

UNIVERSIDADE FEDERAL MINAS GERAIS  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Lucas Skackauskas Gino

**Algoritmos de otimização para  
melhoria da eficiência energética em  
sistemas VLC**

Belo Horizonte

2022

Lucas Skackauskas Gino

**Algoritmos de otimização para melhoria da eficiência  
energética em sistemas VLC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Andrea Chiuchiarelli

Coorientador: Davies William de Lima Monteiro

Belo Horizonte

2022

G493a	<p>Gino, Lucas Skackauskas.          Algoritmos de otimização para melhoria da eficiência energética em sistemas VLC [recurso eletrônico] / Lucas Skackauskas Gino. - 2022.          1 recurso online (71 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Andrea Chiuchiarelli.          Coorientador: Davies William de Lima Monteiro.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 70-71.          Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Algoritmos genéticos - Teses.          3. Eficiência energética - Teses. 4. Diodos emissores de luz - Teses.          I. Chiuchiarelli, Andrea. II. Monteiro, Davies William de Lima.          III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.          IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## FOLHA DE APROVAÇÃO

"ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS VLC"

**LUCAS SKACKAUSKAS GINO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 19 de julho de 2022. Por:

Prof. Dr. Andrea Chiuchiarelli  
DELT (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro  
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Lucas de Souza Batista  
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Luciana Pedrosa Salles  
DEE (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Chiuchiarelli, Professor do Magistério Superior**, em 10/08/2022, às 19:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1609930** e o código CRC **88D82971**.

*Dedicado a minha esposa, Michelle, minha filha Júlia, aos meus pais, Oswaldo e Vania, e aos meus irmãos.*

# Agradecimentos

Agradeço à Deus por me proporcionar a vida e saúde permitindo-me concluir esse trajeto.

À minha esposa, Michelle, em todos meus percursos, e principalmente durante a pós-graduação, o apoio e compreensão.

À minha filha, Júlia, pela compreensão e carinho, durante esses anos, mesmo com minhas ausências.

Aos meus pais, Oswaldo e Vania, pela dedicação ao meu crescimento como pessoa, estudante e profissional, e por serem exemplos em minha vida.

Aos meus irmãos, pelo companheirismo e união.

Ao professor Andrea Chiuchiarelli, pela ajuda, dedicação, disponibilidade e ensinamentos durante o processo de orientação. Ao professor Davies William de Lima Monteiro, pelo apoio e ensinamentos na coorientação.

Aos familiares e amigos, pelo companheirismo e carinho.

Aos professores da Universidade Federal de Minas Gerais, que tanto contribuíram na minha formação.

# Resumo

Comunicação por luz visível (*Visible Light Communication* - VLC) é uma tecnologia em que a informação é transmitida no espaço livre por meio de fontes de luz que emitem no espectro visível. Com o desenvolvimento e o crescimento da utilização de LEDs (*Light Emitting Diode*) em iluminação e displays, além da facilidade em modular sua intensidade, os sistemas VLC vem sendo considerados um promissor complemento aos sistemas de comunicação por radio-frequência, os quais encontram-se com banda insuficiente para atender à crescente demanda por conectividade. Desta forma, principalmente em ambientes *indoor*, os sistemas VLC podem combinar os propósitos de iluminação e transmissão de dados. Entretanto, os ambientes *indoor* podem apresentar geometrias e topologias variadas, em que a preocupação deve ser o melhor *trade-off* entre a performance e a eficiência. Neste trabalho é proposta uma abordagem baseada em algoritmos genéticos (GAs) para otimização da distribuição dos transmissores VLC em ambientes *indoor*, com o objetivo de encontrar a melhor configuração, em termos de número e de localização dos mesmos, capaz de garantir um determinado nível de desempenho do sistema de comunicação, quantificado por meio da taxa de erro de bits recebidos (*Bit Error Rate* - BER) minimizando ao mesmo tempo a potência total emitida.

Palavras-chave: Visible Light Communication, Algoritmos genéticos, Eficiência, LED.

# Abstract

Visible Light Communication (VLC) is a technology in which information is shared in free space within the cone of light emitted in the visible spectrum. The development and growth of the use of LED (*Lighth Emitting Diode*) in lighting and displays, in addition to the ease of modulating its intensity, VLC systems have been considered a promising complement to the radio-frequency communication system, which has insufficient bandwidth to the growing demand for connectivity. In this way, especially in *indoor* environments, also offers the additional advantage of using the same optical source for both lighting and data transmission purposes. However, *indoor* environments can feature varied geometries and topologies, in which the concern must be the best *trade-off* between performance and efficiency. In this work, we propose an optimization strategy in *indoor* environments with transmission in VLC based on genetic algorithms (GA), in which, given the data rate, the number of transmitters and the target *Bit Error Rate* (BER), it seeks to minimize the emitted power required in the transmitters.

*Keywords: Visible Light Communication, Genetic Algorithms, Efficiency, LED.*

# Lista de Ilustrações

Figura 1 – Espectro eletromagnético da luz visível . . . . .	18
Figura 2 – Sistema VLC . . . . .	21
Figura 3 – Processo de excitação eletrônica do LED . . . . .	22
Figura 4 – Emissão do LED de GaAs (Ghassemlooy et al. [2013]) . . . . .	23
Figura 5 – Padrão de emissão Lambertiano . . . . .	24
Figura 6 – Comparação da largura de banda de emissão dos LEDs azul-fósforo e tri-cromático (Ghassemlooy et al. [2013]) . . . . .	25
Figura 7 – Dependência do material para o comprimento de onda de operação (adaptado de IGA [2003]) . . . . .	26
Figura 8 – Estrutura de um VCSEL (adaptado de BARBOSA [2017]) . . . . .	27
Figura 9 – Junção pn . . . . .	28
Figura 10 – Estrutura básica de um fotodiodo . . . . .	28
Figura 11 – Fotodiodo tipo PIN (adaptado de Ghassemlooy et al. [2013]) . . . . .	30
Figura 12 – Canal LOS . . . . .	32
Figura 13 – Canal NLOS . . . . .	33
Figura 14 – Resposta ao impulso canal VLC . . . . .	33
Figura 15 – Principais etapas do Algoritmo Genético . . . . .	37
Figura 16 – Crossover por variável . . . . .	39
Figura 17 – Mutação bit-flip . . . . .	40
Figura 18 – Seleção por torneio . . . . .	41
Figura 19 – Dimensões da sala utilizada para simulações . . . . .	43
Figura 20 – Resposta ao impulso para um transmissor LOS . . . . .	45
Figura 21 – Distribuição da potência recebida no plano receptor por um transmissor LOS . . . . .	45
Figura 22 – Distribuição no plano receptor para 2 Transmissores LOS a) Potência de recepção e b) SNR . . . . .	46
Figura 23 – Distribuição da potência recebida no plano receptor para a) 3 transmissores LOS e b) 4 transmissores LOS . . . . .	46
Figura 24 – Resposta ao impulso para três transmissor LOS . . . . .	47
Figura 25 – Resposta ao impulso para quatro transmissor LOS . . . . .	47

Figura 26 – Distribuição da potência recebida no plano receptor para a) 1 transmissor NLOS e b) 2 transmissores NLOS . . . . .	48
Figura 27 – Resposta ao impulso no receptor para a) 3 transmissores NLOS e b) 4 transmissores NLOS . . . . .	48
Figura 28 – Sala considerada no problema de otimização a) Dimensões e b) Área circular . . . . .	49
Figura 29 – Sala primeiro cenário . . . . .	51
Figura 30 – Histograma do fitness da população a) Inicial, b) 2500 iterações, c)5000 iterações e d) 10000 iterações . . . . .	52
Figura 31 – Histograma da distribuição da população inicial . . . . .	53
Figura 32 – Distribuição da população a) Inicial e b) Final . . . . .	53
Figura 33 – Fitness da população ao longo das iterações a) Mínimo e b) Média . . . . .	53
Figura 34 – Posição final dos transmissores . . . . .	54
Figura 35 – Distribuição no plano receptor a) SNR e b) BER . . . . .	54
Figura 36 – Distribuição da posição final dos transmissores a) 3, b) 4, c) 7 e d) 10 . . . . .	55
Figura 37 – Distribuição da SNR para número transmissores a) 3, b) 4, c) 7 e d) 10 . . . . .	56
Figura 38 – Potência dos transmissores de acordo com variação da taxa de transmissão, para o número de transmissores a) 2, b) 4, c) 6 e d) 8 . . . . .	56
Figura 39 – Variação da potência total relativo ao número de transmissores utilizados para as taxas a) $200Mb/s$ , b) $500Mb/s$ , c) $1000Mb/s$ e d) $2000Mb/s$ . . . . .	57
Figura 40 – Potência óptica total variando-se o número de transmissores e taxa de transmissão de dados . . . . .	57
Figura 41 – Posições aleatórias . . . . .	58
Figura 42 – Comparação entre o resultado do algoritmo genético e posições aleatórias geradas para três transmissores . . . . .	59
Figura 43 – Posições aleatórias . . . . .	59
Figura 44 – Posições aleatórias . . . . .	60
Figura 45 – Comparação entre o resultado do algoritmo genético e posições aleatórias geradas para quatro transmissores . . . . .	60
Figura 46 – Comparação entre o resultado do algoritmo genético e posições aleatórias geradas para cinco transmissores . . . . .	61
Figura 47 – Cenário com uma mesa - plano receptor . . . . .	62
Figura 48 – Distribuição dos 6 transmissores e mapa de sombras . . . . .	62
Figura 49 – Distribuição no plano receptor considerando uma mesa a) SNR b) BER . . . . .	63
Figura 50 – Comparação da potência óptica emitida variando-se o número de transmissores . . . . .	63
Figura 51 – Comparação do cenário com mesa a $200Mb/s$ , com cenário sem mesa em diversas taxas . . . . .	64
Figura 52 – Cenário com duas mesas . . . . .	65

Figura 53 – Distribuição dos 6 transmissores e mapa de sombras para cenário com duas mesas . . . . .	65
Figura 54 – Comparação da potência óptica emitida variando-se o número de transmissores . . . . .	66
Figura 55 – Distribuição SNR para plano receptor com duas mesas . . . . .	67
Figura 56 – Comparação do cenário com duas mesas em diversas taxas . . . . .	67

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Materiais comuns de LED e respectivos comprimentos de onda de emissão.	24
Tabela 2 – Comparação Fotodiodo PIN e APD (adaptado de Ghassemlooy et al. [2013]) . . . . .	31
Tabela 3 – Parâmetros da variância do ruído . . . . .	35
Tabela 4 – VLC Parâmetros . . . . .	44
Tabela 5 – VLC Algoritmo Genético . . . . .	50

# Lista de Abreviaturas e Siglas

UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
OptMA	Laboratório para Optrônica e Microtecnologias Aplicadas
RF	Radiofrequência
VLC	<i>Visible Light Communications</i>
IM/DD	<i>Intensity Modulation/Direct Detection</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LOS	<i>Line of sight</i>
NLOS	<i>Non-Line of sight</i>
FOV	<i>Field of view</i>
ISI	Interferência intersimbólica
SNR	<i>Signal to Noise Rate</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
VCSEL	<i>Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers</i>
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
NRZ-OOK	<i>Non-return-to-zero on-off-keying</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
FET	<i>Field-effect transistor</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
NSGA-II	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II</i>

# Lista de Símbolos

$k$	Constante de Boltzmann
$h$	Constante de Planck
$c$	Velocidade da luz no vácuo
$\lambda$	Comprimento de onda
$m$	Índice de emissão Lambertiano
$\phi_{1/2}$	Ângulo de meia potência
$I_p$	Corrente do fotodiodo
$q$	Carga do elétron
$n_p$	Concentração de buracos na banda de valência
$B$	Taxa de transmissão de dados
$\Psi$	Ângulo de incidência
$\phi$	Ângulo de irradiância
$\delta$	Função Dirac
$\pi$	Constante Pi
$R$	Responsividade do fotodetector
$I_B$	Corrente fotogerada devido a radiação background
$G_{OL}$	Ganho de tensão de open-loop
$C_{pd}$	Capacitância fixa do fotodetector por unidade de área
$\Gamma$	Fator de ruído de canal FET
$g_m$	Transcondutância FET
$A_r$	Área do fotodetector

$\rho$	Coefficiente de reflexão
$T_K$	Temperatura em Kelvin
$\Re$	Conjunto dos números reais
$dH$	Distância de Hamming
$L_i$	Número de bits da representação binária
$p_c$	hyperparâmetro de taxa de recombinação
$p_m$	hyperparâmetro de taxa de mutação

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>17</b>
1.1	Motivação e Justificativa da Pesquisa	19
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	Contribuições do trabalho	20
1.4	Estrutura da Monografia	20
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>21</b>
2.1	Sistemas VLC	21
2.1.1	Transmissores ópticos em sistemas VLC	21
2.1.1.1	LED	22
2.1.1.2	VCSEL	25
2.1.1.2.1	Reflectores de Bragg	26
2.1.2	Receptores ópticos em sistemas VLC	27
2.1.2.1	Fotodiodo	28
2.1.3	Canal VLC	31
2.1.3.1	Canal LOS	31
2.1.3.2	Canal NLOS	32
2.1.3.3	Figuras de mérito	34
2.2	Otimização	34
2.2.1	Algoritmos Genéticos	36
2.2.1.1	Representação	37
2.2.1.2	Operadores de variação	38
2.2.1.2.1	Recombinação	39
2.2.1.2.2	Mutação	39
2.2.1.3	Mecanismos de seleção	40
2.2.1.3.1	Seleção dos pais	41
2.2.1.3.2	Seleção dos sobreviventes	41
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>43</b>
3.1	Simulação do canal VLC	43
3.1.1	Canal LOS VLC	44
3.1.2	Canal NLOS VLC	46
3.2	O problema de otimização	48
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>51</b>
4.1	Otimização no plano receptor	52
4.1.1	Análise da variação do número de transmissores e taxas	55

4.1.2	Validação do algoritmo de otimização . . . . .	58
4.2	Otimização no plano receptor com mesa . . . . .	61
4.3	Otimização no plano receptor com duas mesas . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>68</b>
5.1	Propostas de Continuidade . . . . .	69
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>70</b>

# Capítulo 1

## Introdução

O crescimento da demanda por conectividade móvel, impulsionado pelo o advento de tecnologias como internet das coisas (IoT) e 5G, tem mostrado a limitação do espectro de frequência de rádio. Além da limitação de banda, há outras limitações inerentes ao uso de radiofrequências, sendo as principais (Khan [2017]): A) Interferência eletromagnética (exemplo da interferência de telefones celulares em aeronaves). B) Ser pouco adequado para aplicações que necessitam de baixa latência. C) Poder sofrer problemas de segurança por penetrar facilmente em paredes. D) A potência da ondas RF acima de certos limites pode impor riscos à saúde humana. E) A comunicação RF é ineficiente energeticamente, pois exige diferentes *setup* para a comunicação RF.

Desta forma, faz-se necessária a utilização de outra tecnologia que complemente a utilização das ondas RF. Neste contexto, os sistemas de comunicação por luz visível (*Visible Light Communications* - VLC) vêm sendo estudados como uma alternativa promissora às comunicações RF, principalmente devido à larga faixa ocupada pela luz visível no espectro eletromagnético, variando seu comprimento de onda entre 350 nm e 880 nm, correspondendo a frequências entre 430 THz e 790 THz, como mostrado na Figura 1. Além disso, em contrapartida ao RF, sistemas VLC são melhores soluções para comunicação *indoor* devido à sua larga banda de transmissão livre de licença, alta imunidade a ruídos eletromagnéticos e alta segurança de dados na camada física.(Khan [2017])

A tecnologia VLC utiliza-se, na maioria dos casos, de LEDs, sendo hoje a principal fonte de iluminação em diversos ambientes, devido a seu tempo de vida maior comparado com lâmpadas fluorescente e incandescentes (Ndjionguea et al. [2015]). Desta maneira, VLC utiliza-se de LEDs para transmitir dados usando modulação de intensidade com detecção direta (*intensity modulation with direct detection* - IM-DD), sendo o sinal detectado por um fotodiodo em um receptor, onde estes sistemas têm sido utilizados principalmente para comunicação de dados ponto a ponto (Haas et al. [2016]).

Desta forma, em qualquer que seja a aplicação que envolva luz, principalmente

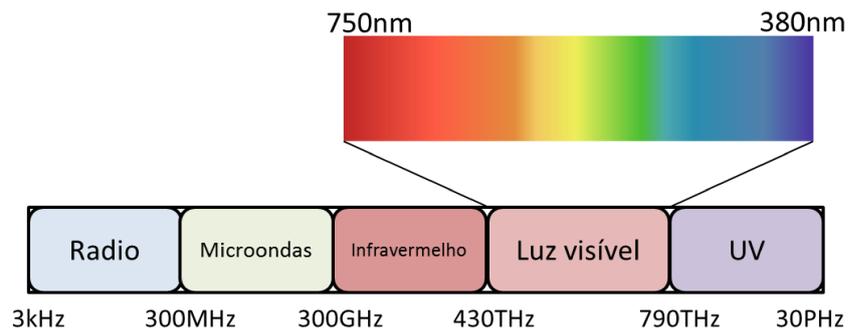


Figura 1 – Espectro eletromagnético da luz visível

em ambientes internos, pode-se combinar a função de iluminação dos LEDs com uma nova função de comunicação. Podem-se citar diferentes aplicações para o VLC, tais como Li-Fi, comunicação veículo para veículo, robôs em hospitais, informações exibidas em *displays* de sinalização (Khan [2017]), além de aplicações em redes domésticas, aproveitando-se da iluminação em escritórios, comunicação de alta velocidade em cabines de avião, comunicação em trens e gerenciamento de semáforos (Ghassemlooy et al. [2013]).

Na modelagem de canais VLC, existem tipicamente dois casos principais de comunicação, sendo eles comunicação por visada direta (*line-of-sight* - LOS) e por visada indireta (*non-line-of-sight* - NLOS), que dependem da configuração do receptor e do transmissor. Nos canais LOS existe um caminho óptico desobstruído entre o receptor e transmissor. Já nos canais NLOS, os fótons emitidos pelo transmissor são refletidos nas paredes ou em outros objetos antes de chegar ao receptor .

Normalmente, ambientes de aplicação VLC são compostos pelos dois tipos de canais LOS e NLOS, onde no receptor podem chegar fótons advindos de diferentes caminhos. O efeito de caminho múltiplo deve ser considerado em fase de projeto do sistema, pois pode levar a interferência intersimbólica (ISI), limitando a largura de banda do canal.(Ghassemlooy et al. [2013])

Neste âmbito, para controlar a interferência intersimbólica e maximizar a taxa de transmissão de dados em sistemas VLC, faz-se necessário o monitoramento de parâmetros tais como relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR) e taxa de erro (*Bit Error Rate* - BER). Através destes parâmetros pode-se verificar a qualidade da comunicação. Em canais RF, normalmente o *Signal to Noise Ratio* (SNR) é proporcional à média da potência recebida, enquanto para *links* ópticos *wireless* é proporcional ao quadrado da potência média recebida (Ghassemlooy et al. [2013]), dependente do ganho do canal, da densidade espectral de ruído e da responsividade do receptor.

A proposta deste trabalho é de gerar algoritmos de otimização baseados em algoritmos genéticos (GA) e aplicá-los a sistemas VLC, tendo como objetivo o de garantir um determinado nível de SNR e de BER escolhendo a distribuição ótima aproximada dos

transmissores, tanto em termos de posicionamento quanto de potência transmitida, de modo a maximizar a performance do sistema.

## 1.1 Motivação e Justificativa da Pesquisa

Os atuais estudos, Khan [2017] Haas et al. [2016] por exemplo, não se aprofundam em uma análise visando a otimização de parâmetros em sistemas VLC. Portanto, a principal motivação é preencher essa lacuna através da modelagem e análise de canal VLC, realizando o levantamento de possíveis parâmetros que possam ser otimizados.

Assim, esta pesquisa visa, a partir destes parâmetros e objetivando a maximização da performance da comunicação do sistema VLC, o desenvolvimento de algoritmos de otimização para este fim.

Através do levantamento dos parâmetros a serem otimizados e realizando a geração de dados suficiente para alimentar o algoritmo de otimização a ser desenvolvido, pretende-se melhorar o desempenho de um sistema VLC.

Para tal, o problema a ser solucionado nesta pesquisa é o desempenho de sistemas VLC a partir da maximização de parâmetros tais como *Signal to Noise Ratio* (SNR) ou minimização da *Bit Error Rate* (BER), por meio do desenvolvimento e implementação de algoritmos de otimização aplicados a estes sistemas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como finalidade o estudo de sistemas VLC (*Visible Light Communications*) e implementação de um algoritmo de otimização aplicado à melhoria de performance e eficiência. Aplicado a ambientes específicos, será realizada a análise dos resultados do algoritmo aplicado à otimização dos parâmetros levantados através do estudo do canal de comunicação VLC.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o canal de sistemas VLC.
- Analisar parâmetros de comunicação em VLC.
- Definir os parâmetros a serem otimizados que garantam melhores resultados aos sistemas VLC.

- Aplicar um algoritmo de otimização a ambientes específicos a fim de validar os resultados.

### 1.3 Contribuições do trabalho

Com base nos objetivos propostos neste trabalho foram estudados os parâmetros que mais influenciam no ganho do canal óptico VLC, e aplicado um algoritmo de otimização a cenários específicos.

Desta maneira, foi desenvolvido neste trabalho um simulador do canal óptico, baseado nas formulações encontradas na literatura ([Ghassemlooy et al. \[2013\]](#) e [Mohsen Kavehrah and Zhou \[2016\]](#)), além do desenvolvimento de um algoritmo de otimização, aplicado a este simulador do canal óptico.

Por fim, alcançou-se melhores resultados no que tange a eficiência energética, os quais foram apresentados no artigo *Optimization technique for efficiency improvement in Visible Light Communication systems*, apresentado no 2021 *International Microwave and Optoelectronics Conference (SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2021)*. ([GINO et al. \[2021\]](#))

### 1.4 Estrutura da Monografia

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo que este apresentou uma breve introdução sobre os sistemas VLC e suas tecnologias, bem como os objetivos propostos para o projeto de mestrado. O capítulo 2 traz a abordagem teórica sobre os sistemas VLC, definindo-se as características dos transmissores e receptores, bem como o estudo do canal de comunicação VLC. Além disso, os conceitos do algoritmo de otimização utilizado no estudo e características dos algoritmos genéticos são apresentados. No capítulo 3, apresenta-se o simulador do canal VLC implementado e seus resultados. Além disso, traz a definição a situação problema em que será aplicado o algoritmo de otimização escolhido. No capítulo 4 são discutidos as diversas simulações realizadas bem como os resultados obtidos e a comparação com outros trabalhos. Finalmente, o capítulo 5 traz as conclusões do trabalho baseadas nos resultados apresentados no capítulo 4, além de propostas de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será abordado a teoria sobre os sistemas VLC, definindo-se as características dos transmissores e receptores, bem como o estudo do canal de comunicação VLC. Em um segundo momento serão apresentados os conceitos do algoritmo de otimização utilizado no estudo e suas características.

#### 2.1 Sistemas VLC

Considerando o sistema VLC apresentado na Figura 2, este capítulo apresentará um estudo dos principais dispositivos que o compõem, com enfoque naqueles que pertencem ao domínio óptico do sistema, tais como os transmissores ópticos e os receptores, e será analisada no detalhe a modelagem do canal óptico, o qual será apresentado na seção 2.1.3. (Ndjionguea et al. [2015])

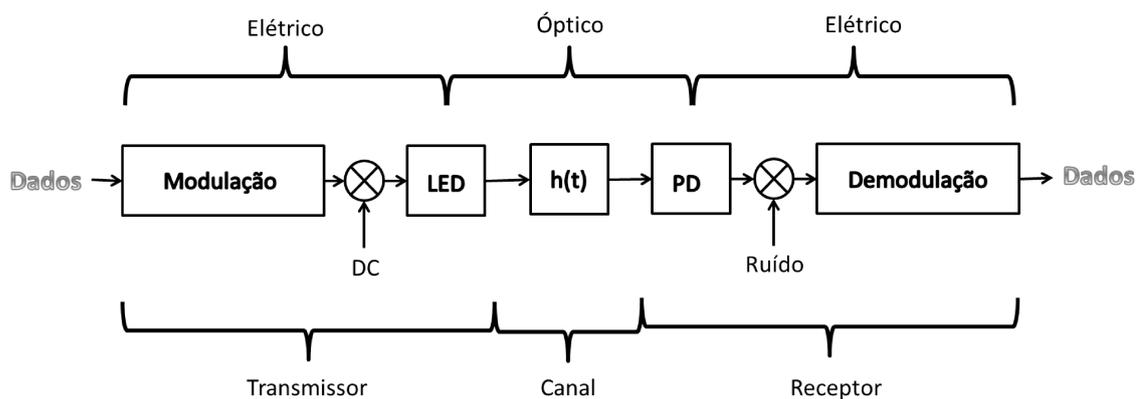


Figura 2 – Sistema VLC

##### 2.1.1 Transmissores ópticos em sistemas VLC

Existem diversos transmissores possíveis de serem utilizados em sistemas VLC, tais como lasers, LEDs e VCSELs. Os LEDs tornaram-se a fonte opto-eletrônica mais popular,

sendo fabricados para funcionar no espectro eletromagnético desde o infravermelho até o visível. (Ndjionguea et al. [2015])

Diante da necessidade de combinar as funções de iluminação com transmissão de dados, os LEDs tornaram-se a escolha mais viável, tendo em vista que emitem luz de forma não coerente (difusa). Os LEDs de luz branca ainda possuem largura de banda de modulação entre 20 MHz e 100 MHz, além de serem mais confiáveis, terem melhor eficiência luminosa e menor consumo energético, quando comparados a outras fontes de luz branca, como a luz incandescente.

A seção 2.1.1.1 apresenta um detalhamento maior das características e funcionamento de um LED. Além disso, a seção 2.1.1.2 apresenta um outro tipo de transmissor que vem sendo aplicado em sistemas VLC, o VCSEL.

### 2.1.1.1 LED

O LED é um semiconductor de junção p-n, o qual emite radiação óptica quando submetido a uma excitação eletrônica, através da aplicação de uma tensão através da junção. Desta forma, a excitação eletrônica causa a geração de pares elétrons-lacunas nas bandas de condução e de valência, respectivamente. Após um transitório inicial, os elétrons na banda de condução podem retornar à banda de valência, recombinando-se com uma lacuna e cedendo sua energia em forma de radiação eletromagnética (fóton). A Figura 3 ilustra esse processo de recombinação radiativa, chamado emissão espontânea.

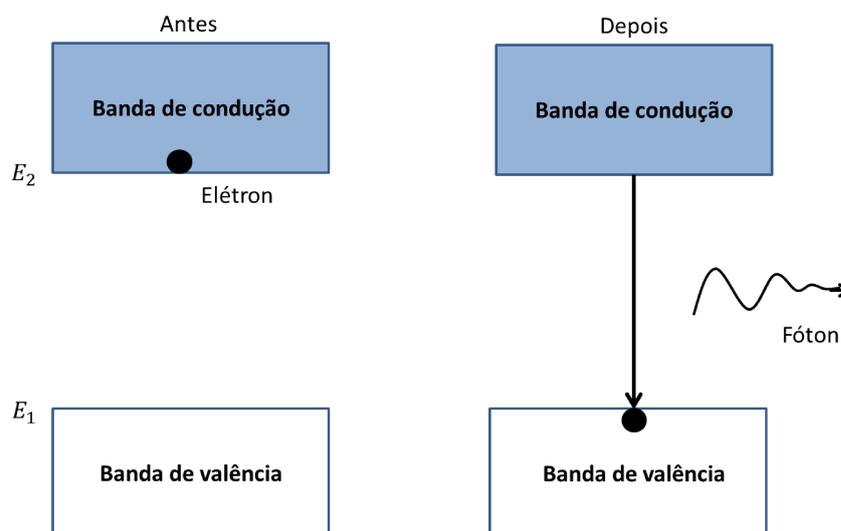


Figura 3 – Processo de excitação eletrônica do LED

O LED emite luz com intensidade ( $I$ ) proporcional ao gap de energia do material semiconductor  $E_g$ , ao nível de energia ocupado pelo elétron  $E$ , além da constante de Boltzmann  $k$ , da constante de Planck  $h$ , da frequência do fóton  $\nu$  e da temperatura

absoluta  $T$ , conforme apresentado na equação 2.1 (Ghassemlooy et al. [2013]).

$$I(E = h\nu) \propto \sqrt{E - E_g} \exp \frac{-E}{kT} \quad (2.1)$$

A partir então desta energia em  $Ev$  verifica-se o comprimento de onda  $\lambda$  de emissão através da relação, onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo:

$$\lambda = \frac{hc}{E(Ev)} \quad (2.2)$$

Desta forma, tem-se por exemplo o espectro de emissão do LED GaAs, bem como a dependência do pico de emissão e da largura de meia potência, apresentados na Figura 4.

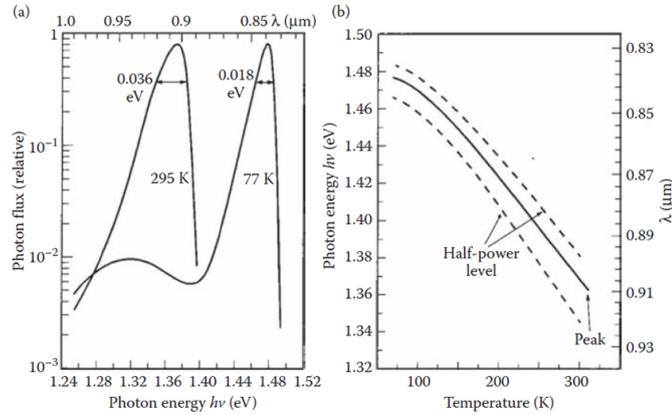


Figura 4 – Emissão do LED de GaAs (Ghassemlooy et al. [2013])

Diferentes tipos de materiais emitem fótons de diferentes comprimentos de onda, já que o gap de energia  $E_g$  depende do material semiconductor. A Tabela 1 apresenta o pico ou range de emissão em comprimento de onda para diferentes materiais comuns de fabricação de LED (Ghassemlooy et al. [2013]).

A maioria dos LEDs emite luz seguindo uma distribuição de emissão de tipo Lambertiano, apresentada na Figura 5 (Ghassemlooy et al. [2013]), em que a máxima intensidade ( $I_o$ ) é perpendicular à superfície plana, e a intensidade de emissão ( $I(\theta)$ ) reduz para os lados baseado no ângulo de visão ( $\theta$ ), a partir da relação apresentada na equação 2.3.

$$I(\theta) = I_o \cos(\theta) \quad (2.3)$$

A distribuição Lambertiana é caracterizada pela ordem de emissão, a qual está relacionada ao ângulo de emissão de meia potência  $\phi_{1/2}$  através da relação abaixo (Ndjionguea

Tabela 1 – Materiais comuns de LED e respectivos comprimentos de onda de emissão.

LED Material/ substrato	Pico ou range do comprimento de onda (nm)
AlGaIn/GaN	230-350
InGaIn/GaN	360-525
ZnTe/ZnSe	459
SiC	470
GaP	470
GaAs <sub>0.15</sub> P <sub>0.85</sub>	589
AlGaInP/GaAs	625-700
GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub> /GaAs	632
GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub> /GaAs	650
GaAsP/GaAs	700
Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As/GaAs	650-900
GaAs	910-1020
InGaAsP/InP	600-1600

et al. [2015]):

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln \phi_{1/2}} \quad (2.4)$$

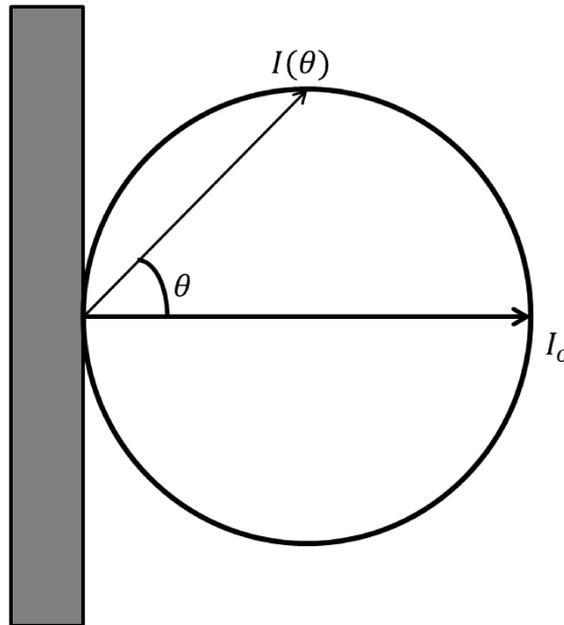


Figura 5 – Padrão de emissão Lambertiano

As duas principais tipologias de LED para emissão de luz branca são o LED de luz azul adicionado de revestimento de fósforo, e o LED tri-cromático, o qual combina as luzes vermelha, verde e azul (RGB) (Khan [2017]). O primeiro tem a desvantagem de

ter sua largura de banda limitada a alguns  $MHz$ , devido ao lento decaimento do fósforo, sendo então aplicado apenas a sistemas de até  $40 Mb/s$  em uma modulação NRZ-OOK, por exemplo. O último, mais utilizado, tem grande largura de banda e alcança altas taxas de transmissão, podendo até ser utilizadas técnicas de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). Além disso, a banda de emissão dos dois tipos de LEDs são distintas, tendo em vista que um utiliza a emissão de luz em uma cor específica (azul), reagindo com revestimento de fósforo amarelo, e o outro já emite, de maneira separada, luz nas três cores citadas anteriormente, as quais combinadas formam a luz branca. A Figura 6 ilustra a diferença da banda de emissão dos LEDs citados.

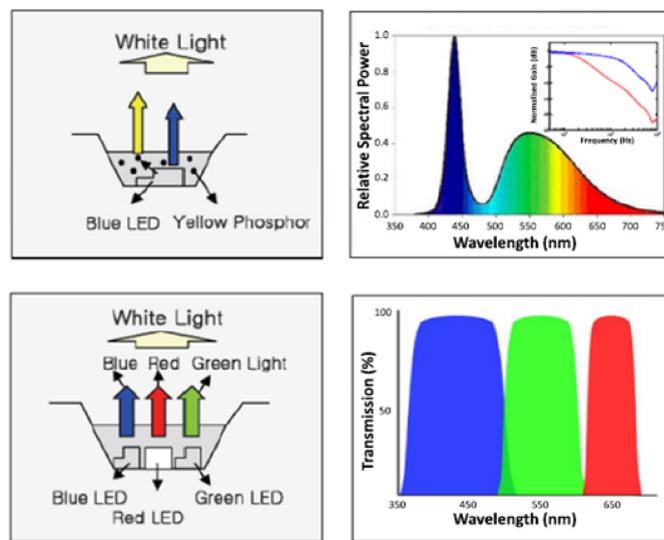


Figura 6 – Comparação da largura de banda de emissão dos LEDs azul-fósforo e tricolor (Ghassemlooy et al. [2013])

### 2.1.1.2 VCSEL

Outro tipo de fonte óptica que pode ser utilizada em sistemas VLC, a qual vem sendo estudada atualmente são os *Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers* (VCSELs), que são lasers de emissão de superfície de cavidade vertical, ou seja, é um tipo de diodo laser que emite luz em um feixe cilíndrico na direção perpendicular à superfície dos chips semicondutores.

Os VCSELs foram idealizados em 1977 por Kenichi Iga, sendo o primeiro dispositivo fabricado em 1979, utilizando o material InGaAsP para um comprimento de onda de  $1310 nm$ , que fica na região do infravermelho. A fabricação destes foi evoluindo até que em 1998 produziu-se o primeiro VCSEL com capacidade de bombear luz azul opticamente, o que permitiu sua utilização no espectro de luz visível (BARBOSA [2017]).

A Figura 7 apresenta a dependência da escolha do material para o comprimento de onda de operação, permitindo aplicações desde o visível até o infravermelho.

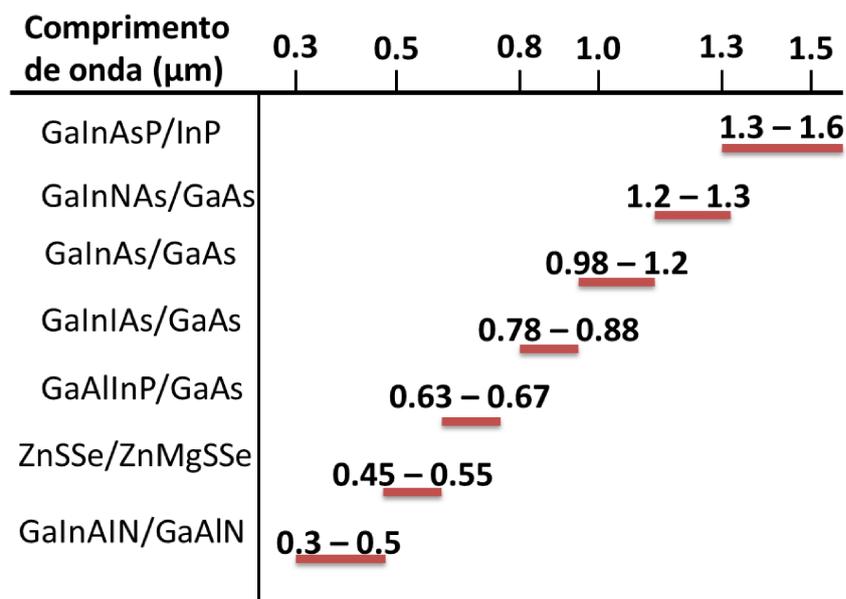


Figura 7 – Dependência do material para o comprimento de onda de operação (adaptado de IGA [2003])

Devido ao tipo de construção, é possível criar as estruturas como poços quânticos para confinamento dos portadores e refletores de Bragg formando espelhos de altíssima refletividade, em que, através das espessuras de cada camada que é depositada, pode-se ter um controle maior da estrutura que se deseja.

Assim, é possível escolher bem os níveis de energia da transição laser dos portadores no meio de ganho e obter uma alta refletividade dos espelhos para o comprimento de onda relativo a essa transição.

#### 2.1.1.2.1 Reflectores de Bragg

Uma parte importante dos VCSELS são os refletores de Bragg, os quais são formados por uma sequência alternada de camadas de materiais dielétricos de menor e maior índices de refração,  $n_1$  e  $n_2$ . A Figura 8 mostra a estrutura de um VCSEL com os refletores de Bragg.

As reflexões parciais em cada interface do maior para o menor índice de refração, se adicionam construtivamente, sendo possível construir um refletor de Bragg com o  $\lambda_B$  conveniente, de acordo com o  $\lambda$  do campo incidente, escolhendo apenas os materiais (escolha de  $n_1$  e  $n_2$ ) e as respectivas espessuras  $d_1$  e  $d_2$  das camadas alternadas que o compõem.

O  $\lambda_B$  é o chamado comprimento de onda de Bragg, o qual segue a relação dada

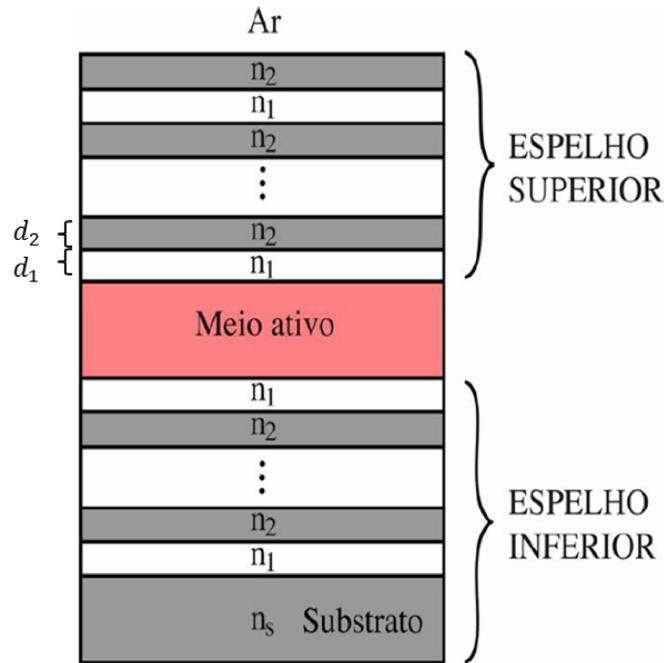


Figura 8 – Estrutura de um VCSEL (adaptado de BARBOSA [2017])

abaixo:

$$d_i = \frac{\lambda_B}{4n_i}, \quad \text{onde } i \in \{1, 2\} \quad (2.5)$$

Assim, o campo incidente vem do meio de ganho de índice  $n_{in}$  e é transmitido através dos  $M$  pares de camadas até o substrato de índice  $n_{out}$  (ar no caso do espelho superior).

### 2.1.2 Receptores ópticos em sistemas VLC

Um receptor óptico tem o propósito de produzir uma corrente ou tensão de saída proporcional à intensidade de luz que incide sua superfície. Os fotodetectores mais comuns são os fotodiodos e os fototransistores, porém podendo ter outros tais como os fotocondutores.

Os mais utilizados devido às suas características são os fotodiodos, do tipo PIN e APD, que serão abordados na seção 2.1.2.1. As características procuradas nos receptores são: larga superfície de detecção, pois isso melhora a amplitude do ângulo de captação de luz do fotodiodo (FOV); alta sensibilidade e responsividade para o comprimento de onda desejado; pequeno ruído (alta SNR); rápido tempo de resposta; baixo custo, pequeno tamanho e alta confiabilidade.

### 2.1.2.1 Fotodiodo

Através da utilização de materiais semicondutores, são introduzidos átomos de impurezas de maneira a dopar o material. Aqueles em que os elétrons são os portadores majoritários são os materiais do tipo n, e aqueles que tem buracos como portadores majoritários são os de tipo p. Os fotodiodos são construídos a partir da junção de semicondutores pn. A Figura 9 apresenta a estrutura básica de uma junção pn, mostrando a região de depleção criada pela junção dos materiais p e n.

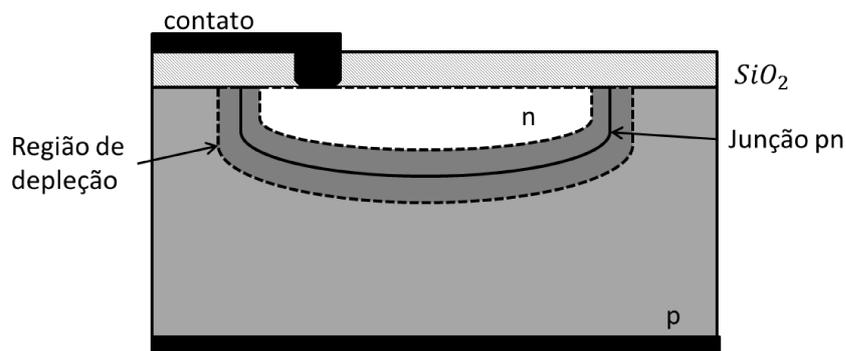


Figura 9 – Junção pn

Os fotodiodos são polarizados reversamente através dos contatos metálicos, em que, ao aplicar a tensão  $V_b$  aumenta-se a região de depleção, apresentado na Figura 10. Ao incidir a luz no material de tipo p, aumenta-se a formação dos pares de elétron-buraco, o que conseqüentemente aumenta a difusão de portadores de carga no material, gerando-se a corrente fotogerada.

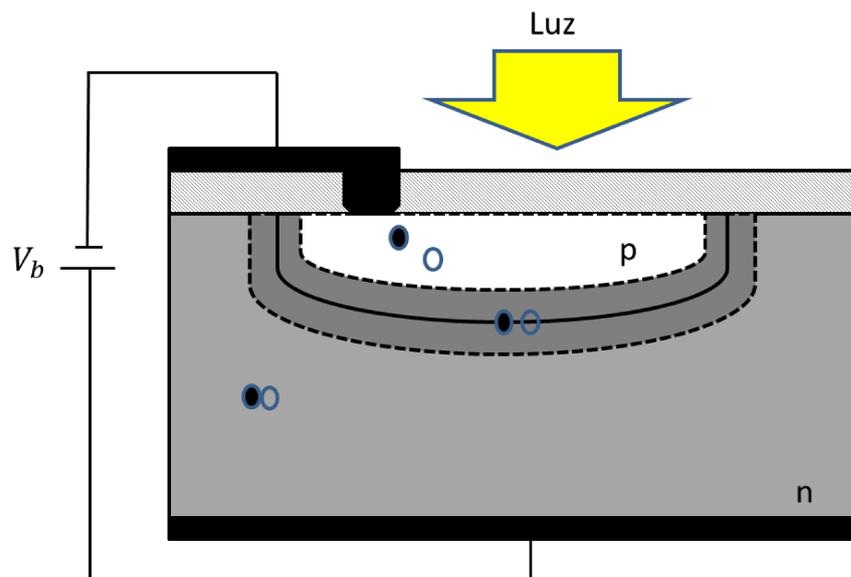


Figura 10 – Estrutura básica de um fotodiodo

A corrente fotogerada ( $I_p$ ), considerando que essa geração se dá primordialmente ao longo da região de depleção  $W$ , é dada pela equação 2.6, em que  $P_o$  é a potência óptica,

$g$  a fração de fótons que gera pares elétrons-buraco,  $R$  a refletividade da superfície do fotodetector,  $\alpha$  o coeficiente de absorção e  $q$  a carga do elétron.

$$I_p = P_o \frac{qg}{h\nu} (1 - R)(1 - e^{-\alpha W}) \quad (2.6)$$

Um importante fator que afeta essa corrente fotogerada, como visto na equação 2.6, é a dimensão da região de depleção, a qual depende primordialmente do material, através da constante dielétrica  $\epsilon_{Si}$ , dopagem das regiões p e n ( $N_A$  e  $N_D$  respectivamente) e tensão reversa aplicada ( $V_b$ ), como apresentado na equação 2.7. A tensão  $V_{bi}$  refere-se ao potencial embutido já devido à junção pn. (Sze and Lee [2012])

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_{bi} + V_b)} \quad (2.7)$$

Diante disso, dentre as principais características que afetam um sistema VLC que dependem diretamente do receptor escolhido, está a Eficiência Quântica, a qual determina o número de pares elétron-buraco que são gerados através da incidência de um fóton com energia  $h\nu$ . A Eficiência Quântica é então dada pela relação abaixo, em que  $I_p$  é a corrente média de saída do fotodiodo,  $q$  a carga do elétron e  $P_o$  a potência média carregada por  $n_p$  fótons. (Mohsen Kavehrah and Zhou [2016])

$$\eta = \frac{I_p/q}{P_o/h\nu} \quad (2.8)$$

Outra importante figura de mérito é a Responsividade do fotodiodo, o qual caracteriza a sua performance. A Responsividade está ligada à  $I_p$ , que é a corrente média de saída do fotodiodo, podendo ser obtida pela relação:

$$R = \frac{I_p}{P_o} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (2.9)$$

onde  $P_o$  é a potência média carregada por  $n_p$  fótons.

Além disso, todo dispositivo possui ruídos inerentes a ele, sendo que, para o fotodiodo têm-se as principais correntes de ruído: a corrente shot, devido à natureza estatística de produção e coleção de fótons; a corrente de escuro, que existe mesmo sem a incidência de luz; e corrente de ruído térmico, dependente da temperatura, o qual está presente quando conecta-se o fotodiodo a circuitos contendo resistor. Essas três correntes são relacionadas através das equações abaixo 2.10, 2.11 e 2.12, respectivamente (Mohsen Kavehrah and Zhou [2016]), em que  $B$  é a largura de banda do receptor,  $I_d$  a

média da corrente de escuro,  $k$  a constante de Boltzmann's,  $T$  a temperatura absoluta e  $R_{load}$  o resistor conectado ao fotodiodo.

$$i_{shot} = \sqrt{2qI_pB} \quad (2.10)$$

$$i_{dark} = \sqrt{2qI_dB} \quad (2.11)$$

$$i_{thermal} = \frac{4kT_kB}{R_{load}} \quad (2.12)$$

Dentre os principais fotodiodos temos o de tipo PIN, o qual consiste de materiais semicondutores do tipo p e n separados por uma região intrínseca (ou levemente dopada tipo n), em que um fóton que atinge a região intrínseca gera uma fotocorrente no fotodiodo ( $I_p$ ) no resistor de carga  $R_L$ , como apresentado na Figura 11.

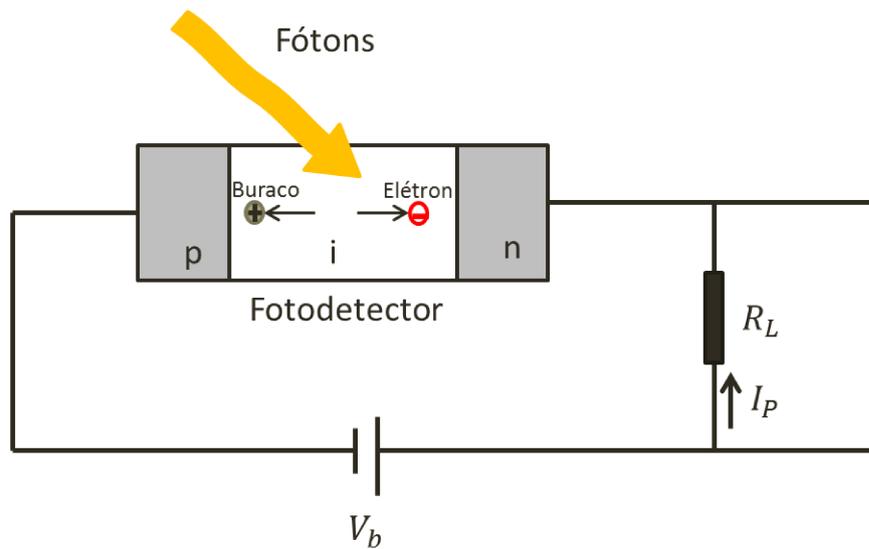


Figura 11 – Fotodiodo tipo PIN (adaptado de [Ghassemlooy et al. \[2013\]](#))

Os fotodiodos de tipo PIN alcançam altas taxas e possuem boa responsividade, não conseguindo porém atingir valores de muito superiores a 1 A/W.

Outro importante fotodiodo é o de avalanche, (*avalanche photo-detector* - APD), o qual possui um ganho na sua responsividade, devido ao efeito avalanche. Este tipo de fotodiodo é utilizado quando altas velocidades são importantes ao projeto. Estes possuem uma camada semicondutora adicional, a qual proporciona um ganho em relação ao PIN, em que mais elétrons são produzidos a partir de um fóton [Sze and Lee \[2012\]](#). A tabela apresentada na Tabela 2, mostra a diferença das características entre os fotodiodos PIN e APD para diferentes materiais de produção.

Tabela 2 – Comparação Fotodiodo PIN e APD (adaptado de Ghassemlooy et al. [2013])

Parâmetro	Silício		Germânio		InGaAs	
	PIN	APD	PIN	APD	PIN	APD
Range comprimento de onda (nm)	400-1100		800-1800		900-1700	
Responsividade (A/W)	0.6	77-1300	0.65-0.7	3-28	0.63-0.8	
Eficiência quântica (%)	65-90	77	50-55	55-75	60-70	60-70
Ganho	1	150-250	1	5-40	1	10-30
Tensão de polarização (-V)	45-100	220	6-10	20-35	5	30
Corrente de escuro (nA)	1-10	0.1-10	5-500	10-500	1-20	1-5
Tempo de subida (ns)	0.5-1	0.1-2	0.1-0.5	0.5-0.8	0.06-0.5	0.1-0.5

### 2.1.3 Canal VLC

Um canal óptico no espaço livre pode ser afetado por diversos parâmetros, os quais precisam ser bem modelados para simulação e estudo de sistemas VLC. Características como a BER (Bit Error Rate) e SNR (Signal to Noise Ratio) podem variar, por exemplo, se mudamos a superfície de paredes, alterarmos a distância entre o transmissor e receptor, alterarmos o número de transmissores, além de fatores como as fontes de ruído internas, geradas pelo receptor, ou fontes de ruídos externas, tal como a luz do sol.

#### 2.1.3.1 Canal LOS

No modelo de propagação LOS (*Line of sight*), não são consideradas reflexões, e sim apenas sinais recebidos diretamente pelo receptor a partir do transmissor. A Figura 12 ilustra a comunicação LOS, em que  $\phi$  é o ângulo de irradiância,  $\Psi$  o ângulo de incidência,  $d$  a distância entre o transmissor e o receptor, e  $FOV$  o campo de visão do receptor.

Desta forma, relacionando os parâmetros de um canal LOS, além das características do transmissor e do receptor, pode-se modelar o ganho de um canal LOS através da relação apresentada na equação 2.13, em que  $m$  é a ordem de emissão Lambertiana,  $A_r$  a área do fotodetector e  $g$  o ganho do concentrador (Ghassemlooy et al. [2013]).

$$H_{LOS} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_r}{2\pi d^2} \cos^2 \phi T_s(\Psi) g(\Psi) \cos \Psi, & 0 \leq \Psi \leq FOV \\ 0, & FOV < \Psi \end{cases} \quad (2.13)$$

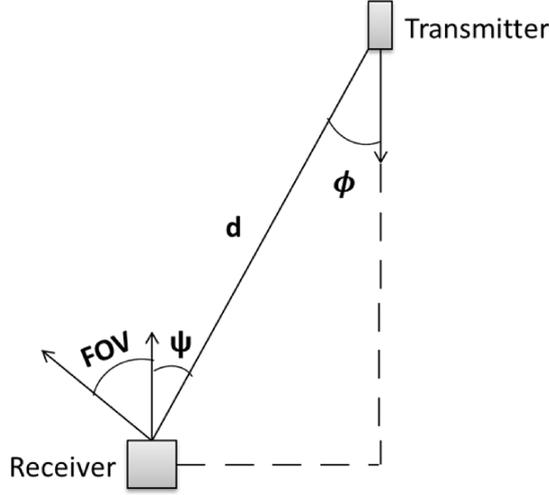


Figura 12 – Canal LOS

Ainda para um canal LOS pode-se modelar a resposta ao impulso, verificando-se a resposta temporal para um sinal recebido em um fotodetector, sendo apresentado na equação 2.14, onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $\delta$  é função Dirac, em que  $\delta(t - \frac{d}{c})$  representa o atraso da propagação do sinal (Ghassemlooy et al. [2013]).

$$h_{LOS}(t) = \frac{(m+1)A_r}{2\pi d^2} \cos^{m_1} \phi \cos(\Psi) g(\Psi) \delta(t - \frac{d}{c}) \quad (2.14)$$

### 2.1.3.2 Canal NLOS

Já em um canal NLOS (*Non-Line of sight*), as reflexões são consideradas, possuindo o modelo de propagação apresentado na Figura 13.

Desta forma, considerando  $\rho$  o coeficiente de reflexão das paredes e  $\delta A$  a área dos elementos de reflexão, pode-se modelar o ganho de canal e a resposta ao impulso em um canal NLOS como apresentados na equação 2.15 e equação 2.16, respectivamente (Ghassemlooy et al. [2013]).

$$H_{NLOS} = \begin{cases} \frac{A_r \Delta A \rho (m_1 + 1)}{2\pi^2 d_1^2 d_2^2} \cos^{m_1} \phi \cos \Psi \cos \alpha \cos \beta, & 0 \leq \Psi \leq FOV \\ 0, & FOV < \Psi \end{cases} \quad (2.15)$$

$$h_{LOS}(t) = \sum \frac{A_r \Delta A \rho (m_1 + 1)}{2\pi^2 d_1^2 d_2^2} \cos^{m_1} \phi \cos \Psi \cos \alpha \cos \beta \delta(t - \frac{d_1 + d_2}{c}) \quad (2.16)$$

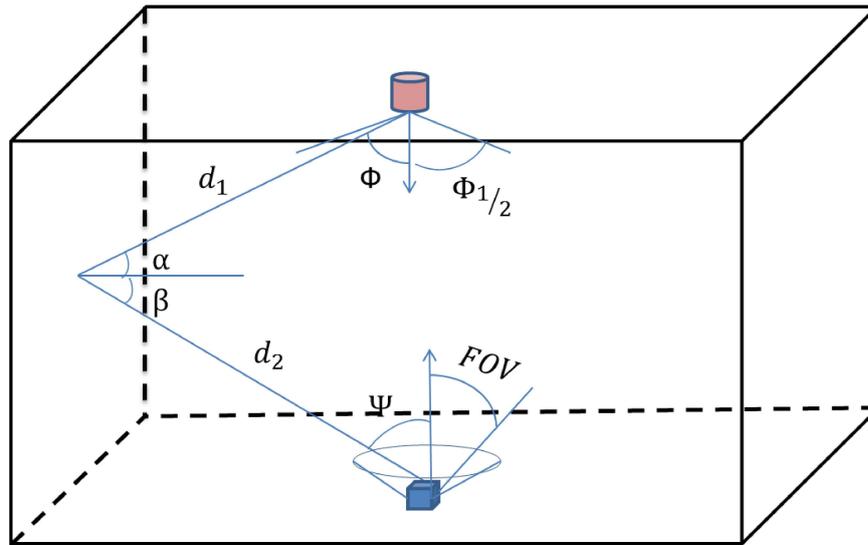


Figura 13 – Canal NLOS

Assim, analisando a resposta temporal de um canal VLC em que são considerados os elementos LOS e NLOS, tem-se a resposta ao impulso mostrado na Figura 14, em que percebe-se um primeiro pico relacionado à contribuição do canal LOS, seguido por um segundo pico de menor amplitude e mais espalhado no tempo, que corresponde à contribuição do canal NLOS.

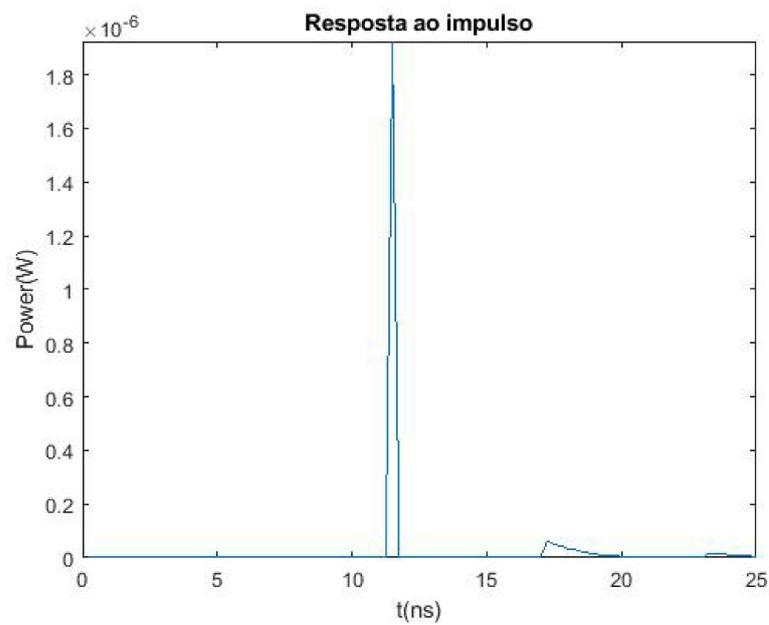


Figura 14 – Resposta ao impulso canal VLC

### 2.1.3.3 Figuras de mérito

Para concluir o estudo do canal, é importante introduzir algumas figuras de mérito importantes para mensurar a qualidade da comunicação, sendo a BER (Bit Error Rate) e SNR (Signal to Noise rate), já citadas anteriormente.

Considerando um esquema de modulação OOK-NRZ, a BER pode ser estimada através da equação 2.17 (Mohsen Kavehrah and Zhou [2016]).

$$BER = Q(\sqrt{(SNR)}) \quad (2.17)$$

Em que  $Q(x)$  é denominada a *q-function*, dado pela equação 2.18

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} \quad (2.18)$$

Para sistemas OWC (*Optical Wireless Communications*), a BER depende unicamente da SNR, sendo essa dada pela relação indicada na equação 2.19 (Ndjionguea et al. [2015]), onde  $R$  é a Responsividade do fotodiodo e  $N_0$  é a potência elétrica do ruído.

$$SNR = \frac{R^2 P_{Rx}^2}{N_0^2} \quad (2.19)$$

Desta forma, o  $N_0$  é a soma das contribuições do *shot noise* (equação 2.20) e *thermal noise* (equação 2.21). Nos estudos realizados neste trabalho, limitamos a contribuição do ruído apenas ao *thermal noise*, devido a este ser o que mais influencia no cálculo do ruído, devido a sua ordem de grandeza, em que o valor da potência elétrica do ruído, dada na equação 2.19, é proporcional à variância da corrente de ruído.

$$\sigma_{shot}^2 = 2qRP_R B + 2qI_B I_2 B \quad (2.20)$$

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G_{ol}} C_{pd} A_r I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_K \Gamma}{g_m} C_{pd}^2 A_r^2 I_3 B^3 \quad (2.21)$$

A Tabela 3 trás os parâmetros indicados nas equações 2.21 e 2.20, assumindo um *low noise PIN-FET transimpedance receiver stage*, como descrito em Komine and Nakagawa [2004] e Smith and Personick [1980].

## 2.2 Otimização

Em diversos processos, as tomadas de decisões envolvem diversas variáveis e contextos. Visando obter o melhor arranjo dessas variáveis, é possível recorrer a processos de otimização.

Tabela 3 – Parâmetros da variância do ruído

Símbolo	Significado
B	Banda em Hz
$I_B$	Corrente fotogerada devido a radiação background
$G_{OL}$	Ganho de tensão de open-loop
$C_{pd}$	Capacitância fixa do fotodetector por unidade de área
$\Gamma$	Fator de ruído de canal FET
$g_m$	Transcondutância FET

Estes processos de otimização, considerando os objetivos e restrições de projeto, visam, através de métodos computacionais, encontrar a melhor combinação de valores para as variáveis de um problema, configurando-se assim a solução ótima. Desta maneira, otimizar significa minimizar ou maximizar uma determinada função. A equação 2.22 traz a definição matemática de um problema de otimização, em que buscam-se as variáveis  $x_i$  que minimizam a função  $f(x)$ . As variáveis de otimização definem o espaço de projetos  $\mathcal{X}$ . Já o conjunto  $\mathcal{F}$  define o espaço factível a partir das restrições do problema, tais quais limitações físicas, tempo de processamento, sendo que essas restrições podem ser de igualdade ou desigualdade.

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \in \mathfrak{R}^n, \mathbf{x} \in \mathcal{F} \\
 & \mathbf{f} : \mathcal{X} \subset \mathfrak{R}^n \rightarrow Y \subset \mathfrak{R}^n \\
 & \mathcal{X} = \{\mathbf{x} = (x_1 \dots x_n), x_i \in \mathcal{D}_i\} \\
 & \mathcal{F} = \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0; & i = 1, \dots, p \\ h_j(\mathbf{x}) = 0; & j = 1, \dots, q \\ \mathbf{x} \in \mathcal{X} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Considerando as características do problema abordados neste trabalho, utilizou-se uma otimização mono-objetivo, em um domínio das variáveis contínuas, com restrições devido a limitações físicas, dimensão do ambiente etc. Estes conceitos ficarão mais claros ao longo deste capítulo, quando for apresentado o algoritmo utilizado.

Por tratar-se de um problema de otimização contínua, não existe um método exato rápido capaz de localizar um ótimo global em um número finito de iterações. Desta forma, os métodos metaheurísticos são os mais indicados, sendo aqueles que combinam procedimentos de maneira a resolver problemas computacionais usando métodos de alto nível, encontrando soluções satisfatórias em problemas complexos. (Osman and Laporte [1996])

De maneira geral, uma metaheurística é um processo de geração iterativo que guia uma ou mais heurísticas subordinadas através da combinação inteligente de diferentes conceitos de exploração do espaço de busca, aprendendo as estratégias que são utilizadas para estruturar a informação, com o objetivo de achar soluções aproximadas próximas à ideal. (Osman and Laporte [1996])

Assim, considerando o escopo de algoritmos metaheurísticos empregados na literatura foram escolhidos os algoritmos genéticos para desenvolvimento deste trabalho. Os algoritmos genético, assim como os demais algoritmos evolutivos, possuem as características citadas abaixo:

- Produzem boas soluções;
- Fácil implementação;
- Métodos aproximados, não garantem uma solução ótima;
- Guiam o processo de busca;
- Inspirados em analogias físicas ou biológicas.

### 2.2.1 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos (GA) tiveram início na década de 50 através de simulações computacionais de sistemas genéticos realizadas por diversos biólogos. Em 1975, John Holland publicou o livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, o que popularizou os algoritmos genéticos. (Holland [1975])

Para formar uma algoritmo de busca, os algoritmos genéticos combinam de forma estocástica a troca de informações entre os indivíduos da população (soluções candidatas) com intuito de continuamente melhorar as características dessas soluções ao longo das gerações/iterações do processo de otimização.

Em toda geração a população é atualizada, com um novo conjunto de indivíduos formado por parte do melhor das gerações anteriores sendo que ocasionalmente uma nova parte é inserida com melhor precisão. Já que são estocásticos, os Algoritmos Genéticos não são uma busca aleatória simples, sendo que estes exploram informações históricas de forma eficiente para encontrar novos pontos de busca com um esperado aumento de performance. (Goldberg [1989])

De maneira geral para a implementação de um GA é necessário: (Pozo et al. [2005]):

- a representação das soluções em um formato genético (genótipo);

- a população inicial deve conter diversidade tal que permita a combinação e produção de novas soluções;
- existir uma função ou método que meça a qualidade das soluções a serem testadas (fitness);
- um método de geração de novas soluções através das combinações dos indivíduos;
- Um critério para seleção das soluções que serão utilizadas ou descartadas;
- um método para inserir alterações esporádicas a fim de manter a diversidade da população.

A figura 15 representa as principais etapas de um algoritmo genético.

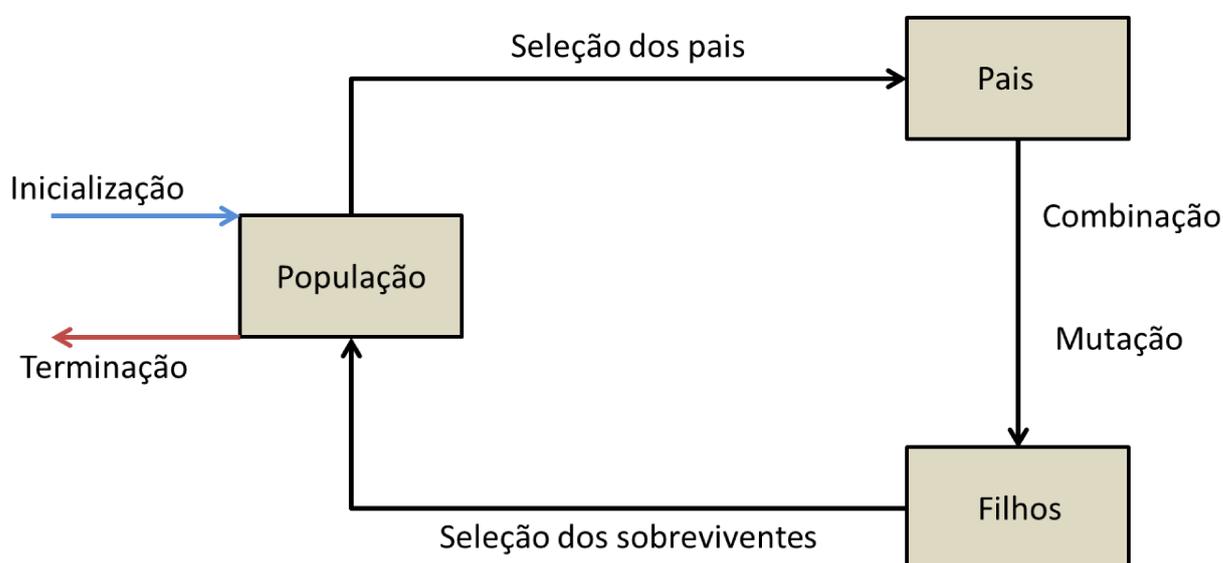


Figura 15 – Principais etapas do Algoritmo Genético

### 2.2.1.1 Representação

A representação consiste na codificação daqueles indivíduos do espaço de fenótipo para o espaço de genótipo, sendo que, o espaço de genótipo consiste na cadeia de bits que representa uma possível solução do problema, e o espaço de fenótipo é a expressão deste genótipo no indivíduo. A escolha da representação é uma das etapas mais importantes em um projeto de algoritmos genéticos. Os principais tipos de codificação utilizadas são (Pozo et al. [2005]):

- Representação Binária;
- Representação Real;
- Representação por permutação.

A representação mais clássica dos GAs é a representação binária, em que os indivíduos são representados utilizando vetores binários de tamanhos fixos.

A representação binária pode ser utilizada para problemas que envolvam variáveis booleanas, porém podem ser utilizadas para codificar informações não binárias, realizando para isso um mapeamento de uma variável real para uma representação em codificação binária.

Para este trabalho, escolheu-se a representação binária, apesar das variáveis manipuladas serem reais. A discretização do espaço de busca das soluções através da utilização da representação binária com a utilização de um número de bits adequado possibilitam soluções com boa precisão.

Desta forma, para as variáveis relativas às coordenadas das posições dos transmissores no teto, estando estas no intervalo de 0 a  $5m$ , utilizou-se  $L_i$  bits igual a 10 para codificar cada variável. A precisão, portanto, para esta codificação é dada pela equação 2.23. Para o caso específico das variáveis de posição consideradas neste trabalho a precisão é de aproximadamente  $5mm$ , possibilitando a utilização em ambientes industriais, por exemplo, onde sensores poderiam utilizar a tecnologia VLC.

$$\Delta_x = \frac{x_{max} - x_{min}}{2^{L_i} - 1} \quad (2.23)$$

Outra decisão do projeto do GA deste trabalho, a fim de evitar-se o *Hamming Cliffs*, foi a conversão do código binário para o código de Gray. Um *Hamming Cliffs* é formado quando dois indivíduos numericamente adjacentes, quando representado em binário, apresentam-se distantes, ou seja, uma pequena diferença no espaço dos fenótipos podem gerar grandes diferenças no espaço dos genótipos. Um exemplo é a distância entre os números 7 e 8, em que na representação decimal tem sua distância igual a 1, sendo que quando representados em código binário, 0111 e 1000, tem sua distância de *Hamming* igual a  $dH = 4$ . Em consequência disso, por exemplo, na mutação por *bit-flip*, o efeito não será o mesmo do que outros números. Desta forma, aplicou-se a representação em código de Gray, onde a distância *Hamming* entre a representação de dois números sucessivos é sempre  $dH = 1$ .

### 2.2.1.2 Operadores de variação

Os operadores de variação são aqueles utilizados para alterar os indivíduos, com o objetivo da criação de novos indivíduos a partir daqueles já existentes. Dentre estes operadores foram aplicados dois ao algoritmo em questão, sendo eles a recombinação e a mutação. (Pozo et al. [2005])

## 2.2.1.2.1 Recombinação

A recombinação é normalmente o mais importante operador para a criação de novos indivíduos no espaço de busca. Neste trabalho foi utilizado o *crossover* por variável (Pozo et al. [2005]), sendo aquele que atribui um ponto de corte por variável de decisão. A figura 16 apresenta a representação da recombinação *crossover* por variável, para um ponto de corte aplicado após o segundo bit.

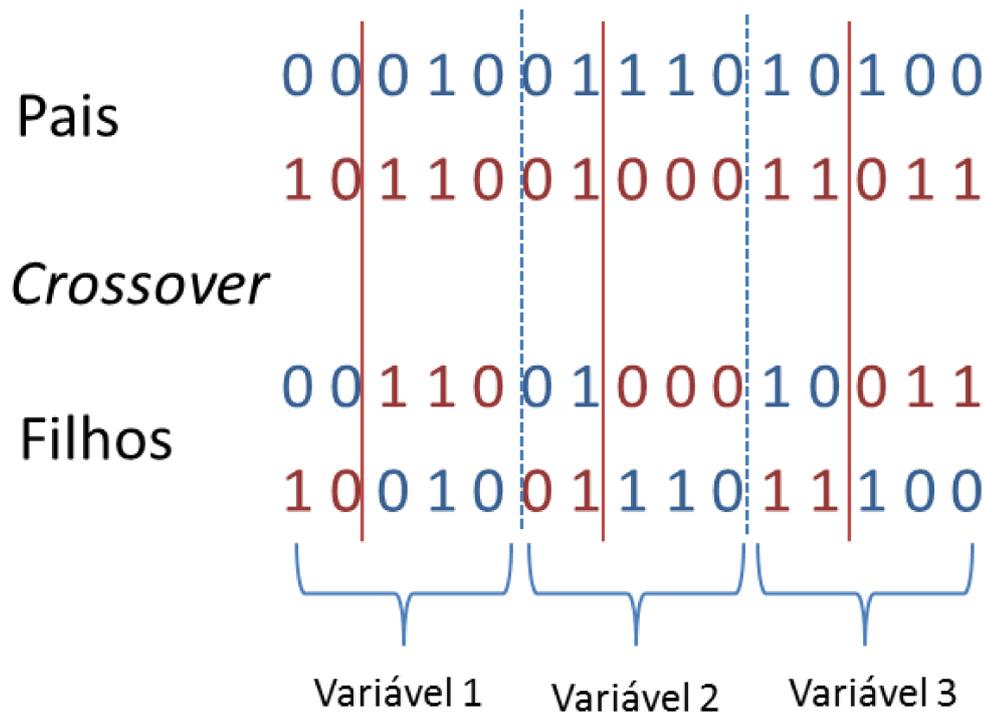


Figura 16 – Crossover por variável

A recombinação acontece a partir do sorteio de um número aleatório no intervalo  $[0, 1]$ , o qual é comparado com o hiperparâmetro  $p_c$ , que é a taxa de recombinação, que define se os filhos gerados serão recombinações dos pais, conforme figura 16, ou apenas as cópias puras dos pais.

## 2.2.1.2.2 Mutação

Outro tipo de operador de variação é a mutação, a qual é aplicada aos indivíduos gerados como filhos também sorteando um número aleatório no intervalo  $[0, 1]$ , o qual é comparado com o hiperparâmetro  $p_m$ , agora a taxa de mutação. O operador de mutação, escolhido para representação binária utilizada foi o *bit-flip*. (Pozo et al. [2005])

O *bit-flip* consiste na alteração dos genes do filho, de 0 para 1 ou 1 para 0, com a probabilidade  $p_m$ , conforme apresentado na figura 17.

0 0 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 0

**Mutação**

0 **1** 0 1 0 0 1 **0** 1 0 1 **1** 1 0 0

Figura 17 – Mutação bit-flip

A mutação é essencial para diversificação da população do algoritmo genético, permitindo a exploração do espaço de busca, perpassando por regiões não exploradas. Outra importante contribuição da operação de mutação é o ajuste da solução final, procurando resultados próximos e melhores daqueles já encontrados.

### 2.2.1.3 Mecanismos de seleção

Os mecanismos de seleção são essenciais para atualização da população, sendo normalmente baseados na função *fitness* (Poza et al. [2005]). A função *fitness* é uma função matemática utilizada para quantificar o quão boa é uma solução candidata, mapeando a representação do espaço de projetos em um escalar.

Os operadores de seleção são baseados somente no *fitness*, ou seja, são independentes da representação adotada para as soluções. Em uma seleção proporcional ao *fitness*, a probabilidade de seleção  $P_{Si}$  do  $i$ -ésimo indivíduo de uma população de tamanho  $\mu$  é dada pela relação apresentada na equação 2.24, assumindo-se a maximização da função *fitness* (Holland [1975]).

$$P_{Si} = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{\mu} f_j} \quad (2.24)$$

Os operadores de seleção proporcionais ao *fitness*, por serem elitistas, implicam em alguns problemas que devem ser tratados, sendo eles:

- Convergência prematura, em que aqueles indivíduos de melhor *fitness* rapidamente dominam a população, afetando a diversidade requerida para uma convergência de um GA;
- Após algumas iterações do algoritmo, a seleção de soluções se torna aleatória, devido aos valores de *fitness* serem muito próximos.

### 2.2.1.3.1 Seleção dos pais

Para a seleção dos pais a serem utilizados na geração de novos indivíduos, escolheu-se o operador baseado em Torneio (Pozo et al. [2005]). Diferente do operador de seleção proporcional ao *fitness*, o torneio não requer informação global da população, sendo possível controlar os problemas apresentados pela primeira opção, podendo-se controlar o mecanismo de pressão da seleção.

Na seleção por torneio escolhem-se  $k$  indivíduos aleatoriamente, em que  $k$  determina o tamanho do torneio. Desta forma, quanto maior o valor de  $k$  maior a pressão da seleção, já que aumenta-se a probabilidade de seleção de indivíduos com melhores *fitness*.

Em cada torneio, sempre o indivíduo mais apto é escolhido, com probabilidade de seleção igual a 1. A figura 18 exemplifica o processo de seleção através de torneio.

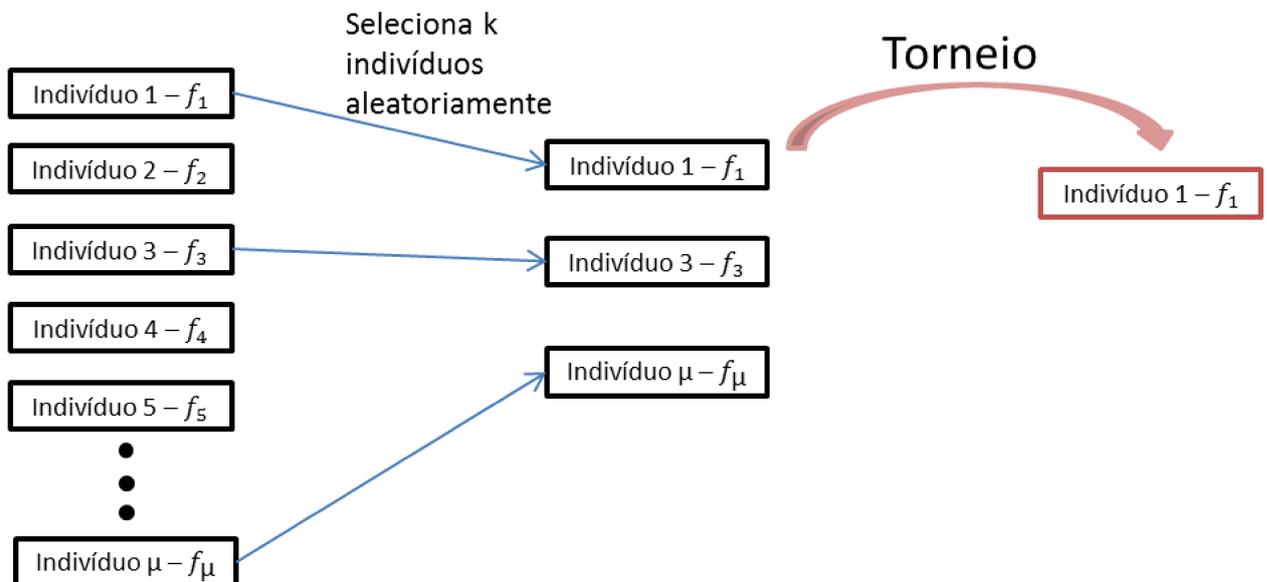


Figura 18 – Seleção por torneio

### 2.2.1.3.2 Seleção dos sobreviventes

Da mesma maneira, para seleção dos sobreviventes, utiliza-se o operador de seleção por torneio, conforme figura 18, porém agora baseada na probabilidade de *fitness*, dado pela equação 2.24. Utilizando a relação de  $1 - P_{Si}$ , seleciona-se dentro do torneio aquele com pior *fitness* para ser substituído na próxima geração.

Desta forma, a substituição é baseada em *fitness*, em que utilizando o método do torneio, selecionam-se  $k$  indivíduos da população  $\mu$ , sendo que os piores são substituídos pelos filhos gerados após a seleção dos pais.

# Capítulo 3

## Metodologia

Com a finalidade de definir a abordagem ao problema, este capítulo trás o programa implementado para simulação da modelagem do canal VLC, definido no Capítulo 2, bem como a formulação do problema a ser aplicado o algoritmo de otimização escolhido.

### 3.1 Simulação do canal VLC

A fim de validar a modelagem do canal VLC, foi projetado um simulador em Matlab aplicando-se as equações descritas na seção 2.1.3. Para tal utilizou-se uma sala, inicialmente vazia, com paredes, chão e teto em ângulos retos, com dimensões de  $5.0m \times 5.0m \times 3.0m$ , como apresentado na figura 19, em que um ou mais transmissores são posicionados no teto, em posições pré-determinadas, e cria-se uma matriz  $50 \times 50$  de receptores posicidados a  $0.85m$  do chão, altura essa típica de uma mesa.

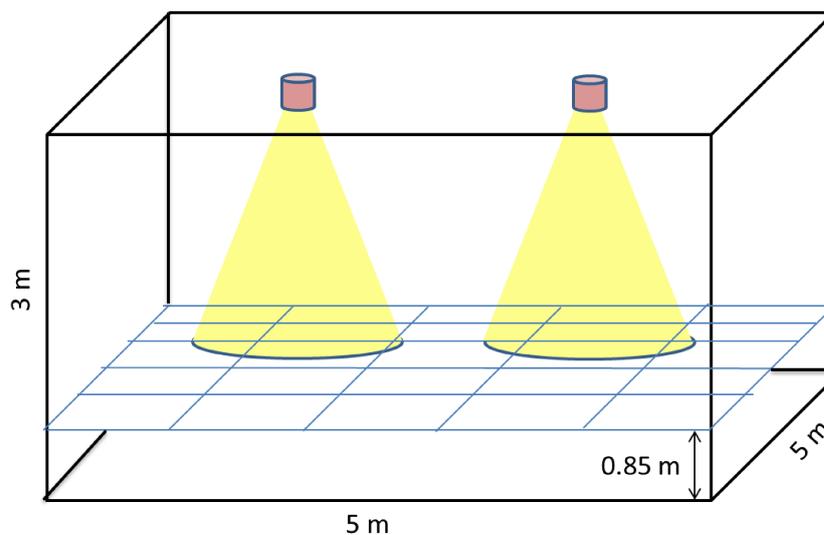


Figura 19 – Dimensões da sala utilizada para simulações

Para tal simulação, foi utilizada como transmissor uma matriz de  $60 \times 60$  LEDs, totalizando 3600 LEDs, sendo que a potência individual considerada de cada LED foi de

20mW, com semi ângulo de emissão de meia potência ( $\phi_{1/2}$ ) de 60 graus. Foi assumido o uso de um receptor de transimpedância PIN-FET de baixo ruído, como descrito na seção 2.1.3.3. A Tabela 4 sumariza os valores considerados na simulação.

Tabela 4 – VLC Parâmetros

Parâmetro	Valor
Field of view (FOV)	70 degrees
Ângulo de meia potência ( $\phi_{1/2}$ )	60 degrees
Área do fotodetector ( $A_r$ )	1 cm <sup>2</sup>
Responsividade do fotodetector (R)	0.54 A/W
Ganho de tensão de Open loop ( $G_{ol}$ )	10
Capacitância fixa do fotodetector ( $C_{pd}$ )	112 pF/cm <sup>2</sup>
Fator de ruído do canal FET ( $\Gamma$ )	1.5
Transcondutância FET ( $g_m$ )	30 mS
$I_2$	0.562
$I_3$	0.0868
Coefficiente de reflexão( $\rho$ )	0.8
Temperatura ( $T_K$ )	298 K
Taxa de dados (B)	200 Mb/s

Para melhor entendimento do canal VLC, decidiu-se simular tanto uma transmissão *Line-of-sight* (LOS) quanto uma transmissão *Non-line-of-sight* (NLOS).

### 3.1.1 Canal LOS VLC

Foi inicialmente considerado um cenário de simulação utilizando-se apenas um transmissor, localizado no teto, centralizado na posição (2.5, 2.5) em x e y, e o plano receptor (50x50), localizado na altura de 0.85 m. A resposta ao impulso, para um dos receptores, do plano receptor considerado, localizado na posição (1.5, 1.5), é apresentada na Figura 20. Percebe-se nesse caso apenas um pico de sinal recebido pelo receptor em questão em torno de 9ns, referente justamente à contribuição direta desse único transmissor.

Realizando o cálculo do ganho de canal, subtraído da potência transmitida, pode-se verificar a distribuição da potência recebida no plano receptor, conforme apresentado na Figura 21.

Da mesma forma que apresentado para um transmissor localizado no teto, foi simulado o caso de um sistema com mais transmissores. Para o caso de 2 transmissores no teto, localizados em (0.83, 0.83) e (4.17, 4.17), em x e y, pode-se verificar na figura 22 a distribuição de potência recebida e a SNR calculada a partir da equação 2.19.

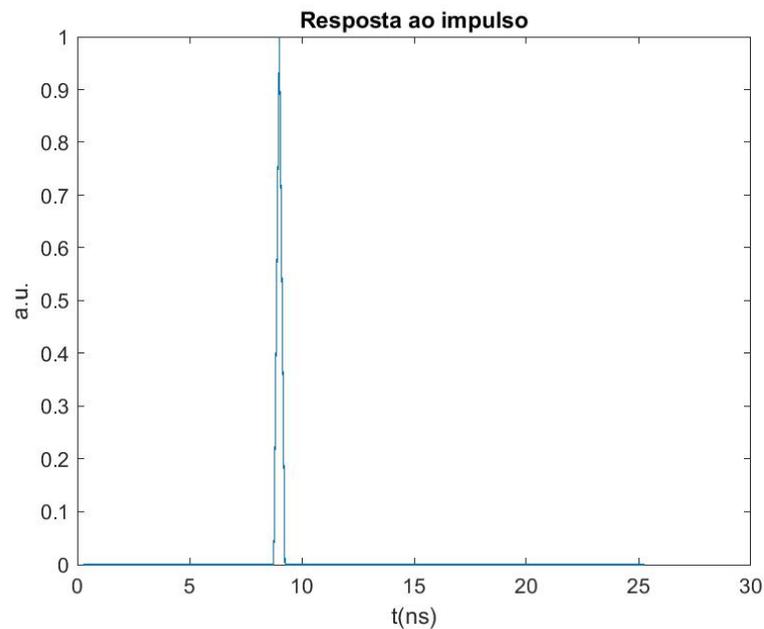


Figura 20 – Resposta ao impulso para um transmissor LOS

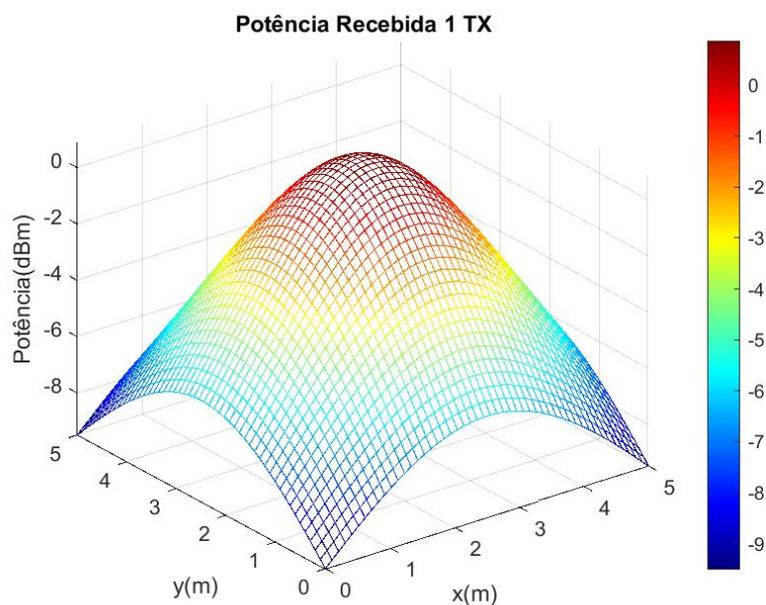


Figura 21 – Distribuição da potência recebida no plano receptor por um transmissor LOS

Para o caso de três e quatro transmissores, percebe-se que a distribuição da potência recebida acompanha a localização espacial dos transmissores. Para o caso de três transmissores, estes estão localizados no teto nas posições  $(0.83, 0.83)$ ,  $(2.5, 4.17)$  e  $(4.17, 0.83)$ , em x e y. Já para o caso de quatro transmissores, as coordenadas x e y de localização são  $(0.83, 0.83)$ ,  $(4.17, 4.17)$ ,  $(4.17, 0.83)$  e  $(0.83, 4.17)$ . A Figura 23 apresenta a distribuição da potência recebida para o caso de três e quatro transmissores, respectivamente.

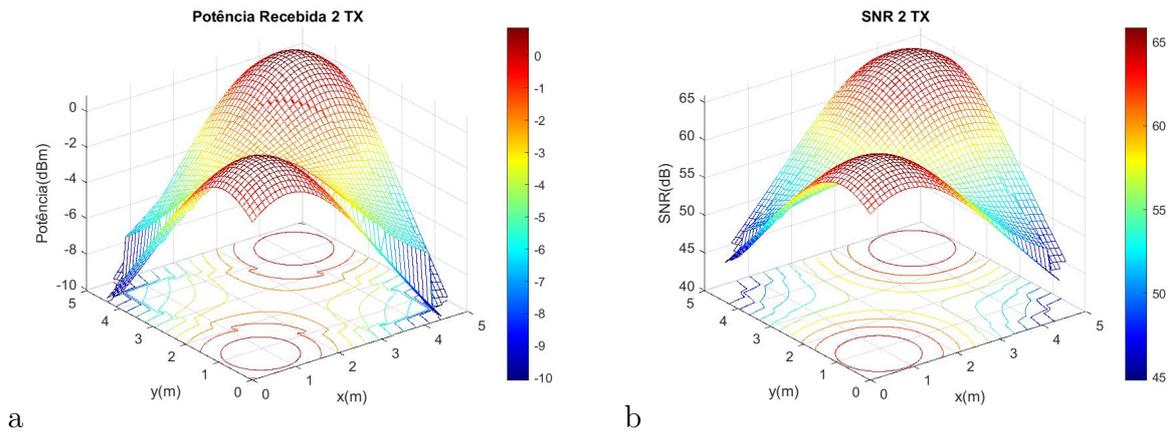


Figura 22 – Distribuição no plano receptor para 2 Transmissores LOS a) Potência de recepção e b) SNR

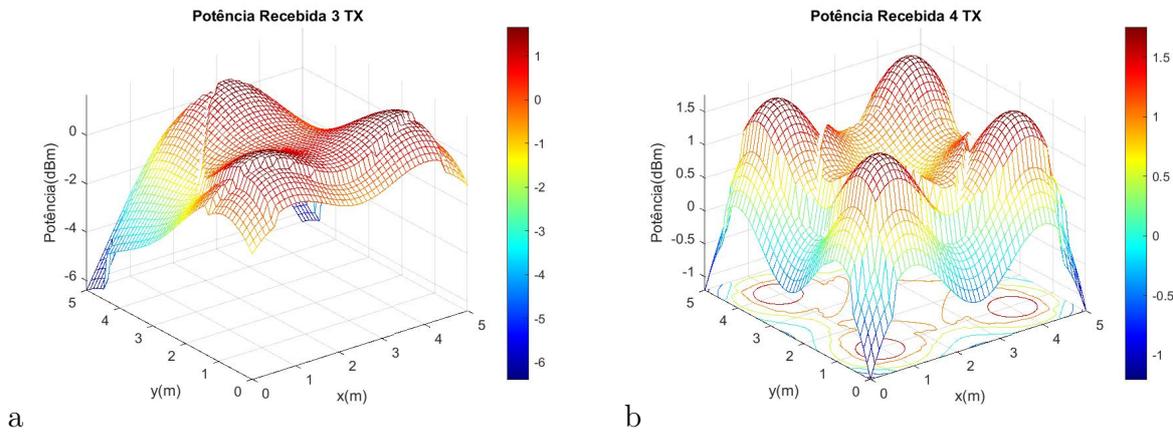


Figura 23 – Distribuição da potência recebida no plano receptor para a) 3 transmissores LOS e b) 4 transmissores LOS

Considerando novamente o receptor localizado na altura do plano receptor nas coordenadas  $x, y (1.5, 1.5)$ , na resposta ao impulso, percebe-se para o caso de três transmissores, os três picos equivalentes aos três transmissores, apresentados na Figura 24.

Para o caso de quatro transmissores, devido à localização destes, bem como à restrição do *field of view* (FOV) de 70 graus para os receptores, nem todos contribuíram para a resposta ao impulso desse receptor específico, apresentando, dessa forma, uma resposta ao impulso com apenas dois picos, conforme visto na Figura 25

### 3.1.2 Canal NLOS VLC

A mesma análise foi realizada considerando as reflexões, ou seja, considerando também a contribuição *Non-line-of-sight* (NLOS) dos transmissores. Para o caso de um e dois transmissores, localizados no primeiro caso nas coordenadas  $x, y (2.5, 2.5)$ , e no segundo caso em  $(0.83, 0.83)$  e  $(4.17, 4.17)$ , percebe-se maior uniformidade na distribuição

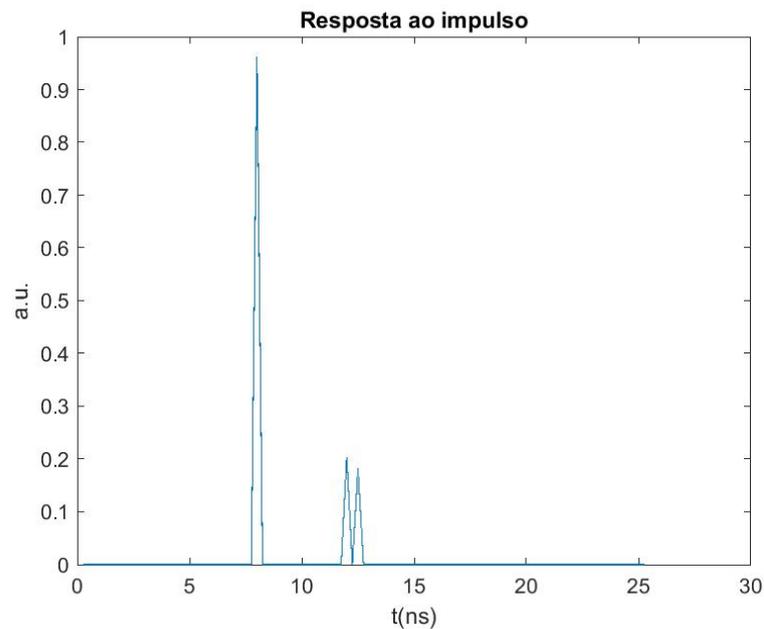


Figura 24 – Resposta ao impulso para três transmissor LOS

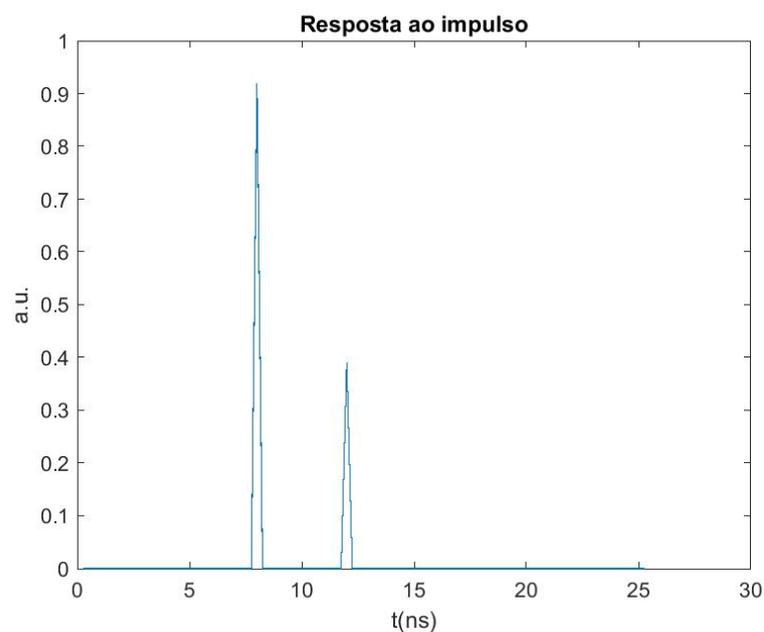


Figura 25 – Resposta ao impulso para quatro transmissor LOS

de potência recebida no plano receptor, devido às contribuições das reflexões nas paredes, diminuindo relativamente o pico de recepção abaixo da posição dos transmissores, o que pode ser verificado na Figura 26.

Já para o caso de três transmissores localizados no teto nas posições  $(0.83, 0.83)$ ,  $(2.5, 4.17)$  e  $(4.17, 0.83)$ , em  $x$  e  $y$ , e para caso de quatro transmissores, as coordenadas  $x$  e  $y$  de localização são  $(0.83, 0.83)$ ,  $(4.17, 4.17)$ ,  $(4.17, 0.83)$  e  $(0.83, 4.17)$ , percebe-se na resposta ao impulso nestes casos, a contribuição LOS dos transmissores, bem como a

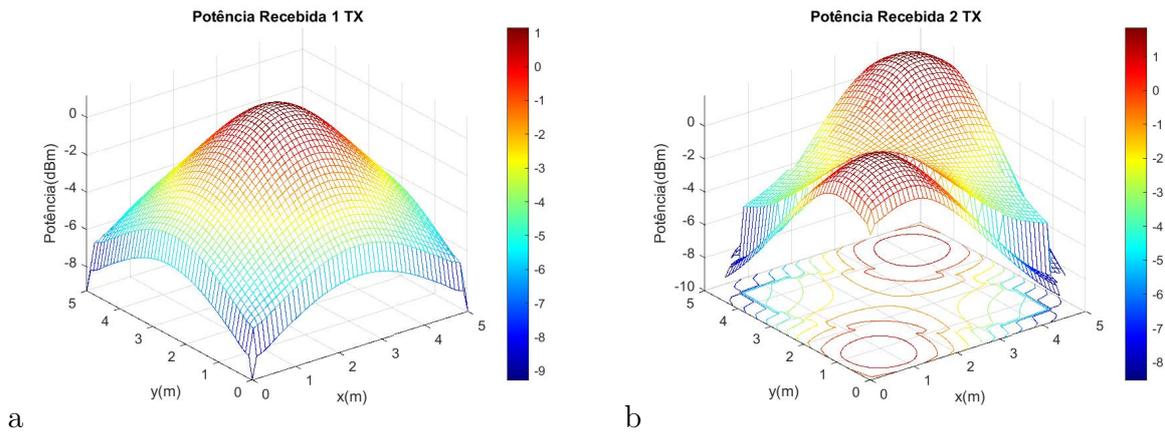


Figura 26 – Distribuição da potência recebida no plano receptor para a) 1 transmissor NLOS e b) 2 transmissores NLOS

NLOS. Para o primeiro caso, de três transmissores, no receptor localizado novamente em  $x, y (1.5, 1.5)$ , na primeira parte da Figura 27 percebem-se os três picos maiores referentes aos LOS dos transmissores e valores menores referentes às contribuições NLOS. Já na segunda parte da Figura 27 percebe-se novamente apenas duas contribuições LOS de transmissores, devido ao *field of view* (FOV) limitado do receptor, e às diversas contribuições das reflexões.

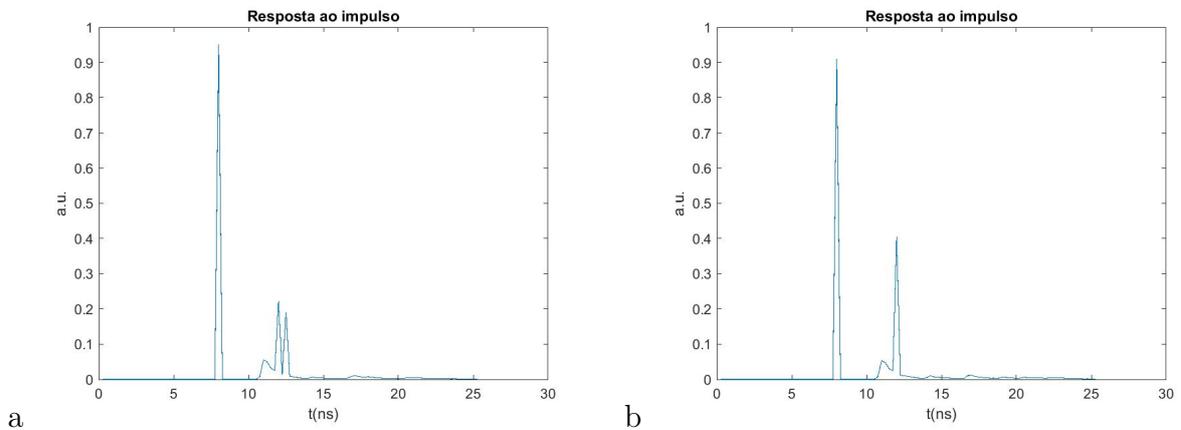


Figura 27 – Resposta ao impulso no receptor para a) 3 transmissores NLOS e b) 4 transmissores NLOS

## 3.2 O problema de otimização

Tendo em vista os processos dos Algoritmos Genéticos (GA) apresentados nas seções anteriores, assumiu-se o mesmo cenário descrito na seção 3.1, com uma sala inicialmente vazia, com paredes, chão e teto em ângulos retos, com dimensões de  $5.0m \times 5.0m \times 3.0m$ , como apresentado na figura 28. Desta forma, dado o número de transmissores ópticos modulados diretamente com uma sequência OOK-NRZ a uma taxa de dados

definida, inicialmente  $B = 200\text{Mb/s}$ , uma boa aproximação de uma ótima distribuição dos transmissores no teto é determinada, através da minimização da potência óptica requerida de maneira a garantir um *Bit Error Rate* (BER)  $\leq 10^{-6}$ , em uma área circular com diâmetro  $D = 5\text{m}$  no plano receptor, podendo este variar da posição  $0\text{m}$ , relativo ao chão, até  $0.85\text{m}$ , altura esta relativa a uma mesa.

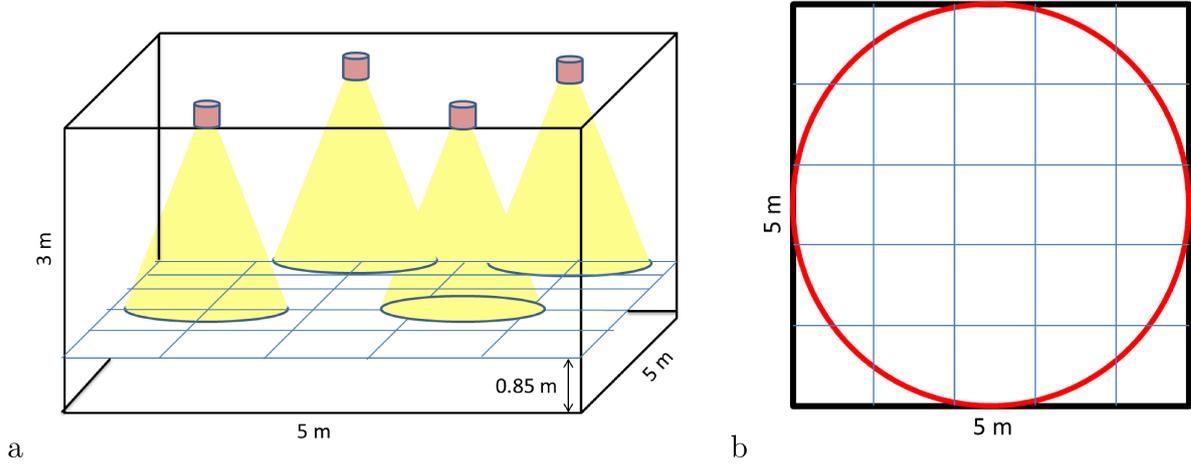


Figura 28 – Sala considerada no problema de otimização a) Dimensões e b) Área circular

Desta forma, foi selecionado como função objetivo, a função *fitness*, o inverso da potência óptica emitida. Considerando as equações 2.17 e 2.19, apresentadas na seção 2.1.3.3, a potência óptica emitida pode ser relacionada à potência óptica recebida e ao ganho do canal, conforme mostrado na equação 3.1.

$$P_{Rx} = H_{LOS}P_{Tx} \quad (3.1)$$

Para representação das variáveis, sendo elas as coordenadas  $x$  e  $y$  dos transmissores localizados no teto da sala, o código Gray usando 10 bits por variável foi implementado, desta maneira, discretizando as possíveis posições dos transmissores. Para o caso de 4 transmissores, por exemplo, a representação utiliza 80 bits no total.

Para esta representação, foi selecionada uma população de 100 indivíduos, sendo que como operadores de seleção foi utilizado para a seleção de 2 pais um torneio de 3 indivíduos selecionados aleatoriamente. Aplicando-se a esses dois pais selecionados, utilizou-se como operador de recombinação um ponto de corte por variável. Para o operador de mutação foi utilizado o *bit-flip*.

Para seleção dos sobreviventes também utilizou-se o torneio, realizando a substituição daqueles piores indivíduos selecionados pelos filhos gerados no processo de recombinação e mutação. A tabela 5 traz todos estes parâmetros sumarizados.

No capítulo 4 serão apresentados os diversos resultados obtidos através da variação dos cenários baseados nesse algoritmo genético implementado.

Tabela 5 – VLC Algoritmo Genético

AG	Definições
Representação	Código Gray
Recombinação	1 ponto de corte por variável
Probabilidade de recombinação	100%
Mutação	Bit Flip
Probabilidade de mutação	2% por bit
Seleção dos pais	Melhores 2 de 3 aleatórios
Seleção dos sobreviventes	Substituição 2 piores de 3 aleatórios
Tamanho da população	100
Filhos	2
Condição de parada	10000 iterações

# Capítulo 4

## Resultados

Tendo em vista o Algoritmo Genético apresentado no capítulo 3, foram testados diversos cenários com a finalidade de validar o canal óptico e o GA projetado, além de encontrar melhores resultados na distribuição e potência óptica dos transmissores.

Desta forma, neste capítulo serão mostrados os resultados em um primeiro cenário em uma sala vazia com paredes, chão e teto em ângulos retos, com dimensões de  $5.0m \times 5.0m \times 3.0m$ , como apresentado na figura 29, com o plano receptor localizado no chão em  $0m$ , sendo que foram avaliados cenários com diferentes números de transmissores. Outro cenário a ser avaliado é a mesma sala anterior, porém com uma mesa localizada em uma posição específica da sala. E por fim, um cenário com duas mesas em posições distintas distribuídas pela sala.

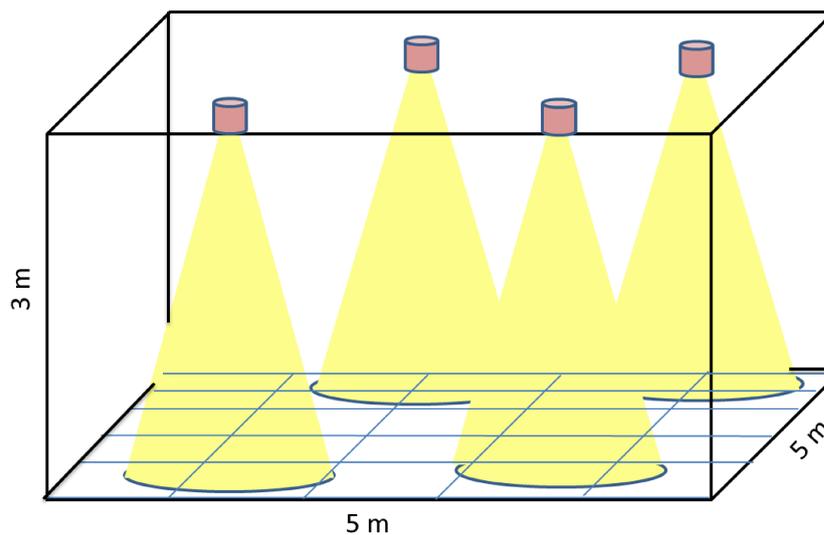


Figura 29 – Sala primeiro cenário

## 4.1 Otimização no plano receptor

O primeiro cenário a ser avaliado foi o mostrado na figura 29, com o plano receptor localizado no chão em  $0m$ . Para este cenário foi variado o número de transmissores ópticos entre 2 e 10. Também, para efeito de comparação, alterou-se a taxa de transmissão de dados, podendo variar entre  $200Mb/s$ ,  $500Mb/s$ ,  $1Gb/s$ , além de  $2Gb/s$ .

Para todos os casos propostos, percebeu-se resultados satisfatórios no que tange à distribuição dos transmissores e também na minimização da potência óptica destes. Como exemplo, para o caso de  $1Gb/s$ , considerando inicialmente cinco transmissores, a figura 30 mostra a evolução da população do GA ao longo das iterações. No início, a população é distribuída por diversos valores de *fitness*, sendo este a potência óptica emitida por cada transmissor. Estes valores encontrados nessa população aleatória inicial, apresentado na figura 31, são em sua maioria muito distantes daqueles encontrados após a evolução do algoritmo. Ao longo das iterações, os indivíduos vão migrando para valores cada vez melhores.

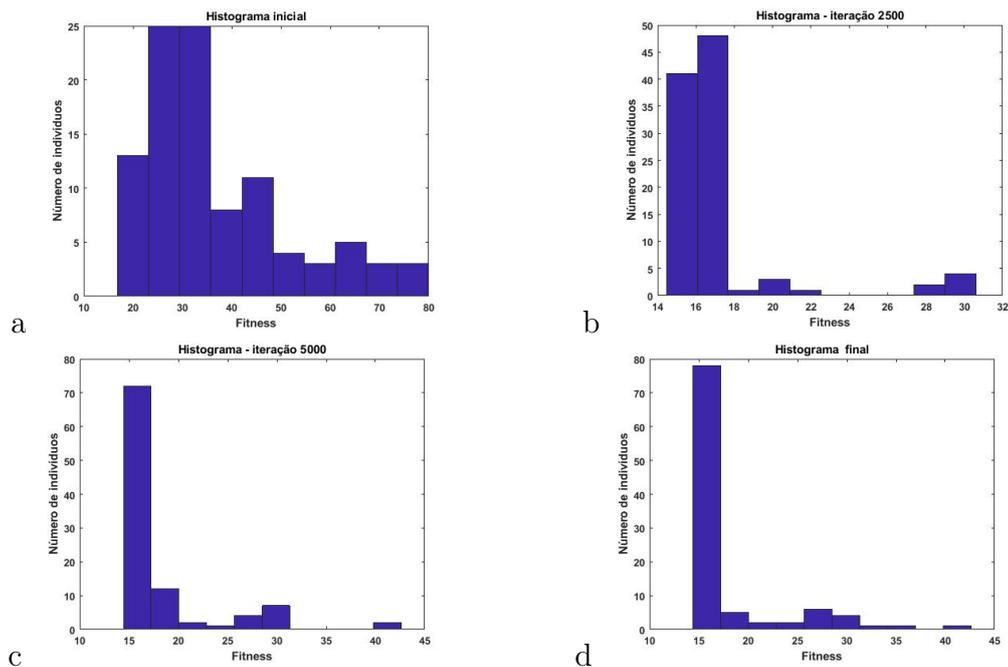


Figura 30 – Histograma do fitness da população a) Inicial, b) 2500 iterações, c) 5000 iterações e d) 10000 iterações

De outra maneira, a figura 32 mostra a distribuição da população inicial e final para este mesmo caso considerado. Percebe-se que a população inicial é distribuída de maneira aleatória, sendo que a população final já se concentra em torno de valores, prováveis mínimos da função, em que grande parte está próximo ao mínimo global.

Para verificar-se a evolução do algoritmo, a figura 33 apresenta o avanço do menor mínimo encontrado ao longo das iterações, bem como a média do *fitness* de cada população ao longo do tempo.

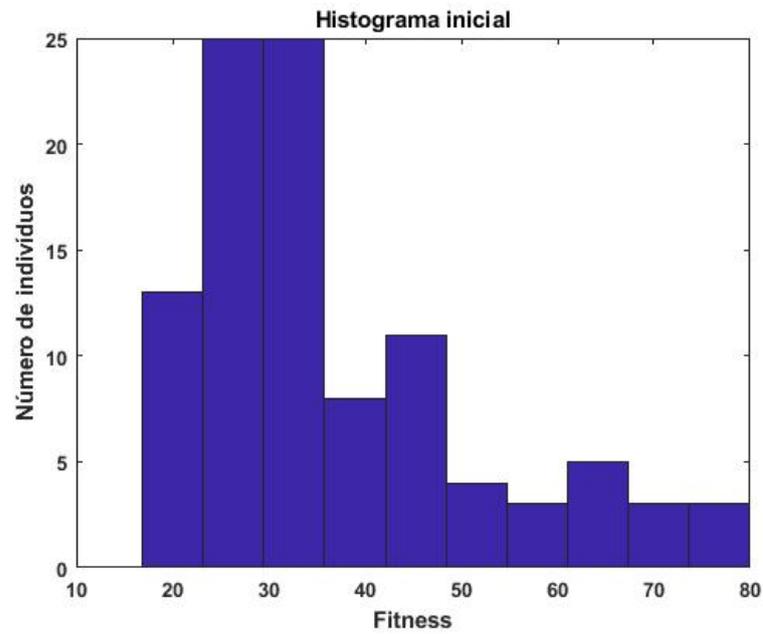


Figura 31 – Histograma da distribuição da população inicial

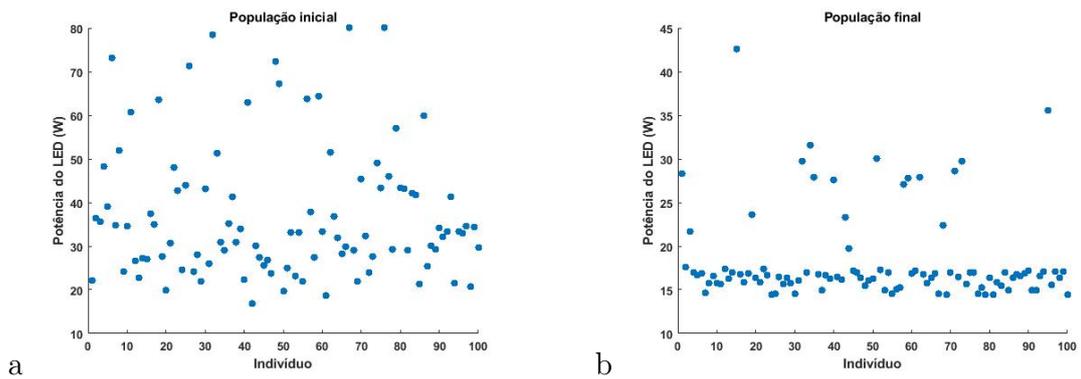


Figura 32 – Distribuição da população a) Inicial e b) Final

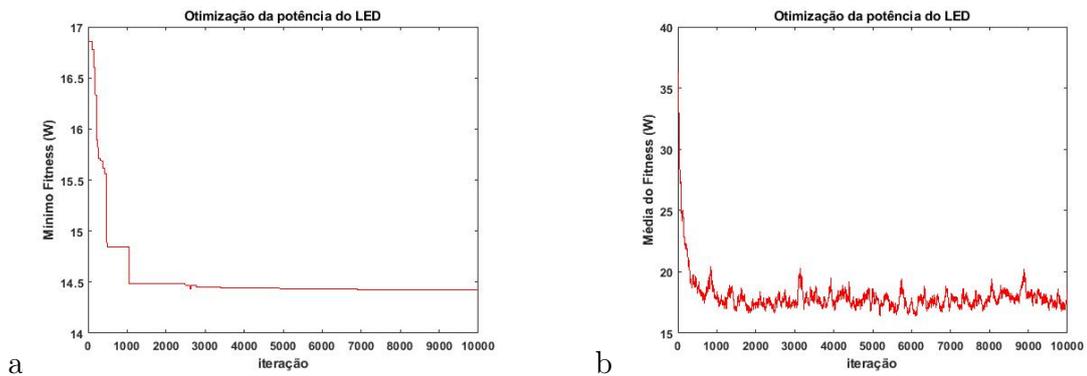


Figura 33 – Fitness da população ao longo das iterações a) Mínimo e b) Média

Desta forma, para este caso analisado, os transmissores ficaram posicionados conforme figura 34, em que, para uma taxa de  $1Gb/s$ , cada transmissor deve ter uma potência óptica transmitida de  $14,43W$ , de maneira a garantir, para esta taxa, a BER

mínima de  $10^{-6}$ , no círculo apresentado na figura 28. Considerando esta potência óptica encontrada, conseguiu-se então a distribuição da SNR e BER apresentadas na figura 35, atingindo-se o objetivo de melhorar a eficiência do sistema VLC projetado.

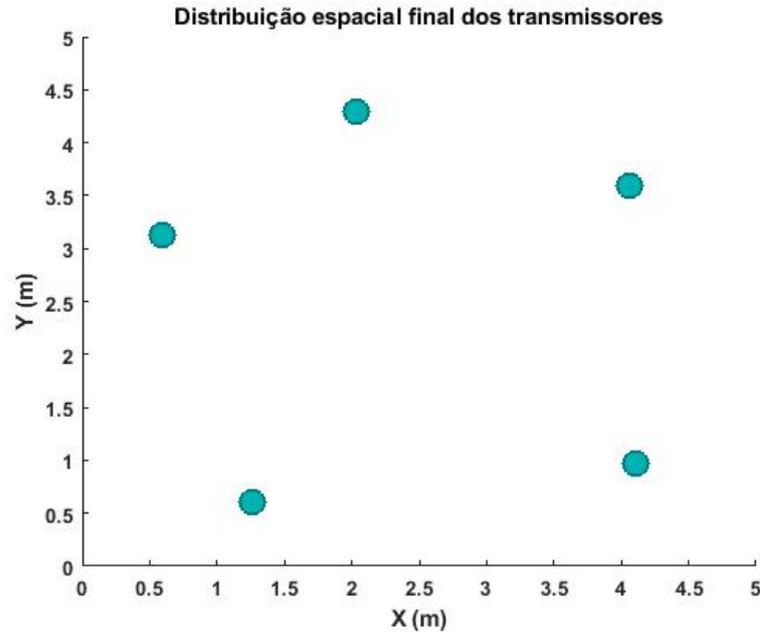


Figura 34 – Posição final dos transmissores

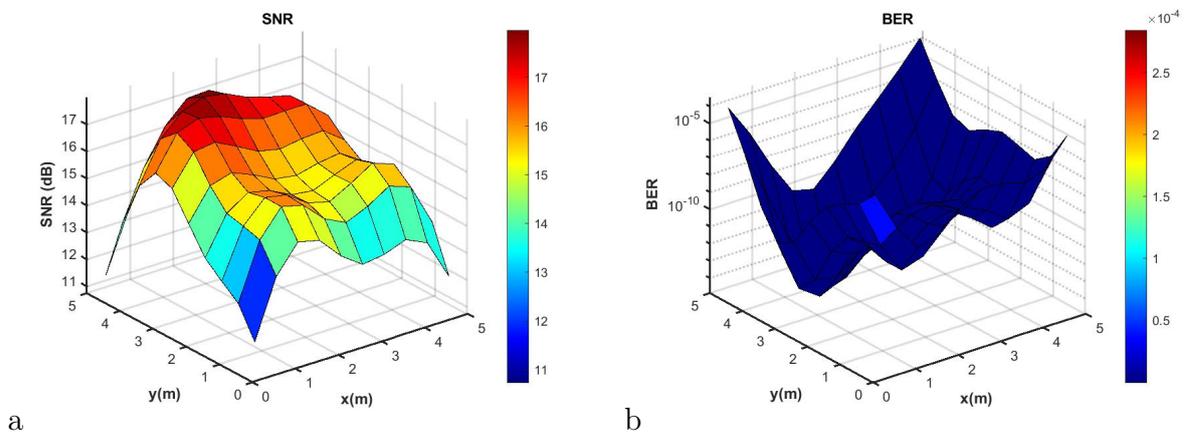


Figura 35 – Distribuição no plano receptor a) SNR e b) BER

Nessa mesma taxa de transmissão de dados considerada, de  $1Gb/s$ , foi simulado o mesmo cenário com o número de transmissores variando entre 2 e 10. Percebe-se que a distribuição desses transmissores no teto, torna-se simétrica ao longo da evolução do algoritmo. A figura 36 mostra, como exemplo, esse posicionamento simétrico dos transmissores para o caso de 3, 4, 7 e 10 transmissores ópticos.

Desta maneira, essas distribuições dos transmissores, associadas à minimização da potência óptica requerida, resultam nas distribuições da SNR apresentadas na figura

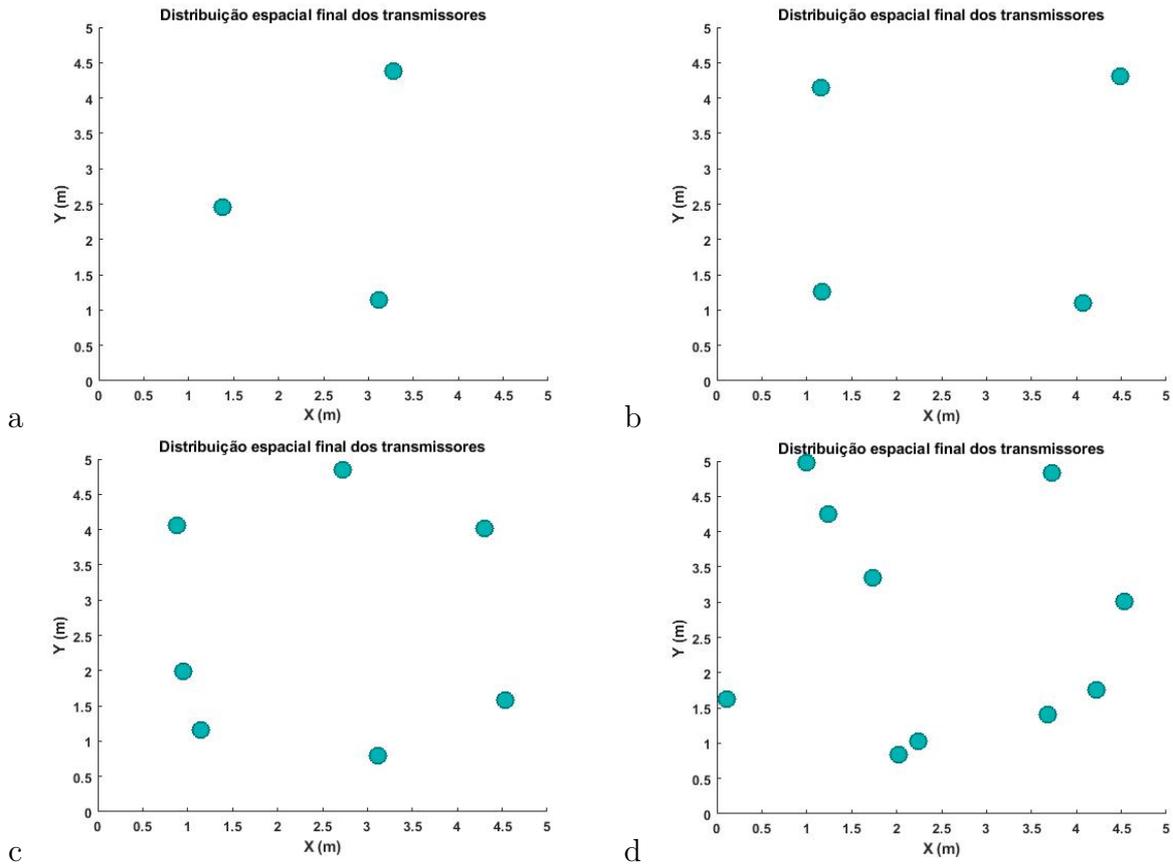


Figura 36 – Distribuição da posição final dos transmissores a) 3, b) 4, c) 7 e d) 10

37, em que percebe-se a distribuição da SNR com valores entre 13 e 16dB, valores estes que atendem ao requisito de mínima BER de  $10^{-6}$ .

#### 4.1.1 Análise da variação do número de transmissores e taxas

Foram realizadas, portanto, simulações nesse cenário variando o número de transmissores ópticos entre 2 e 10, além da taxa de transmissão de dados: 200Mb/s, 500Mb/s, 1Gb/s e 2Gb/s. Desta forma, fixando o número de transmissores e variando-se a taxa de transmissão de dados, percebe-se para todos os casos o crescimento da demanda por potência óptica, de maneira a, mesmo em altas taxas de transmissão, garantir a BER mínima de  $10^{-6}$ . A figura 38 mostra essa variação da potência óptica requerida ao aumentar-se a taxa de transmissão de dados, para os casos com 2, 4, 6 e 8 transmissores.

Outro importante resultado que observou-se foi que, variando-se o número de transmissores, a potência óptica total requerida tende a estabilizar para um número de transmissores maior do que 4 ou 5, percebendo-se um alto ganho de eficiência energética ao aumentar-se o número de transmissores entre 2 e 5, como pode-se perceber na figura 39, para as diferentes taxas simuladas.

Condensando essas informações percebe-se através da figura 40 que, quanto maior

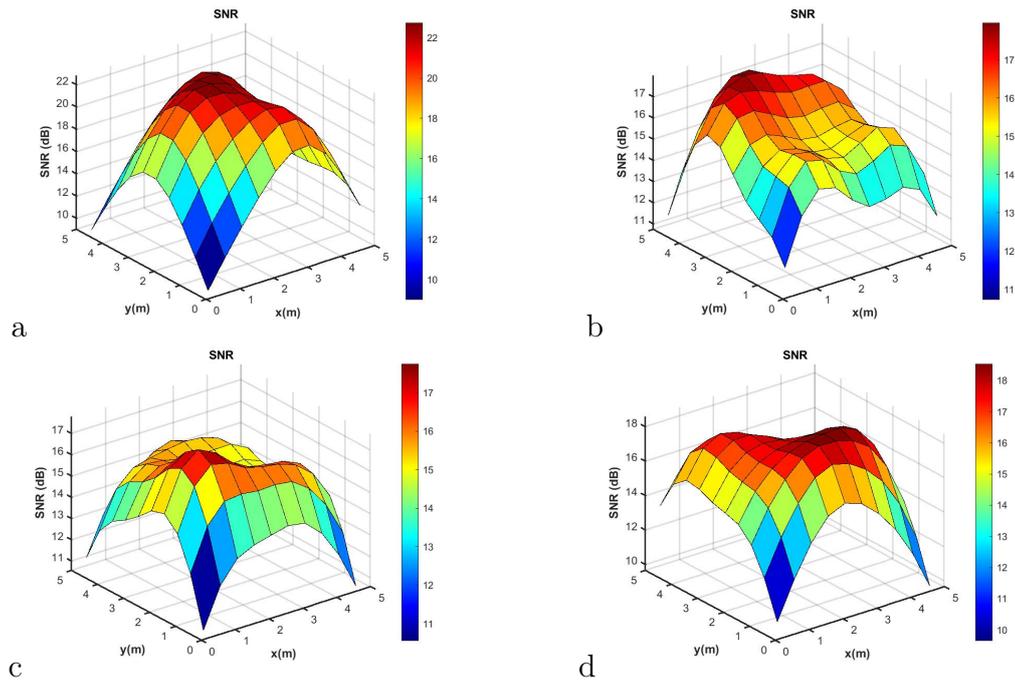


Figura 37 – Distribuição da SNR para número transmissores a) 3, b) 4, c) 7 e d) 10

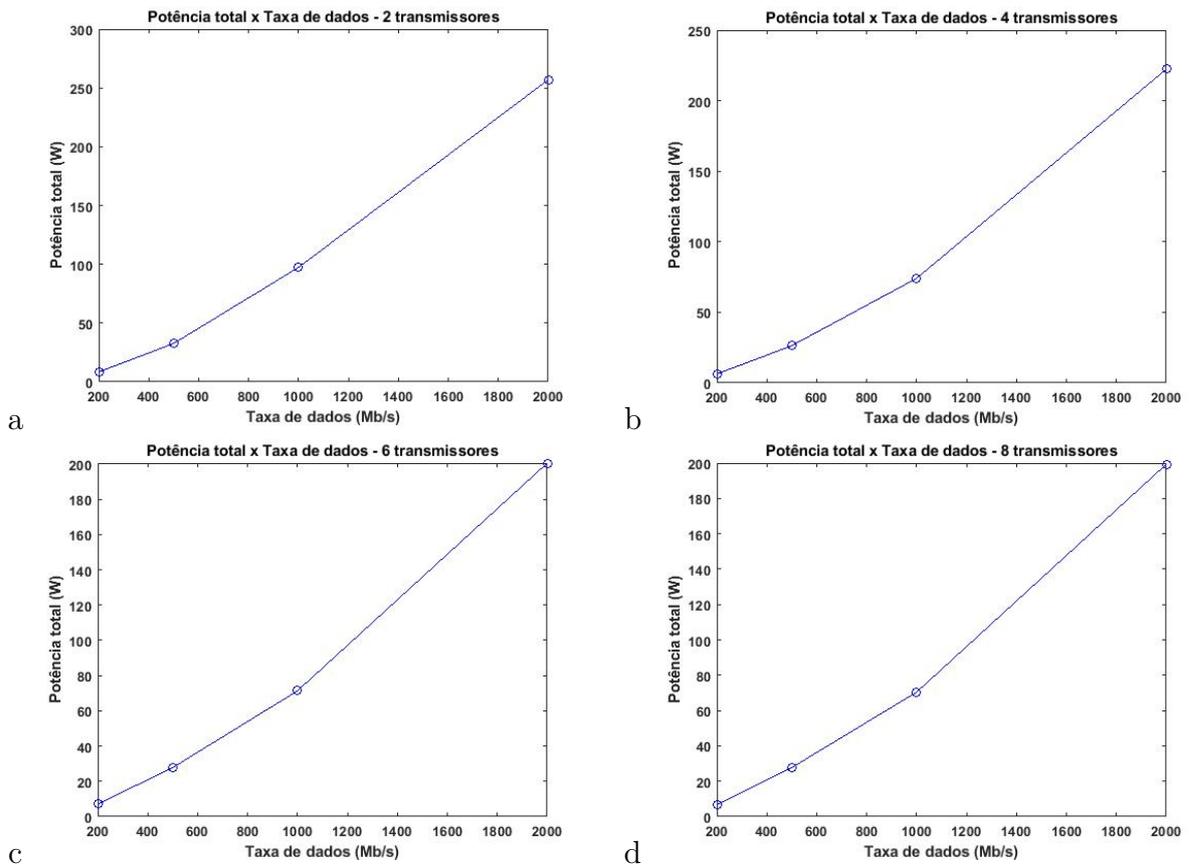


Figura 38 – Potência dos transmissores de acordo com variação da taxa de transmissão, para o número de transmissores a) 2, b) 4, c) 6 e d) 8

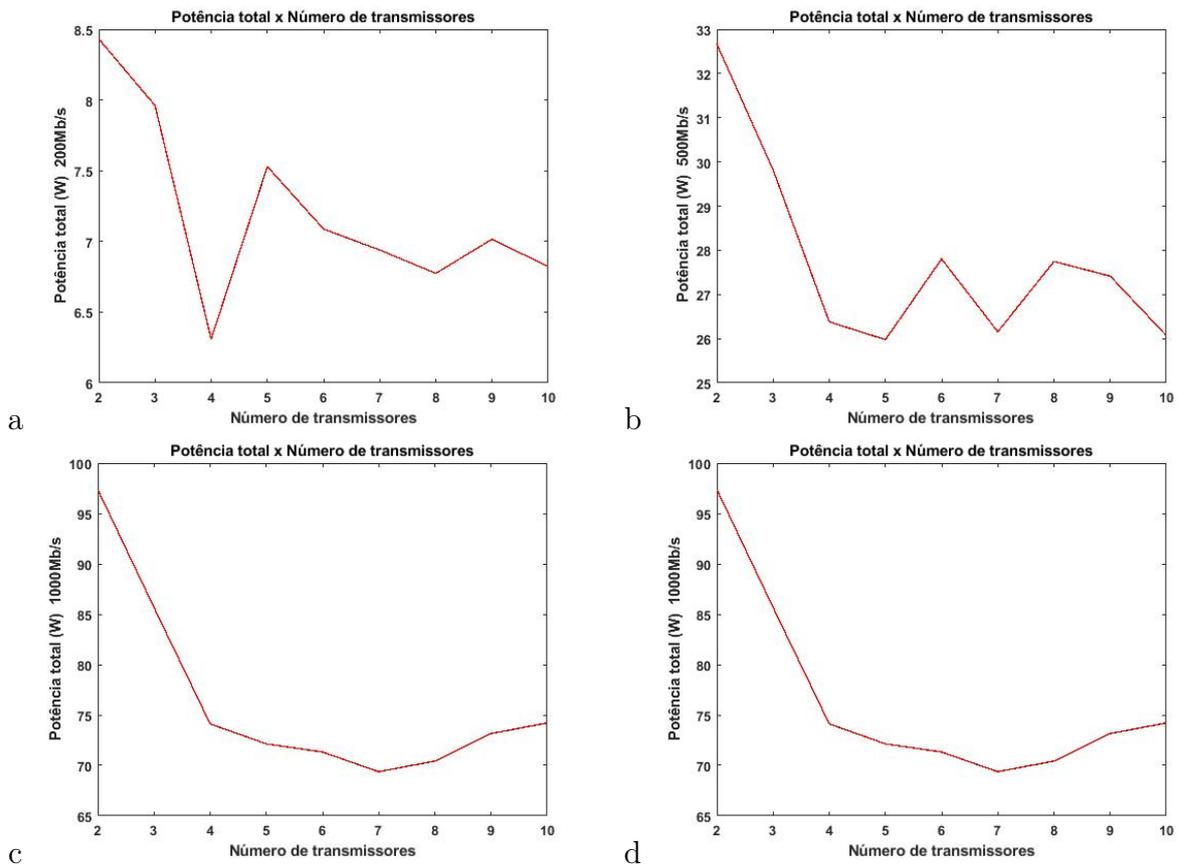


Figura 39 – Variação da potência total relativo ao número de transmissores utilizados para as taxas a)  $200\text{Mb/s}$ , b)  $500\text{Mb/s}$ , c)  $1000\text{Mb/s}$  e d)  $2000\text{Mb/s}$

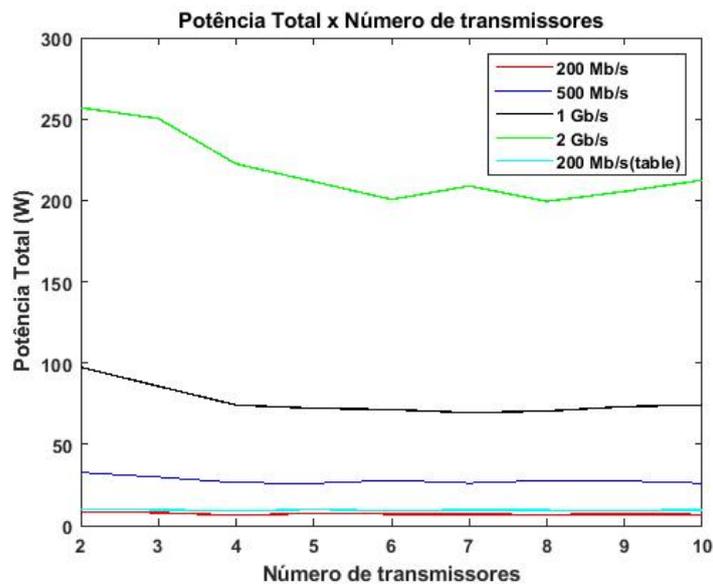


Figura 40 – Potência óptica total variando-se o número de transmissores e taxa de transmissão de dados

a taxa de transmissão de dados, maior será a requerida potência óptica transmitida, além da citada conclusão que não há muito ganho de eficiência aumentando-se o número de

transmissores para além de 5, para o cenário avaliado.

### 4.1.2 Validação do algoritmo de otimização

Para validar o algoritmo de otimização desenvolvido, foi realizada uma série de testes, em que foram gerados diversas configurações de teste para os casos de 3, 4 e 5 transmissores, definindo posições aleatórias e calculando, baseado nestas posições, qual seria a potência óptica por transmissor exigida de maneira a garantir a BER mínima de  $10^{-6}$ , considerando o mesmo cenário estudado anteriormente. As figuras 41, 43 e 44 mostram alguns exemplos das 100 posições geradas para 3, 4 e 5 transmissores respectivamente.

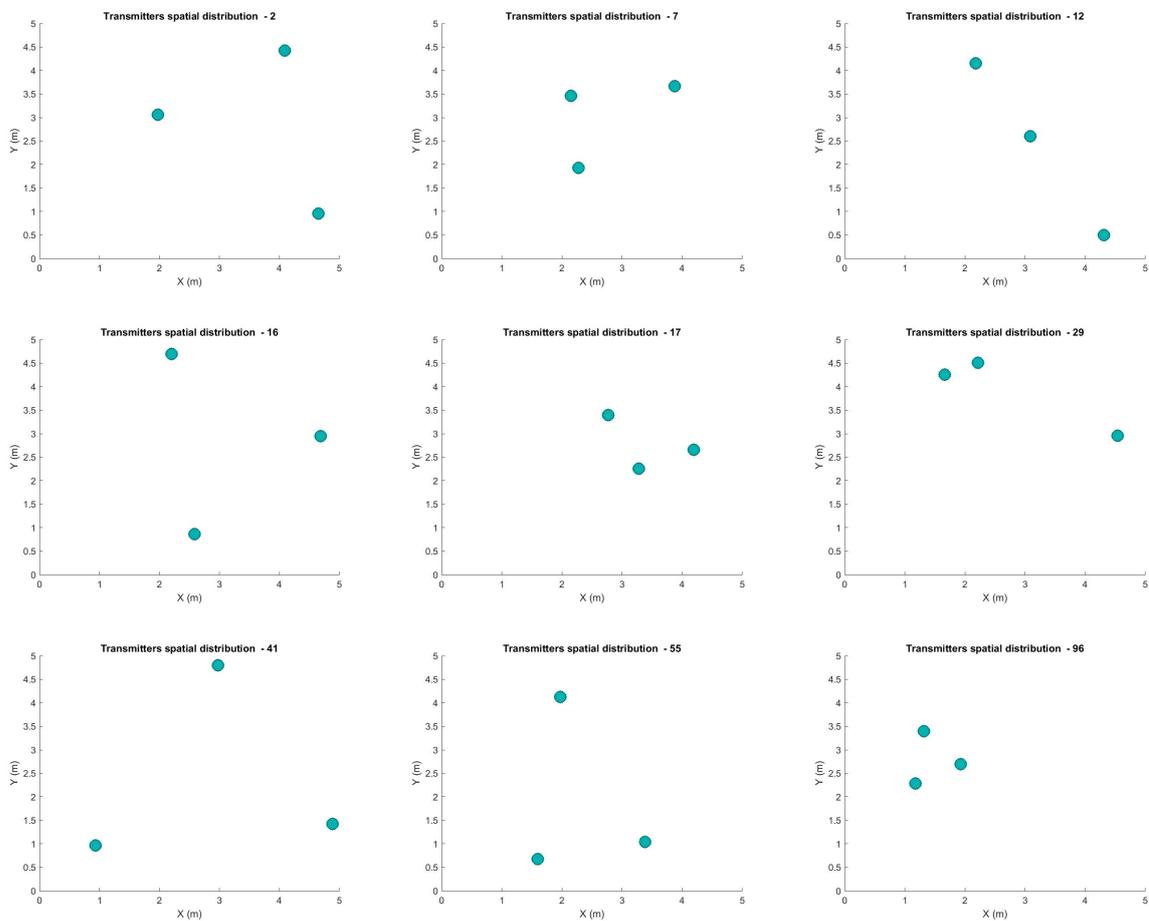


Figura 41 – Posições aleatórias

Para todos os casos considerados, por mais que muitas configurações pareçam muitas vezes simétricas e bem posicionadas, nenhuma das amostras conseguiu melhorar a potência óptica requerida pelos transmissores obtida através da otimização utilizando o algoritmo genético projetado. A figura 42 mostra este resultado, validando a ferramenta de otimização desenvolvida.

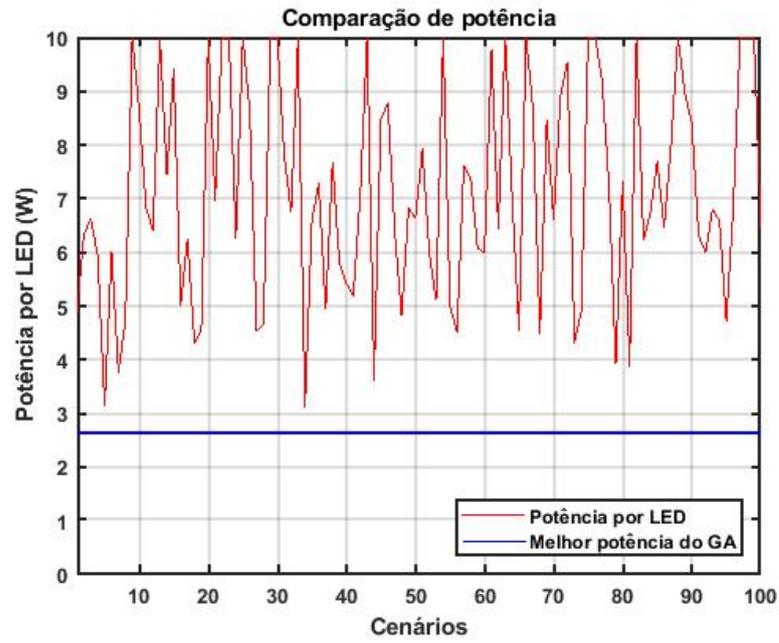


Figura 42 – Comparação entre o resultado do algoritmo genético e posições aleatórias geradas para três transmissores

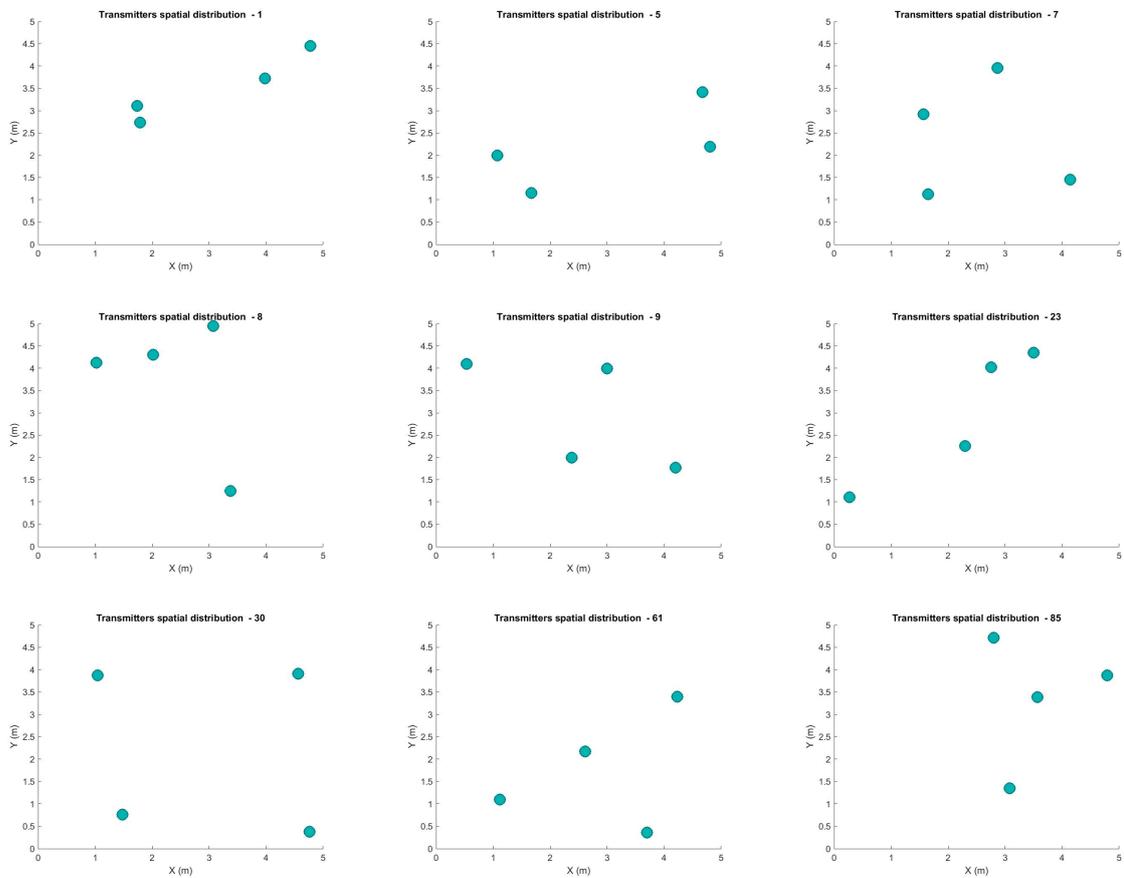


Figura 43 – Posições aleatórias

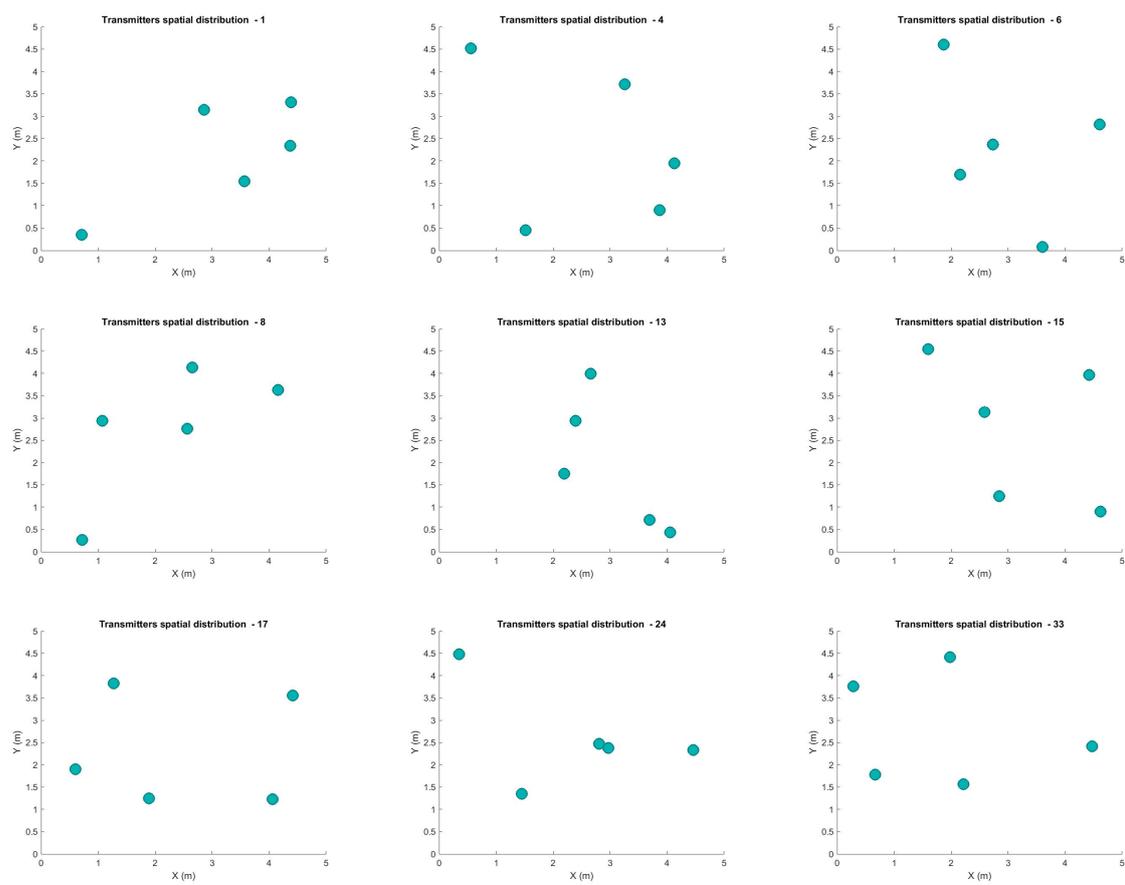


Figura 44 – Posições aleatórias

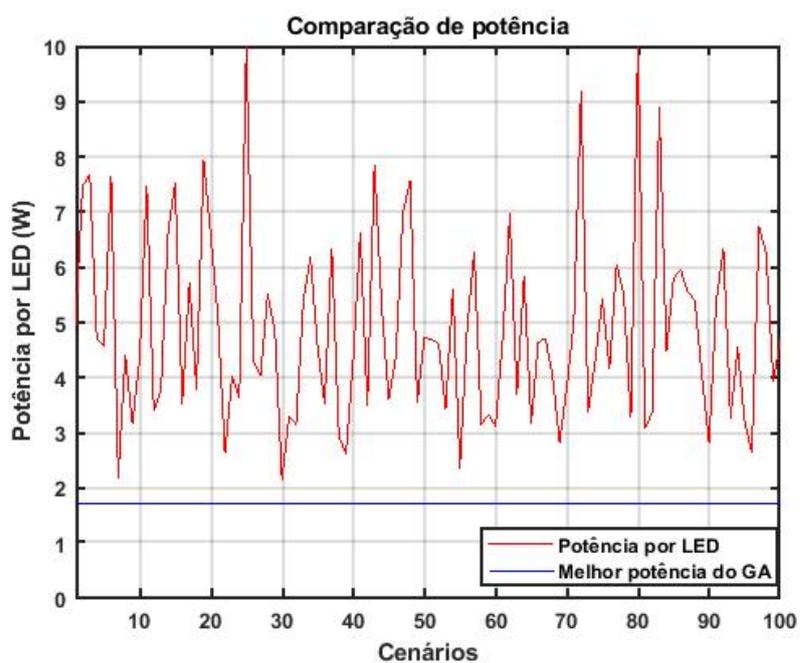


Figura 45 – Comparação entre o resultado do algoritmo genético e posições aleatórias geradas para quatro transmissores

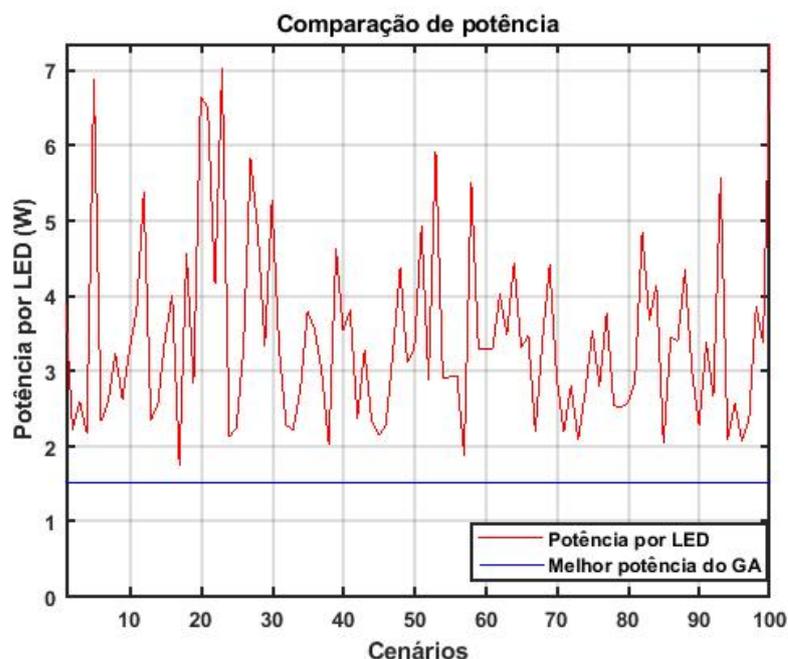


Figura 46 – Comparação entre o resultado do algoritmo genético e posições aleatórias geradas para cinco transmissores

Da mesma forma, as figuras 45 e 46 validam a ferramenta de otimização desenvolvida, mostrando que a melhor solução obtida pelo algoritmo genético sobressai no quesito eficiência energética e posicionamento dos transmissores aos indivíduos gerados aleatoriamente para teste.

## 4.2 Otimização no plano receptor com mesa

Com a finalidade de testar o algoritmo implementado em outros cenários, inseriu-se na sala uma mesa com  $0.85m$  de altura, posicionada entre as coordenadas  $1.75m$  e  $2.75m$  em  $x$  e  $y$ , como apresentado na figura 47.

Para esta análise, fixou-se a taxa de transmissão de dados em  $200 Mb/s$ , variando-se o número de transmissores. Como exemplo, para o caso de 6 transmissores, obteve-se a distribuição apresentada na figura 48. Além disso, como estes transmissores não conseguem iluminar todo o plano receptor, foi projetado uma maneira de mensurar essas áreas de sombra. Realizando para cada receptor considerado no plano a contabilização do número de transmissores que o iluminam, obteve-se uma escala de cores, onde o amarelo representa aquele receptor iluminado por todos os transmissores, e o azul aquele que deixa de ser iluminado por algum dos transmissores, sendo que quanto mais escura a cor, menos transmissores atingem um dado ponto no plano receptor.

A partir desse posicionamento dos transmissores, resultado da otimização da potência óptica emitida por eles, obteve-se a distribuição de SNR e BER apresentadas na

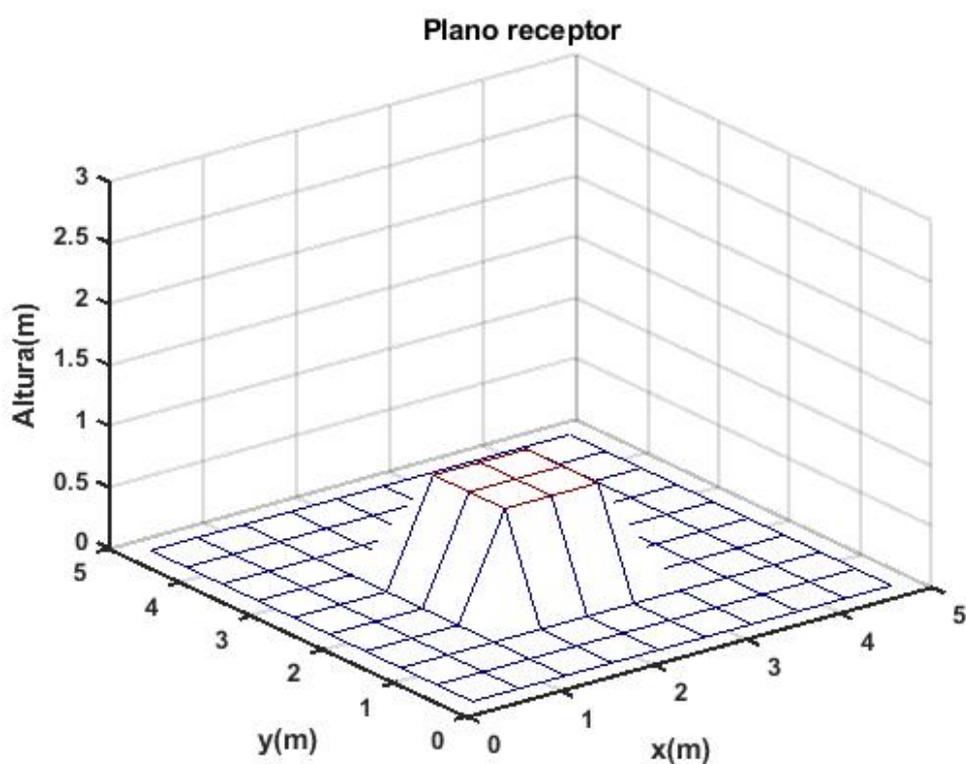


Figura 47 – Cenário com uma mesa - plano receptor

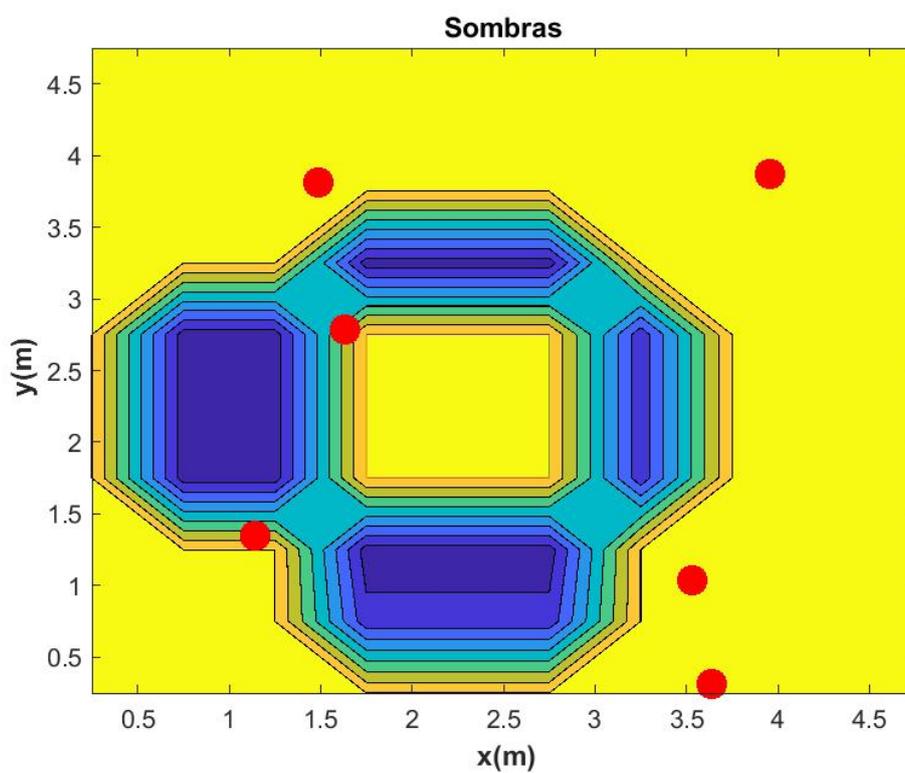


Figura 48 – Distribuição dos 6 transmissores e mapa de sombras

figura 49. Para este caso foi considerado todo o plano receptor, e não somente dentro do círculo, permitindo a análise com objetos posicionados em qualquer lugar da sala.

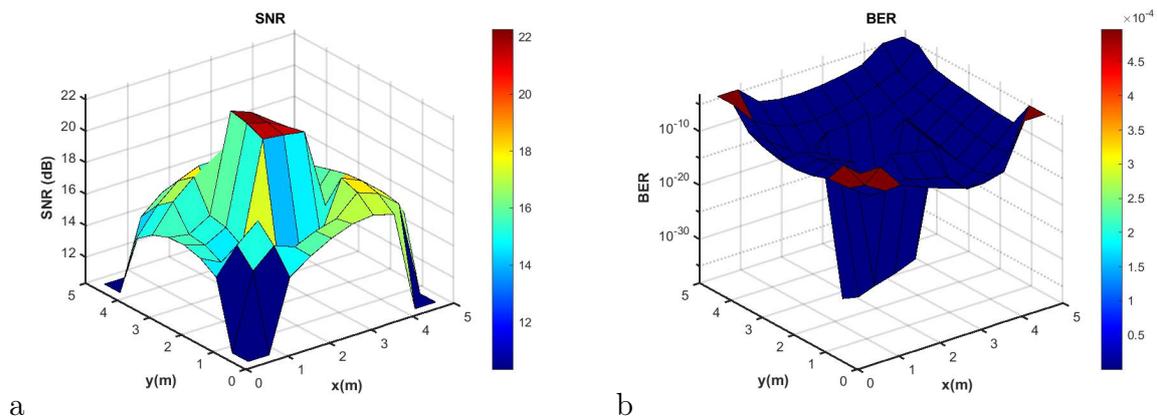


Figura 49 – Distribuição no plano receptor considerando uma mesa a) SNR b) BER

Comparando-se o resultado variando-se o número de transmissores, mantendo-se a taxa de transmissão de dados fixa em  $200\text{Mb/s}$ , verificou-se que para todos os números de transmissores existiu a necessidade de maior potência óptica por transmissor comparado com o caso de sala vazia, o que pode ser verificado na figura 50.

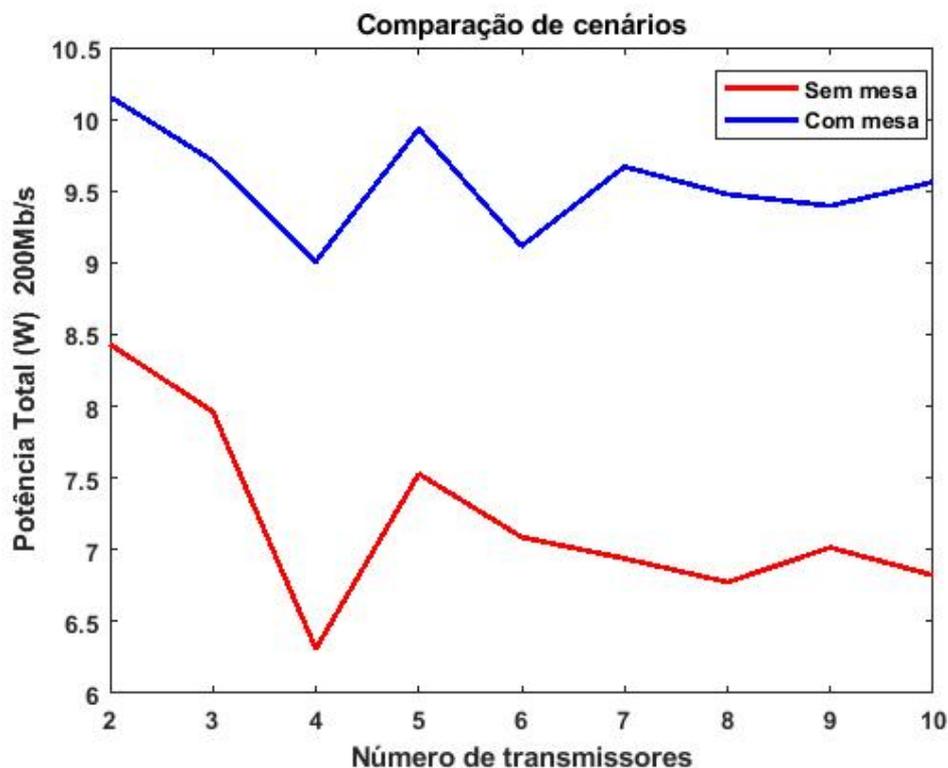


Figura 50 – Comparação da potência óptica emitida variando-se o número de transmissores

Comparando-se as situações já testadas anteriormente para diversas taxas com a inserção de uma mesa no cenário, obtém-se a figura 51, verificando que a inserção de um

objeto resulta na necessidade de maior potência, da mesma forma que o aumento da taxa implica em maior necessidade de potência também.

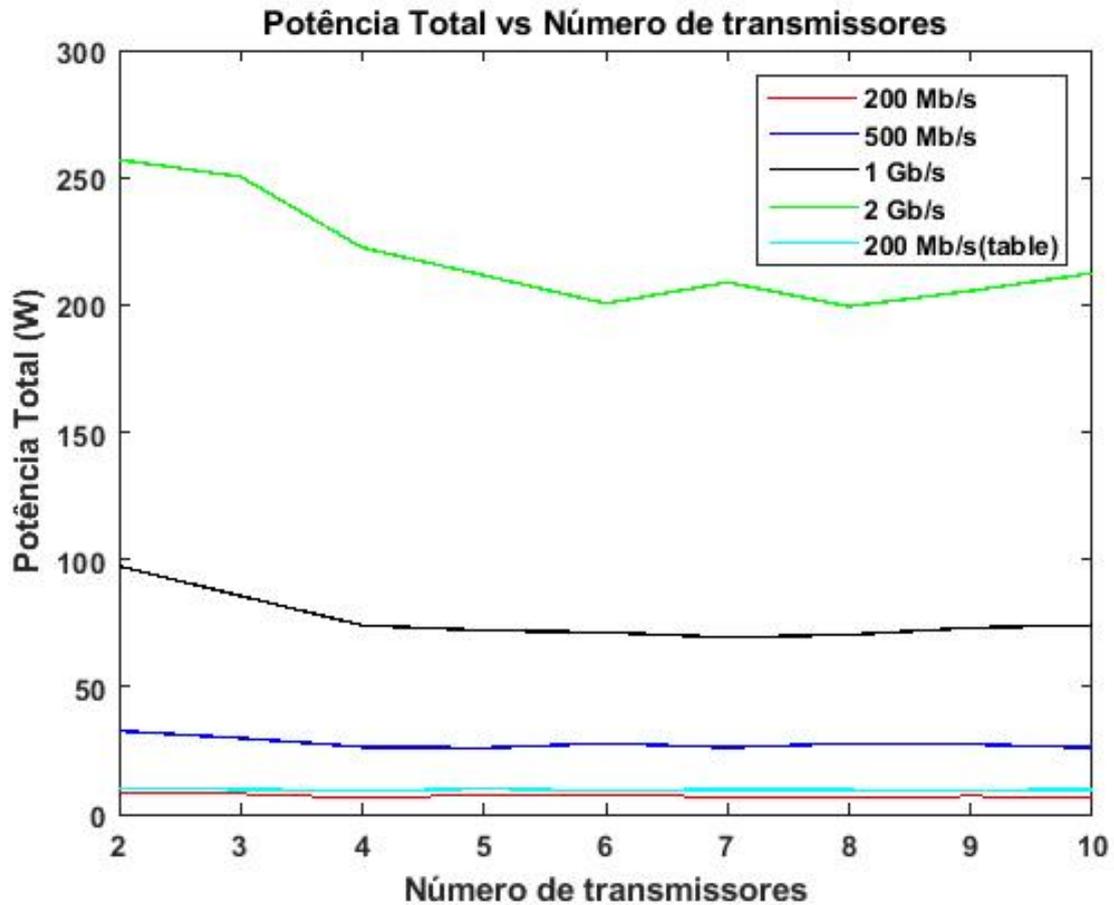


Figura 51 – Comparação do cenário com mesa a 200Mb/s, com cenário sem mesa em diversas taxas

### 4.3 Otimização no plano receptor com duas mesas

Outro teste realizado foi a inserção de mais uma mesa no plano receptor, conforme mostrado na figura 52.

Da mesma forma que anteriormente, foi considerado o caso de 6 transmissores, com uma taxa de 200 Mb/s, onde obteve-se a distribuição apresentada na figura 53, com o respectivo mapa de sombra.

Como era de se esperar, quanto mais obstáculos, maiores serão as áreas de sombras. Como resultado, para se alcançar a BER mínima, necessita-se de maior potência dos transmissores, o que pode ser observado na figura 54. Utilizando a configuração dos transmissores encontrada para o caso da sala vazia, a potência requerida ao inserir mesas, crescerá cada vez mais. Esse aumento de potência pode ser controlado através da aplicação

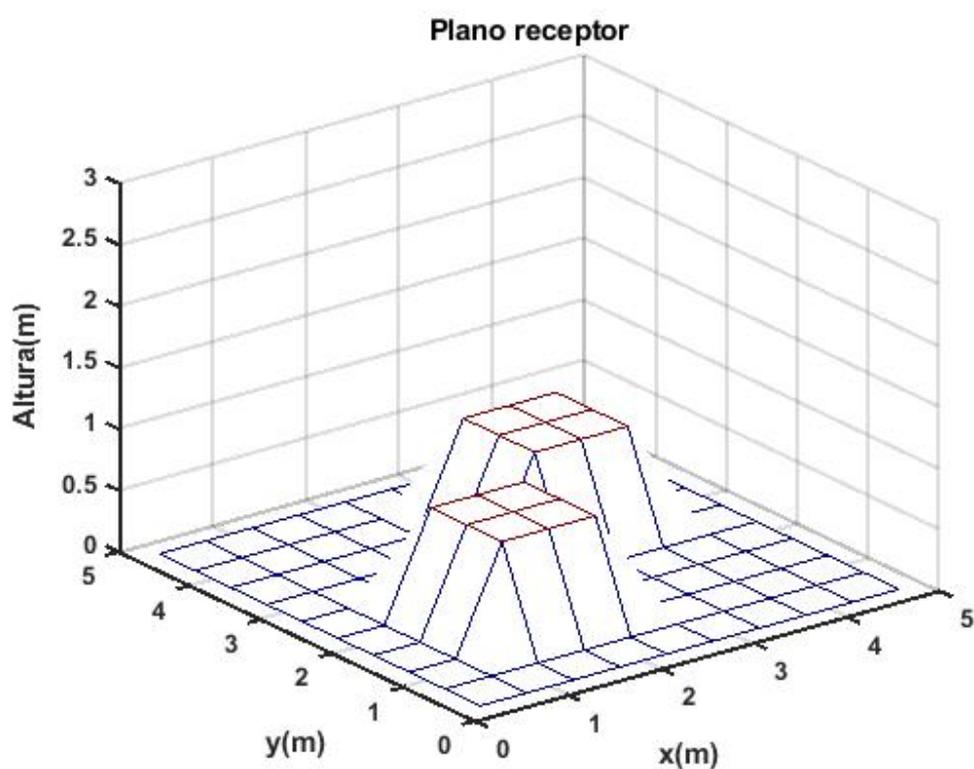


Figura 52 – Cenário com duas mesas

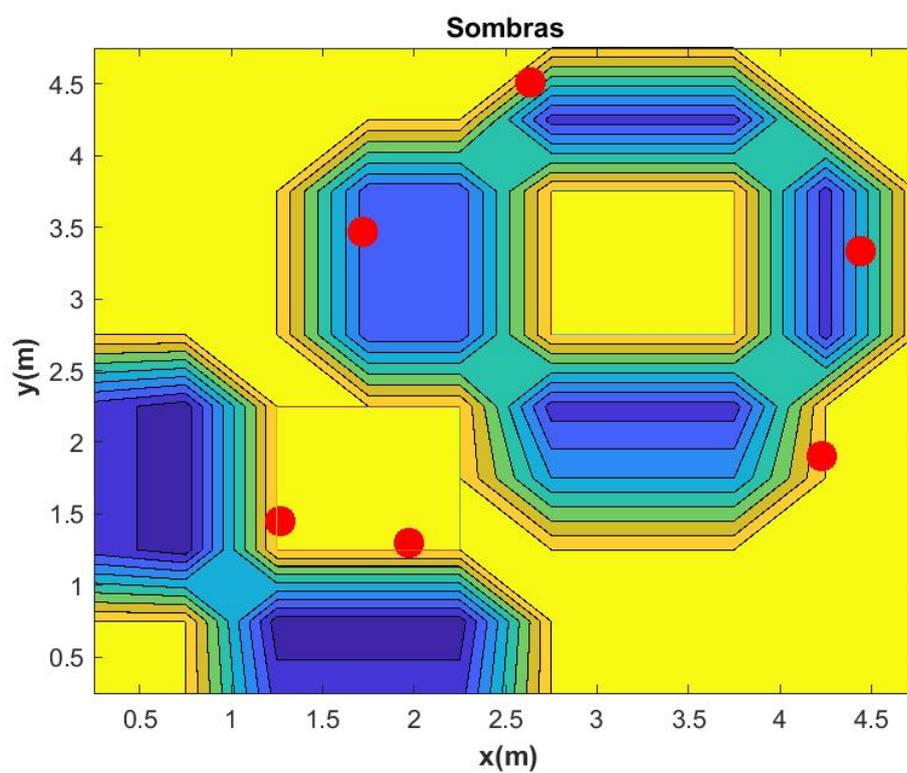


Figura 53 – Distribuição dos 6 transmissores e mapa de sombras para cenário com duas mesas

do GA projetado, uma vez que este busca configurações e potências que garantam a BER requerida.

Além disso, exigiu-se uma porcentagem mínima de 85% dos receptores serem iluminados por pelo menos um transmissor para ser considerado um indivíduo válido no algoritmo, o que pode ser percebido na distribuição de SNR no plano receptor para o caso colocado como exemplo de 6 transmissores, conforme figura 55.

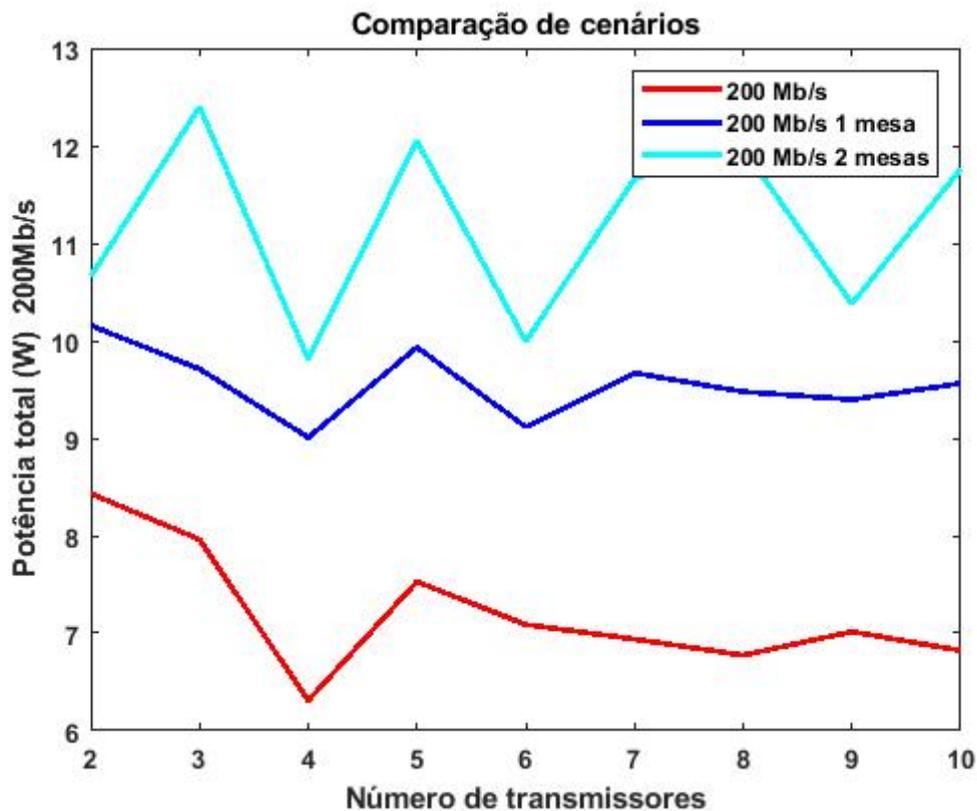


Figura 54 – Comparação da potência óptica emitida variando-se o número de transmissores

Por fim, neste cenário com duas mesas, variou-se além do número de transmissores, a taxa de transmissão de dados, figura 56, podendo-se da mesma forma, concluir que o aumento da taxa implica no aumento da necessidade de potência óptica emitida pelos transmissores, resultando ainda em valores totais maiores do que os cenários com menos obstáculos.

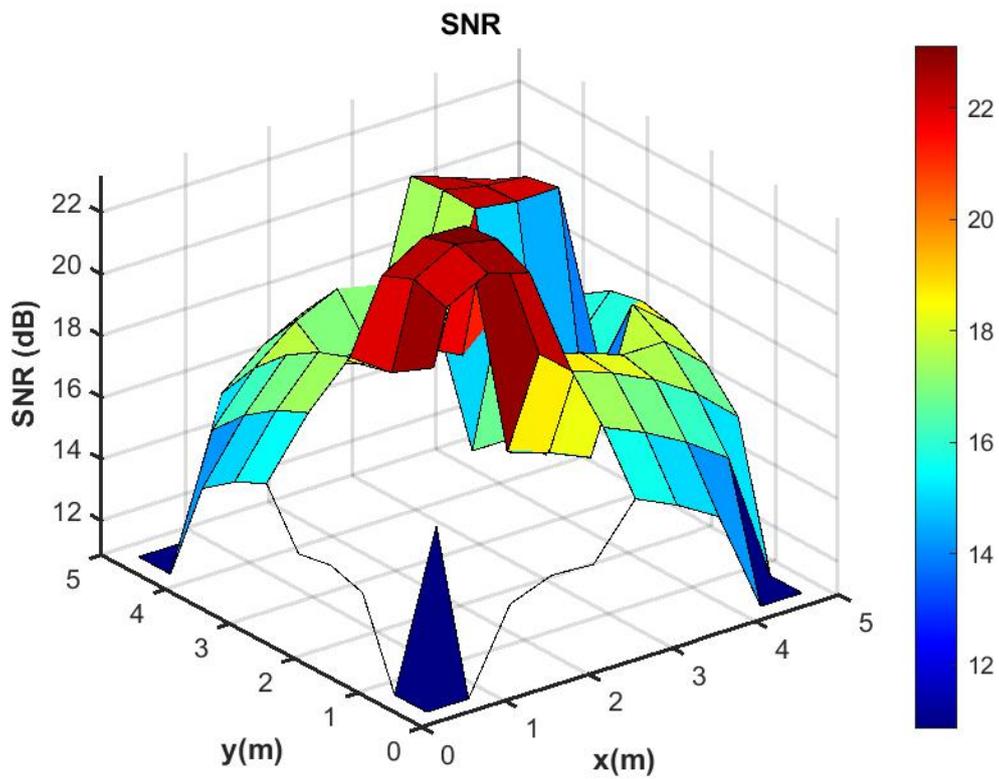


Figura 55 – Distribuição SNR para plano receptor com duas mesas

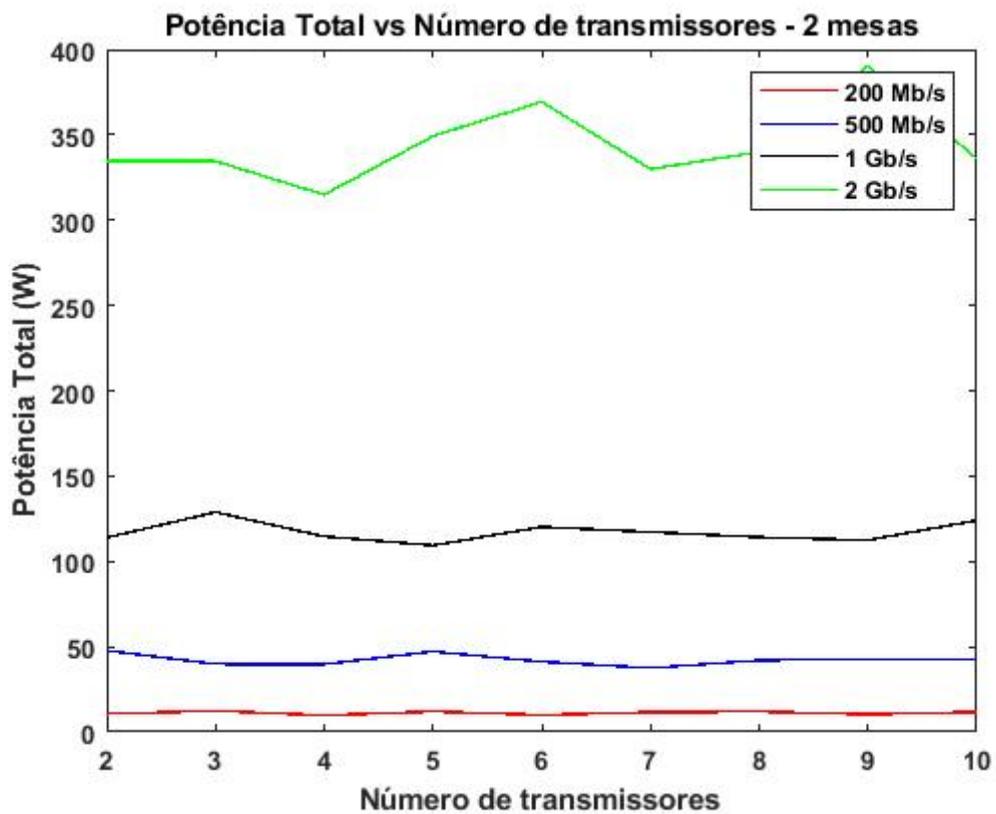


Figura 56 – Comparação do cenário com duas mesas em diversas taxas

# Capítulo 5

## Conclusão

Este trabalho apresentou o projeto de um algoritmo de otimização aplicado a um sistema VLC, baseado em Algoritmos Genéticos (Holland [1975]), em que buscava-se alcançar um melhor *trade-off* entre performance e a eficiência, através da minimização da potência óptica transmitida pelos transmissores, garantindo a BER mínima de  $10^{-6}$  em toda a área considerada, como pode ser visto na introdução apresentada no capítulo 1.

No capítulo 2 foram apresentadas as características de um sistema VLC, focando-se naqueles parâmetros dos transmissores e receptores que influenciam o resultado da SNR e BER, bem como a descrição e modelagem do canal VLC. Assim, tendo em vista as equações apresentadas e o modelo escolhido para estudo, no capítulo 3 foi realizado o estudo das características dos algoritmos genéticos e apresentados os hiper-parâmetros e estratégias utilizados no projeto do GA.

Com base nas características do canal e projetando-se o algoritmo a ser utilizado, no capítulo 4 foram apresentados os resultados encontrados. Como esperado, foram encontrados resultados satisfatórios em todos os cenários verificados. Em um primeiro momento aplicou-se o algoritmo a um ambiente livre de obstáculos, em uma sala com paredes, chão e teto em ângulos retos, com dimensões de  $5.0m \times 5.0m \times 3.0m$ . Os resultados encontraram-se consistentes mesmo após a variação do número de transmissores distribuídos pelo teto e variação da taxa de transmissão de dados. Percebeu-se, através dos resultados apresentados, em comparação com a potência óptica emitida em posicionamento aleatórios dos transmissores, um alto ganho de eficiência energética, com consumo médio, em posições aleatórias, maiores que 200% do posicionamento ótimo obtido.

Além deste cenário, variando-se número de transmissores e taxa de transmissão de dados, foram inseridos obstáculos a fim de validar o algoritmo, encontrando-se bons resultados, garantindo a BER considerada, e melhorando a eficiência energética do sistema. Como conclusão percebe-se que quanto mais obstáculos presentes maior a necessidade de potência óptica emitida, bem como melhores posicionamentos dos transmissores devem ser estabelecidos, de maneira a manter-se a distribuição da BER respeitando os limites

impostos. Além da presença de obstáculos, o aumento da taxa de transmissão também aumenta a exigência energética do sistema. Já o aumento do número de transmissores, percebeu-se influenciar a potência óptica total transmitida exigida só até certo limite, em que, por exemplo, para o caso de uma sala vazia, a potência total emitida sofreu variações relevantes apenas até 4 ou 5 transmissores.

## 5.1 Propostas de Continuidade

Diante dos diversos resultados obtidos, verificam-se várias oportunidades de continuidade deste trabalho. Alguns pontos, como a inclusão de obstáculos, ainda permitem maiores estudos, variando-se formatos, inclinação e número destes pelo plano receptor.

Outra proposta de continuidade é a montagem prática desse sistema, permitindo-se o estudo melhor da modelagem do canal VLC, bem como a exploração dos parâmetros que afetam a comunicação nos transmissores e receptores ópticos.

Além disso, existem outras figuras de mérito que podem ser estudadas e otimizadas, como a BER, o *RMS Delay Spread* (DRMS) e a interferência intersimbólica (ISI). Essas outras métricas, bem como a potência óptica emitida, a qual foi utilizada como objetivo de otimização neste trabalho, podem também ser combinadas em uma estratégia de otimização multiobjetivo, como o NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*), para otimização de mais de um objetivo ao mesmo tempo, resultando assim uma fronteira estimada de Pareto como resultado, podendo auxiliar tomadas de decisão baseadas em relações custo-benefício.

# Referências

- W. A. BARBOSA. Dinâmica em laser de semiconductor: efeitos de realimentação ótica na intensidade e na polarização. *Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco*, 2017.
- Ghassemlooy, Papoola, and Rajbhandari. *Optical Wireless Communications - System and Channel Modelling with MATLAB*. CRC Press, 2013.
- L. S. GINO, A. Chiuchiarelli, and D. W. L. Monteiro. Optimization technique for efficiency improvement in visible light communication systems. *2021 International Microwave and Optoelectronics Conference (SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2021)*, 2021.
- D. Goldberg. *Genetic algorithms in optimization, search and machine learning*. Addison Wesley, 1989.
- H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen. What is lifi? *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 34(6):1533 – 1544, 2016.
- J. H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press, 1975.
- H. IGA, K.; LI. *Vertical-cavity surface-emitting laser devices*. Springer, 2003.
- L. U. Khan. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 3:79 – 88, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2016.07.004>. URL [www.elsevier.com/locate/dcan](http://www.elsevier.com/locate/dcan).
- T. Komine and M. Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50(102), 2004.
- M. S. C. Mohsen Kavehrah and Z. Zhou. *Short-Range Optical Wireless - Theory and Applications*. Wiley, 2016.
- A. R. Ndjonguea, H. C. Ferreira, and T. M. N. Ngatched. Visible light communications (vlc) technology. *ResearchGate*, 2015. doi: 10.1002/047134608X.W8267. URL <https://www.researchgate.net/publication/279321580>.

- 
- I. H. Osman and G. Laporte. Metaheuristics: A bibliography. *Annals of Operations Research*, 63(5):513–628, 1996. doi: 10.1007/BF02125421. URL [https://www.researchgate.net/publication/234014434\\_Metaheuristics\\_A\\_Bibliography](https://www.researchgate.net/publication/234014434_Metaheuristics_A_Bibliography).
- A. Pozo, A. F. Cavalheiro, C. Ishida, E. Spinosa, and E. M. Rodrigues. *Computação evolutiva*. Grupo de Pesquisas em Computação Evolutiva, 2005.
- R. G. Smith and S. D. Personick. *Receiver design for optical fiber communication systems*. Springer-Verlag, 1980.
- S. M. Sze and M. K. Lee. *Semiconductor Devices*. Wiley and Sons. Inc., 2012.