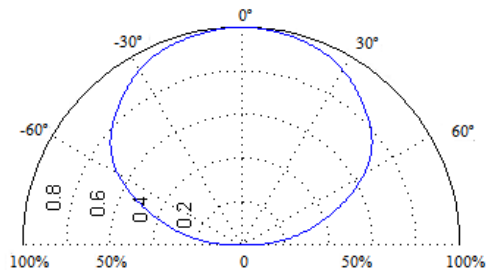
(c) Intensidade relativa por Corrente (Fabricante)



(d) Intensidade relativa por Corrente (Aproximada)



(e) Intensidade por ângulo (Fabricante)



(f) Intensidade por ângulo (Aproximada)

Figura 3.5: Curvas fornecidas pelo fabricante e geradas pelo MATLAB.

Para transmitir informação pela intensidade de luz de um LED utiliza-se a região linear, pois é a região em que a intensidade de luz melhor corresponde à excitação do sinal, característica desejada no transmissor. Desta maneira o sinal deve estar sempre compreendido entre a região de corte e a região de saturação, idealmente nunca atingindo valores de tensão nos terminais do LED que o levam para fora da região linear.

O símbolo OFDM tem como uma de suas características uma alta razão pico-média (PAR - Peak to Average Ratio), portanto deve-se utilizar uma compressão do símbolo OFDM para que seus picos se mantenham dentro da região linear.

Como o símbolo pode assumir valores negativos provenientes de componentes negativas, além de se comprimir o sinal é necessário polarizar os terminais do LED com uma corrente contínua (DC - Direct Current) com o objetivo de manter o sinal sempre na região de operação. A Figura 3.6 representa a compressão e polarização do sinal OFDM em um LED operando na região linear.

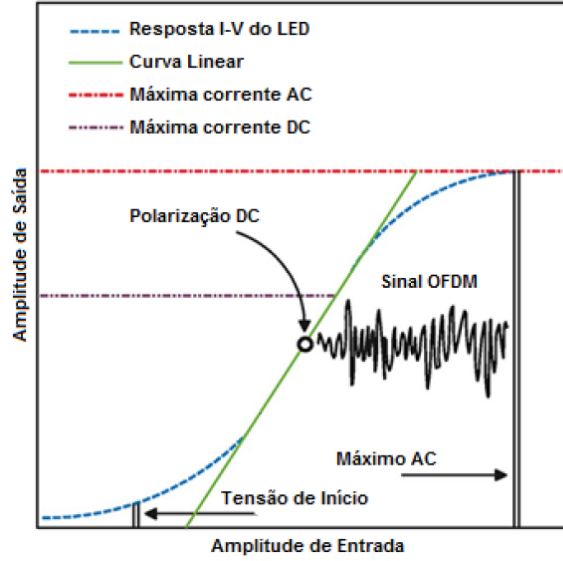


Figura 3.6: Característica não linear de transmissão do LED, adaptado de [11].

Para implementar essa não linearidade no modelo de transmissão, utilizaram-se as curvas aproximadas em MATLAB para inserir a distorção no sinal. A relação entre a luminosidade e a tensão nos terminais do LED pode ser obtida utilizando-se modelo de pequenos sinais. Para achar a função de transferência da luminosidade em relação à tensão fez-se uma aproximação linear de primeira ordem da função de transferência por Série de Taylor em torno do ponto de polarização escolhido. Essa aproximação pode ser representada como

$$Lum(V) = Lum(V_0) + \frac{dLum(V)}{dV}(V_0) \cdot (V - V_0), \quad (3.3)$$

em que a derivada da função de transferência em relação a tensão pode ser obtida por meio da derivada implícita

$$\frac{dLum(V)}{dV} = \frac{dI(V)}{dV} \cdot \frac{dLum(V)}{dI(V)}, \quad (3.4)$$

em que os termos podem ser retirados das curvas de Tensão por Corrente e Intensidade relativa por Corrente, obtidas anteriormente.

Observando a Tabela 3.2, fornecida pelo fabricante, escolheu-se uma corrente de 20 mA para polarizar o LED, restringindo assim o símbolo OFDM a uma amplitude de pico de 0.2 V. Essas escolhas para o LED de InGaN significam graficamente que a intensidade luminosa relativa do ponto de polarização escolhido representa 75% da capacidade de emissão de luz do LED, sofrendo variação de 25% para os valores de pico do símbolo OFDM.

O fabricante do fotodetector disponível (Modelo 875 da Newport Corporation) não apresenta as curvas características no manual do modelo, portanto apenas citam-se os valores fornecidos de

Tabela 3.2: Valores fornecidos pela FEDY Technology

Modelo do Chip	FD-5TW-1	FD-5TW-2	FD-5TW-3
Material do Chip	InGaN	InGaN	InGaN
Cor de emissão	Branco quente	Branco quente	Branco quente
Temperatura da cor	2900 [K]	2900 [K]	2900 [K]
Cor da lente	Transparente	Transparente	Transparente
Intensidade	15000-18000 [mcd]	18000-20000 [mcd]	20000-25000 [mcd]
Corrente	20 [mA]	20 [mA]	20 [mA]
Tensão	3.0 - 3.4 [V]	3.0 - 3.4 [V]	3.0 - 3.4 [V]
Ângulo de meia potência	20 [graus]	20 [graus]	20 [graus]

interesse ao projeto. Os valores de subida e descida são inferiores a 1 ns. Este parâmetro é determinante para a capacidade do sistema de transmissão no quesito velocidade de detecção. Quanto maior for o tempo de subida e descida mais tempo o dispositivo precisará para alterar o valor de corrente de saída quando for submetido a uma mudança de intensidade na entrada. Este valor permite trabalhar com frequências por volta de 1 GHz. A resposta espectral vai de aproximadamente 400 nm a 1060 nm, com um pico de 0.4 A por Watt próximo a 600 nm. Este parâmetro é determinante para a capacidade do sistema de transmissão em detectar a emissão de luz do transmissor. Caso o dispositivo emissor não trabalhasse nessa faixa de valores o fotodetector não detectaria a luz emitida pelo LED e o receptor não seria capaz de receber as informações enviadas. O LED escolhido apresenta o pico de emissão na largura de 525 nm, portanto está apto a ser utilizado em conjunto com o fotodetector disponível. Levando em conta estes parâmetros o simulador foi desenvolvido sem modelagem de distorção no receptor, embora seja importante frisar que a simulação foi feita para que se possa introduzir posteriormente o maior número de parâmetros envolvidos, sendo assim relativamente fácil atualizá-la e adicionar uma possível distorção no receptor.

3.4 Modelagem do enlace

Seguindo os passos descritos foi elaborado um código para integrar a técnica de transmissão O-OFDM e a distorção não linear do LED, modelada na seção anterior. O código foi desenvolvido a partir das aproximações das curvas características do LED que se deseja utilizar, para testar as distorções sofridas pelo sinal ao passar pelo enlace ótico.

Uma breve descrição do simulador é explicada em conjunto à Figura 3.7 que representa o tratamento dado ao sinal desde a entrada no circuito transmissor até a saída no LED.

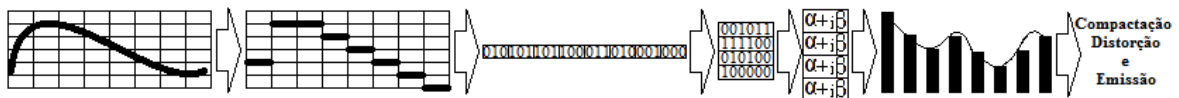


Figura 3.7: Tratamento do simulador sobre o sinal de entrada

O sinal analógico chega ao circuito e é digitalizado. Ao ser digitalizado o sinal passa por uma codificação simples onde cada valor assumido pelo sinal é representado binariamente em vetores tão menores quanto forem possíveis para alocar todos os níveis necessários. Os bits entram de forma serial e em alta taxa no sistema de transmissão. Nesta etapa o sinal serial é paralelizado em quantos subsinais sejam desejados. Os subsinais são interpretados pelas constelações QAM e são traduzidos em números complexos. Os subsinais paralelizados e interpretados são tratados para adquirir a simetria hermitiana e logo após são multiplicados pelas subportadoras ortogonais, através da IFFT. Os subsinais provenientes da IFFT possuem somente valores reais das componentes a serem enviadas. Essas componentes paralelas são serializadas novamente e interpoladas para formar o sinal a ser enviado. Esse sinal passa por um processo de compactação para garantir a integridade do sinal a ser enviado na região linear do LED emissor. O sinal compactado passa por uma função de transferência que representa a interpretação da tensão de entrada em luminosidade e distorção causadas pelo LED, baseada nas curvas fornecidas pelo fabricante. O sinal passa a ser representado por luminosidade, de 0 a 100%, e após ser atenuado de acordo com o ângulo de emissão passa por um meio AWGN (Additive White Gaussian Noise) antes de chegar ao receptor.

No receptor o sinal recebe um tratamento que desfaz passo a passo as alterações sofridas no transmissor. Nesta etapa foi observado que o não alinhamento entre o transmissor e o receptor causava uma severa distorção no sinal proveniente da atenuação de acordo com o ângulo de emissão, causando uma interpretação errada dos símbolos recebidos. Essa interpretação foi corrigida ao se compensar a atenuação do LED, amplificando o sinal recebido antes de continuar o tratamento.

Ao final do código, o sinal recodificado é comparado ao original e a taxa de erros de bits (BER - Bit Error Rate) é encontrada para cada relação sinal ruído (SNR - Signal Noise Ratio) utilizada. Um gráfico é traçado ao final do código para todas as QAMs de 4 a 128 símbolos distintos relacionando a taxa de erro de bits por relação sinal ruído. Os valores de relação sinal ruído são configuráveis pelo código. O código na íntegra se encontra no Anexo III.

O resultado da simulação para valores do sinal na região linear do LED (polarizado com uma corrente de 20 mA e 0.2 V de amplitude) se apresenta a seguir, na Figura 3.8(a). Ao lado, exemplos de constelações formadas no receptor para uma relação sinal ruído de 40 dB.

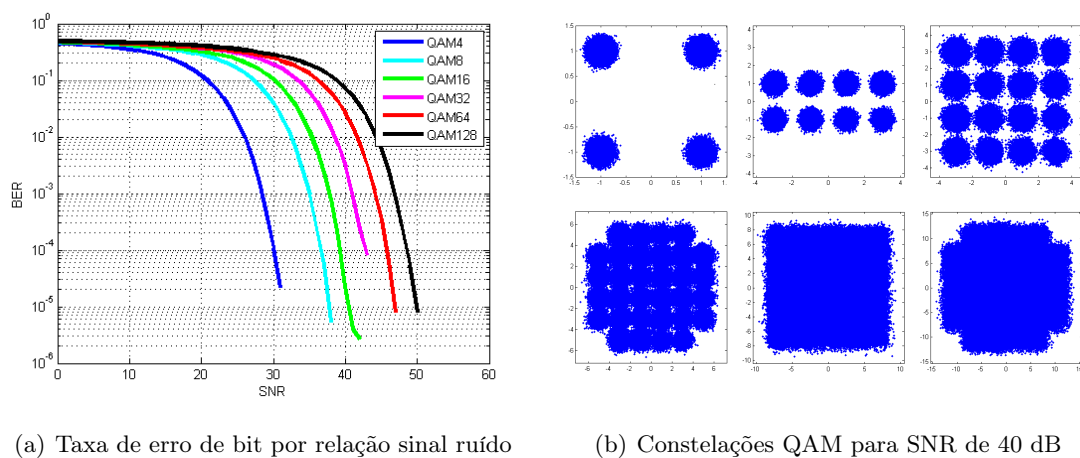


Figura 3.8: Resultado da simulação para região linear.

A simulação foi alterada para representar o que aconteceria caso o sinal não fosse compactado e polarizado, com o objetivo de observar a total ou parcial distorção da mensagem pela não linearidade do LED. Assim como na Figura 3.9, o sinal de entrada não está compreendido nos valores de mínimo e máximo para a região linear do LED, adentrando na região de corte, para valores menores que 2.8 V, e na região de saturação, para valores maiores que 3.4 V. Observa-se que valores do sinal abaixo da T_{oV} não são capazes de fazer com que o LED emita luz, portanto estes valores podem ser aproximados entre 0 e 2.8 V para reconstrução do sinal no receptor quando não houver detecção de luz, produzindo assim diferentes resultados para cada aproximação feita. A mesma aproximação não pode ser feita na parte superior do sinal, pois não há como distinguir no receptor os valores do sinal que estão realmente em 3.4 V ou em valores superiores que, por estarem na região de saturação, além de gerarem luminosidades muito próximas, não possuem um limite superior para o valor de tensão na entrada do LED.

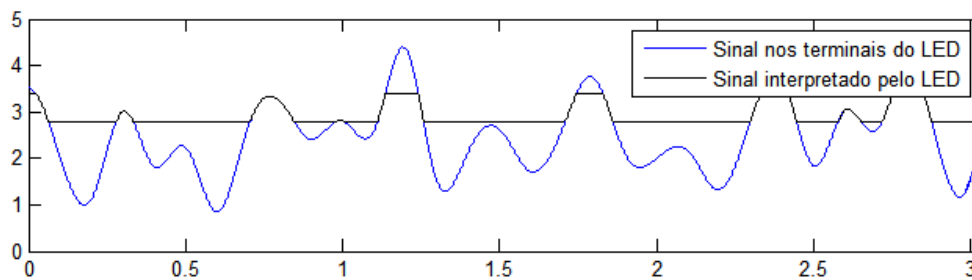


Figura 3.9: Sinal distorcido pelo LED.

A simulação alterada foi feita para três tipos de aproximações. Considerou-se para cada caso que, quando não houvesse detecção de luz no receptor, a tensão no emissor seria igual a 0 V, a 1.4 V ou a 2.8 V. Para isso, partes do código, responsáveis pela polarização e compactação do sinal no transmissor e despolarização e descompactação do sinal no receptor, foram substituídas respectivamente pelos códigos a seguir para adequar o tratamento do sinal pela simulação do enlace.

```

K1=20*10^-3/(Y(3000)-Y(1000));
K2=(y(2000)-y(1000))/(20*10^-3);
DerivadaImplicita=K1*K2;
SinalComprimido=5*(SaidaIFFT/(max(SaidaIFFT(:))-min(SaidaIFFT(:))),...
-min(SaidaIFFT(:)/(max(SaidaIFFT(:))-min(SaidaIFFT(:)))));
SinalDistorcido=zeros(size(SaidaIFFT));
for k=1:length(SaidaIFFT(:))
    if SinalComprimido(k)<=2.8
        SinalDistorcido(k)=2.8;%Este parâmetro é uma aproximação
    elseif SinalComprimido(k)>=3.4
        SinalDistorcido(k)=3.4;
    else
        SinalDistorcido(k)=SinalComprimido(k);
    end
end
SinalNormalizado=SinalDistorcido/3.4;
SinalPolarizado=y(1)+DerivadaImplicita*SinalNormalizado;
SinalDirecionado=inttotal(zeta)*SinalPolarizado;

```

e

```

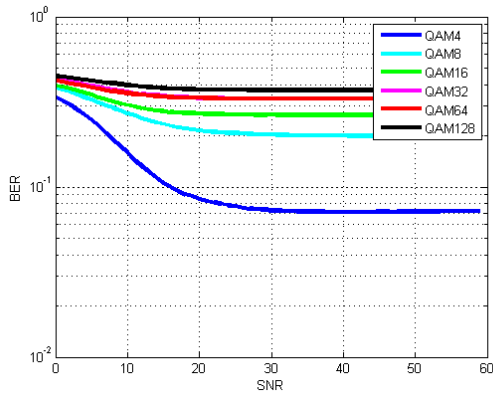
SinalAmplificado=Sinal_Transmitido/inttotal(zeta);
SinalDespolarizado=(SinalAmplificado-y(1))/DerivadaImplicita;
SinalDesnormalizado=SinalDespolarizado*3.4;
SinalDescomprimido=((SinalDesnormalizado/5)+min(SaidaIFFT(:)/(max,...
(SaidaIFFT(:))-min(SaidaIFFT(:)))))*(max(SaidaIFFT(:))-min(SaidaIFFT(:)));

```

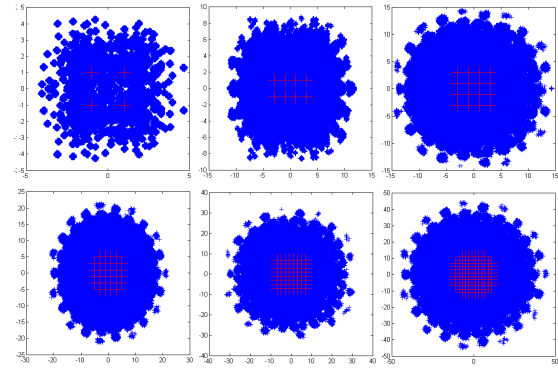
Nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 apresentam-se os resultados para as simulações considerando-se respectivamente 0 V , 1.4 V e 2.8 V nos terminais do emissor quando não houver detecção de luz.

Percebe-se do resultado das simulações para o sinal distorcido que não tem-se uma boa taxa de erro de bit entre o sinal original e o sinal recuperado até mesmo para baixos valores de ruído no canal. Dessa observação, conclui-se que a distorção inserida pela não linearidade do LED no sinal não comprimido faz com que o sinal seja completamente destruído, tornando impraticável trabalhar com esse enlace fora da região linear.

No Capítulo 4 alguns experimentos são executados para validar a modelagem do enlace VLC.

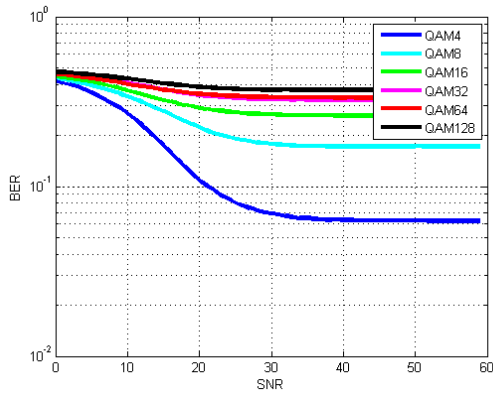


(a) Taxa de erro de bit por relação sinal ruído

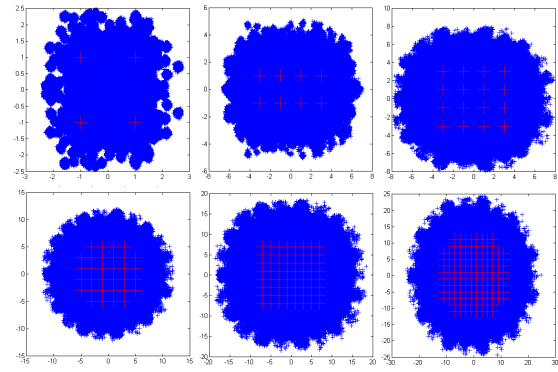


(b) Constelações QAM para SNR de 40 dB

Figura 3.10: Primeiro resultado da simulação para sinal distorcido (aproximação=0 V).

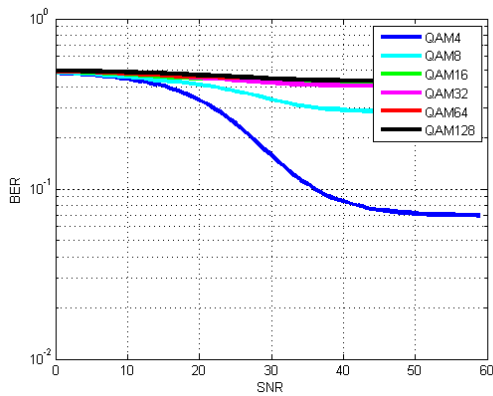


(a) Taxa de erro de bit por relação sinal ruído

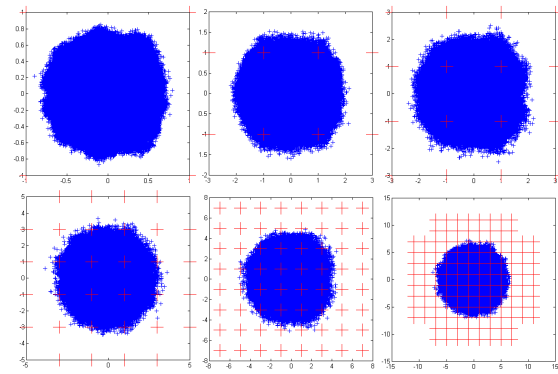


(b) Constelações QAM para SNR de 40 dB

Figura 3.11: Segundo resultado da simulação para sinal distorcido (aproximação=1.4 V).



(a) Taxa de erro de bit por relação sinal ruído



(b) Constelações QAM para SNR de 40 dB

Figura 3.12: Terceiro resultado da simulação para sinal distorcido (aproximação=2.8 V).

Capítulo 4

Resultados Experimentais

Neste capítulo são descritos os experimentos elaborados e os resultados experimentais apresentados.

4.1 Experimentos realizados

Três experimentos foram elaborados, dois deles para confirmar o modelo gerado na parte teórica do trabalho e um terceiro para tentar estabelecer determinados fatores limitantes do enlace.

4.1.1 Caracterização experimental dos interferidores

Para conferir como a distribuição de potência da luz interferente (das luminárias) se projeta no ambiente, utilizou-se um luxímetro analógico (semelhante ao da Figura 4.1) disponível com 2 fundos de escala, $300lx$ ou $3000lx$, sendo divididos em 61 níveis diferentes (como pode ser observado na foto abaixo), tendo assim uma acurácia para as medidas de $5lx$ para o menor fundo de escala e $50lx$ para o maior fundo de escala.



Figura 4.1: Luxímetro analógico.

A medição foi feita posicionando o luxímetro a uma determinada altura fixa e variando sua posição de um lado a outra do sala pelo meio, com as luminárias distribuídas conforme a modelagem. Os resultados foram adicionados ao MATLAB para gerar a Figura 4.2(a) que se assemelha mais com o perfil lateral da modelagem da fonte por pontos, como representado ao lado.

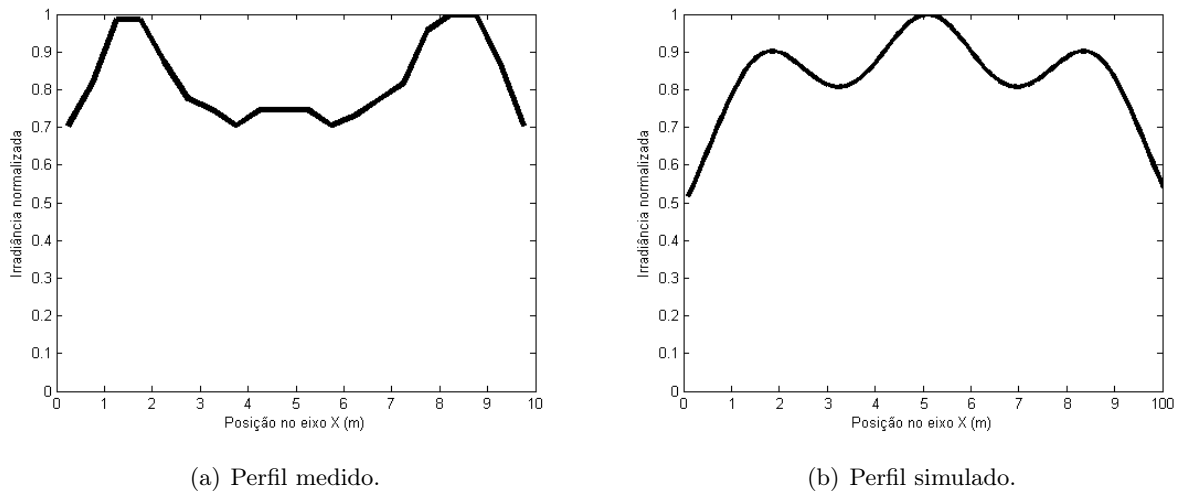


Figura 4.2: Perfil lateral de Irradiância na sala.

Para fins práticos utiliza-se o ponto de maior discrepância entre o perfil medido e o simulado para descobrir a máxima diferença percentual entre os modelos. O valor mais distante entre os dois gráficos é exatamente no centro, em 5 m no eixo X. O valor simulado normalizado é de 1 enquanto o valor medido normalizado é de 0,75, portanto assumindo um valor de máxima diferença de 25% da simulação.

As diferenças em relação ao resultado teórico foram atribuídas às lâmpadas de valores diferentes no ambiente em que foram realizadas as medidas, aos objetos como bancadas e instrumentos que bloqueavam parcialmente o caminho da luz direta de algumas luminárias em determinados pontos de medição, a presença da atuação não uniforme na sala da luz externa ao ambiente (proveniente do sol) e a não consideração no modelo teórico das reflexões das luzes nas paredes do ambiente, que deve ser conferida em um próximo estudo para confirmar se a ausência desse fator influenciou de maneira determinante no resultado. Embora esses fatores tenham alterado levemente o perfil lateral de distribuição de luminosidade pela sala, eles não anulam o modelo, que pode ser melhorado passando a considerar uma atuação mais forte das reflexões nas paredes do ambiente em um futuro estudo.

4.1.2 Caracterização experimental do LED Transmissor

Para descrever como varia a irradiância do LED utilizado com a distância, posicionou-se o LED polarizado conforme as especificações do fabricante em um determinado ponto e afastou-se o luxímetro gradualmente, em linha reta e no sentido de máxima intensidade de luz. A cada 2,5 cm o valor lido no luxímetro foi anotado para gerar valores experimentais. Os valores foram adicionados ao MATLAB para gerar a Figura 4.3.

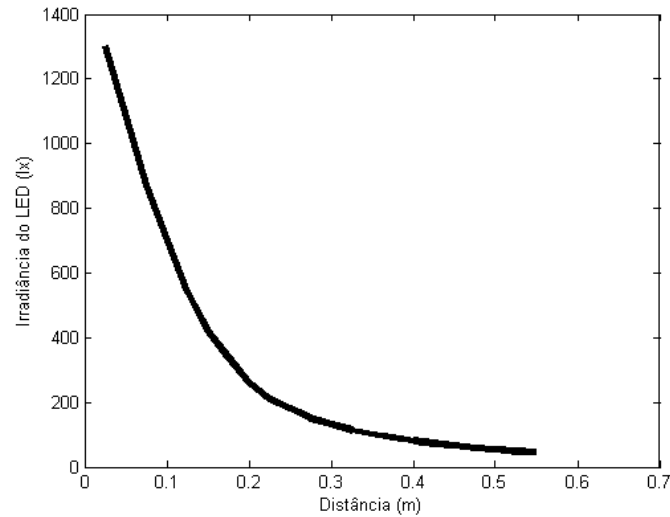


Figura 4.3: Irradiância do LED por distância.

4.1.3 Superposição

Para validar a hipótese da superposição entre as contribuições das lâmpadas individualmente e o dispositivo transmissor, fez-se o seguinte procedimento: utilizou-se o luxímetro para medir a irradiância em um determinado ponto da sala com todas as luzes acesas e o LED desligado. Após essa medição polarizou-se o LED para que emitisse luz na direção do luxímetro, tendo assim um novo valor lido, referente à soma da contribuição de todas as lâmpadas mais a contribuição do LED. A diferença entre o valor da segunda medição (LED e luminárias) e o valor da primeira medição (somente luminárias) foi anotada. Para confirmar que a diferença de valor que apareceu era exatamente a contribuição do LED, desligaram-se as lâmpadas da sala deixando somente o LED aceso na direção do luxímetro e fez-se uma terceira medição, referente à contribuição do LED somente. A terceira medição (somente LED) e a diferença entre a segunda e a primeira medição (referente à contribuição do LED) foram exatamente a mesma, o que comprova a modelagem da superposição.

Essa confirmação vem a ser a mais importante dentre as experimentais, pois sem a mesma a modelagem seria inadequada, visto que desde o princípio utilizou-se como verdade a hipótese da superposição das contribuições luminosas.

Um quarto experimento para reafirmar o terceiro foi feito nos mesmos moldes, mas em vez de se utilizar um valor fixo para polarizar o LED, utilizou-se uma corrente contínua adicionada de uma variação dentro da região linear para observar a variação de irradiância no luxímetro. O resultado, como era esperado, foi que ao se medir a variação com as lâmpadas acesas ou apagadas a medição foi a mesma, somente se deslocava de alguns lux pela presença ou ausência das lâmpadas.

4.2 Cálculo da SNR experimental

A partir dos resultados obtidos, apresentados na seção anterior, pode-se afirmar que um tratamento simples no sinal é capaz de retirar a contribuição média das interferências externas (luz do sol e luminárias) levando assim o valor médio das interferências ao fundo de escala ($5lx$), o que permite calcular, a partir da modelagem experimental do LED, a relação sinal ruído do sistema de transmissão, para cada distância desejada.

Os valores foram calculados a partir da fórmula $SNR = 10 \cdot \log(\frac{Irradiancia_{distancia}}{Irradiancia_{fundo_de_escala}})$ e adicionados ao MATLAB para gerar a Figura 4.4(a) que representa a SNR experimental para cada distância. Na Figura 4.4(b) as curvas experimentais retiradas de [23] e [12] traçadas a partir da implementação do transmissor em kits DSPs são adicionadas ao MATLAB e plotadas lado a lado com a obtida ao se desenvolver este trabalho.

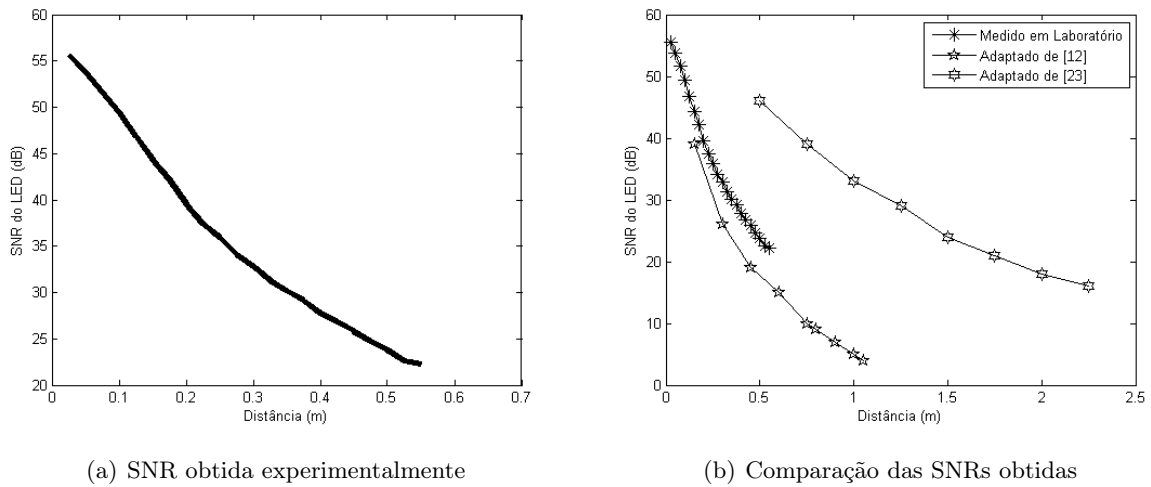


Figura 4.4: SNR do LED pela distância.

Percebe-se que as curvas têm propriedades semelhantes características do LED emissor. A diferença de SNR entre a curva retirada de [12] e as outras duas é justificada pelo fato de esta curva ter sido traçada ao se utilizar um vetor de LEDs para amplificar a potência do sinal emitido, ao passo que as outras duas foram traçadas para apenas um LED. Este vetor de LEDs está representado na Figura 4.5 e é uma das soluções práticas para melhorar a SNR ou a iluminação, caso queira se utilizar os LEDs emissores como fontes de iluminação ambiente.

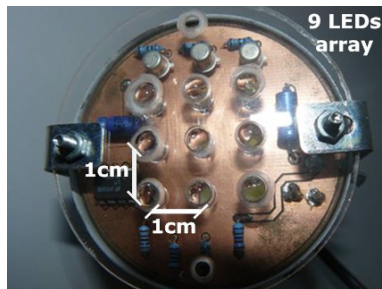


Figura 4.5: Vetor de LEDs emissor, retirado de [12].

4.3 Estudo de Caso

O LED escolhido neste trabalho para montar o enlace VLC limita o sistema tornando-o capaz de atingir taxas de transmissão da ordem de 10MHz. Essa taxa é suficiente para enviar áudio em alta qualidade e até mesmo vídeos.

Um exemplo para se ter ideia do que representa essa banda disponível se encontra no Sistema Brasileiro de TV Digital (SBTVD) que utiliza o padrão de codificação de vídeo H.264, sendo assim é capaz de transmitir dentro de 6 MHz dois sinais em altíssima definição (1080p), dois sinais de alta definição (720p) e um em definição padrão (480p), ou até mesmo quatro sinais em definição padrão, fora a banda reservada para transmissão de dados extras [28].

Como todo sistema de transmissão, este deve ter uma taxa de erro de bits limite para o bom funcionamento. A taxa de erro de bits pode ser atrelada à distância entre o transmissor e o receptor. Supondo uma taxa de erro de bits necessária para bom funcionamento do sistema de por exemplo 10^{-4} , pode-se transmitir com esse sistema até determinada distância dependendo da QAM selecionada. Na Tabela 4.1 encontram-se as distâncias máximas, em que o sistema poderia operar sem falhas, obtidas a partir do gráfico da taxa de erro de bits pela relação sinal ruído e do gráfico de relação sinal ruído do LED pela distância.

Tabela 4.1: Distância limite para transmissão a uma BER máxima de 10^{-4}

QAM 4	35	[cm]
QAM 8	24	[cm]
QAM 16	20	[cm]
QAM 32	18	[cm]
QAM 64	12	[cm]
QAM 128	10	[cm]

Essas limitações podem ser melhoradas de diversas maneiras. Utilizar técnicas complexas de tratamento do sinal que utilizem codificações capazes de melhorar a taxa de erro de bits pode ser uma solução elegante, embora até mesmo utilizar maior número de LEDs no transmissor seja uma solução plausível para solucionar o problema proposto. O ideal é que se apliquem todas as técnicas disponíveis simultaneamente para que o sistema tenha o maior ganho de capacidade possível.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

A capacidade do sistema está atrelada ao dispositivo escolhido para transmissão e/ou recepção, podendo ser substituídos por outros dispositivos que possuam características voltadas ao que se deseja otimizar. Por hora verificou-se que caso se queira melhorar a relação sinal ruído para qualquer distância, basta adicionar mais LEDs ao dispositivo transmissor, sem precisar alterar nada no sistema simulado. Também verificou-se que, caso o sistema não seja capaz de equalizar o canal, a medida que o desalinhamento entre os dispositivos aumenta, o erro na detecção dos símbolos recebidos e consequente falha na reconstrução do sinal original tornam-se cada vez mais influentes sobre a taxa de erro de bits.

O simulador elaborado é capaz de receber parâmetros diversos que foram implementados durante os estudos e pode ser aprimorado cada vez mais. A maneira como o código foi escrito possibilita adicionar parâmetros para tratar o sinal em qualquer etapa da transmissão de dados.

Estudos futuros podem complementar as funcionalidades do simulador tornando-o capaz de fazer codificações de fonte mais complexas para melhorar a taxa de transmissão de dados, utilizar códigos corretores de erros para melhorar a taxa de erro de bits ou introduzir e equalizar interferências seletivas em determinadas frequências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SPECTRUM, i. t. I. *Fastest Single-Laser Transmission*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/fastest-singlelaser-transmission>.
- [2] VELTEN, D. *Polynomial OFDM*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://polyofdm.sourceforge.net/>.
- [3] WIRELESSTUT. *Basic Terminologies*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://www.wirelesstut.com/ccna-wireless-knowledge/basic-terminologies>.
- [4] Magna Design Net, Inc. *II. Digital Modulation*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://www.magnadesignnet.com/en/booth/technote/ofdm/page2.php>.
- [5] HADASCHICK, N. *Techniques for UWB-OFDM*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://www.ice.rwth-aachen.de/research/algorithms-projects/entry/detail/techniques-for-uwbofdm/>.
- [6] Telecom Cellular Technology Concepts. *Advantages & Disadvantages of OFDM*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://cellular-technology-concepts.blogspot.com.br/2011/11/advantages-disadvantages-of-ofdm.html>.
- [7] National Instruments. *Gaining Spectral Efficiency with OFDM*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://www.ni.com/white-paper/3370/en>.
- [8] YOUNG, M. *Optics and Lasers Including Fibers and Optical Waveguides*. [S.l.]: Springer, p. 65–76, 2000.
- [9] FAPTECH. *IPTV e suas tendências*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://faptech.wordpress.com/iptv/tv-digital/>.
- [10] KOMINE, T.; NAKAGAWA, M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, v. 50, n. 1, p. 100–107, 2004.
- [11] Elgala, Hany; Mesleh, Raed; Haas, Harald. An led model for intensity-modulated optical communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 22, n. 11, p. 835–837, 2010.
- [12] Elgala, Hany; Mesleh, Raed; Haas, Harald. Indoor Broadcasting via White LEDs and OFDM. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, v. 55, n. 3, p. 1127–1134, 2009.

- [13] ZHELUDEV, N. The life and times of the LED, a 100-year history. *Nature Photonics*, v. 4, n. 1, p. 189–192, 2007.
- [14] SIMONITE, T. *The LED, older than we thought*. [S.l.], 2007. Disponível online em <http://www.newscientist.com/blog/technology/2007/04/led-older-than-we-thought.html>.
- [15] BRAUNSTEIN, R. Radiative transitions in semiconductors. *Physical Review*, v. 99, n. 6, p. 1892–1893, 1955.
- [16] BIARD E. L. BONIN, W. N. C. J. R.; PITTMAN, G. E. GaAs Infrared Source. *PGED Electron Device Conference, Washington, D.C.*, 1962.
- [17] SCHUBERT, E. F. Light-emitting diodes: research, manufacturing, and applications v. *Cambridge University Press*, 2003.
- [18] HUMPHREYS, C. J. *Solid-State Lighting*. [S.l.], 2008. Disponível online em <http://journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=7960441>.
- [19] CAMPOS, M. A. de. *EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: Iluminação LED*. [S.l.], 2012. Disponível online em <http://www.sme.org.br/arquivos/pdf/SMEEFICIENCIAENERGETICA.pdf>.
- [20] SHAW, K. *LED Technology for Lighting Folks*. [S.l.], 2008. Disponível online em <http://www.kevan-shaw.com>.
- [21] LATHI, Z. D. B. P. *Modern Digital and Analog Communication Systems, 4 ed.* [S.l.]: Oxford University Press, 2009.
- [22] Barros, B. O.; Rolim, F. A. S. Comunicação por luz visível e suas aplicações. 2011.
- [23] Elgala, Hany; Mesleh, Raed; Haas, Harald. OFDM Visible Light Wireless Communication Based on White LEDs. *IEEE Conference Publications*, p. 2185–2189, 2007.
- [24] ALBUQUERQUE, E. L. P. e Claudio Penedo de. A Técnica de Transmissão OFDM. *Revista Científica Periódica - Telecomunicações*, v. 5, n. 1, 2002.
- [25] CHANG R. W. E GIBBY, R. A. A theoretical study of an orthogonal multiplexing data transmission scheme. *IEEE Transactions on Communications*, v. 16, n. 4, p. 529–540, August 1968.
- [26] CIMINI L., J. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. *IEEE Transactions on Communications*, v. 33, n. 7, p. 665–675, July 1985.
- [27] ARMSTRONG, J. OFDM for optical communications. *J. of Lightwave Technology*, v. 27, n. 3, p. 189–204, 2009.
- [28] Luciano Leonel Mendes. SBTVD Û Uma visão sobre a TV Digital no Brasil. *T&C Amazônia*, v. 48, n. 12, p. 48–59, 2007.

ANEXOS

I. CÓDIGO UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO EM MATLAB - ILUMINAÇÃO

```
%Simulacao do valor da intensidade da interferência  
%para cada ponto da sala utilizando superposição de  
%valores para cada luminária
```

```
phi=60;%Potência [W]  
Eficiencia=0.3;%Eficiência luminosa  
n=100;%Número de discretização da lâmpada  
L=1;%Tamanho da lâmpada [m]  
AlturaLuminaria=3;  
AlturaMedicao=1;  
S=0.026*L;%Área de cada Lâmpada [m2]
```

```
IntensidadeRadiante=Eficiencia*phi/(2*pi*n);  
Radiancia=Eficiencia*phi/(pi*S*n);
```

```
%Declara valores para dinamizar a operação  
COSSENO=zeros(101,101);  
SENO=COSSENO;  
Xo=COSSENO; Yo=Xo; Zo=AlturaMedicao*ones(101,101);  
X=Xo;Y=Yo;Z=AlturaLuminaria*ones(101,101);  
a=(0:0.1:10);  
distX2=cat(3); distY2=distX2; distZ2=distX2;  
for k=1:101  
    Xo(k,:)=a;  
    Yo(:,k)=a;  
end
```

```
%Cria os vetores de cada lâmpada  
Lampada=(-0.5:1/(n-1):0.5)*L;  
%Atribui valores dos centros das luminárias  
Xlum=[2.5 5 7.5 2.5 5 7.5 2.5 5 7.5];  
Ylum=[2.5 2.5 2.5 5 5 5 7.5 7.5 7.5];  
%Distribui as luminárias com 2 lâmpadas cada  
%nas posições do vetor criado acima  
posX=zeros(1,length(Xlum)*n*2);  
for k=1:length(Xlum)
```

```

posX(2*(k-1)*n+1:2*k*n)=[Lampada+Xlum(k),Lampada+Xlum(k)];
posY(2*(k-1)*n+1:(2*k-1)*n)=(Ylum(k)-0.05);
posY((2*k-1)*n+1:2*k*n)=(Ylum(k)+0.05);
end

%Calcula o seno e cosseno para cada ponto da luminária em
%relação a todos os pontos da altura escolhida.
cont=1;
while cont<=length(posX)
    X(:,:)=posX(cont)*ones(size(Xo));
    Y(:,:)=posY(cont)*ones(size(Yo));
    distZ2(:,:,cont)=(Z-Zo).^2;
    distY2(:,:,cont)=(Y-Yo).^2;
    distX2(:,:,cont)=(X-Xo).^2;
    COSSENO(:,:,cont)=((Z-Zo)./(sqrt(distX2(:,:,cont)+...
    distY2(:,:,cont)+distZ2(:,:,cont))));
    SEN0(:,:,cont)=sqrt(distX2(:,:,cont)+distY2(:,:,cont))./(...
    (sqrt(distX2(:,:,cont)+distY2(:,:,cont)+distZ2(:,:,cont))));
    cont=cont+1;
end

%Fonte extensa
Intensidade=zeros(101,101);
figure();
for cont=1:length(posX(:))
    Intensidade=(Intensidade+((Radiancia*S)*(SEN0(:,:,cont).^2)),...
    ./(distX2(:,:,cont)+distY2(:,:,cont)));
end
[A,B]=meshgrid(a,a);
surf(A,B,Intensidade)
xlabel('X (m)'); ylabel('Y (m)'); zlabel('Irradiância (w/m²)');
set(gcf,'Color','white')

%Fonte pontual
Intensidade2=zeros(101,101);
figure();
for cont=1:length(posX(:))
    Intensidade2=Intensidade2+(IntensidadeRadiante)*(COSSENO(:,:,cont)),...
    ./(sqrt(distZ2(:,:,cont)+distY2(:,:,cont)+distX2(:,:,cont))).^2;
end
[A,B]=meshgrid(a,a);

```

```
surf(A,B,Intensidade2)
xlabel('X (m)'); ylabel('Y (m)'); zlabel('Irradiância (w/m2)');
set(gcf,'Color','white');
```

II. CÓDIGO UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO EM MATLAB - APROXIMAÇÃO DAS CURVAS DO LED

```
%Criação dos gráficos em MATLAB
%Tensão por Corrente
VxC=[0 0.9433 1.8866 2.83 2.88 2.974 3.068 3.162 3.256 3.35];
v1=VxC(1:4);
v2=VxC(5:10);
t=[0 1 2 3 5 10 15 20 25 30];
t1=t(1:4);
t2=t(5:10);
x=(0:0.01:30);
y1=spline(t1,v1,x);
y2=spline(t2,v2,x);
Y=[y1(1:301) y2(301:3000)];
figure();
plot(x,Y,': ', 'Linewidth',4, 'color' , 'g' );
ylabel('Tensão (V)');
xlabel('Corrente (mA)');
axis([0 30 0 5]);
set(gcf,'Color','white')
grid on;

%Intensidade por Corrente
IxC=[26.5 40 50 56.25 62.5 69 75 81 87 92];
t=[5 7.5 10 12.5 15 17.5 20 22.5 25 27.5];
x=(5:0.01:27.5);
y=spline(t,IxC,x);
figure();
hold on;
plot(x,y,': ', 'Linewidth',3, 'color', 'g');
ylabel('Intensidade Relativa (%)');
xlabel('Corrente (mA)');
axis([0 30 0 100]);
set(gcf,'Color','white')
set(gca,'YTick',0:25:100);
set(gca,'XTick',0:5:30);
grid on;
hold off;
```

```

%Intensidade por Ângulo
angulodiscreto=[-9*pi/18 -8*pi/18 -7*pi/18 -6*pi/18 -5*pi/18 -4*pi/18 -3*pi/18
-2*pi/18 -1*pi/18 0 1*pi/18 2*pi/18 3*pi/18 4*pi/18 5*pi/18 6*pi/18 7*pi/18
8*pi/18 9*pi/18];
int=[0 0.25 0.45 0.65 0.78 0.86 0.93 0.97 0.99 1 0.99 0.97 0.93 0.86 0.78 0.65
0.45 0.25 0];
ang=round(10000*(-9*pi/18:0.0001:9*pi/18))/10000;
inttotal=spline(angulodiscreto,int,ang);
figure();
polar(ang,inttotal)
set(gcf,'Color','white')

```

III. CÓDIGO UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO EM MATLAB - O-OFDM UTILIZANDO LED

```
%Simulação de um sistema de comunicação ótico
%utilizando O-OFDM para diferentes modulações
%do sinal. (QAM-4, QAM-8 ... QAM-128)
%

Angulo=0;%Escolha do ângulo formado em graus
E=5;%Escolha do número de subsinais
Q=11;%Escolha do número de quantizações do sinal

%Define a intensidade relativa a partir do ângulo escolhido
zeta=1;
Angulo=round(10000*Angulo*pi/180)/10000;
while 10000*ang(zeta)~=10000*Angulo
    zeta=zeta+1;
end

%Define o número de bits para quantização escolhida
nbits=0;
while 2^nbits<Q
    nbits=nbits+1;
end
T=Q*E*nbits*4*5*6*7;

%Declara vetores para dinamização da simulação
Snrs=60;
BER=zeros(6,Snrs);
Sinal_Quantizado=zeros(1,T);
SNRstorage=zeros(6,Snrs);
Z=cat(3);

%Cria sinal a ser enviado para T valores de tempo
tempo=(1:1:T);%Tempo de simulação
Sinal_Entrada=2.5*sin(tempo/(20*nbits*E*Q))+2.5;

%Quantiza o sinal criado
for k=1:T
```

```

        while Sinal_Quantizado(k)-Sinal_Entrada(k)<=-2.5/(Q-1);
            Sinal_Quantizado(k)=Sinal_Quantizado(k)+5/(Q-1);
        end
    end

    %Codifica o sinal("Q"níveis diferentes)
    code=(0:5/Q:5);
    index=quantiz(Sinal_Quantizado,code);
    Sinal_Codificado=dec2bin(index,nbits);

    %Paraleliza o codigo de entrada
    A=Sinal_Codificado';
    A=A(:);
    Pre_Constelacao=reshape(A,E,length(A)/E);

    %Inicia o laço para várias QAMs
    for bitsQAM=2:7
        QAM=2^bitsQAM;

        %Gera a constelação para a QAM de cada ciclo.
        dec=zeros(E,T*nbits/(E*log2(QAM)));
        for k=1:E
            for q=1:T*nbits/(E*log2(QAM))
                dec(k,q)=bin2dec(Pre_Constelacao(k,(1+((q-1)*,...
                    (log2(QAM)))):(log2(QAM)*q)));
            end
        end
        EntradaIFFT=qammod(dec,QAM);

        %IFFT do sinal a ser enviado
        EntradaIFFT2=zeros(2*E+1,size(EntradaIFFT,2));
        for k=1:size(EntradaIFFT,2)
            Vauxiliar=EntradaIFFT(:,k);
            EntradaIFFT2(:,k)=[0; EntradaIFFT(:,k); conj(Vauxiliar(end:-1:1))];
        end
        SaidaIFFT=ifft(EntradaIFFT2);

        %Aplica a função de transferência do LED
        K1=20*10^-3/(Y(3000)-Y(1000));
        K2=(y(2000)-y(1000))/(20*10^-3);
        DerivadaImplicita=K1*K2;
        SinalComprimido=SaidaIFFT*(Y(3000)-Y(1000)),...

```

```

/(0.5*(max(SaidaIFFT(:))-min(SaidaIFFT(:))));
SinalPolarizado=y(1500)+DerivadaImplicita*SinalComprimido;
SinalDirecionado=inttotal(zeta)*SinalPolarizado;

%Inicia o laço para diferentes SNRs
for it=1:Snrs

%Inserção de ruído gaussiano no canal
SNR=(it-1);
Sinal_Transmitido=awgn(SinalDirecionado,SNR,'measured');

%Recepção do sinal transmitido no detedor:
%Tentativa de Restituir a linearidade do Sinal Despolarizado.
SinalAmplificado=Sinal_Transmitido/inttotal(zeta);
SinalDespolarizado=(100*(SinalAmplificado/DerivadaImplicita)-y(1500))/100-0.4;
SinalDescomprimido=SinalDespolarizado*(0.5*(max(SaidaIFFT(:))-min(SaidaIFFT,...
(:))))/(Y(3000)-Y(1000));

%FFT do sinal recebido
SaidaFFT2=fft(SinalDescomprimido);
SaidaFFT=SaidaFFT2(2:E+1,:);

%Detecção de símbolos recebidos
Sinal_Recebido=qamdemod(SaidaFFT,QAM);

%Codifica os símbolos recebidos
Pos_Constelacao=zeros(E,size(Sinal_Recebido,2)*bitsQAM);
Pos_Constelacao=char(Pos_Constelacao);
for k=1:E
    C=Sinal_Recebido(k,:);
    C=dec2bin(C);
    C=C';
    C=reshape(C,1,(size(Sinal_Transmitido,2)*log2(QAM)));
    Pos_Constelacao(k,:)=C;
end

%Serializa o sinal
Sinal_Recodificado=(reshape(Pos_Constelacao,nbits,length,...
(Pos_Constelacao(:))/nbits))';

%Calcula BER
BER(bitsQAM-1,it)=(sum((Sinal_Codificado(:)-Sinal_Recodificado(:)).^2),...

```

```

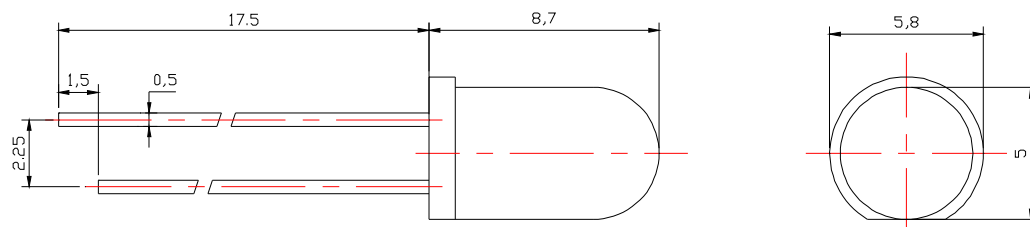
/length(Sinal_Codificado(:)));

%Monta o vetor SNR
SNRstorage(bitsQAM-1,it)=SNR;
end
end

%Plota o vetor SNR pela BER
%com as respectivas identificações
figure('name','BER(Bit Error Ratio) x SNR(Signal Noise Ratio)')
semilogy(SNRstorage(1,:),BER(1:),'b','LineWidth',3)
hold on;
semilogy(SNRstorage(2,:),BER(2:),'c','LineWidth',3)
semilogy(SNRstorage(3,:),BER(3:),'g','LineWidth',3)
semilogy(SNRstorage(4,:),BER(4:),'m','LineWidth',3)
semilogy(SNRstorage(5,:),BER(5:),'r','LineWidth',3)
semilogy(SNRstorage(6,:),BER(6:),'k','LineWidth',3)
title('BER x SNR');
xlabel('SNR'); ylabel('BER');
set(gcf,'Color','white')
legend('QAM4','QAM8','QAM16','QAM32','QAM64','QAM128')
grid on;
hold off;

```

IV. DATASHEET DO LED MODELO FD-5TW-2 DA FEDY TECHNOLOGY



Notes 注:

1.All dimension units are millimeters.

以上尺寸单位为 mm.

2.All dimension tolerance is $\pm 0.2\text{mm}$ unless otherwise noted.

以上尺寸平均误差 $\pm 0.2\text{mm}$.

3.An epoxy meniscus may extend about 1.5mm down the leads.

胶体底部爬胶尺寸不超过 1.5mm.

4.Burr around bottom of epoxy may be 0.5mm max.

胶体尺寸最大误差 $\pm 0.5\text{mm}$.

■ Features 特征:

●The service life

is long 使用寿命长

●The credibility is

strong 可靠性强

●Environmental

protection,economy

energy 环保、节能

■ Descriptions 产品描述:

●The series is specially

designed for appliction

requiring higher brightness.

此系列专用于高亮需求领域

■ Applications 适用范围:

●Illuminate 照明

●Monitor 监视器

●Backlight 背光

Chip		Lens Color 胶体颜色
Material 材质	Emitting Color 发光颜色	
InGaN	White	Water clear

■Absolute Maximum Ratings at Ta=25 °C 极限参数（环境温度 Ta=25 °C）

Parameter 参数	Symbol 符号	Rating 范围	Unit 单位
Forward Current 正向工作电流	IF	20	mA
Operating Temperature 正常使用温度	Topr	-25 to +80	°C
Storage Temperature 贮藏温度	Tstg	-25 to +80	°C
Soldering Temperature 可焊接温度	Tsol	260	°C
Power Dissipation 极限功耗	Pd	50	mW
Peak Forward Current (Duty1/10@1kHz) 脉冲驱动时极限正向电流 1 msec 脉冲	IF(Peak)	100	mA
Reverse Voltage 反向冲击电压	VR	5	V

■Electronic Optical Characteristics 光电特性

Parameter 参数	Symbol 符号	Min. 最小值	Typ. 中间值	Max. 最大值	Unit 单位	Condition 测试条件值
Luminous Intensity 发光亮度	IV	18000	/	20000	mcd	IF=20mA
Viewing Angle 发光角度	2θ½	/	15	/	deg	IF=20mA
Peak Wavelength 峰值波长	X	/		/	/	IF=20mA
	Y	6000		6500	/K	
Forward Voltage 正向电压降	Vf	3.2		3.4	V	IF=20mA
Reverse Current 反向电流	IR	/	/	5	μA	VR=5V



Shenzhen Fedy Technology Co., Ltd

Part Number: FD-5TW-2

Suggestions to customers 使用注意事项:

- 1、 Soldering Bath at $260^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ with in 3 seconds.(Dip depth should under 6mm below seating plane.) 焊接温度要求在 $260^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内不超过 5 秒 (焊点位置应至少低于底座的 4mm)
- 2、 The neutrality flux must be used before soldering. 焊接时要求用中性助焊剂

CLEANING 清洁:

Do not use unspecified chemical liquid to clean LED. They could harm it IF cleaning is necessary, wipe the pin out with alcohol、Freon TE or Chlorosen at normal temperature for less than 1 minute or wipe the surface with alcohol. 禁止使用不明化学液体擦拭发光管器件，以免导致伤害材料。如果一定要擦拭材料，建议使用酒精、VREONTE 或 CHLORROSEN 在常温下擦拭不超过 1 分钟。

METHODS AGAINST STATIC ELECTRICITY 防静电工艺:

Static electricity is the enemy of lamps emitting blue and green. Workers must put on working rings、gloves clothes that protect static electricity while working. Wires of the rings keep well together with the floor and there must be wires to connect the irons and the floor. 在使用兰、绿 LED 时，作业员必须佩戴静电环、防静电手套、穿防静电服，静电环须与地面接触良好，烙铁须接地线。

PREVENTING OVERCURRENT 过流保护:

- 1、 Be not overcurrent. 禁止使用大电流。
- 2、 In order to cooperate LEDs under stable conditions, put protective resisetor in seride. Resistor values can be determined by supplying voltage or current for the LEDs Recommended current is in the range of forward current 5mA-20mA. 使用中 加入保护电阻以便配合发光二极管的正常使用。保护电阻可以限制电压或电流不超过发光二极管的正常使用范围。建议使用时的正常电流在 5mA-20mA.

Circuit must be designed so that overvoltage is not applied the LED during on/off switching. Transient or pulse current will damage junction of LED die. 在使用发光二极管器件时，必须先设计电路的电压和电流，以免 LED 过载，短暂的过载就可能导致 LED 发光部分损坏而不能发光。

■Reliability Performance 可靠性测试

(1) TEST ITEMS AND RESULTS 测试项目和结果

Type 类型	Test Item 测试项目	REF Standard 标准	Test Conditions 测试条件	Note 备注	Number of Damaged 测试结果
Environmental Sequence 测试环境次序	Resistance to Soldering Heat (Reflow Soldering) 高温长时间焊接测试		Tsld=230 °C,10sec	2times 次	0/22
	Temperature cycle 温度周期	JIS C 7021 (1977)A-4	-20°C 30min 5min 80°C 30min	100 cycle	0/100
	Thermal Shock 高低温测试	MIL-STD- 107D	-20°C 15min 80°C 15min	100cycle	0/100
	High Temperature Storage 高温贮藏测试	JIS C 7021 (1977)B-10	Ta=80°C	1000hrs	0/100
	Temperature Humidity Storage 高湿度贮藏测试	JIS C 7021 (1977)B-11	Ta=60°C RH=90%	1000hrs	0/100
	Low Temperature Storage 低温贮藏测试	JIS C 7021 (1977)B-12	Ta=-30°C	1000hrs	0/100
Operation Sequence	Life Test 寿命测试	JIS C 7035 (1985)	Ta=25°C IF=20mA	1000hrs	0/100
	High Humidity Heat Life Test 高温高湿测试		60°C RH=90% IF=20mA	500hrs	0/100
	Low Temperature Life Test 低温寿命测试		Ta=-20°C IF=20mA	1000hrs	0/100

(2).Criteria for Judging The Damage 测试标准:

Item 项目	Symbol 符号	Test Conditions 测试条件	Criteria for Judgment 标准	
			Min	Max
Forward Voltage 正向电压降	VF	IF=20mA		U.S.K*1.2
Reverse current 反向电流	IR	VR=5V		U.S.L*2.2
Luminous Intensity 发射功率	IV	IF=20mA	L.S.L**x0.7	

U.S.L*:Upper Standard Level

L.S.L**:Lower Dstandard Level

Optical characteristics curves

