



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**INSTITUTO CIBERESPACIAL**  
**BACHARELADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO**

**LUCKY LUCIANO QUEIROZ SEIXAS**  
**NIKOLAS OHANA BARUCH**

**Proposta de um Simulador baseado em Python para  
Planejamento de Cobertura de Rede VLC (*Visible Light  
Communication*) - LuNiPy**

**BELÉM**

**2018**

**LUCKY LUCIANO QUEIROZ SEIXAS**

**NIKOLAS OHANA BARUCH**

**Proposta de um Simulador baseado em Python para  
Planejamento de Cobertura de Rede VLC (*Visible Light  
Communication*) - LuNiPy**

Monografia apresentada ao  
Curso de Bacharelado em  
Sistemas de Informação da  
Universidade Federal Rural da  
Amazônia, como requisito para  
obtenção do grau de Bacharel  
em Sistemas de Informação,  
orientado pelo Prof. Dr. Edvar  
da Luz Oliveira.

**BELÉM**

**2018**

**Proposta de um Simulador baseado em Python para Planejamento  
de Cobertura de Rede VLC (*Visible Light Communication*) -  
LuNiPy**

**LUCKY LUCIANO QUEIROZ SEIXAS**

**NIKOLAS OHANA BARUCH**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal Rural da Amazônia, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Monografia defendida e aprovada, em \_\_\_\_\_, pela banca  
examinadora:

---

Professor Dr. Edvar da Luz Oliveira

Orientador

---

Professor Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

Professor do curso de Engenharia da Computação da Universidade Federal do Pará

---

Professor M.SC. Anderson Souto Vinicius

Bacharel em Sistemas de informação pela Universidade Federal Rural da Amazônia

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe, dona Conceição, que sempre pegou no meu pé para estudar, ao meu pai, o senhor Machado, que sempre me incentivou a pegar leve nos estudos e me divertir de vez em quando, ambos me ensinaram a importância do equilíbrio na vida.

Aos meus irmãos Halan Albuquerque, Helan Albuquerque, Agnes Seixas, Lívia Seixas e Bianca Seixas, por todo apoio e crítica que constantemente me proporcionaram ao longo da vida.

Ao meu amigo, parceiro de TCC, irmão e uma das pessoas mais importantes na minha vida, Nikolas Ohana, por ter me acompanhado nesta trajetória desde 2011, por todos os puxões de orelha, brigas, abraços, conselhos e palavras de apoio. Principalmente, agradeço por ter errado o soco e ter quebrado o nariz de outra pessoa ao invés do meu.

A meu orientador e amigo Professor Dr. Edvar da Luz Oliveira, por ter acreditado em mim e nos meus esforços, pelo conhecimento passado, pelas conversas sérias, brincadeiras, sermões e por todo apoio e suporte que prestado quando quase morri.

Ao Professor Dr. Carlos Renato Francês e ao CNPq, pela oportunidade de participar de projetos de pesquisas e possibilitar meu crescimento acadêmico.

Aos amigos e familiares que participaram direta ou indiretamente na caminhada da vida e contribuíram para construção deste trabalho. Em especial ao Rodrigo Alfaia, Mila Façanha, Anderson (Batata) Vinicius, Dalete Oliveira, (de)Monica Sousa, Rennan Barbosa, Raylana Rodrigues, Nicolas (Brimo) Brito, Jefferson (Vô) Alba, Augustus Frasson, Larissa Areal, Willian Gonzaga, Lais Yamaguchi, Igor Ruiz e Jorge (Maranhão) Magno. Sem amigos nada seríamos.

Fora Temer.

Lucky Luciano Queiroz seixas

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Leinha Boneca, que sempre esteve do meu lado, desde a famosa “escolinha da tia Léa” até os incentivos para sair do país em intercâmbio e crescer como ser humano. Deve também a minha Avo, Dona Stela, que sempre me deu suporte para que não desanimasse, chegando 23:30 todos os dias depois de passar o dia na universidade. Agradeço também a minha prima Tayana, que me mostrou que a vida não precisa ser pontual e fechada me mostrando novas vocações nunca antes aplicadas por medo. Concluindo assim a tríplice-coroa da minha vida.

Agradeço ao meu irmão, meu amigo, meu parceiro, Lucky Luciano Queiroz Seixas, por sempre estar perto com seus conselhos que só funcionam para os outros e suas “piadotas”, que fazem até burro chorar. Mesmo quando tudo parecia acaso, morar na mesma casa foi uma das melhores épocas da minha vida.

A meu orientador e amigo Professor Dr. Edvar da Luz Oliveira, por ter acreditado em mim desde 2012 e quando eu estava sem perspectivas de crescimento. Pelos conhecimentos passados, brincadeiras, sermões.

Devo também agradecer meus tios, que de certa forma, me ajudaram a vencer essa etapa. Tia Merian e tio Benjamin que me fizeram sentir o calor da família em Portugal quando mais precisava. Tio Acelino (Tio Grilo), Tia Katia e tio Jones com seus ensinamentos de vida sempre na hora certa. E tio David que mesmo indo embora cedo, deixou uma marca profunda em minha personalidade.

Sem os amigos, nada seríamos. Obrigado em especial ao Rodrigo Alfaia e Anderson (Batata) Vinicius que desde a época do kids mostrando o real sentido acadêmico. Victor Baidek e Jorge Magno que me mostraram quanto um *teacher* pode nos ensinar. Ao Rennan Barbosa, Nicolas (Brimo) Brito, Augustus Frasson nas horas de Dota 2. Amora Cordovil por manter a calma e tranquilidade enquanto o TCC não saía. E as conversas boas e malucas no decorrer desta vida de William Gonzaga, Jessica Gomes, Anderson Maia, Rafael Fishman.

Nikolas Ohana Baruch

## RESUMO

A comunicação por luz visível (VLC) descreve o uso do espectro visível para comunicações ópticas, com o potencial de fornecer um novo espectro sem fio de licença livre. A maioria dos trabalhos existentes sobre VLC concentra-se na otimização do meio físico, deixando de lado o contexto em que será implantado. Este trabalho apresenta a proposta de um simulador VLC que utiliza as características e comportamentos da tecnologia para simular o planejamento em um ambiente *indoor*. Este simulador desenvolvido em Python possui grande flexibilidade, possibilitando a parametrização das características do LED, do fotorreceptor e do cenário a ser planejado, como resultado são gerados gráficos de potência em função da distância, arquivo *trace* e mapas de calor que possibilitam analisar a rede (potência e ruído), poupando custos com implementação e testes físicos.

**Palavras-chave:** Simulação, VLC, Python

## **ABSTRACT**

Visible light communication (VLC) describes the use of visible spectrum for optical communications, with potential to provide a new wireless spectrum of free license. Most existing work on VLC focuses on optimizing the physical environment, leaving aside the context in which it will be deployed. This work presents the proposal of a VLC simulator that uses the characteristics and behaviors of the technology to simulate the planning in an indoor environment. This simulator developed in Python has great flexibility, allowing the parameterization of the characteristics of the LED, the photoreceptor and the scenario to be planned. As a result, power graphs are generated as a function of the distance, trace file and heat maps that make it possible to analyze the network (power and noise), saving implementation costs and physical testing.

**Keywords:** Simulation, VLC, Python

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Frequência do espectro de luz visível	16
<b>Figura 2</b> - Ambiente com rede VLC	18
<b>Figura 3</b> - Posição relativa de transmissor e receptor, LOS	20
<b>Figura 4</b> - Reflexão do raio de luz até o receptor	21
<b>Figura 5</b> - <i>On-Off Keying</i>	22
<b>Figura 6</b> - <i>Variable Pulse Position Modulation</i>	23
<b>Figura 7</b> - <i>Color-Shift keying</i>	23
<b>Figura 8</b> - Diagrama de fluxo	30
<b>Figura 9</b> - Diagrama de classe	31
<b>Figura 10</b> - Exemplo de cenário	36
<b>Figura 11</b> - Exemplo de mapa de calor de potência	37
<b>Figura 12</b> - Exemplo de gráfico de potência pela distância	38
<b>Figura 13</b> - Exemplo dos arquivos de texto	39
<b>Figura 14</b> - Cenário criado com seis APs no ciclo 1	43
<b>Figura 15</b> - Cenário criado com seis APs no ciclo 2	44
<b>Figura 16</b> - Cenário criado com seis APs no ciclo 3	45
<b>Figura 17</b> - Cenário criado com seis APs no ciclo 4	46
<b>Figura 18</b> - Trace do receptor de ID 9	47



<b>Figura 19</b> - Trace do receptor de ID 8	48
<b>Figura 20</b> - Trace do receptor de ID 5	49
<b>Figura 21</b> - Mapa de calor da potência	50
<b>Figura 22</b> - Gráfico Potência x Distância	51
<b>Figura 23</b> - Mapa de calor do SINR	52
<b>Figura 24</b> - Mapa de calor da potência com dois APs	53
<b>Figura 25</b> - Mapa de calor do SINR com dois APs	54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Análise trabalho correlatos	27
<b>Tabela 2</b> - Variáveis alteradas para configurar cenário	40
<b>Tabela 3</b> - Variáveis alteradas para configurar LEDs e receptores	41
<b>Tabela 4</b> - Variáveis alteradas para configurar ruído	41

## **SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivos gerais	14
1.2 Objetivos específicos	14
1.2 Organização do trabalho	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>16</b>
2.1 Considerações iniciais	16
2.2 Visible light communication (VLC)	16
2.2.1 Elementos de uma rede VLC	19
2.2.2 Camada física	20
2.3 Simulação	26
2.4 Python	26
2.5 Considerações finais	27
<b>3. TRABALHO CORRELATOS</b>	<b>28</b>
3.1 Considerações iniciais	28
3.2 Trabalhos correlatos	28
3.3 Considerações finais	30
<b>4. MODELAGEM DO SISTEMA</b>	<b>31</b>
4.1 Considerações iniciais	31
4.2 Descrição do simulador	31
4.3 Diagramas	31
4.4 Entrada de dados	35
4.5 Cálculos	36
4.6 Saída de dados	38
4.7 Considerações finais	42
<b>5. ESTUDO DE CASO DO SIMULADOR VLC PYTHON E RESULTADOS</b>	<b>43</b>
5.1 Considerações iniciais	43
5.2 Estudo de caso	43

5.3 Resultados da simulação	45
5.4 Considerações finais	57
6. CONCLUSÃO	58
6.1 Trabalhos futuros	58
7. REFERÊNCIAS	60
8. APÊNDICE	62

## 1. INTRODUÇÃO

Hoje existe um excesso de redes sem fio, devido ao aumento na produção e consumo de aplicações móveis. Por sua vez o tráfego de dados móveis também aumentou drasticamente nas últimas décadas. Identificou-se que as comunicações móveis por rádio frequência (RF) tendem a se esgotar. O atual espectro de frequência livre para RF está saturado, embora haja reutilização espacial e frequência eficiente (Pathak et al, 2015).

Em contrapartida, o espectro de luz visível inclui centenas de terahertz de licença livre completamente inexplorada. A comunicação por luz visível (VLC) é um excelente candidato para implementação de tecnologia que aproveitem estas frequências.

Para Aldalbahi et al, 2017 existem vários tipos de comunicação por luz como, *Light Fidelity* (LiFi), infravermelho (IR) e VLC que podem ser usados para comunicação de curto e longo alcance, podendo complementar outras tecnologias como Wifi e bluetooth. Devido sua grande capacidade, segurança, eficiência e disponibilidade, o VLC é um candidato em potencial para complementar as redes sem fio já existentes, principalmente em ambiente *indoor*.

A tecnologia VLC possui algumas particularidades que em muitos casos pode se tornar uma vantagem, devido à sua alta frequência, a luz visível não pode penetrar na maioria dos objetos e paredes permitindo criar redes sem problemas de interferência entre células, garantindo uma segurança quanto ao controle da área de cobertura do sinal, por sua vez dos dados. Embora haja um grande esforço em pesquisas para otimização e aplicação da tecnologia VLC, é evidente a carência de trabalhos voltados para implementação, a nível de infraestrutura, da mesma.

Este trabalho propõe um simulador com foco no planejamento de cobertura e análise de redes VLC em ambientes *indoor*. O sistema criado possui funcionalidades que permitem a criação de cenários, composto por Access Point (Aps - do inglês, pontos de acesso) e receptores, onde pode se verificar a cobertura da rede; funções para movimentação dos receptores foram implementadas para melhor representar o

comportamento da rede; métricas de potência do sinal SINR e capacidade de transferência de dados são calculadas, a fim de proporcionar uma melhor observação e análise da rede. Todo o Sistema foi desenvolvido em python, para tal foi adotado o paradigma de orientação a objetos visando uma fácil manutenção, customização e reutilização do simulador desenvolvido.

### **1.1. Objetivos gerais**

Mediante ao exposto, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo geral especificar e desenvolver um simulador para redes VLC, com foco no planejamento de cobertura *indoor* e análise do comportamento da rede e seus componentes. A partir do simulador será possível ter maior flexibilidade e custos menores nas configurações e instalações que norteiam os elementos de transmissão (LEDs) e recepção (fotorreceptores), com isso, será possível realizar a instalação dos equipamentos em locais que contribuam para uma maior cobertura do sinal.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Desenvolver cenários *indoor* para aplicação de rede VLC, com Aps fixos e receptores de movimento aleatório para melhor representar o comportamento dos componentes da rede;
- Gerar representações gráficas de cenários para visualização e análise da cobertura da rede;
- Implementação de cálculos para potência do sinal recebido, SINR e capacidade do canal, de modo a analisar o comportamento da rede em relação ao cenário proposto e receptores.

### **1.3. Organização do trabalho**

O conteúdo deste trabalho de conclusão de curso é dividido em capítulos. O Capítulo 2 é constituído pelo referencial teórico responsável, embasamento conceitual utilizado para este trabalho. No Capítulo 3 são apresentados os trabalhos correlatos, pesquisas e trabalhos congêneres ao tema desta monografia. No

Capítulo 4 são apresentados a modelagem do sistema e características do simulador VLC. No Capítulo 5 são apresentados a simulação realizada para validação do simulador e resultados obtidos. O Capítulo 6 mostra as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Considerações iniciais**

Este capítulo apresenta os conceitos básicos sobre a tecnologia de Comunicação por Luz Visível (do inglês, *Visible Light Communication* - VLC), formas de comunicação e elementos do VLC. Também serão abordados a modularização do canal e características de propagação.

Além disso, este capítulo trata dos conceitos de simulação, como ferramenta de planejamento para instalação de pontos de acesso VLC, e as tecnologias necessárias para o desenvolvimento do simulador.

### **2.2. *Visible light communication* (VLC)**

A tecnologia de comunicação por luz visível (VLC) é definida como uma fonte de luz que além de fornecer iluminação também transfere informações. Essa fonte de luz deve oscilar rápido o suficiente para que o olho humano não perceba (Zafar et al, 2015, tradução nossa).

Esta dupla funcionalidade torna o VLC um excelente candidato para a comunicação, principalmente em ambientes *indoor*, e deixa evidente a importância do estudo deste campo.

“O VLC utiliza luz visível como meio de comunicação e é considerado inofensivo para os olhos. Tem potencial de implantação de sistemas operando em um paradigma de uso duplo para fornecer iluminação e comunicação de dados.” (Aldalbahi et al, 2017, p. 1, tradução nossa).

Com o aprimoramento dos diodos emissores de luz (LEDs), a eficiência energética e a vida útil das luminárias sobrepuseram seus antecessores. De acordo com Pathak et al. (2015), as lâmpadas incandescentes e fosforescentes possuem eficácia luminosa média de até quatro vezes inferior, vida útil duas vezes menor e maior produção de calor do que um LED.



Um dos requisitos primários para a implementação do VLC é a possibilidade de enviar dados sem atrapalhar a iluminação ambiente. O padrão do IEEE 802.15.7, define que a taxa de oscilação da luz deve ser superior a 200 Hz, para que não haja dano ou percepção ao olho humano.

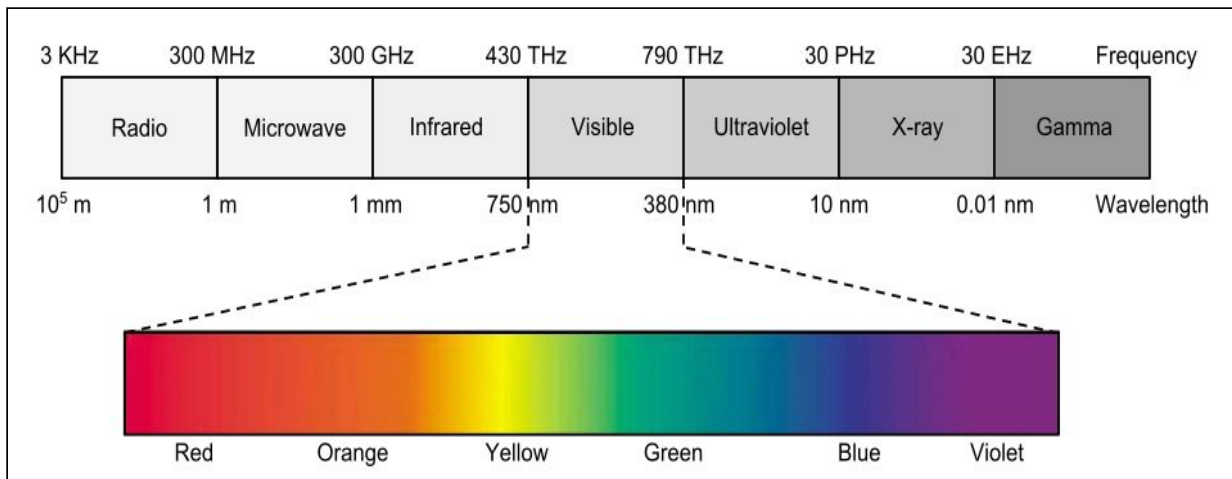
A propriedade do LED de variar níveis de intensidade a uma taxa muito rápida, o torna uma fonte de luz perfeita para a implementação e estudo na transferência de dados. Esta funcionalidade, possibilita o uso dos LEDs para comunicação, onde os dados são codificados e emitindo por meio da luz ao mesmo tempo que mantém uma luminosidade satisfatória e constante do ambiente aos olhos humanos.

A comunicação por luz visível (VLC) transmite dados pela modulação de intensidade de fontes ópticas, como diodos emissores de luz (LEDs) e diodos de laser (LDs), mais rápido do que o olho humano é capaz de perceber (Chen, 2018).

Comparado a outras formas de comunicação wireless, o VLC oferece uma vantagem extra, a luz trabalha em frequências diferente das usadas em comunicação por ondas de rádio. Segundo Khan (2017), com o aumento exponencial do tráfego de dados móveis nas últimas duas décadas, é visível as limitações das comunicações móveis por frequência de rádio, gerando uma grande interferência e prejudicando a comunicação.

O uso cada vez maior da tecnologia wireless (Wi-Fi, controle remotos, redes celulares, etc), acarretou um em uma saturação das radiofrequências de uso livre. O atual espectro está escasso para atender à crescente demanda de tráfego. “O espectro de luz visível possui centenas de terahertz de largura de banda livre de licença e completamente inexplorado para comunicação” (Pathak et al, 2015, p. 1, tradução nossa), como visto na figura 1.

Figura 1: Frequência do espectro de luz visível



Fonte: Pathak et al, 2015

A luz tem uma frequência de onda que a impede de atravessar paredes e a maioria dos objetos sólidos. Com isso é possível criar redes wireless mais seguras, tendo como limitador do sinal a parede de uma sala por exemplo, assim os dados não podem ser interceptados por agentes fora do espaço físico onde a rede está implementada.

O VLC facilita a reutilização da infraestrutura de iluminação já existente, isso significa que tais sistemas podem ser implantados com esforços e custos relativamente menores (Pathak et al, 2015). A iluminação não deve ser afetada por causa do uso da comunicação. Logo, o desempenho do sistema pode ser afetado dependendo de como as luminárias LED são projetadas.

A resolução 802.15.7 do IEEE em 2011, que incluía as especificações da camada de link e design de camada física, define uma taxa de transmissão de até 100 Mbps. Pathak et al. (2015) afirma que nos últimos anos, a capacidade viável de um link VLC, ultrapassou 1 Gbps.

Para a realização deste trabalho, foram utilizados conceitos de VLC. Os elementos de uma rede VLC como transmissores, receptores e modos de comunicação entre eles e detalhes de como funciona a camada física serão abordados nos próximos tópicos.

### 2.2.1. Elementos de uma rede VLC

Os receptores VLC em geral possuem duas tipagens: O fotodetector e o sensor de imagem. Ambos possuem a característica de receber os sinais de luz visível transmitidos e convertê-los para corrente elétrica, que consequentemente é convertida para dados digitais.

Os sensores de imagem, estão embarcados na maioria dos dispositivos móveis da atualidade, tendo assim o potencial de converter os dispositivos móveis em receptores VLC.

O sensor de imagem tem como vantagem permitir que qualquer dispositivo móvel, com câmera, receba comunicação de luz visível. Em contrapartida fornece uma taxa de transferência limitada, devido sua baixa taxa de amostragem. Por outro lado, os fotodetectores possuem um rendimento maior saindo de Kbps para Mbps.

O transmissor em um sistema VLC consiste em uma luminária LED. Formada por uma ou mais lâmpadas LED, driver que efetua o controle de brilho, entre outros componentes( Khan, 2017).

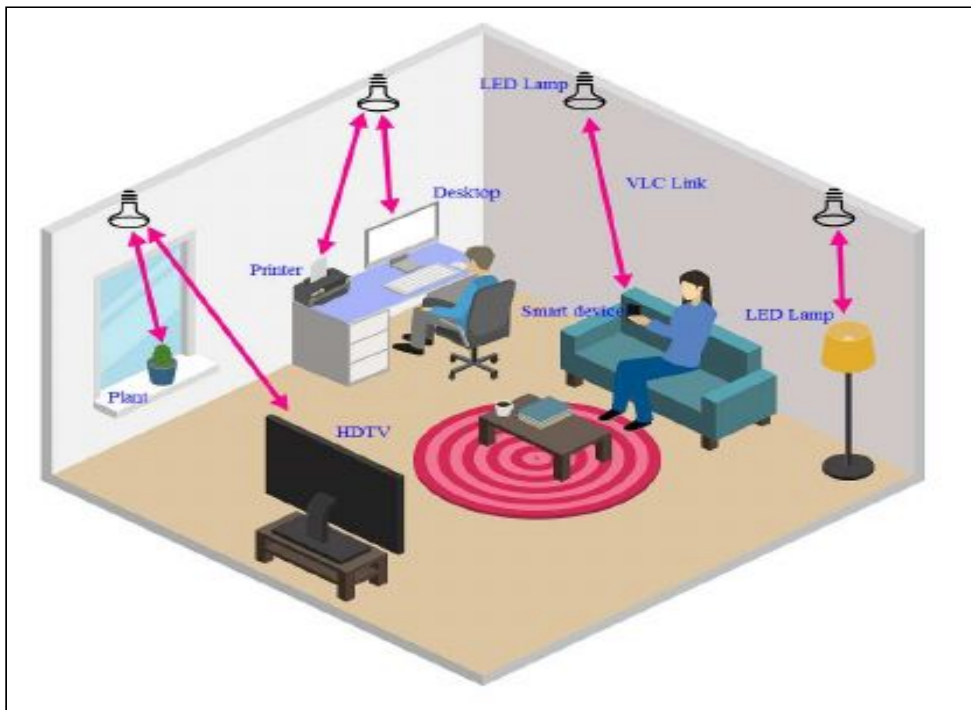
A luz branca é a mais utilizada na maior parte dos ambientes internos e externos. É a mais escolhida pois não altera as cores dos objetos em comparação a luz natural. O branco pode ser produzido de duas formas principais, com LED azul com fósforo amarelo ou com Combinação RGB. De acordo com Khan, 2017, os LEDs tem três formas de construção: A Tetracromática, dicromática e tricromática.

A luminária LED ou lâmpada LED, pode incluir um ou mais LED e um circuito de acionamento. Este controla a corrente que passa pelos LEDs e variação do brilho. Para utilizar a luminara para a comunicação, o circuito passa por alterações para modular os dados através da luz emitida.

Por fim, as formas de comunicação de uma rede VLC podem ser classificadas em dois tipos: *i*) comunicação de infraestrutura para dispositivo e; *ii*) dispositivo para dispositivo.

A figura 2 ilustra o funcionamento da comunicação de infraestrutura para dispositivo. As luminárias podem transmitir dados para vários dispositivos dentro de um quarto e também coordenam-se para reduzir a interferência. Isso permite a transmissão multiponto coordenada para os receptores.

Figura 2: Ambiente com rede VLC



Fonte: Aldalbahi et al, 2017

Por outro lado, a comunicação de dispositivo para dispositivo pode ser exemplificada com o exemplo de Pathak et al. (2015), onde uma tela de um smartphone pode ser usada para transmitir dados ao sensor da câmera de outro smartphone.

### 2.2.2. Camada física

A camada física pode ser analisada de uma forma abrangente na seguinte divisão: *i)* Modelo de canal e características de propagação e; *ii)* métodos de modulação para VLC.

- Modelo de canal e características de propagação:

Para este é necessário compreender os parâmetros fotométricos e radiométricos relevantes. Os parâmetros fotométricos seriam o brilho, a cor e tudo

que o olho humano pode perceber, os parâmetros radiométricos medem as características da energia eletromagnética radiante da luz. Com base nestas características é possível calcular o fluxo luminoso, ou seja, a potência transmitida de um LED.

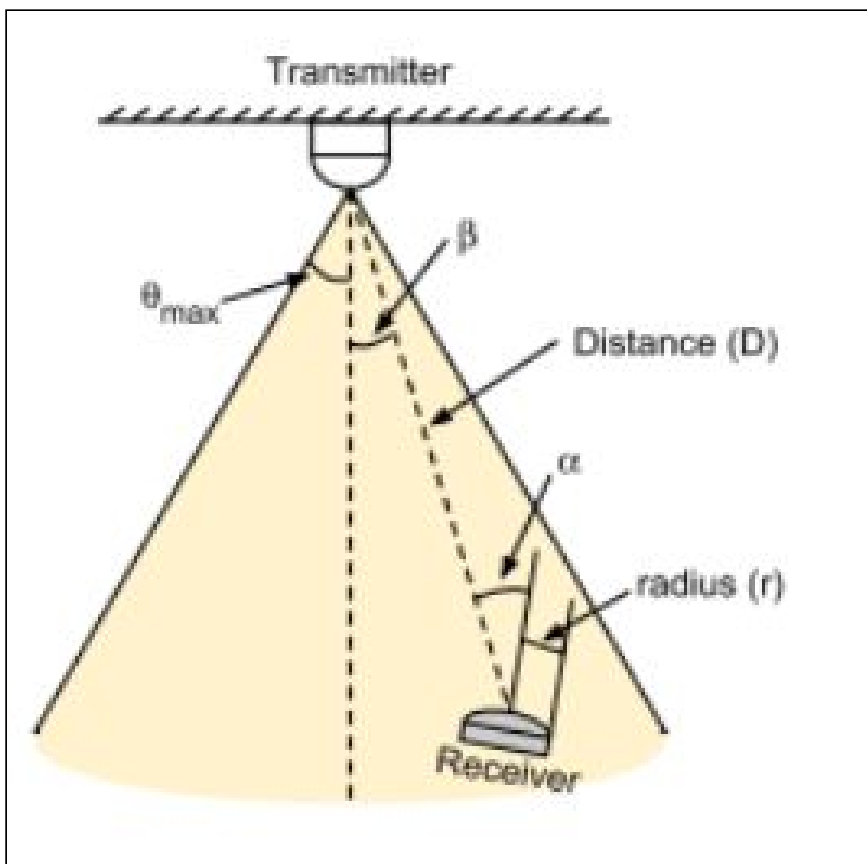
O fluxo luminoso combina a função de luminosidade e a distribuição de energia espectral para calcular a potência “percebida” emitida pelo LED. Para a melhor eficiência luminosa, é definido um valor constante em lúmens / watt. Assim, Pathak et al, 2015 afirma que a razão do fluxo luminoso com o fluxo radiante mede a radiação da energia eletromagnética e a eletricidade necessária de um LED que foi necessária para gerar luz visível.

As características relevantes do comportamento do LED para comunicação são chamadas de parâmetros radiométricos. Estas medem as características de irradiação eletromagnética, ou seja, o comportamento da energia proveniente da luz de acordo com o meio em que ela se propaga. (Pathak et al, 2015)

Vauvoulas et al (2015) calcula a potência transmitida utilizando a "perda no caminho" (*Path-loss*) e a energia recebida de um *link line-of-sight* (LOS). Para o cálculo do *Path-loss*, existem duas formas, a espectral integral ou a espacial integral. Onde a espacial integral permite compreender como o LED espalha a luz emitida no ambiente e a espectral integral determina os espectros de luz visíveis para o olho humano. Ambos podem ser escolhidos dependendo dos parâmetros do LED.

Para os aspectos de comunicação o *Path-loss* considera primeiramente a posição de transmissores e receptores. Assim, tem-se a distância, ângulo de irradiação da luz e ângulo de incidência da luz. Consequentemente distância ( $D$ ) e ângulos de irradiação ( $\beta$ ) e incidência ( $\alpha$ ) são fatores determinantes para a potência recebida dentro de uma rede VLC, uma vez que estes independem do LED e receptor usado e podem variar de acordo com a movimentação, ilustrado pela figura 3.

Figura 3: Posição relativa de transmissor e receptor, LOS.



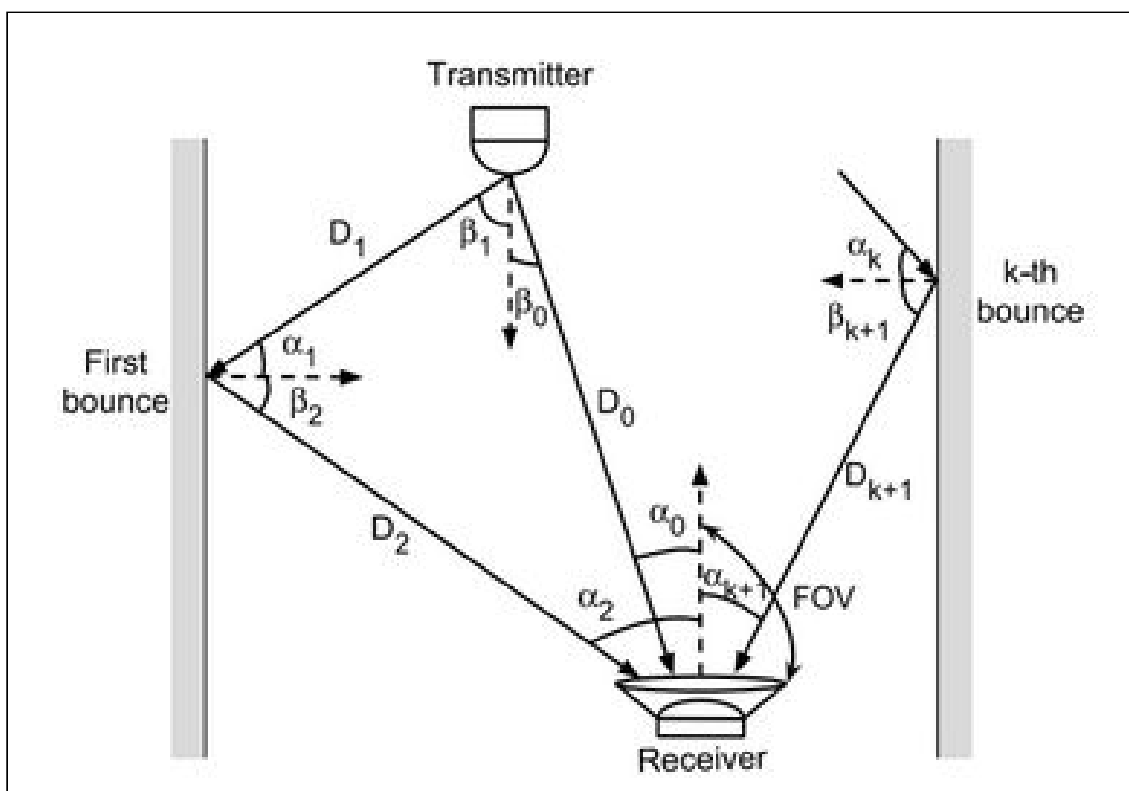
Fonte: Pathak et al, 2015

A Propriedades estáticas de cada LED e fotodetector variam entre modelos e também influenciam diretamente na comunicação, sendo elas: o ângulo de irradiação máxima do LED, que determina o alcance máximo da luz emitida; a área de abertura do fotorreceptor, área pela qual a luz será recebida, quanto maior a área maior a potência; semi ângulo de meia iluminação, ângulo de emissão onde a quantidade de luz emitida cai pela metade; campo de visão do fotorreceptor, ângulo máximo de visão do receptor para o LOS; o modelo de emissão de luz do LED.

Se tratando de luminária, existem cenários com mais de um LED transmitindo um mesmo sinal, neste caso a potência recebida por LOS é determinada pela soma das potências provenientes do LOS que atingem a superfície do receptor (Pathak et al, 2015).

Ambientes *indoor* geralmente possuem superfícies que refletem a luz, os raios de luz refletidos ao atingir receptores criam mais LOS geralmente com *delay* e tem impacto na comunicação, propagação por vários caminhos com reflexão (Vauvoulas et al, 2015). A existência e quantidade de interferência por meio da multi propagação depende do índice de reflexão e do número de saltos que um raio de luz da antes de atingir o fotorreceptor, a cada novo salto o *Path-loss* é calculado e a potência do raio de luz diminui. este comportamento é melhor demonstrado pela figura 4.

Figura 4: Reflexão do raio de luz até o receptor



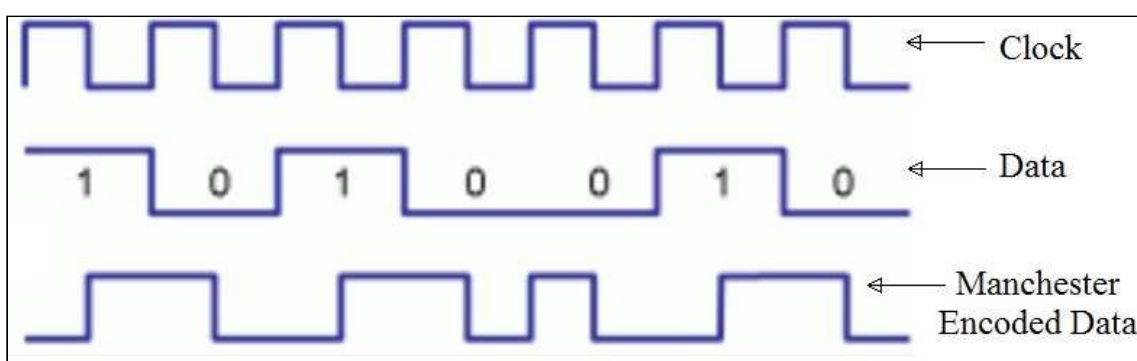
Fonte: Pathak et al, 2015

- Métodos de modulação:

A definição 802.15.7 do IEEE, define que a modulação do canal deve ser feita por meio do controle de brilho da luz, de maneira que a iluminação não seja comprometida. São estipulados três tipos de modulação para redes VLC: *On-Off Keying* (OOK), *Variable Pulse Position Modulation* (VPPM) e *Color-Shift Keying* (CSK).

No OOK os dados são transmitidos mudando o estado da luz entre ligado e desligado, representando respectivamente os bit 1 e 0. Entretanto, para reduzir o impacto da mudança de brilho decorrente da transmissão na iluminação, o LED ao invés de ser desligado, tem seu brilho reduzido. Segundo o padrão IEEE 802.15.7, OOK é comumente usado aliado a *Manchester Code*, que é um *line code* onde os bits (1 e 0) são codificados de forma que sua representação é feita por uma mudança que vai de uma valor mais alto para um mais baixo ou vice e versa, durante um mesmo período.

Figura 5: On-Off Keying

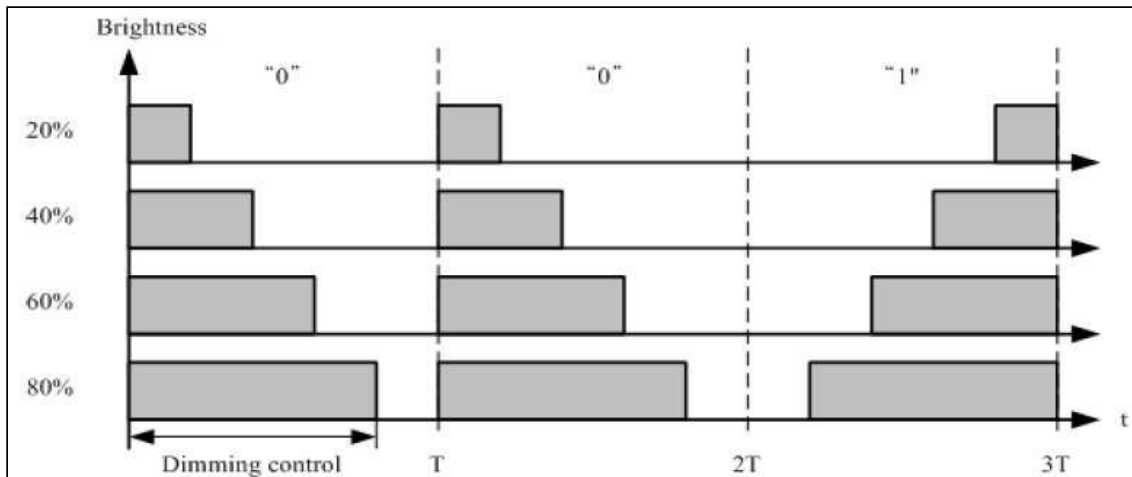


Fonte: OOK, acesso em: 10 de ago. 2018

VPPM, usa característica de *pulse position modulation* e *pulse width-modulation* (IEEE 802.15.7, 2011). Os bits são codificados por pulsos dentro de um determinado período, a distinção entre os bits 1 e 0 é feita pela posição dos pulsos no intervalo. O tamanho dos pulsos é o mesmo independente do bit e o brilho médio em ambos é constante, o que contribui para não percepção da mudança perante o olho humano.



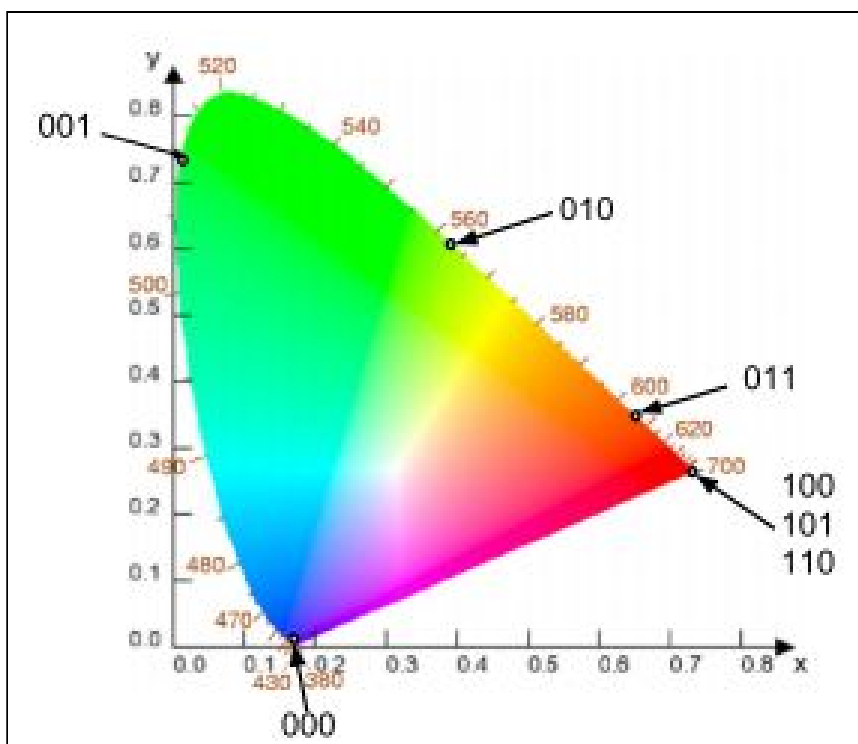
Figura 6: Variable Pulse Position Modulation



Fonte: OOK, acesso em: 10 de ago. 2018

O CSK é uma modulação mais complexa, esta consiste no uso das cores para transmissão da informação. O LED muda sua coloração e a informação é identificada pela coordenada da cor (IEEE 802.15.7), figura 8. Uma das maiores vantagens do CSK é manutenção da potência média constante da luz irradiada.

Figura 7: Color-Shift keying



Fonte: OOK, acesso em: 10 de ago. 2018

### 2.3. Simulação

“A simulação é o processo de projetar um modelo lógico ou matemático de um sistema real e conduzir experimentos em computador com o modelo para descrever, explicar e prever o comportamento do sistema real” (Hoover, 1990, p. 127-160).

A simulação computacional é um meio altamente consolidado e utilizado para prever e estudar o comportamento de redes de comunicação nos mais variados ambientes. Em muitos casos, é uma opção viável para o planejamento, levando em consideração que outros métodos de avaliação podem ser mais caros por haver um custo de implementação física.

Existem vários tipos de simulação. O modelo de simulação contínua possui variáveis que assumem valores específicos, enquanto alterações ocorrem de forma contínua com o tempo variável.

Em contrapartida, os modelos discretos tratam o tempo contínuo. Logo as mudanças no sistema não ocorrem continuamente a uma determinada taxa, mas em tempos de eventos particulares e discretos.

Os modelos probabilísticos ou determinísticos, possuem variáveis aleatórias definidas por funções de probabilidade apropriadas. Todos os sistemas envolvendo seres humanos e muitos sistemas envolvendo apenas máquinas necessitam de variáveis aleatórias.

Para este trabalho foi criado com o intuito de planejar redes VLC, facilitando assim o estudo e implantação.

### 2.4. Python

Segundo Borges, (2014) “*Python* é uma linguagem de alto nível e orientado a objeto. de tipagem dinâmica e forte, interpretada e interativa”. O uso de classes e o conceito de programação orientada a objetos, além de facilitar no desenvolvimento

por aproximar a estrutura do código do mundo real, também facilita na manutenção e adição de funcionalidades futuramente.

Hoje a comunidade mantém a linguagem com a criação de bibliotecas que aumentam o escopo de funcionalidades. Python se destaca pela facilidade de uso e as várias aplicações. Para este projeto foram utilizadas os seguintes módulos:

- matplotlib: biblioteca para a geração de gráficos.
- numpy: biblioteca para computação científica, que pode ser usado como *container* de dados para estruturas multidimensionais..
- seaborn: módulo de visualização de dados baseado no matplotlib
- pandas: módulo para estruturar e analisar dados.
- pylab: módulo para a geração de gráficos bidimensionais.

## **2.5. Considerações finais**

O capítulo demonstrou os principais elementos que foram necessários para o desenvolvimento do simulador LuNiPy, detalhando o VLC e seus componentes, a modelagem do canal, a simulação em geral e a linguagem utilizada para o desenvolvimento do simulador.

### 3. TRABALHO CORRELATOS

#### 3.1. Considerações iniciais

Nesta seção, serão mostrados alguns estudos relacionados a VLC e simulação que abordam o comportamento e características de uma rede VLC em ambientes indoor.

#### 3.2. Trabalhos correlatos

Aldalbahi et al, 2017, apresenta a criação de um módulo para o simulador de rede ns3 que simula uma rede VLC, usando de funções já estabelecidas no ns3, herdando o comportamento das mesmas e adequando-as ao modelo de comunicação por luz visível, o trabalho tem por objetivo permitir a estimativa de métricas de avaliação da rede, considerando a comunicação por *line of sight*, através de modelos para cálculos e modulação do canal, sendo implementados os cálculos para potência, SNR, BER, SER, PER, distribuição de luminância e as modulações OOK, MPAM, VPPM, MQAM, MPSK que permitem calcular as taxas de erro. Também é possível a criação de cenários com transmissores e receptores, os quais podem ser monitorados, O produto deste trabalho foi desenvolvido seguindo o paradigma de orientação a objetos e teve suas classes derivadas das classes do próprio ns3.

Aldalbahi et al, 2017, assim como o trabalho anterior, este consiste na criação de um módulo de simulação de uma rede VLC para o ns3, usando as bibliotecas principais do último, são implementadas quatro classes *VLC Helpers*, *VLC channel*, *VLC Error Models* e *VLC Mobility*. *VLC channel* representa as características de canal da rede e contém atraso, perda de propagação e a transmissão de pacotes através do canal, *VLC Models* possui os modelos de erros de acordo com a modulação e *VLC Mobility* herda as propriedades de mobilidade do ns3 e adapta para os parâmetros de uma rede VLC. Tendo como saída métricas de taxa de erro, SNR e *GoodPut*.

Dehghani Soltani et al (2015), propõe o estudo de uma rede VLC usando modulação OFDMA, em que se trabalha a alocação de recursos usando uma abordagem da camada física, é considerado o sinal recebido via *line of sight* e por reflexão, levando-se em conta apenas as reflexões de primeira ordem. É estipulado um modelo de canal com múltiplos Aps que reusam a mesma largura de banda, a partir daí é feita a delegação de subportadoras aos usuário utilizando dois algoritmos de performance, QoS e *fairness*. Por fim o trabalho usa de simulações Monte Carlo para validar a performance dos métodos propostos.

Em Rahaim (2013), temos a investigação do impacto na cobertura e SINR DE UMA rede VLC em decorrência dos parâmetros usados, tal como propõe um método para controle do tamanho da célula de iluminação, esta proposta consiste no controle da célula a partir da potência de saída do LED e mudança física no padrão de irradiação. É apresentado como resultado, gráficos da cobertura atingida e distribuição do SINR dentro do ambiente estipulado, em razão da quantidade de células presentes e a variação de seus tamanhos.

Vauvoulas et al (2015), aborda a cobertura de uma rede vlc e a probabilidade de erro de comunicação baseado na estrutura física de um cenário e na modulação da rede, assumindo os padrões *on-off keying*, *variable on-off keying* e *multi pulse position modulation*. É considerado um ambiente indoor livre da presença de objetos e a comunicação por *line of site*, onde o LEDs são posicionados uniformemente, também é descartado os efeitos reflexão da luz. Tem-se como resultados a probabilidade de erro e a potência transmitida em razão do número de nós, assim como o número de leds para a cobertura de uma determinada área.

Tabela 1: Análise trabalho correlatos

Aldalbahi et al, 2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deriva do simulador de rede ns3.</li> <li>• Avalia apenas a relação sinal ruído, a interferência dos outros nós na rede é desconsiderada.</li> </ul>
Aldalbahi et al, 2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende do simulador de rede ns3 para funcionar.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não considera a interferência dos outros nós na rede</li> </ul>
Dehghani Soltani et al (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expõe apenas resultados de throughput.</li> <li>• Não mostra as estimativas de SINR, potência e capacidade do canal.</li> <li>• A simulação não é executada pelo algoritmo proposto e sim por terceiros.</li> </ul>
Rahaim (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para gerar os valores de SINR, usa uma constante para ruído térmico no lugar de calculá-la de acordo com as propriedades do fotorreceptor.</li> <li>• Embora a potência seja calculada tais dados não são mostrados.</li> </ul>
Vauvoulas et al (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não tem informações sobre interferência e ruído na rede.</li> <li>• Calcula o alcance da rede e probabilidade de falha, baseado apenas na potência recebida, descarta a qualidade do sinal pelo SINR.</li> </ul>

Fonte: Própria dos autores

### 3.3. Considerações finais

De acordo com as referências supracitadas, este trabalho mostra ser hábil a simular um canal VLC com suas principais propriedades e o comportamento deste canal baseado no cenário criado. Além disso o simulador propõe uma arquitetura orientada a objetos que permite fácil manutenção e reutilização do código.

## **4. MODELAGEM DO SISTEMA**

### **4.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo são abordados todos os aspectos, modelos (artefatos) e características do simulador VLC proposto neste trabalho de conclusão de curso. Especificamente, são descritos todos os modelos do simulador a partir dos diagramas de fluxo e de classe, ambos notações da UML, com as definições de entrada e saída de dados, as fórmulas matemáticas utilizadas para a realização dos cálculos de acordo com as normas do IEEE 802.15.7 e os detalhes de parametrização e elementos do simulador.

### **4.2. Descrição do simulador**

O simulador de rede proposto neste trabalho, foi projetado para possibilitar o planejamento de uma infraestrutura de comunicação, a partir das características de propagação da luz visível utilizada pela tecnologia VLC, com o uso de receptores em um ambiente *indoor*, considerando todos os parâmetros necessários para se ter um nível de largura de banda mínima para utilização de aplicações básicas da internet.

Todos as etapas acima são detalhadas e ilustradas no decorrer deste capítulo.

### **4.3. Diagramas**

O simulador é dividido nos seguintes módulos, sendo:

- **Parametrização:** Consiste na configuração dos parâmetros utilizados para a simulação. Pode ser alterado todos os valores desde potência dos leds, quantidade de Aps e receptores, distância entre dispositivos, potência emitida, ângulo máximo de emissão dos LEDs, quantidade de ciclos de funcionamento, dimensões do cenário, área e responsividade do receptor

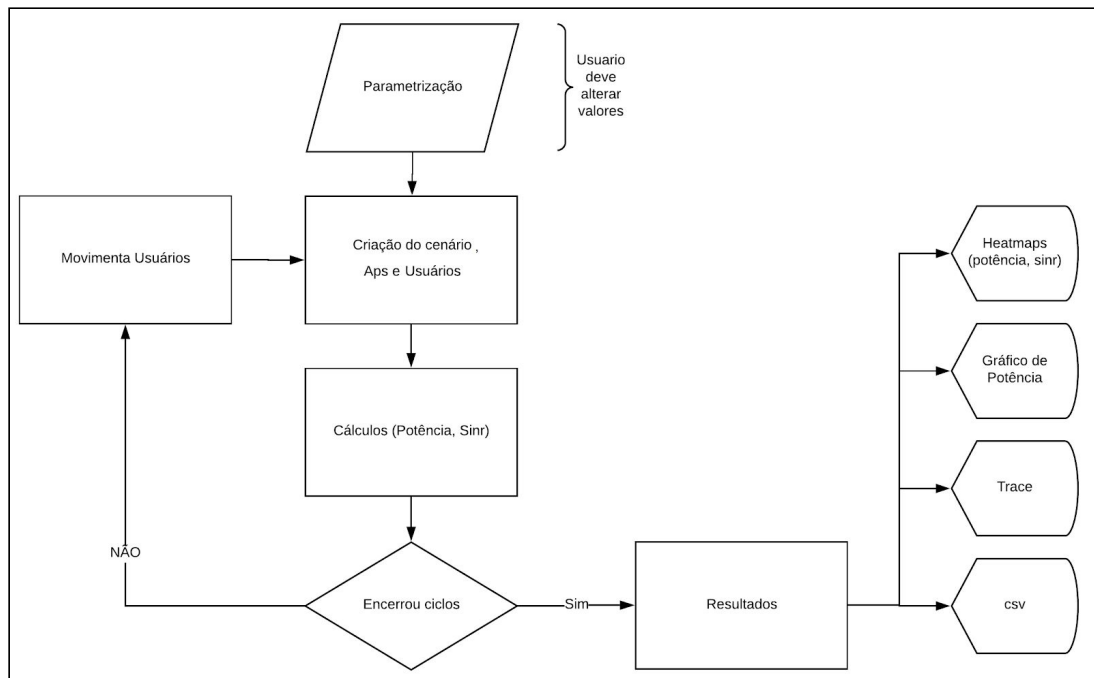
ate índice de refração da luz no meio, etc. Todos os parâmetros a serem alterados estão disponíveis nas tabelas 1 e 2 do apêndice;

- Criação de cenário: A partir do tamanho do cenário parametrizado pelo usuário, os Aps são distribuídos de acordo com a posição inicial, conforme a distância já definida entre eles. Os receptores são posicionados aleatoriamente dentro das limitações espaciais (largura e comprimento). Sendo possível obter a cobertura dos Aps e gerar um cenário com todas as informações necessárias para os cálculos.
- Cálculos: Utilizando as posições dos APs e receptores, é possível calcular a distância entre eles. Sendo assim, é determinado a potência recebida, AP ao qual o receptor está conectado, o ruído e interferência presente na comunicação (SINR) .
- Movimentação: A movimentação dos receptores gira em torno de um número de iterações determinado pelo usuário. As distâncias variam de zero até um valor estipulado na parametrização, em qualquer direção dentro do cenário. Com as posições atualizadas, o simulador volta ao passo anterior. Repetindo-se até que o número de iterações chegue ao fim.
- Resultados: Reúne valores referentes à simulação, como potência, distância entre APs, receptor e SINR. Após o término da simulação, os dados são gerados e armazenados na pasta do simulador. São gerados os seguintes resultados: gráficos que relacionam potência e distância; mapas de calor demonstrando o comportamento da potência e SINR; trace com o histórico dos receptores no decorrer da simulação; imagens que representam graficamente o movimento dos receptores a cada ciclo.

A Figura 3 abaixo ilustra o diagrama de fluxo do simulador LuNiPy.



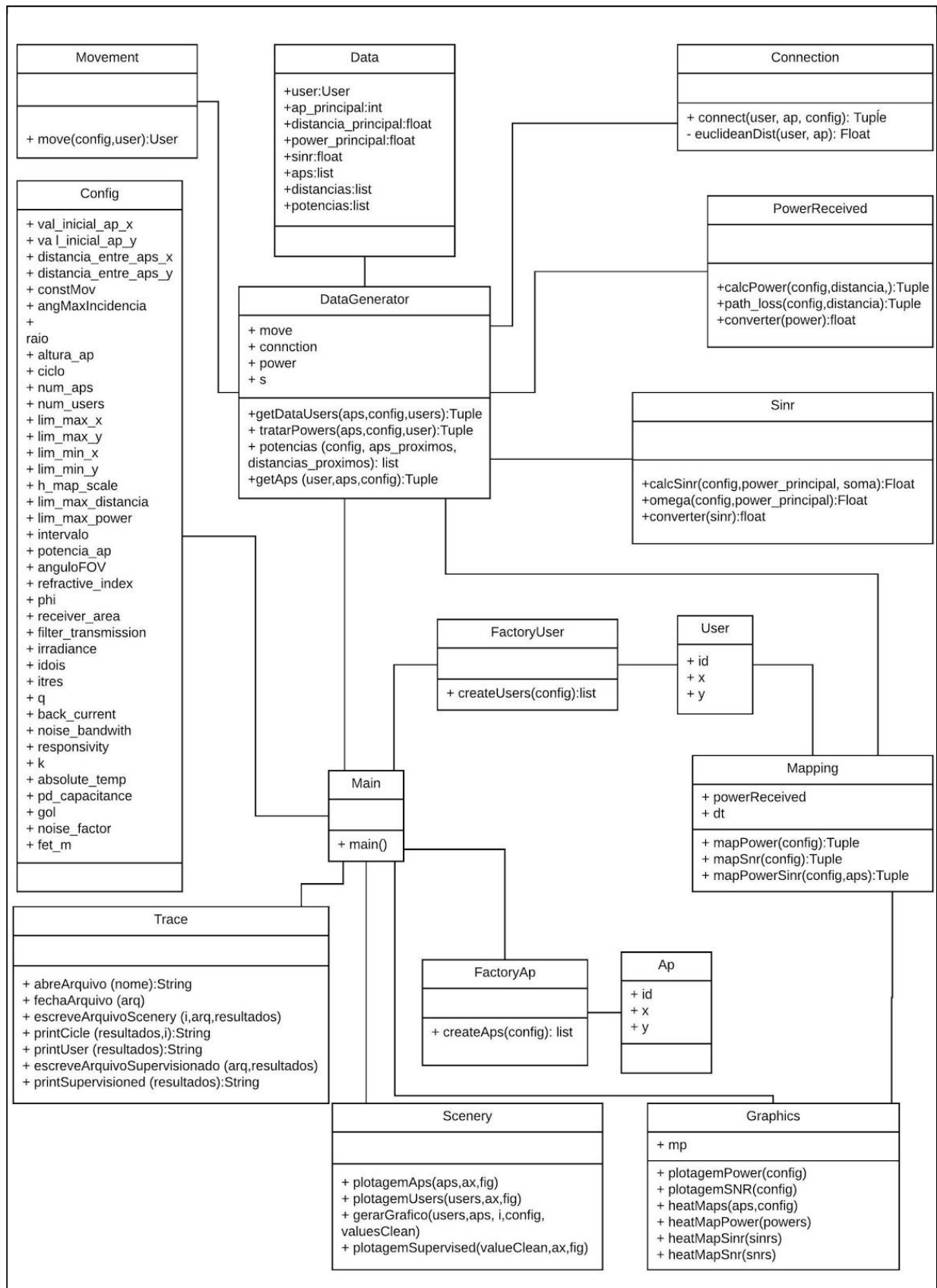
Figura 8: Diagrama de fluxo



Fonte: Própria dos autores

Com relação ao processo de desenvolvimento, para a implementação do simulador foi adotado o paradigma orientado à objetos, pela suas características de fácil organização de código, manutenção e documentação. A figura 4 ilustra o diagrama de classes do simulador, sendo este uma representação estática da estrutura do simulador.

Figura 9: Diagrama de classe



Fonte: Própria dos autores

Com relação ao diagrama de classe (Figura 4), a classe *Config* possui os atributos de parametrização do cenário e do canal. Devem ser alteradas de acordo com as necessidades do usuário, para a simulação a ser executada. Os atributos contidos na classe *Config* são detalhados na Tabela 1 do apêndice.

As classes *FactoryAp* e *FactoryUser* são responsáveis por criar os Aps e os usuários da simulação. Enquanto a classe *Movement* muda a posição dos usuários aleatoriamente dentro do cenário de acordo com os limites definidos pelo usuário na classe *Config*.

*Connection* é a classe responsável por calcular a distância entre Aps e receptor. A classe *PowerRecived* por sua vez, utiliza a distância para o cálculo do *path loss* determinando a potência recebida.

*DataGenarator* utiliza as classes *PowerRecived* e *Connection* para conectar usuários ao Ap de maior potência. Repassa a potência recebida pelo receptor do ap conectado e as potências dos aps adjacentes à classe *Sinr*. Está se utiliza dos valores repassados para efetuar os cálculos de *SINR*. Após esse processo, a classe *DataGenerator*, encapsula os dados de potência principal, distância em relação ao Ap conectado e SINR processados em um objeto da classe *Data*.

A classe *Mapping* percorre o cenário de acordo com uma escala estabelecida na classe *Config*, mapeia o comportamento da potência e SINR. Arquivos de extensão csv são gerados e utilizados na criação dos mapas de calor.

A classe *Trace* recebe os dados encapsulados da classe *DataGenerator*. Organiza de forma concisa em um documento de texto nomeado como *trace.txt*. Os mapas de calor e gráficos com o comportamento da potência e SINR são gerados pela classe *Graphics* e os cenários pela classe *Scenary*.

#### 4.4. Entrada de dados

Para configurar a simulação, o usuário deve primeiramente alterar os dados do cenário e do canal antes de iniciar as simulações. Existe um *script* (Classe)

destinado a essas alterações nomeado “Config.py”. Todos dos valores mutáveis do simulador estão contidos neste *script*.

É possível alterar a potência do LED, o tamanho da área de detecção do receptor, o tamanho do cenário que será gerado, dentre outros como pode ser analisado nas tabelas 1 e 2 no apêndice, onde a tabela 1 consiste nas variáveis referentes ao cenário, enquanto a tabela 2 detém as configurações do canal e parâmetros dos LEDs e fotorreceptores.

#### 4.5. Cálculos

Os cálculos utilizados pelo simulador tem como objetivo estabelecer a potência recebida e o SINR. É possível adequar o modelo de canal usado nas comunicação por infravermelho para o VLC. Foi proposto dentro do modelo adotado por Vauvoulas, a comunicação por LOS. Variações do meio, ou seja, reflexão da luz pelas paredes, teto, piso e sombreamento humano foram desconsideradas, para a modulação do canal.

Ainda em Vauvoulas et al (2015), é estabelecido que a potência recebida corresponde ao produto entre potência emitida  $P$  e a perda por caminho  $H$  como definido na Equação (1).

$$P_r = HP. \quad (1)$$

O  $H$  representa a perda do sinal no meio, que varia de acordo com o posicionamento do receptor e características de emissão do LED, calculado pela Equação (2).

$$H = \frac{(m+1)A_r}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi). \quad (2)$$

Onde  $A_r$  é a área de abertura do receptor,  $d$  a distância entre o Ap e o usuário, multiplicado pelo cosseno do ângulo de irradiação elevado a ordem de emissão lambertiana  $\cos^m(\varphi)$ .  $T_s$  é o filtro de transmissão como descritos na tabela 2 do apêndice.

“A maioria dos LED tem o raio de emissão como fonte Lambertiana”, Pathak et al. (2015, p.3). Os elementos  $m$  e  $g(\psi)$  são respectivamente ordem de emissão lambertiana do LED e *concentrator gain* calculados pelas Equações (3) e (4).

$$m = - \frac{\ln(2)}{\ln[\cos(\varphi_{1/2})]} , \quad (3)$$

$$g(\psi) = \frac{n^2}{\sin^2(\psi_{con})} . \quad (4)$$

Sendo,  $\cos(\varphi_{1/2})$  semi-ângulo a meia luminância,  $n$  índice de refração e  $\psi_{con}$  o campo de visão do fotorreceptor, com isso encontra-se o *path loss* para obter a potência recebida.

“SINR é a métrica relativa de interesse ao considerar uso de recursos em APs próximos...” (Rahaim, 2013, p. 22), o cálculo do SINR é denotado na Equação (5). Onde  $R$  representa a responsividade do fotorreceptor,  $\sigma_{Total}$  o ruído de fundo,  $P_{r,x}$  a potência recebida do Ap conectado e  $\Sigma P_{r,i}$  o somatório das potências de interferência recebida.

$$SINR = \frac{(RP_{r,x})^2}{(R\Sigma P_{r,i})^2 (\sigma_{Total})^2} , \quad (5)$$

$$(\sigma_{Total})^2 = (\sigma_{Shot})^2 + (\sigma_{Termal})^2 , \quad (6)$$

$\sigma_{Shot}$  e  $\sigma_{Termal}$  são respectivamente o desvio padrão *shot noise* e *thermal noise*, calculados em Pathak et al. (2015) pelas Equações (7) e (8):

$$(\sigma_{Shot})^2 = 2qP_rB + 2qI_{bg}i_2B , \quad (7)$$

$$(\sigma_{Termal})^2 = \frac{8\pi kT_k}{G} C_{pd} A_r i_2 B^2 + \frac{16\pi^2 kT_k \eta}{gm} C_{pd}^2 A_r^2 i_3 B^3 . \quad (8)$$

Ao explorar as equações (7) e (8) temos que,  $q$  é a constante carga elétrica,  $B$  a largura de banda do ruído,  $I_{bg}$  a corrente de fundo,  $i_2$  e  $i_3$  os fatores constantes de largura de banda de ruído,  $k$  a constante de Boltzmann,  $T_k$  a temperatura absoluta do receptor,  $C_{pd}$  capacitância do receptor por unidade de área,  $G$  ganho de tensão de malha aberta,  $gm$  transcondutância FET e  $\eta$  o fator de ruído.

Por fim é calculado a taxa máxima de transmissão de informação dentro do canal, para cada receptor, a partir do teorema de Shannon–Hartley. O teorema de Shannon–Hartley estabelece a capacidade máxima de transmissão de informação livre de erros, para um intervalo de tempo (JACOBS et al, 1965).

Os cálculos descritos foram implementados no simulador e permitem a análise de comportamento de um canal VLC, para o planejamento e estudo de uma rede de acordo com as necessidades do usuário.

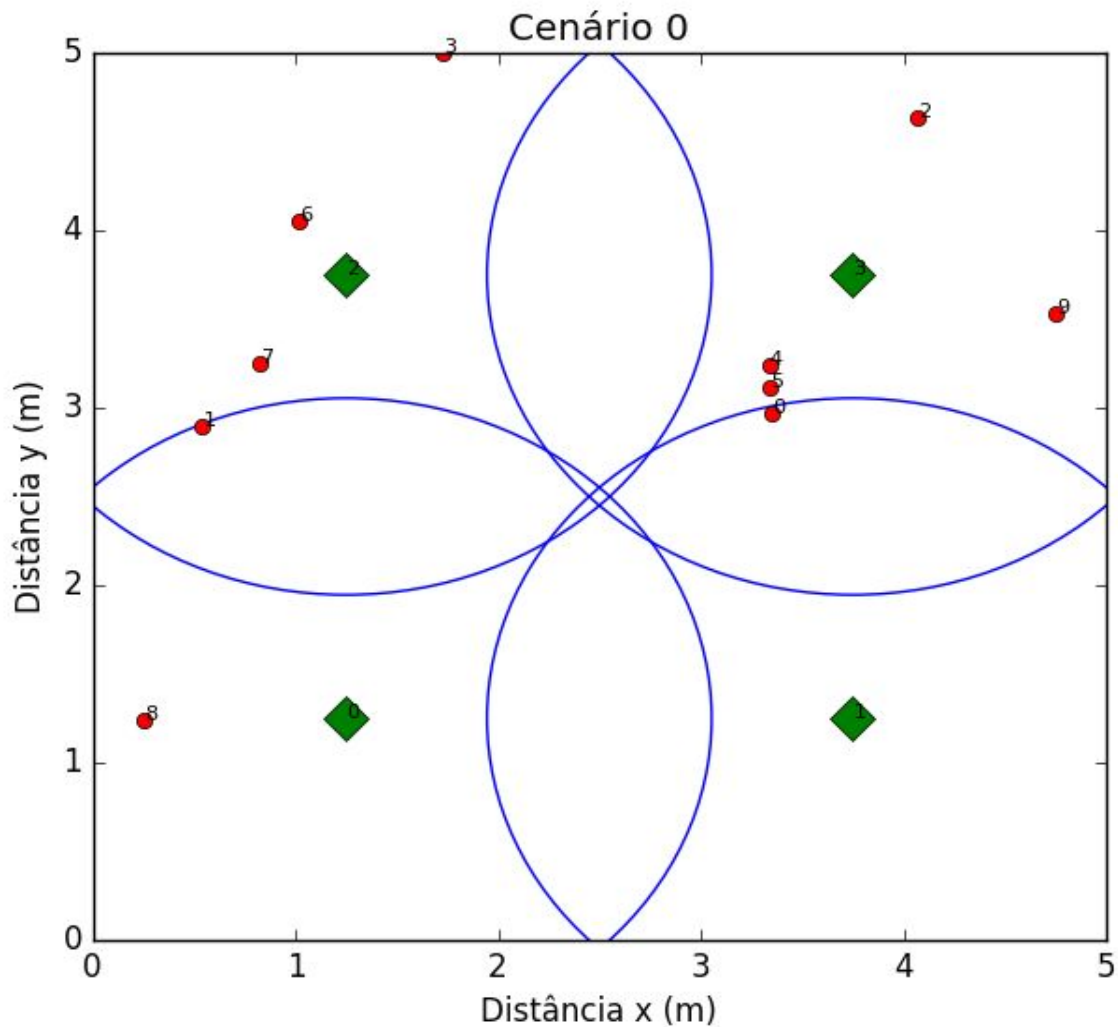
#### **4.6. Saída de dados**

Os resultados da simulação são apresentados da seguinte forma: *trace*, mapas de calor de potência e SINR, ilustração do cenário e gráficos potência.

O cenário ilustrado pela figura 10, retrata as dimensões de largura e comprimento pelos eixos x e y em metros (m). Os Aps são destacados em verde no formato de diamante com seus respectivos raios de incidência da luz na cor azul. Os pontos vermelhos caracterizam os receptores, acompanhados de seus *Ids* em preto.

O cenário é atualizado a cada ciclo, a identificação deste fica exposta pelo número ao lado da palavra “Cenário” no título de cada imagem. A contagem de ciclos sempre inicia pelo número 0.

Figura 10: Exemplo de cenário

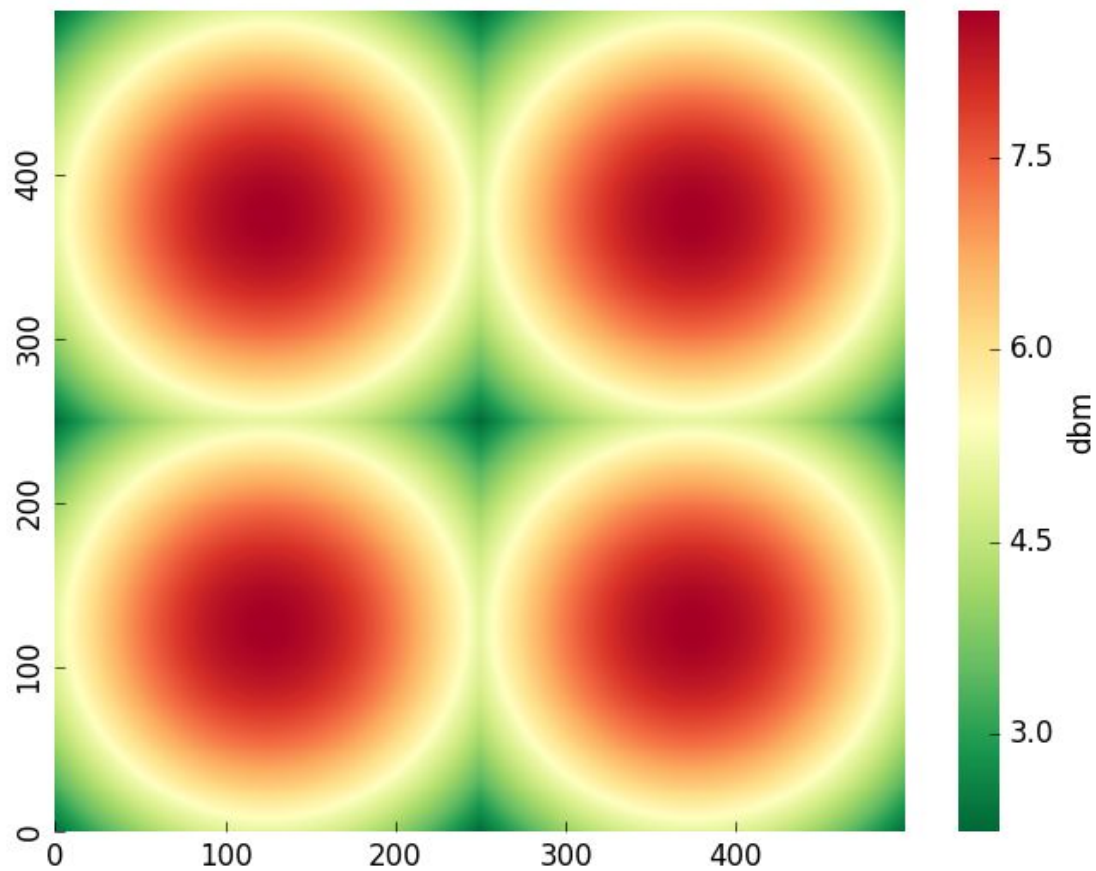


Fonte: Própria dos autores

O mapa de calor é uma forma visual de analisar a variação de potência no decorrer do cenário. A figura 11 ilustra um exemplo de mapa de calor de potência gerado pelo simulador correspondente ao cenário citado a cima. A legenda ao lado do mapa descreve a relação entre cores e valores de potência, em que as áreas vermelhas indicam os lugares onde o sinal é mais forte. Dando uma visão mais clara e de fácil entendimento ao usuário.

É importante ressaltar que os dados provenientes do mapeamento e usados para criação dos mapas de calor, também são salvos em arquivos (.csv), caso seja necessário o acesso aos valores nominais, para manipulação pelo usuário.

Figura 11: Exemplo de mapa de calor de potência



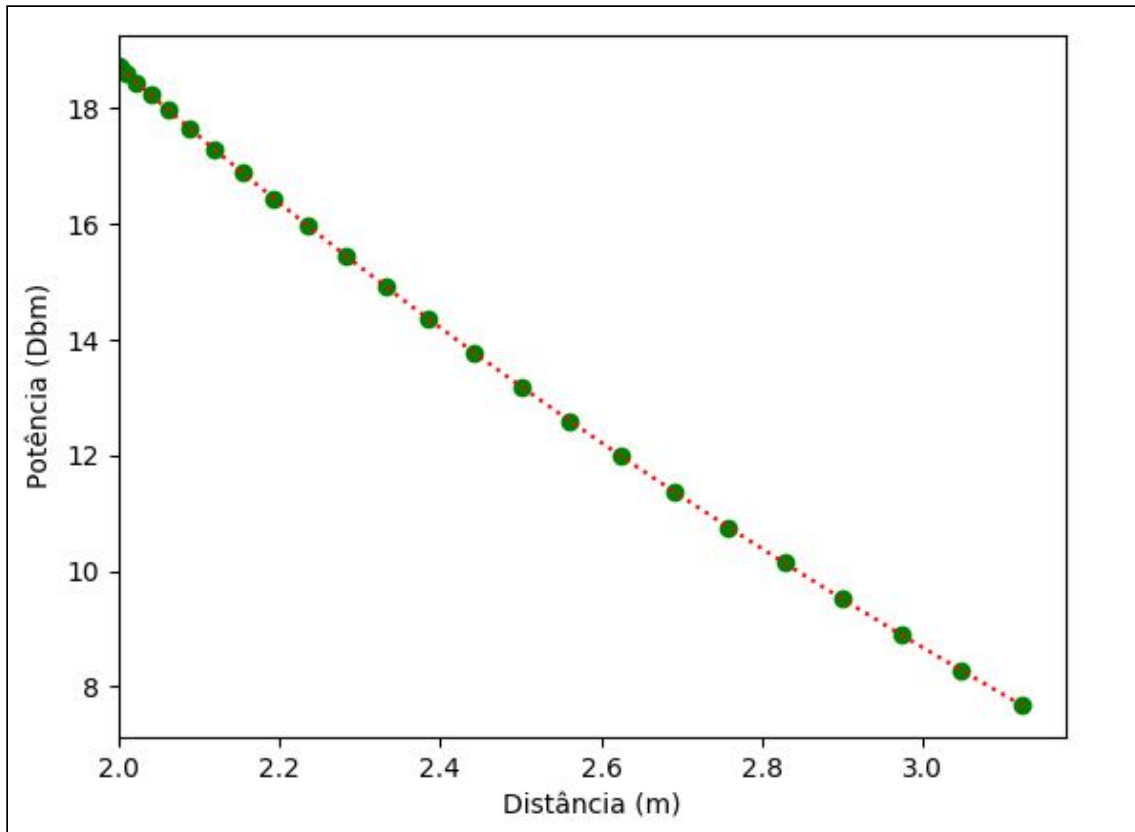
Fonte: Própria dos autores

Dentro da mesma simulação, é extraído um gráfico com a variação de potência recebida em função da distância, figura 12.

O eixo x inicia sempre na menor distância possível entre Ap e receptor, o receptor então é afastado até atingir o limite de alcance do Ap. A movimentação ocorre de forma uniforme, com os intervalos de movimentação definidos pelo usuário (classe *Config*).



Figura 12: Exemplo de gráfico de potência pela distância



Fonte: Própria dos autores

A figura 13 ilustra o trace gerado pelo simulador. Um arquivo de texto (.txt) com o histórico dos usuários dentro da simulação, agrupados por ciclos. O documento é estruturado da seguinte forma:

- Ciclo: o ciclo ao qual o trecho se refere;
- Usuário: Id do usuário, o mesmo mostrado nas imagens do cenário;
- Ap conectado: o id do ap ao qual o usuário está conectado, o mesmo mostrado nas imagens do cenário;
- Distância: entre usuário e Ap conectado, em metros;
- Potência: potência do sinal recebido do Ap conectado, em dbm;
- SINR: o valor do SINR para aquele usuário, decorrente da potência recebida, ruído e interferência em dbm;
- Capacidade máxima do canal: taxa máxima de transmissão entre Ap e receptor, calculada a partir do teorema de shannon, medida em bits por segundo.

Figura 13: Exemplo dos arquivos de texto

```

Ciclo:» 0
  Receptor:» 0
    Ap conectado:» 2
    Distância:» 2.44
    Potência:» 13.75
    SINR:» 169.12838401273996
    Capacidade máxima do canal:»11236.65

  Receptor:» 1
    Ap conectado:» 1
    Distância:» 2.66
    Potência:» 11.67
    SINR:» 166.02927226929705
    Capacidade máxima do canal:»11030.75

  Receptor:» 2
    Ap conectado:» 4
    Distância:» 2.41
    Potência:» 14.12
    SINR:» 12.914175122379415
    Capacidade máxima do canal:»872.38

  Receptor:» 3
    Ap conectado:» 0
    Distância:» 2.41
    Potência:» 14.14
    SINR:» 169.68544080490986
    Capacidade máxima do canal:»11273.66

  Receptor:» 4
    Ap conectado:» 0
    Distância:» 3.01
    Potência:» 8.60
    SINR:» -3.548597625042925
    Capacidade máxima do canal:»105.56

```

Fonte: Própria dos autores

#### 4.7. Considerações finais

O objetivo deste capítulo foi apresentar a modelagem e características do simulador desenvolvido, considerando as referências sobre as equações necessárias desenvolvimento da simulação de um canal VLC, Percorrendo todos os passos desde a inserção dos parâmetros, processamento e resultados.

## 5. ESTUDO DE CASO DO SIMULADOR VLC PYTHON E RESULTADOS

### 5.1. Considerações iniciais

Para análise e validação do simulador este capítulo propõem a experimentação a partir da parametrização de um cenário *indoor*, para planejamento de uma rede VLC com ênfase nas características de cobertura e qualidade do sinal.

### 5.2. Estudo de caso

Para a realização/parametrização da simulação foi proposto o cenário de uma sala, com dez metros de largura, sete metros de comprimento e dois metro de altura. Foram posicionados seis Aps, com ângulo de irradiação máximo ajustado para abranger a maior área possível com a menor interferência entre os Aps. Deste modo, os receptores estão na área de cobertura de pelo menos um AP em qualquer ponto do ambiente. Os valores usados para criação deste cenário, foram setados no *script Config.py* e estão descritos na tabela 2.

Tabela 2: Variáveis alteradas para configurar cenário

Descrição	Variável	Valor
Ponto inicial de posicionamento de AP no eixo x.	val_inicial_ap_x	1,7 m
Ponto inicial de posicionamento de AP no eixo y.	val_inicial_ap_y	1,7 m
Distância entre aps no eixo x.	distancia_entre_aps_x	3,3 m
Distância entre aps no eixo y.	distancia_entre_aps_y	3,6 m
Altura do AP em relação ao receptor.	altura_ap	2 m
Tamanho da sala no eixo x.	lim_max_x	10 m
Tamanho da sala no eixo y.	lim_max_y	7 m
Ângulo de irradiação máximo.	ang_irradiation_max	51°

Número de APs.	num_aps	6
----------------	---------	---

Fonte: Própria dos autores

Uma vez estabelecido o cenário é preciso configurar as características dos LEDs e receptores. Como foi esclarecido no capítulo quatro, as propriedades dos componentes usados influenciam diretamente no comportamento da rede qualidade e alcance do sinal. Para tais parâmetros, foi considerado o trabalho de Rahaim (2013), como base, os valores utilizados estão descritos na tabela 3.

Tabela 3: Variáveis alteradas para configurar LEDs e receptores

Descrição	Variável	Valor
Potência do LED.	potencia_ap	5500 mW
Semi-Ângulo a meia luminância.	phi	60°
largura de banda do ruído.	noise_bandwidth	40 MHz
Área de abertura do receptor.	reciver_area	1 mm <sup>2</sup>
Campo de visão do receptor.	anguloFOV	28°
Índice de refração da luz no meio.	refractivi_index	1,5
Responsividade do receptor.	responsivity	0,28
Largura de banda.	bandwidth	200 Hz

Fonte: Própria dos autores

Entretanto Rahaim 2013 assume o thermal noise (ruído térmico) como constante  $10^{-15} A^2$ . Todavia, isto diverge da proposta deste simulador, uma vez que, o ruído térmico varia dependendo das propriedades do receptor utilizado, como mostrado no capítulo quatro.

As variáveis que circundam o comportamento do ruído térmico (*thermal noise*) e ruído de tiro (*shot noise*) foram definidas em função do trabalho de Aldabahi, et al 2016, conforme ilustrado na tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Variáveis alteradas para configurar ruído

Descrição	Variável	Valor
Corrente de fundo.	back_current	$5100^{-6}$ A
Temperatura absoluta do receptor.	absolute_temp	295 K
Capacitância do receptor por unidade de área.	pd_capacitance	112 p/F cm <sup>2</sup>
Ganho de tensão de malha aberta.	gol	10
Fator de ruído.	noise_factor	1,5
Transcondutância FET.	fet_m	30 mS
Constante fator de largura de banda de ruído.	idois	0,562
Constante fator de largura de banda de ruído.	itres	0,0868
Constante de carga elétrica.	q	$1,60219 e^{-19}$ C
Constante de Boltzmann..	k	$1,3806 e^{-23}$ J/K

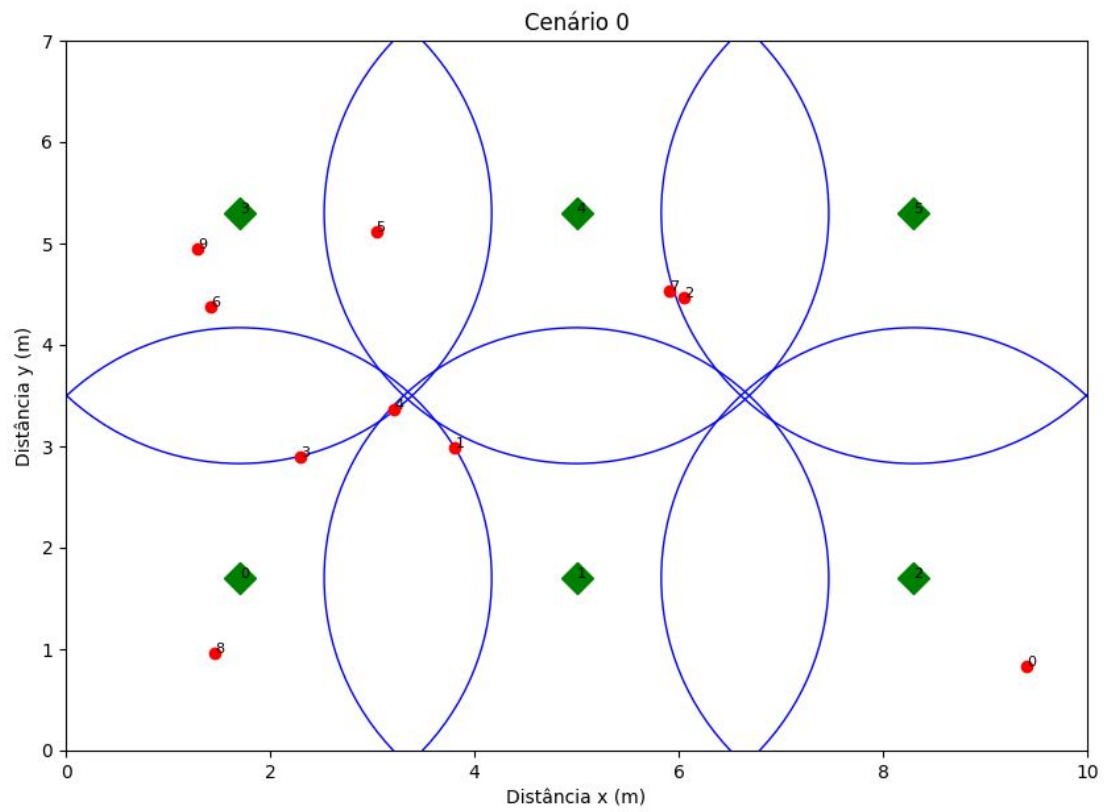
Fonte: Própria dos autores

### 5.3. Resultados da simulação

Foi executada uma simulação de quatro ciclos (iterações) a partir das configurações apresentadas no tópico anterior.

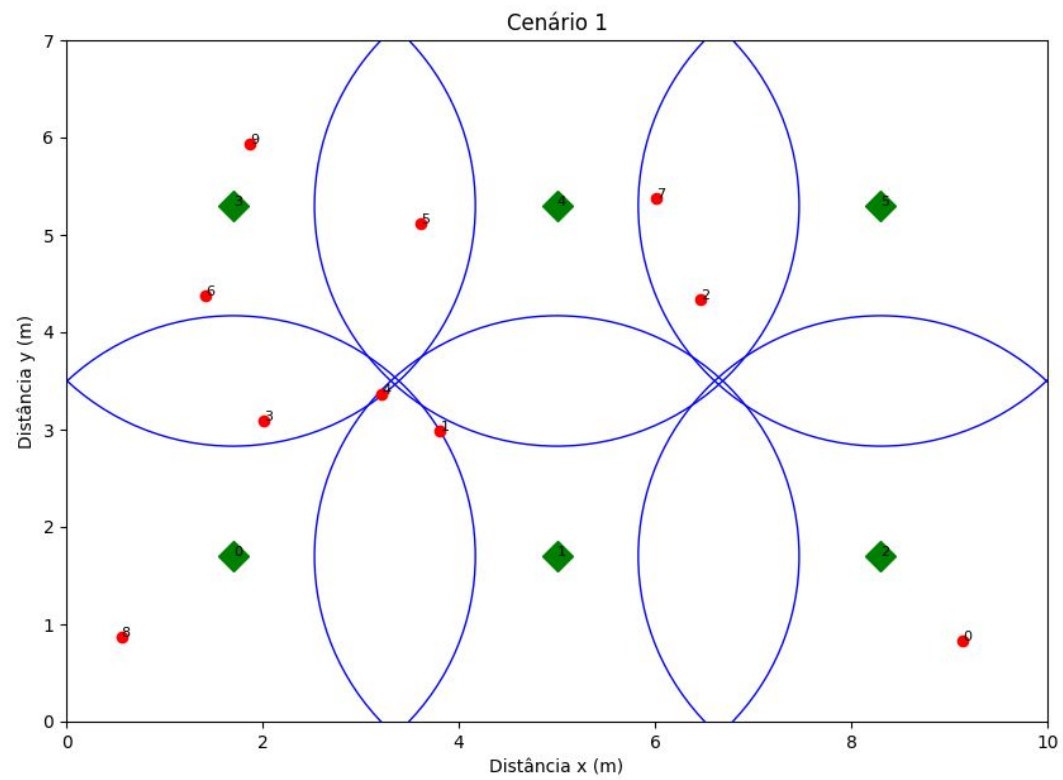
O cenário criado pelo simulador ilustrado pela figura de 14 a 17. Em verde estão destacados os Aps, em azul a área de cobertura de cada Ap e em vermelho os receptores, cada um com seu respectivo ID. É importante ressaltar a variação da posição dos pontos em vermelho, que demonstra a movimentação do receptores a cada ciclo.

Figura 14: Cenário criado com seis APs no ciclo 1



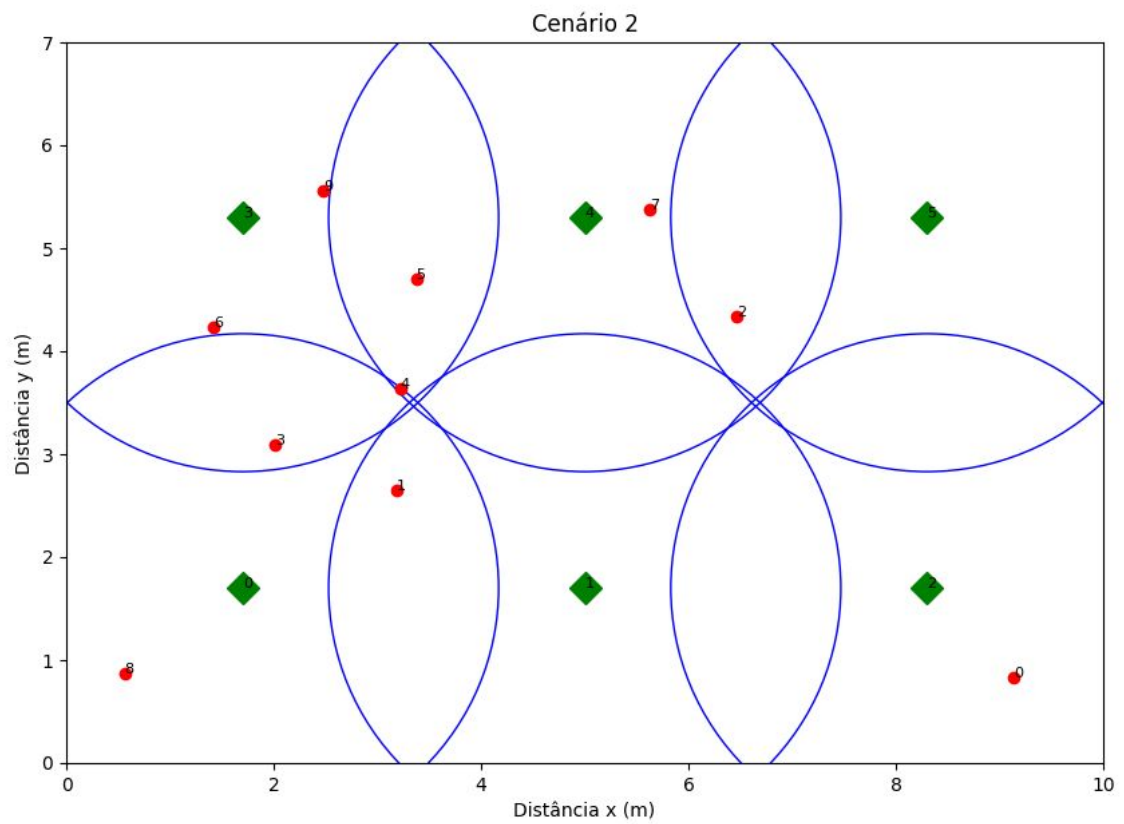
Fonte: Própria dos autores

Figura 15: Cenário criado com seis APs no ciclo 2



Fonte: Própria dos autores

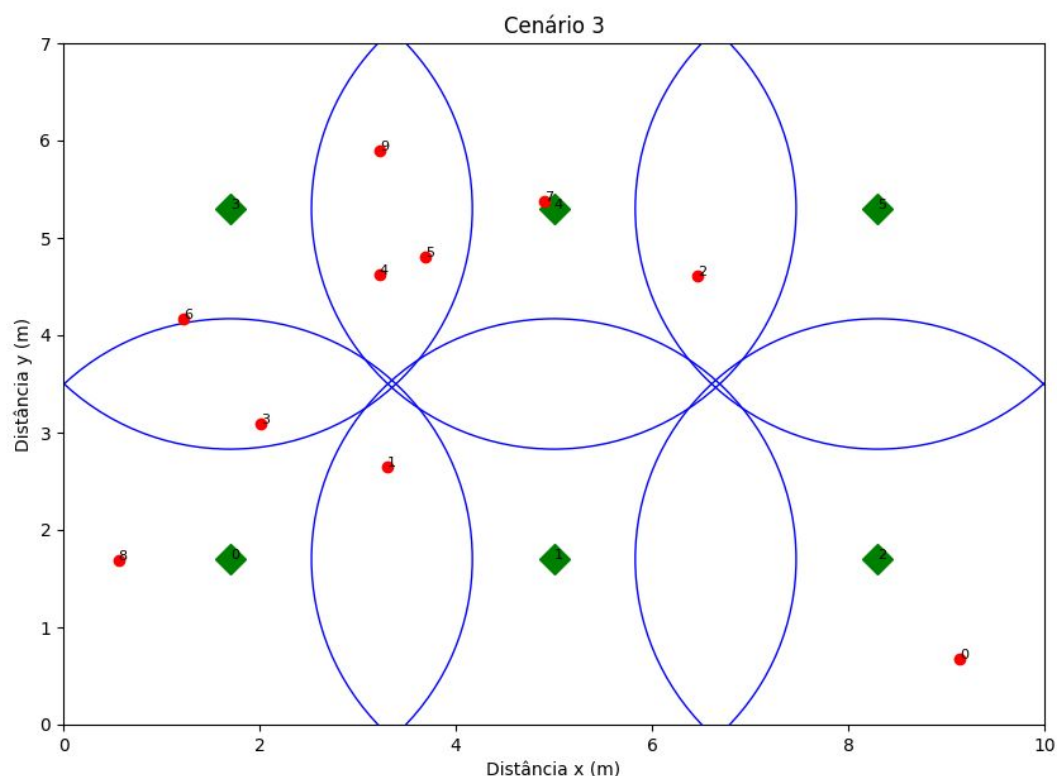
Figura 16: Cenário criado com seis APs no ciclo 3



Fonte: Própria dos autores



Figura 17: Cenário criado com seis APs no ciclo 4



Fonte: Própria dos autores

O *trace* detalha o comportamento de todos os receptores no decorrer das iterações. As figuras de 18 a 20 ilustram um trecho do *trace* gerado.

Tomando como exemplo o receptor de ID nove, nota-se que no ciclo zero o mesmo está conectado ao AP de ID tres a 2,7 m de distância. Por estar próximo ao AP é evidente a alta potência e SINR. Ao final dos ciclos, o receptor mantém a conexão com o Ap tres, porém devido ao aumento na distância em 0,55 m, sua potência cai de 17,87 dbm para 12,36 dbm. Já o SINR, diminuiu drasticamente, decorrente não só na perda de potência, mas principalmente pela entrada em uma área de grande interferência. Como consequência a capacidade máxima do canal para transferência de informação, que era acima de 11500 b/s cai para pouco mais de 300 b/s. Figura 18.

Figura 18: Trace do receptor de ID 9

```

Ciclo:» 0
  Receptor:» 9
    Ap conectado:» 3
    Distância:» 2.07
    Potência:» 17.87
    SINR:» 174.59639167556045
    Capacidade máxima do canal:»11599.93

Ciclo:» 1
  Receptor:» 9
    Ap conectado:» 3
    Distância:» 2.11
    Potência:» 17.45
    SINR:» 174.08374179015453
    Capacidade máxima do canal:»11565.87

Ciclo:» 2
  Receptor:» 9
    Ap conectado:» 3
    Distância:» 2.16
    Potência:» 16.80
    SINR:» 173.25878927844357
    Capacidade máxima do canal:»11511.06

Ciclo:» 3
  Receptor:» 9
    Ap conectado:» 3
    Distância:» 2.59
    Potência:» 12.36
    SINR:» 2.824221986300965
    Capacidade máxima do canal:»308.81

```

Fonte: Própria dos autores

Ao observar o receptor de ID oito, fica evidente a variação de potência recebida durante os quatro ciclos, com mínimo de 13,76 dbm até 16,97 dbm. Esta variação ocorre pelo afastamento do receptor em relação ao AP. Entretanto, por estar em uma área livre de interferência, seu SINR e capacidade máxima do canal se mantêm estáveis, conforme ilustrado pela figura 19 a seguir:

Figura 19: Trace do receptor de ID 8

```

Ciclo:» 0

  Receptor:» 8
    Ap conectado:» 0
    Distância:» 2.15
    Potência:» 16.97
    SINR:» 173.48122454372546
    Capacidade máxima do canal:»11525.84

Ciclo:» 1

  Receptor:» 8
    Ap conectado:» 0
    Distância:» 2.44
    Potência:» 13.76
    SINR:» 169.15366620265206
    Capacidade máxima do canal:»11238.33

Ciclo:» 2

  Receptor:» 8
    Ap conectado:» 0
    Distância:» 2.44
    Potência:» 13.76
    SINR:» 169.15366620265206
    Capacidade máxima do canal:»11238.33

Ciclo:» 3

  Receptor:» 8
    Ap conectado:» 0
    Distância:» 2.30
    Potência:» 15.26
    SINR:» 171.23849513767823
    Capacidade máxima do canal:»11376.84

```

Fonte: Própria dos autores

A conexão entre receptor e Ap tem como critério a maior potência. Na figura 20 acompanhamos o comportamento do receptor de ID cinco. Em seu primeiro ciclo está conectado ao Ap tres, ao se movimentar no segundo ciclo, se conecta ao Ap quatro e mantém essa conexão até o fim. O SINR tem seu valor máximo de aproximadamente 7,93 dbm. Essa qualidade baixa é justificada pela presença constante do receptor em uma área de alta interferência, ponto em que existe o sinal de dois ou mais Ap's.

Figura 20: Trace do receptor de ID 5

```

Ciclo:» 0
  Receptor:» 5
    Ap conectado:» 3
    Distância:» 2.41
    Potência:» 14.06
    SINR:» 7.446974490586294
    Capacidade máxima do canal:»542.53

Ciclo:» 1
  Receptor:» 5
    Ap conectado:» 4
    Distância:» 2.44
    Potência:» 13.81
    SINR:» 6.41189388646792
    Capacidade máxima do canal:»485.37

Ciclo:» 2
  Receptor:» 5
    Ap conectado:» 4
    Distância:» 2.64
    Potência:» 11.80
    SINR:» 0.5935342379411624
    Capacidade máxima do canal:»220.39

Ciclo:» 3
  Receptor:» 5
    Ap conectado:» 4
    Distância:» 2.44
    Potência:» 13.78
    SINR:» 7.93388933741787
    Capacidade máxima do canal:»570.17

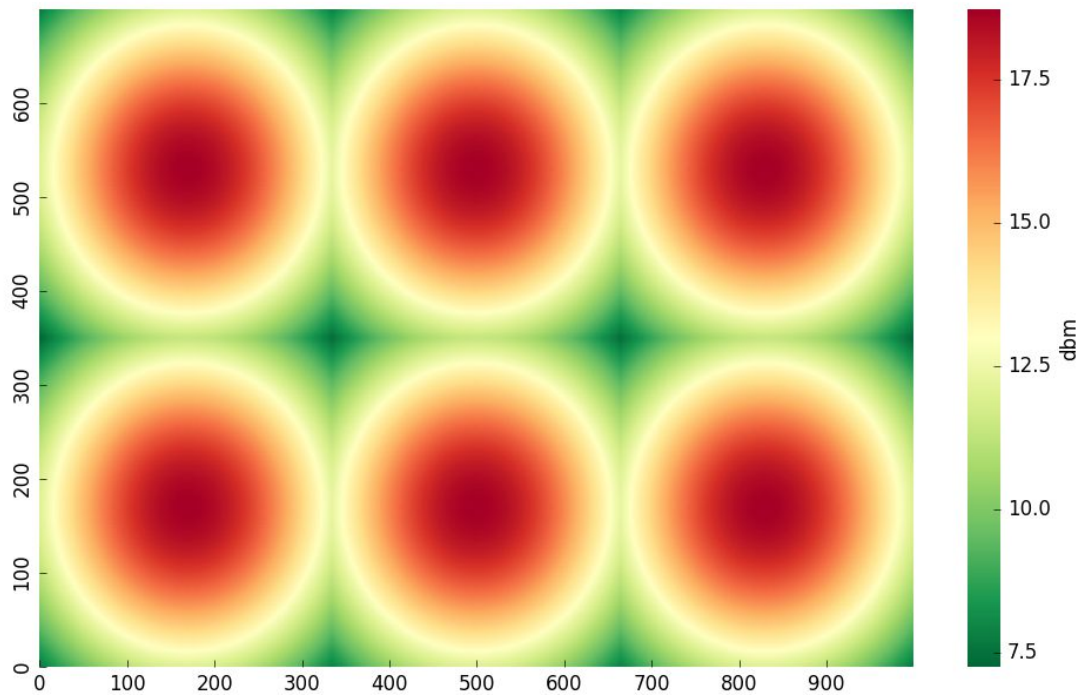
```

Fonte: Própria dos autores

O comportamento da potência é melhor evidenciado quando analisado através do mapa de calor (figura 21). O formato de propagação circular exibido no mapa é resultado do modelo de propagação lambertiana adotado conforme descrito no capítulo 4.

As áreas em vermelho são as de maior potência. Isto ocorre pois se encontram mais próximas do emissores de luz e tanto o ângulo de incidência quanto o ângulo de emissão, entre Ap e receptor, são menores.

Figura 21: Mapa de calor da potência

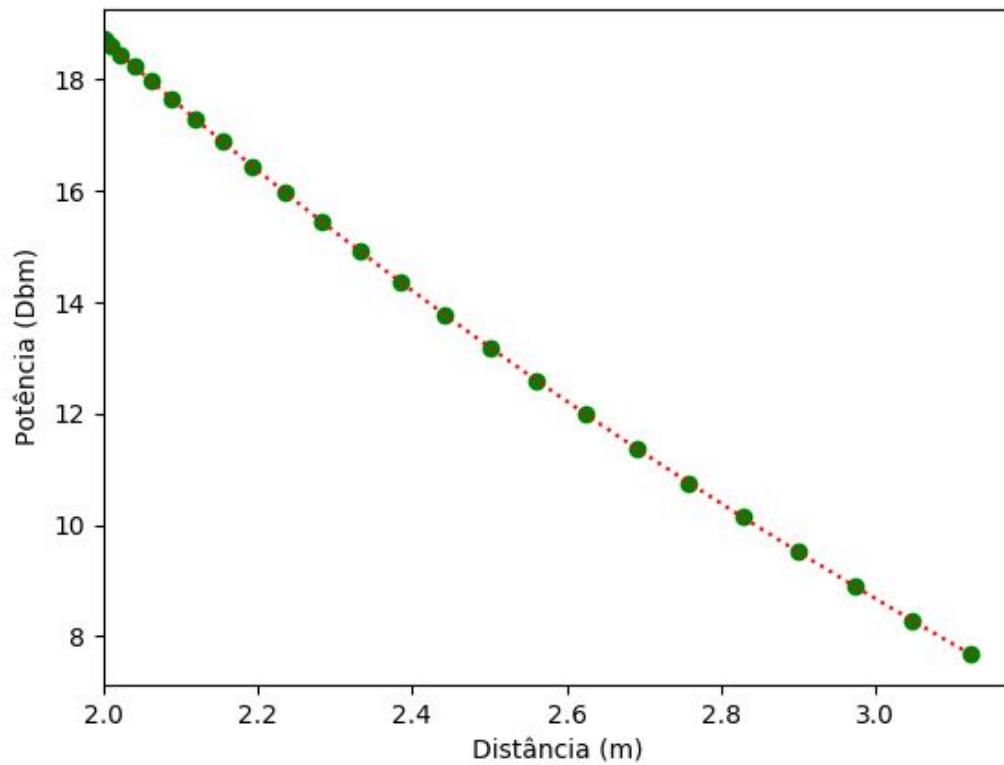


Fonte: Própria dos autores

O gráfico de potência expressa os valores de potência recebida em relação a distância em que o receptor se encontra do Ap, variando de maneira uniforme em intervalos definidos na classe *Config.py*.

Para as configurações estabelecidas nas tabelas 1,2 e 3, tem-se que a potência recebida máxima está próxima aos 19 decibéis, no ponto de menor distância (quando o receptor está embaixo do Ap, no ângulo de emissão igual a zero), conforme ilustrado na figura 22. O gráfico continua até o limite máximo de alcance do ap, onde a potência recebida é abaixo de 8 decibéis.

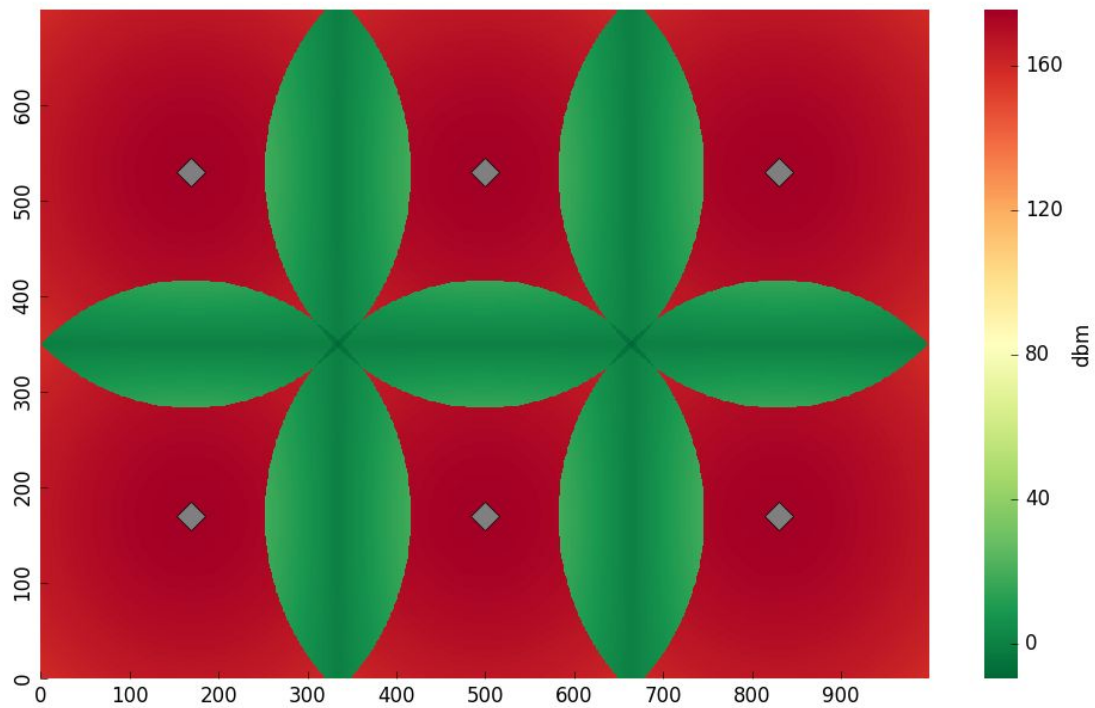
Figura 22: Gráfico Potência x Distância



Fonte: Própria dos autores

Uma medida importante de qualidade de sinal é o SINR. Este serve para medir a qualidade da rede em relação às interferências e ruídos sofridos. Para esta simulação foi gerado o mapa de calor, conforme ilustrado na figura 23.

Figura 23: Mapa de calor do SINR

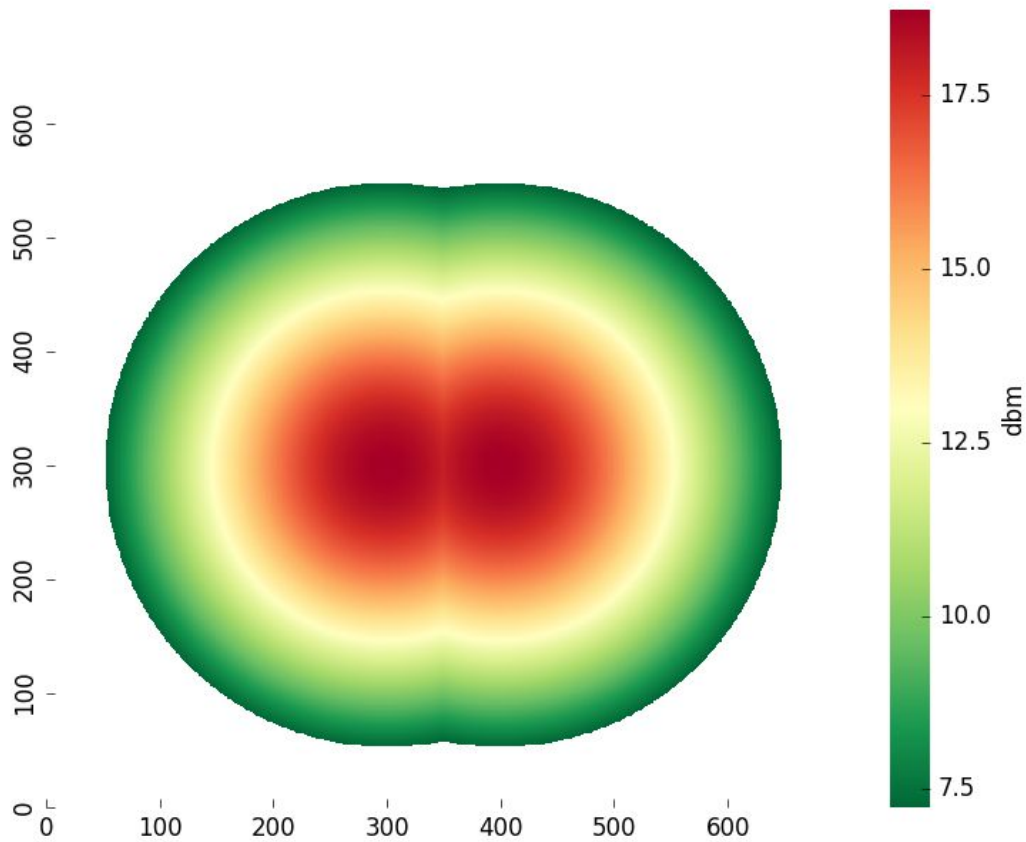


Fonte: Própria dos autores

O mapa de calor na figura 23, ilustra de maneira concisa o quanto a interferência entre Ap's diminui drasticamente a qualidade do sinal. Entretanto, nos pontos em que não há interseção das luzes provenientes dos LEDs, a qualidade se mantém estável e alta. Chega em valores acima de 160 decibéis, mesmo com a variação da distância e ângulos de emissão e incidência.

Para uma melhor avaliação da rede VLC, foi criado um novo cenário contendo apenas dois LEDs. A distância entre eles igual a um metro e com os mesmos parâmetros usados na primeira simulação. Tal cenário gerou um mapa de calor de potência demonstrado pela figura 24.

Figura 24: Mapa de calor da potência com dois APs

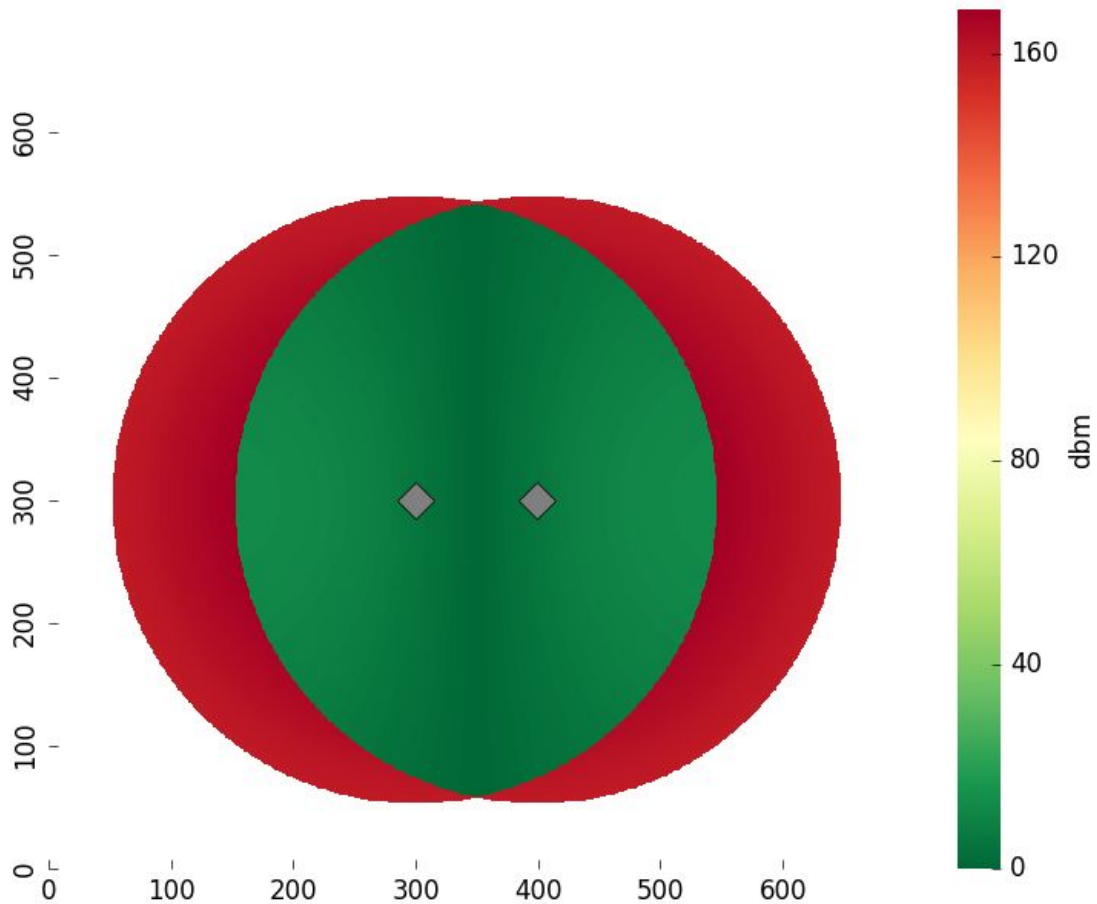


Fonte: Própria dos autores

Embora a potência recebida no espaço coberto pelos Aps seja maior, o sinal existente é de péssima qualidade devido a sobreposição de sinal, ou seja, aumento na área de interferência entre os Aps, como evidenciado na figura 25.



Figura 25: Mapa de calor do SINR com dois APs



Fonte: Própria dos autores

#### 5.4. Considerações finais

Este capítulo discorreu um estudo de caso usando o simulador proposto por este trabalho. Analisando os resultados obtidos, é possível avaliar o comportamento da rede. Levando em consideração os dados levantados, constata-se que a cobertura da área deve ser planejada, ponderando a potência e alcance dos sinais provenientes dos Aps com o mínimo de interseção.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta a definição e implementação de um simulador de redes VLC em ambientes *indoor*, criação de cenários, especificação de características físicas de Aps e receptores, planejamento de cobertura, capacidade máxima do canal e avaliação da qualidade do sinal.

O sistema apresenta uma solução para se estimar a quantidade necessária e a posição dos LEDs para a cobertura total de um ambiente *indoor* e avaliação do comportamento de uma rede VLC. Com isto, é possível planejar a implementação de uma rede, com o uso da simulação, sendo esta uma solução menos custosa e que não necessita da implementação e mudança constantes de equipamentos físicos e seus locais de instalação.

Foram descritos de forma detalha, a utilização e implementação dos conceitos e cálculos que circundam o VLC e seu comportamento. O simulador LuNiPy contempla a criação de cenários, estimativa de métricas de potência e SINR, comportamento das duas últimas em relação a distância e posicionamento dos componentes da rede e também a capacidade máxima de transmissão do canal para cada receptor, em função da potência recebida e interferência. Possibilitando a avaliação da luz visível proveniente dos LEDS, como meio de comunicação.

Por fim, o software de simulação desenvolvido e sua documentação serão disponibilizados em uma plataforma de versionamento em nuvem (github), disponível para acesso público. Permitindo à comunidade o uso e a ampliação das funcionalidades, para melhor planejamento das redes VLC.

### 6.1. Trabalhos futuros

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Implementar as características de reflexão da luz nos cálculos de potência, para uma avaliação mais precisa do comportamento da rede;
- Definir e Implementar um planejamento de frequências entre os Aps, com finalidade de reduzir a interferência;

- Adotar técnicas de inteligência artificial para automatizar e principalmente otimizar o planejamento da cobertura;
- Elaboração de artigos acadêmicos para submissão em conferências da área.

## 7. REFERÊNCIAS

- ALDALBAHI, Adel et al. **Extending ns3 to simulate visible light communication at network-level**. In: ICT. 2016. p. 1-6.
- ALDALBAHI, Adel et al. **Visible Light Communication Module: An Open Source Extension to the ns3 Network Simulator With Real System Validation**. IEEE Access, v. 5, p. 22144-22158, 2017.
- BORGES, Luiz Eduardo. **Python para desenvolvedores**. Novatec Editora, 2014.
- CHEN, Chen et al. **Reduction of SINR Fluctuation in Indoor Multi-Cell VLC Systems Using Optimized Angle Diversity Receiver**. Journal of Lightwave Technology, 2018.
- DEHGHANI SOLTANI, Mohammad et al. **On limited feedback resource allocation for visible light communication networks**. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Visible Light Communications Systems. ACM, 2015. p. 27-32.
- FRANCESCHETTI, Massimo; MEESTER, Ronald. **Random networks for communication: from statistical physics to information systems**. Cambridge University Press, 2008.
- HOOVER, Wesley A.; GOUGH, Philip B. **The simple view of reading**. Reading and writing, v. 2, n. 2, p. 127-160, 1990.
- JACOBS, Irwin Mark; WOZENCRAFT, J. M. **Principles of communication engineering**. 1965.
- Khan, L. U. (2017). **Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges**. Digital Communications and Networks, 3(2), 2017, 78-88.
- LOBATO, Daniel Corrêa. **Proposta de um ambiente de simulação e aprendizado inteligente para RAID**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MARSHOUD, Hanaa et al. **Error performance of NOMA VLC systems**. In: Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on. IEEE, 2017. p. 1-6.
- OOK vs VPPM vs CSK-Difference between OOK, VPPM, CSK modulation. Disponível em:** <http://http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LiFi-OOK-VPPM-CSK-modulation-types.html>. **Acesso em:** 10 de ago. 2018.
- PATHAK, Parth H. et al. **Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges**. IEEE communications surveys & tutorials, v. 17, n. 4, p. 2047-2077, 2015.

RAHAIM, Michael; LITTLE, T. D. C. **SINR analysis and cell zooming with constant illumination for indoor VLC networks.** In: Optical Wireless Communications (IWOW), 2013 2nd International Workshop on. IEEE, 2013. p. 20-24.

VAVOULAS, Alexander et al. **Coverage aspects of indoor VLC networks.** Journal of Lightwave Technology, v. 33, n. 23, p. 4915-4921, 2015.

ŽUKAUSKAS, Artūras; SHUR, Michael S.; GASKA, Remis. **Introduction to solid-state lighting.** Wiley-Interscience, 2002.

Zafar, Fahad, Dilukshan Karunatilaka, and Rajendran Parthiban. **Dimming schemes for visible light communication:** the state of research. IEEE Wireless Communications 22, no. 2 (2015): 29-35.

## 8. APÊNDICE

Tabela 1: Variáveis do cenário

Nome das variáveis	Significado das variáveis
val_inicial_ap_x	Valor inicial do Ap no eixo x
val_inicial_ap_y	Valor inicial do Ap no eixo y
distancia_entre_aps_x	Distância entre Aps no eixo x
distancia_entre_aps_y	Distância entre Aps no eixo y
constMov	Distância que o usuário supervisionado se move (m)
altura_ap	Altura do Ap em relação ao usuário (m)
ciclo	Número de ciclos em que o usuário se movimentará
num_aps	Número de Aps
num_users	Número de Usuários
lim_max_x	Valor máximo para a plotagem e movimentação no eixo x
lim_max_y	Valor máximo para a plotagem e movimentação no eixo y
lim_min_x	Valor mínimo para a plotagem e movimentação no eixo x
lim_min_y	Valor mínimo para a plotagem e movimentação no eixo y
h_map_scale	Escala de geração dos mapas de calor(100 = cm/ 1 = m)
lim_max_distancia	Valor máximo de distância no gráfico
ang_irradiation_max	ângulo de irradiação máxima do LED (°)
bandwidth	Largura de banda (Hz)

Fonte: Própria dos autores

Tabela 2: Variáveis de configuração do canal

Nome das variáveis	Significado das variáveis
potencia_ap ( $P$ )	Potência do LED (mw)
anguloFOV ( $\psi_{con}$ )	Campo de visão do receptor

refractive_index ( $n$ )	Índice de refração da luz no meio
phi ( $\psi_{1/2}$ )	Semi-ângulo a meia luminância
receiver_area ( $A_r$ )	Área de abertura do receptor ( $\text{m}^2$ )
filter_transmission ( $T_s$ )	Filtro de transmissão
idois ( $i_2$ )	Fator de largura de banda de ruído
itres ( $i_3$ )	Fator de largura de banda de ruído
q ( $q$ )	Constante de carga elétrica
back_current ( $I_{bg}$ )	Corrente de fundo (A)
noise_bandwidth ( $B$ )	Largura de banda do ruído (MHz)
responsivity ( $R$ )	Responsividade do receptor
k ( $k$ )	Constante de boltzmann's (J/K)
absolute_temp ( $T_k$ )	Temperatura absoluta do receptor
pd_capacitance ( $C_{pd}$ )	Capacitância do receptor por unidade de área ( $\mu \text{ m}^{-2}$ )
gol ( $G$ )	Ganho de tensão de malha aberta
noise_factor ( $\eta$ )	Fator de ruído
fet_m ( $gm$ )	Transcondutância FET

Fonte: Própria dos autores