

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE
OFFLOADING ENTRE AS REDES MÓVEIS
VLC E LTE BASEADA EM *Q-LEARNING***

ANDERSON VINICIUS DE FREITAS SOUTO

DM 31/2018

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDERSON VINICIUS DE FREITAS SOUTO

**ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE
OFFLOADING ENTRE AS REDES MÓVEIS
VLC E LTE BASEADA EM *Q-LEARNING***

DM 31/2018

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDERSON VINICIUS DE FREITAS SOUTO

**ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE *OFFLOADING*
ENTRE AS REDES MÓVEIS VLC E LTE BASEADA EM
*Q-LEARNING***

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

Coorientador: Prof. Dr. Edvar da Luz Oliveira

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S726e Souto, Anderson Vinicius de Freitas
Estratégia Para Otimização de Offloading Entre As Redes Móveis VLC e LTE Baseada Em Q-learning /
Anderson Vinicius de Freitas Souto. — 2018
81 f. : il. color

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto de
Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

1. Offloading. 2. VLC. 3. LTE. 4. Q-learning. 5. QoS. I. Francês, Carlos Renato Lisboa, *orient.* II. Título

CDD 621.3821

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


**"ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE OFFLOADING ENTRE AS REDES MÓVEIS VLC E
LTE BASEADA EM Q-LEARNING"**

AUTOR: ANDERSON VINICIUS DE FREITAS SOUTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 31/08/2018


BANCA EXAMINADORA:




Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês
(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

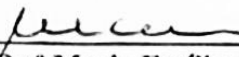


Prof. Dr. Jose Jailton Henrique Ferreira Junior
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)



Prof. Dr. Edvar da Luz Oliveira
(Avaliador Externo – UFRA)

VISTO:



Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

*Este trabalho é dedicado a todos aqueles
que almejam a carreira científica e sabem que ir além
não é uma opção e sim uma certeza.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Agradeço a minha mãe Sandra Souto por tudo que é, foi, e sempre será... Às pessoas que participaram da minha vida e com o tempo me fizeram ser o que eu sou ou entender o que eu sou, evoluíram minhas ideias, as minhas aspirações, os meus objetivos e o meu futuro.

A minha falecida avó Sabina Souto que sempre foi um exemplo de alegria de viver, de luta e de superação e me inspirou a ser um ser humano melhor e buscar por meus objetivos de vida.

Agradeço ao meu Orientador Prof. Dr. Carlos Renato Francês pela imensa paciência, orientação, inspiração e pelo conhecimento repassado.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Edvar da Luz Oliveira, por acreditar em mim e por toda a ajuda e conhecimento que me foi passado.

Agradeço ao CNPq¹ e a CAPES ² pelo apoio financeiro em forma de bolsa.

Aos amigos e em especial Rodrigo Dias Alfaia e Evelin Cardoso, que foram parceiros nessa caminhada da vida que diretamente ou indiretamente me fizeram chegar a essa conquista, onde hoje finco mais uma estaca, graças aos diversos conhecimentos que vieram dos vários relacionamentos construídos nessa grande rede que é a vida.

Agradeço pela amizade e por todas as contribuições dos meus amigos do Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho da Universidade Federal do Pará.

Agradeço a toda a comunidade de *software* livre, em especial ao *stackoverflow* pelo auxílio indireto. Sem os quais não seria possível a utilização adequada das ferramentas *open source* necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE³) que com seus ensinamentos contribuíram para a realização deste trabalho.

A Universidade Federal do Pará (UFPA), pela oportunidade dada a mim para a realização desta dissertação.

¹<http://www.cnpq.br/>

²<http://http://www.capes.gov.br/>

³<http://www.ppg ee.ufpa.br>

“A água escolhe o seu percurso de acordo com o terreno que atravessa.

O guerreiro busca a vitória de acordo com o inimigo que enfrenta.

(A Arte da Guerra, SUN TZE)

“Quanto mais nos elevamos, menores parecemos aos olhos daqueles que não sabem voar.

(Friedrich Nietzsche)

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação e caracterização do problema	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do Trabalho	3
2	Referencial teórico	5
2.1	Considerações iniciais	5
2.2	Visible Light Communication	5
2.2.1	Histórico	5
2.2.2	Características do VLC	7
2.2.3	Comunicação do VLC	8
2.2.4	Propagação do sinal no enlace VLC	9
2.2.4.1	Directed LOS	11
2.2.4.2	Non directed LOS	12
2.2.5	Topologia MAC para VLC	13
2.2.6	Modulação de sinal VLC	14
2.3	LTE	18
2.3.1	Arquitetura LTE	18
2.3.1.1	E-UTRAN	19
2.3.1.2	EPC	20
2.3.2	Características LTE	21
2.3.3	Modelo de Transmissão LTE	21
2.3.3.1	OFDM/MA	22
2.3.3.2	SC-FDM/MA	23
2.4	Offloading	24
2.5	Machine Learning	25
2.5.0.1	<i>Q-learning</i>	27
2.5.1	Simulação	29
2.6	Considerações finais	30
3	Trabalhos correlatos	31
3.1	Considerações iniciais	31
3.2	Correlatos	31
3.3	Considerações finais	35
4	Estratégia de offloading aplicadas à tecnologias de comunicação VLC e LTE	36

4.1	Considerações iniciais	36
4.2	Simulação	36
4.3	Metodologia de otimização de <i>offloading</i> baseado nos princípios do <i>Q-learning</i>	39
4.3.1	Densidade de usuários (<i>densF</i>)	41
4.3.2	Velocidade de deslocamento do usuário	43
4.3.3	Qualidade do sinal	46
4.4	Indicadores de Desempenho	50
4.5	Considerações finais	51
5	Capítulo: Estudo de caso e análise dos resultados	52
5.1	Considerações iniciais	52
5.2	Cenário	52
5.3	Análise dos resultados	55
5.4	Considerações finais	57
6	Conclusão	58
6.1	Contribuições da dissertação	59
6.2	Trabalhos futuros	60
6.3	Dificuldades encontradas	61
	Referências	62

Lista de ilustrações

Figura 1	Previsão do crescimento mundial do consumo de dados móveis	1
Figura 2	Torre semáforo em Nalbach, Alemanha.	6
Figura 3	Experimento com o Fotofone.	7
Figura 4	Espectro Eletromagnético.	8
Figura 5	Comunicação entre transmissor e receptor no enlace VLC.	9
Figura 6	a) directed-LOS, b) non-directed-LOS, c) non-directed-NLOS, d) tracked.	10
Figura 7	Directed-LOS	11
Figura 8	Non Directed LOS	13
Figura 9	Topologia MAC	14
Figura 10	separação entre o tipos PHY no domínio das modulações	16
Figura 11	Arquitectura LTE	19
Figura 12	Estrutura de modulação OFDM	22
Figura 13	Diferença entre o OFDM e o OFDMA	23
Figura 14	OFDMA x SC-FDMA	24
Figura 15	modelo conceitual de cenário híbrido móvel	25
Figura 16	Modelo conceitual de cenário híbrido móvel	26
Figura 17	Fluxograma do algoritmo baseado em aprendizado por reforço	28
Figura 18	Fluxograma Q-learning	29
Figura 19	Fluxograma da Heurística de otimização de <i>offloading</i>	38
Figura 20	Metodologia do cálculo da recompensa do <i>Q-learning</i>	40
Figura 21	Resultado do aprendizado acumulado na tabela $Q(e,a)$	41
Figura 22	Fluxograma do algoritmo densidade de usuários	43
Figura 23	Fluxograma do algoritmo índice de velocidade	45
Figura 24	Imagem representativa do variação dos ângulos de inclinação α e β	46
Figura 25	Inclinação do receptor VLC em relação aos feixes de luz	47
Figura 26	Imagem representativa do ambiente de aferição	48
Figura 27	Aferição para o ângulo α	49
Figura 28	Aferição para o ângulo β	49
Figura 29	Cenário proposto no estudo de caso	53
Figura 30	Taxa de transferência máxima	55
Figura 31	Probabilidade de bloqueio	56
Figura 32	Desempenho do algoritmo <i>Q-learning</i> baseado no número de iteração	57

Lista de tabelas

Tabela 1	Tabela Modulações VLC	15
Tabela 2	Cenários de Aplicação	17
Tabela 3	Elementos constituintes do EPC	20
Tabela 4	Alguns Parâmetros do LTE	21
Tabela 5	Técnicas de Machine Learning	27
Tabela 6	Lacunas encontradas na literatura	34
Tabela 7	Prioridade de conexão dos usuários	42
Tabela 8	Parâmetros gerais	53
Tabela 9	Parâmetros VLC	54
Tabela 10	Parâmetros LTE	54

Lista de abreviaturas e siglas

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	Quinta Geração de internet móvel
CSK	Color shift keying
EPC	Evolved packet core
FOV	Field of View
IoT	Internet of things
LED	Light Emitting Diode
Li-Fi	Light Fidelity
LOS	Line of sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
ML	Machine Learning
MME	Mobility Management Entity
NS-3	Network Simulator 3
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access
OOK	On-Off Keying
OWC	Optical wireless communications
PCRF	Policy and charging rules function
PD	Photo detector
PDN-GW	Packet data network gateway
PHY	Camada Física

PPM Pulse position modulation

PWM Pulse width modulation

QL Q-learning

QoS Quality of Service

RF Radiofrequência

RSS Received Strength Signal

S-GW Serving gateway

SC-FDM Single Carrier Frequency Division Multiplexing

SC-FDMA Single Carrier Frequency Division Multiple Access

VLC Visible Light Communication

Voip Voice over IP

VPPM Variable pulse position modulation

Wi-Fi Wireless Fidelity

WLAN Wireless local area network

Resumo

O aumento no consumo de tráfego de dados é motivado pelo aumento do número de dispositivos como *smartphone e tablets*, já que há uma necessidade de estar conectado com tudo e com todos. As aplicações como *streaming* de vídeo e jogos online demandam por maior taxa de transmissão de dados, essa alta demanda corrobora para um a sobrecarga das redes móveis baseadas por radiofrequência, de modo a culminar em uma possível escassez do espectro RF. Por tanto, este trabalho busca otimizar o *offloading* entre LTE e VLC, e para isso é utilizado uma metodologia baseado em aprendizado por reforço denominada de *Q-Learning*. O algoritmo utiliza como entrada as variáveis do ambiente que estão relacionadas à qualidade do sinal, densidade e velocidade do usuário para aprender e selecionar a melhor conexão. Por tanto, os resultados da simulação mostram a eficiência da metodologia proposta em comparação com o esquema RSS predominante na literatura da área. já que provou por métricas de QoS, suportar maiores taxas de transmissão de dados, assim como, garantiu uma melhoria de 18% em relação as interrupções de serviço a medida que o número de usuários aumenta no sistema.

Palavras-chave: Offloading, VLC, LTE, Q-learning, QoS.

Abstract

The increase in the consumption of data traffic is motivated by the increasing number of devices like smartphone and tablets, since there is a need to be connected with everything and with everyone. Applications such as streaming video and online games require a higher rate of data transmission, this high demand corroborates the overload of mobile networks based on radio frequency, so as to culminate in a possible shortage of the RF spectrum. Therefore, this work seeks to optimize offloading between LTE and VLC, and for this a methodology based on reinforcement learning called Q-Learning is used. The algorithm uses as input the environment variables that are related to the signal quality, density and speed of the user to learn and select the best connection. Therefore, the results of the simulation show the efficiency of the proposed methodology in comparison with the predominant RSS scheme in the area literature. as it has been proven by QoS metrics to support higher data rates, as well as ensuring an 18% improvement over service interruptions as the number of users increases in the system.

Keywords: Offloading,VLC,LTE,Q-learning, QoS.

1 Introdução

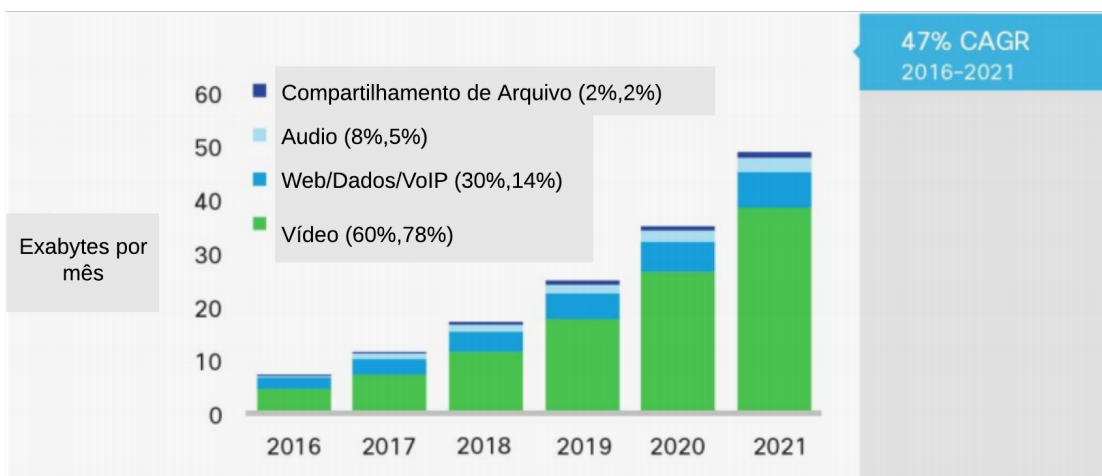
1.1 Motivação e caracterização do problema

Muitos desafios permeiam as redes móveis das próximas gerações, como por exemplo a alta demanda por capacidade de tráfego de dados e a disponibilidade de estar conectado à internet. De acordo com CISCO (2017), estima-se, que em 2021 o tráfego de dados será de aproximadamente 49 *exabytes*. Um fator responsável por este aumento futuro de tráfego pode estar relacionado ao crescimento do número de dispositivos conectados à internet nas últimas décadas (COMPTIA, 2015).

Além disso, outro fator que corrobora para este cenário está no aumento do uso de dispositivos móveis como *smartphones*, *tablets* e *notebooks*, que fazem uso principalmente das redes sem fio devido a sua facilidade de conexão e variedades de aplicações e serviços disponíveis .

As aplicações como *streaming* em 4k e jogos online de realidade aumentada tendem a necessitar de uma maior largura de banda e conexões de alta velocidade. A Figura 1 mostra as previsões para o consumo de dados de aplicações móveis até 2020 e aponta que isso irá saturar as tecnologias de acesso tradicionais caso estas não evoluam, já que levará à eventual escassez do espectro de radiofrequência.(CISCO, 2017)

Figura 1 – Previsão do crescimento mundial do consumo de dados móveis



Fonte: CISCO (2017)

Diante deste cenário de sobrecarga das redes de comunicação, é necessário a busca por alternativas que visem suprir essa demanda por disponibilidade de banda para atendimento dos serviços. Uma dessas alternativas baseia-se na utilização da Comunicação por Luz Visível, ou VLC (*Visible Light Communication*). O VLC é a tecnologia emergente na área de comunicação sem fio que utiliza *Light Emitting Diode* (LED) para transmitir dados e luz, simultaneamente (HUSSAIN et al., 2015). Os LEDs podem ser modulados em velocidades muito altas, o que aumenta sua eficiência e possibilita a dupla finalidade de iluminação e comunicação de dados (JHA; MISHRA; KUMAR, 2017)]. Além disso, trabalha na faixa do espectro da luz visível ainda pouco explorada para comunicações, o que evita interferências com outros sinais.

Por outro lado, uma desvantagem do VLC é o fato de não poder atravessar paredes e objetos sólidos, para resolver este problema é necessário o uso de soluções híbridas que visam contrapor as deficiências de duas ou mais tecnologias de acesso no objetivo de alcançar as vantagens de cada uma delas (Mayer, 2014). Dentro da lógica de cenários híbridos, a arquitetura 5G surge como uma nova alternativa para suprir a demanda por alta vazão de dados, uma das premissas do 5G é corroborar com a integração de diversas tecnologias de acesso como, por exemplo, *Long Term Evolution* (LTE), fibra ótica e o *Visible Light Communication* (VLC) (HAZAN; RAN, 2016).

Diversos trabalhos abordam a temática das tecnologias híbridas para suprir a demanda por banda, como em (FAKHFAKH; HAMOUDA, 2017) que propõem uma solução de balanceamento entre Wi-Fi e rede de celular. A proposta utiliza um algoritmo de aprendizado por reforço para aprender sobre as variáveis de ambiente e decidir qual tecnologia de comunicação utilizar. Outro trabalho proposto em (LI et al., 2016a), utiliza conceitos de *offloading* para melhorar a qualidade de serviços de dados móveis, por meio de enlaces VLC e Long Term Evolution (LTE).

A tecnologia LTE foi especificada pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) e foi criada com base nas tecnologias GSM e WCDMA, das gerações celulares anteriores. A diferença é que, dessa vez, a tecnologia prioriza o tráfego de dados em vez do tráfego de voz. Isso proporciona uma rede de dados mais rápida e mais estável (ROHILLA; KAMBOJ, 2014). Além disso, o LTE é uma tecnologia já consolidada, e suas características de propagação possibilita transpor as limitações do VLC, como a capacidade de atravessar objetos opacos (KASHEF et al., 2016).

À luz do exposto, esta dissertação apresenta uma estratégia de *offloading* para o problema relacionado a saturação das redes móveis tradicionais, por intermédio do enlace de comunicação por luz visível como via de escape para sobrecarga do fluxo de dados.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é desenvolver e simular uma estratégia em cenários híbridos que utilize o VLC como solução à grande demanda de fluxo de dados e o LTE como tecnologia secundária para acesso de comunicação, em virtude de alguma falha ou bloqueio de sinal que incidam quando conectado ao VLC. Além disso, considera outros fatores importantes no momento da troca de enlace (*offloading*), como a densidade de usuários e velocidade deslocamentos do usuário. Toda a heurística por trás das tomadas de decisão relacionadas à troca de tecnologia será gerida pela técnica de aprendizado de máquina denominada *Q-learning*. De forma mais específica, esta dissertação apresenta os seguintes objetivos:

- Realizar um amplo levantamento do estado da arte das áreas contempladas nesta dissertação;
- Criar uma metodologia para *offloading* que considere densidade de usuários, velocidade de deslocamento e qualidade de sinal;
- Estabelecer o *Q-learning* como agente escalonador de enlace de comunicação;
- Simular um cenário *indoor* e híbrido que utilize o VLC e o LTE como tecnologias de acesso no qual os usuários tenham mobilidade;
- Comparar a metodologia proposta com uma metodologia já existente;
- Validar o desempenho da estratégia de *offloading* por meio de critérios de QoS.

1.3 Organização do Trabalho

Estruturalmente, este documento está dividido em 6 capítulos, o primeiro descreve a introdução e os próximos sendo:

- Capítulo 2: Neste capítulo são introduzidas os conceitos, as tecnologias e apresentação do estudo da arte necessários para a compreensão do estudo realizado. O capítulo inicia com um breve apanhado da literatura do VLC e suas características como enlace de comunicação e, em seguida, explora os conceitos do LTE como tecnologia predominante no cenários móvel e cita suas particularidade como enlace RF. O capítulo é finalizado com uma explanação sobre a técnica de aprendizado de máquina utilizada neste estudo, dando ênfase aos conceitos principais do *Q-learning*.
- Capítulo 3: Apresentam-se as técnicas de modelagem para avaliação de desempenho, explicando de forma mais detalhada as etapas e principais técnicas de especificação e solução do modelo.

-
- Capítulo 4: Apresentam-se os trabalhos relacionados ao estudo de caso desta dissertação, abordando-se principalmente os desafios associados ao *offloading* em cenários híbridos.
 - Capítulo 5: Este capítulo expõe a metodologia proposta e o estudo de caso realizado, detalhando o ambiente de simulação, no qual demonstram-se os parâmetros e configurações utilizados, assim como os resultados obtidos.
 - Capítulo 6: Neste capítulo, demonstram-se as considerações finais sobre os temas abordados na proposta do trabalho, apontando as dificuldades encontradas e os possíveis desdobramentos em trabalhos futuros.

2 Referencial teórico

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem por finalidade conceituar teoricamente todo o conhecimento referente ao que será abordado neste trabalho. Será abordado os conceitos de comunicação por luz visível e o LTE como enlaces de comunicação tal como as características do *offloading* e os princípios de *machine learning*.

2.2 Visible Light Communication

2.2.1 Histórico

Bem antes das comunicações por rádio frequência existirem, a luz visível já vinha sendo uma alternativa de comunicação. Desde a Roma antiga há rumores empregados a sinais de fumaça ou grandes fogueiras que eram responsáveis por alertar sobre presságios de batalhas servindo como antecipador de defesa para com as tropas inimigas. A *Ilíada*, poema épico escrito por Homero cerca de 700 a.C e que descreve os acontecimentos da Guerra de Tróia, contém as primeiras referências sobre o uso de faróis de fogo ou de fumaça para fins militares. Em *Agamenon*, outro poema épico escrito por Ésquilo em 458 a.C., é descrito como a mensagem sobre a queda de Tróia foi enviada por Clitenestra, esposa de Agamenon, para a cidade de Argos através de uma cadeia de faróis de fogo, percorrendo uma distância total de aproximadamente 480 km (BURNS, 2004).

Muitos outros eventos históricos marcaram feitos associados à comunicação por luz visível. Na França no final do século XVIII, um telégrafo foi desenvolvido pelo engenheiro Charles Chappe (SKLAVOS et al., 2013) como mostrado na Figura 2. Estes equipamentos eram colocados em torres, em uma distância média de 10 a 15 quilômetros. Com essa estrutura e uma codificação eficiente, era possível criar até 98 combinações diferentes, que podiam ser enxergadas a quilômetros de distância, com o auxílio de um par de telescópios equipados nas torres. Em poucas décadas, a França já estava equipada com centenas de telégrafos, formando uma grande rede de comunicação, que serviu aos interesses franceses por mais de 50 anos, sendo substituído posteriormente pelo telégrafo elétrico.

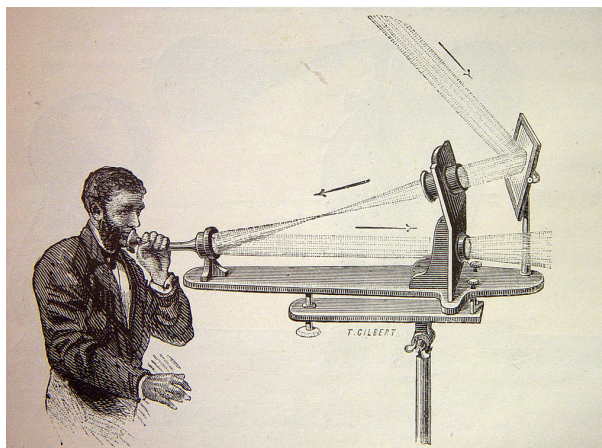
Figura 2 – Torre semáforo em Nalbach, Alemanha.



Fonte: Kidwell (1996)

Em 1880, Graham Bell apresentou seu fotofone que é um dispositivo de telecomunicações, que permitiram a transmissão de voz sobre um feixe de luz, como mostra a Figura 3. Funciona de forma semelhante ao telefone, exceto que o fotofone usa a luz modulada como um meio de transmissão de informação, enquanto o telefone dependia de um sinal modulado elétrico realizado ao longo de um circuito de fios condutores (BELL, 1880).

Figura 3 – Experimento com o Fotofone.



Fonte: Bell (1880)

Já no início do século 21, a comunicação por LEDs passou a ser realidade (TANAKA et al., 2003). Os primeiros experimentos a utilizar uma lâmpada LED atingiram taxas de 400 Mbps. Posteriormente, no ano de 2011, Harald Haas realizou a primeira demonstração do Li-Fi (*Light Fidelity*), durante um *Technology, Entertainment, Design* (TED¹).

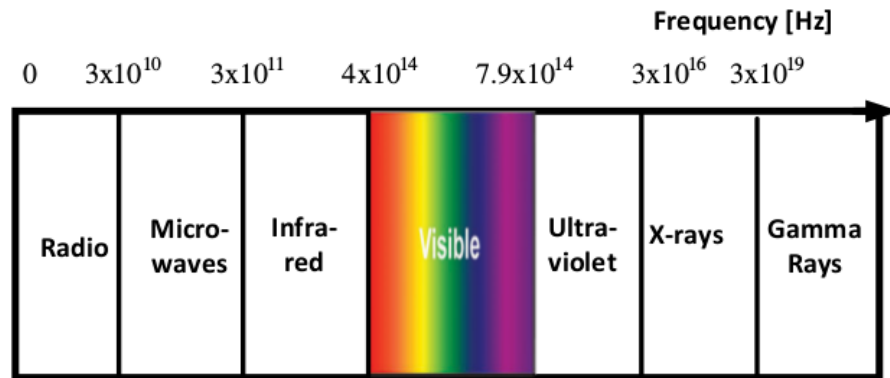
Percebe-se que no decorrer dos anos, a comunicação por luz visível vem passando por grandes aprimoramentos de forma a ser perspicaz em diversas situações no decorrer da história da humanidade, e, além disso, por apresentar características próprias, passar a ser um referencial bem promissor no que diz respeito a meio de comunicação.

2.2.2 Características do VLC

Na comunicação por luz visível, uma pequena parte do espectro de frequência referente a luz visível é usada para a comunicação de dados. O VLC pode oferecer largura de banda de até 10.000 vezes o que é oferecido pelas tecnologias de radiofrequência, tendo um alcance de 430 THz a 790 THz, como mostrado na Figura 4. Como vantagens do sistema VLC, podemos citar altas taxas de dados, inerente segurança (pois a luz não deixa o ambiente), espectro não regulado, múltiplas células possíveis, não interferentes, com luminárias adequadas. As desvantagens são a necessidade de sincronismo entre transmissor e receptor; o fato da luz ambiente intensa poder saturar o receptor; e além disso, é preciso limitar a potência para evitar ofuscamento e o multipercurso, devido a reflexão do sinal em objetos, pessoas e paredes.

¹É uma série de conferências realizadas na Europa, na Ásia e nas Américas pela fundação Sapling, dos Estados Unidos, sem fins lucrativos, destinadas à disseminação de ideias

Figura 4 – Espectro Eletromagnético.



Fonte: CHOWDHURY (2016)

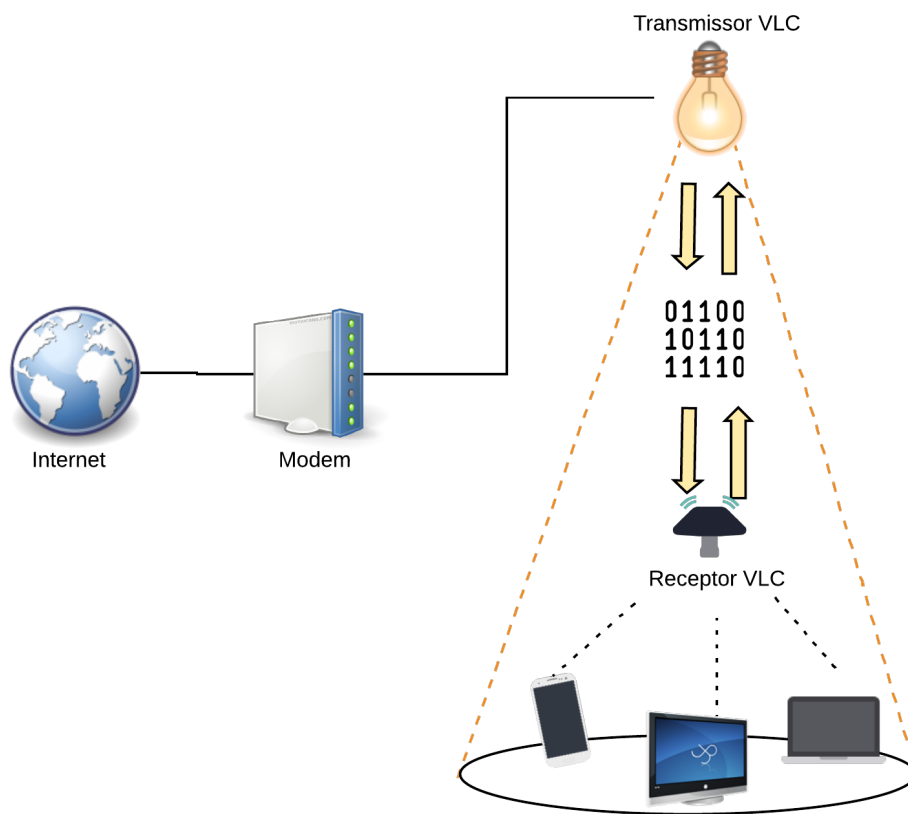
Os sistemas VLC são basicamente compostos por transmissores e receptores. É interessante notar que uma das dificuldades em um sistema VLC é o *uplink*. Numa situação em que temos luminárias com LEDs no teto e um dispositivo móvel sobre uma superfície plana, o *downlink*, praticamente não necessita de alinhamento. Já no *uplink*, o transceptor no dispositivo móvel terá que alinhar seu transmissor com a luminária, além disso, o dispositivo móvel teria que mandar um sinal para o receptor, ou seja, em um cenário ideal de apenas um receptor e um emissor isso não teria problema, no entanto se pensarmos em um cenário real onde teremos múltiplos receptores e emissores isso já se torna inviável devido às inúmeras interferências causada pelo *uplink*. Dentre as possíveis soluções, considera-se o uso de uma segunda tecnologia de acesso para o *uplink*, tais como o *Bluetooth*, *Wi-Fi* e o *LTE* (CHOWDHURY, 2016; IEEE-802.15.7, 2011).

2.2.3 Comunicação do VLC

A comunicação no enlace VLC é intermediado por um transmissor e receptor de luz que permite que diversos equipamentos se conectem a Internet. O transmissor VLC é composto de um LED branco, que pode ser um LED RGB (que possui as três componentes (vermelho, azul e verde, que combinadas produzem o branco, ou então um LED azul encapsulado com uma camada de fósforo (KRAEMER; KATZ, 2009). O LED RGB demanda um controle mais complexo, mas há a possibilidade de modular três comprimentos de onda separadamente. No caso do LED RGB pode ser necessário um controle baseado em realimentação (malha fechada) devido à variação da cor com a temperatura do LED. Observe que são necessárias três intensidades distintas de corrente, uma em cada LED de cor básica, para produzir a cor branca. O LED azul com fósforo é comum em iluminação devido à simplicidade de seu uso. O fósforo porém torna o LED mais lento para transmissão de dados (PATHAK et al., 2015).

Na recepção do sinal, a luz é coletada por lentes e pode ser submetida a um filtro óptico. As lentes aumentam a área efetiva de captura para o *Field of View* (FOV) que é o campo de visão do detector desejado. Os fotodetectores podem ser do tipo PIN ou avalanche (KRAEMER; KATZ, 2009). Os fotodetectores avalanche tem a desvantagem de demandar tensões altas de operação e também custo elevado, porém são mais sensíveis. A área do detector é crítica no projeto, pois quanto maior a área maior será a capacitância do detector, o que terá impacto direto na banda. Trata-se de uma relação de compromisso: velocidade versus área de captura do detector. A equalização no receptor pode aumentar significativamente a banda (PATHAK et al., 2015). A Figura 5 representa um esquema padrão de comunicação entre um receptor e transmissor de dados em redes VLC:

Figura 5 – Comunicação entre transmissor e receptor no enlace VLC.



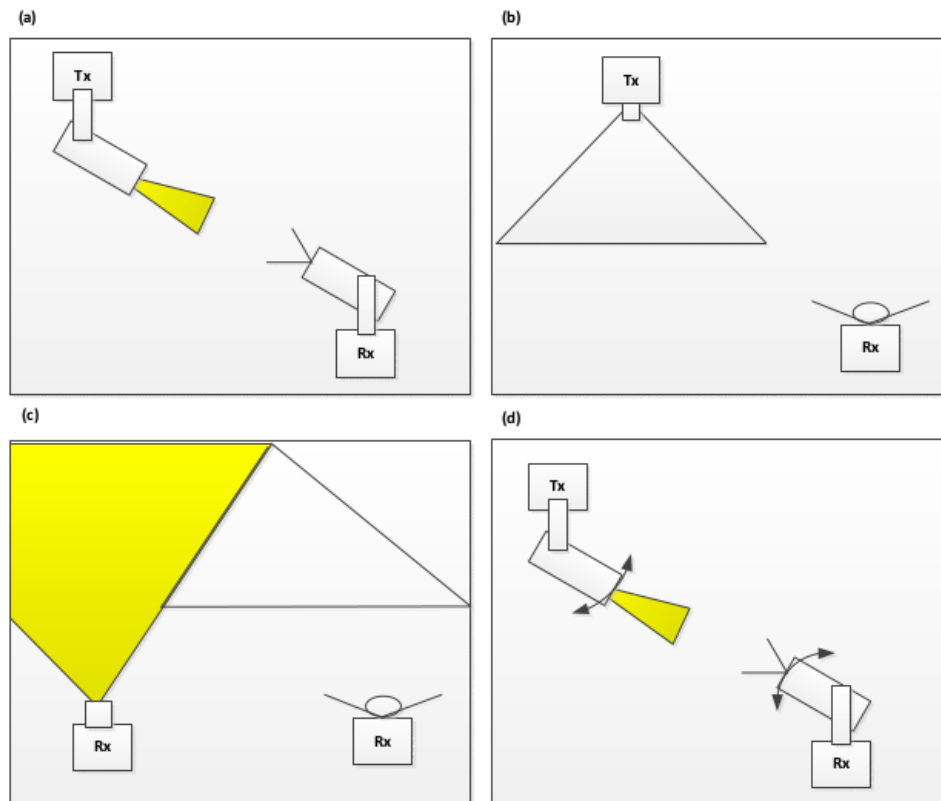
Fonte: O Autor

2.2.4 Propagação do sinal no enlace VLC

Tão importante quanto os receptores e emissores, em um sistema VLC o modelo de propagação é de fundamental importância, já que é usado para predição da intensidade com a qual um sinal transmitido chega ao seu receptor, quando as duas pontas do enlace apresentam entre elas uma linha de visada não-obstruída por nenhum obstáculo (PATHAK

et al., 2015). Na *Optical Wireless Communications* (OWC), o *Line-of-sight* (LOS) é o modelo de propagação utilizado e obedece os padrões comportamentais da luz visível. É possível configurar quatro tipos diferentes de topologia LOS em um ambiente interno, os quais são mostrados na Figura 6. Essas quatro características de link são classificadas como: *directed-LOS*, *non-directed-LOS*, *non-directed-NLOS* e *tracked* (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2012; GFELLER; BAPST, 1980; KAHN; BARRY, 1997)

Figura 6 – a) *directed-LOS*, b) *non-directed-LOS*, c) *non-directed-NLOS*, d) *tracked*.



Fonte: CHOWDHURY (2016)

Na topologia *directed-LOS* Figura 6 (a) tanto o transmissor quanto o receptor possuem uma FOV restrita, isto é, a posição entre o LED o fotodetector tem que ser estática. Por outro lado, a topologia *non-directed-LOS* Figura 6 (b) o receptor faz conexão direta com a fonte emissora de luz e também considera o sinal proveniente das reflexões. Já na topologia *non-directed-NLOS* Figura 6 (c), o receptor não faz conexão direta com a fonte de luz e considera apenas o sinal de luz proveniente das reflexões do piso, teto e paredes enquanto que na topologia *tracked* Figura 6 (d) são utilizados dois canais de comunicação, o primeiro fica encabido pelas configurações de conexão enquanto que o segundo canal fica responsável pela transmissão de dados(Chowdhury, 2016).

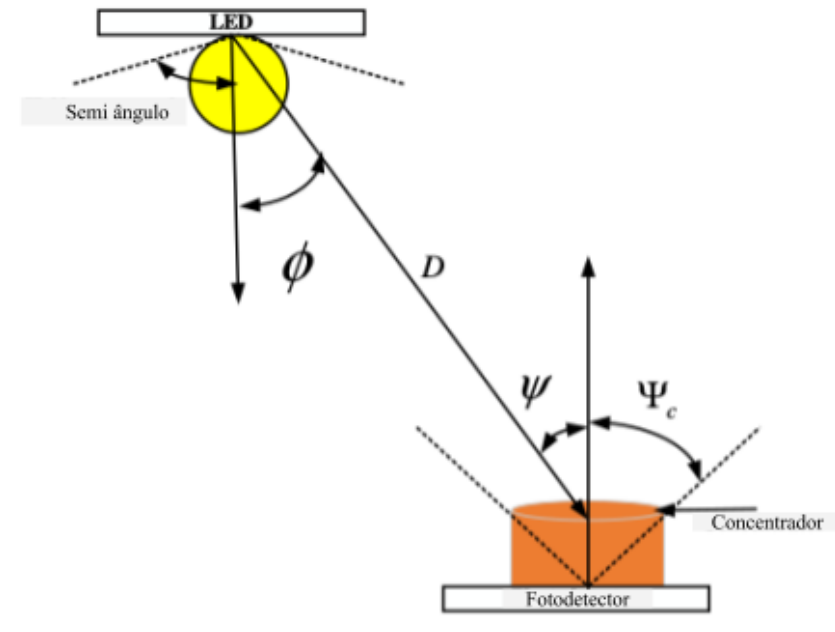
Existem basicamente dois critérios usados para classificar essas topologias. O primeiro é relacionado ao grau de direcionalidade e o segundo pela garantia de interrupção

da comunicação entre o transmissor e o receptor. Na *directed-LOS*, tanto o transmissor quanto o receptor possuem um FOV restrito. Por outro lado, na topologia *non-directed*, tanto o transmissor quanto o receptor têm um amplo campo de visão (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2012; GFELLER; BAPST, 1980).

2.2.4.1 Directed LOS

O *directed-LOS* é normalmente usado em comunicação ponto-a-ponto. Esse tipo de topologia proporciona menor perda de caminho e menor impacto do ruído de luz ambiente. Como resultado, altas taxas de dados medidos em Mbps podem ser alcançadas tanto em ambientes internos quanto externos. No entanto, como essa topologia requer um alinhamento preciso entre o transmissor e o receptor, a mobilidade se torna um grande problema (PATHAK et al., 2015). Esse comportamento pode ser ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Directed-LOS



Fonte: CHOWDHURY (2016)

Em comunicação óptica sem fio, a intensidade radiante é dada por R_i para o modelo de propagação LOS e pode ser expressa pela Equação 1 (KAHN; BARRY, 1997):

$$R_i = P_t \times R_0(\phi) \quad (1)$$

Onde P_t é a potência transmitida do LED e $R_0(\phi)$ é o padrão de *Lambertian* para o ângulo de incidência ϕ , que pode ser expresso de acordo com a Equação 2:

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

Onde m é relacionado ao padrão Lambertiano de radiação para o semi-ângulo (*half-power*) $\Psi_{1/2}$ do LED, que é dado por pela Equação 11:

$$m = \frac{\ln 2}{\ln(\cos(\Psi_{1/2}))} \quad (3)$$

Portanto, a equação final do canal de acordo com o modelo de propagação LOS pode ser expressa pela Equação 4:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)Ad}{2\pi D^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (4)$$

Onde D é a distância entre o LED e o photo detector (PD), eAd é a área do detector; $T_s(\psi)$ é o filtro de transmissão, $g(\psi)$ é o ganho concentrado de sinal e Ψ_c é o concentrador FOV, que é representado como um semi-ângulo. Após o cálculo do canal de transmissão é possível mensurar a potência recebida no dispositivo final, expressa pela Equação 5.

$$P_r = H(0)P_t \quad (5)$$

O $g(\psi)$ é o ganho do concentrador e é constituído por uma material transparente que pode ser plástico ou vidro. Objetivo desse acessório é aumentar área de contato do PD. O cálculo de $g(\psi)$ pode ser expresso por pela Equação 6.

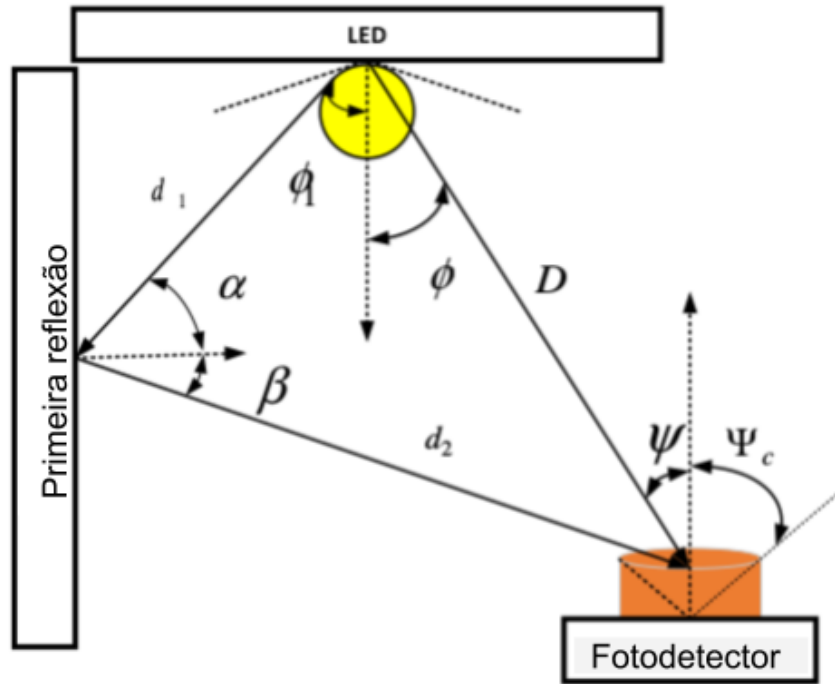
$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{k^2}{\sin^2(\Psi_c)} & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (6)$$

Onde k é o índice de refração do material.

2.2.4.2 Non directed LOS

Neste tipo de topologia, além do *link* de comunicação entre o receptor e o transmissor, há também outras reflexões múltiplas de sinal advindo das paredes e objetos do ambiente. Como visto na Figura 8, N-LOS é completamente dependente das reflexões das paredes e teto e é conhecido como um enlace *non-directed-NLOS* ou difuso. As ligações difusas são relativamente imunes à bloqueio e interrupções e permitem um grande grau de mobilidade para os receptores em um ambiente interno. No entanto, o sinal recebido é corrompido pela dispersão multipercurso. Como resultado, um grande número de reflexões ocasiona altas taxas de interferência (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2012; KAHN; BARRY, 1997).

Figura 8 – Non Directed LOS



Fonte: CHOWDHURY (2016)

O cálculo da potência em *Non-directed* pode ser expresso pela Equação 7:

$$P_{total} = H_{los(0)} + H_{nlos(0)}P_t = \left(H_{los(0)} + \sum H_{reflec(0)} \right) P_t \quad (7)$$

Onde H_{reflec} representa o ganho de canal no pontos de reflexão:

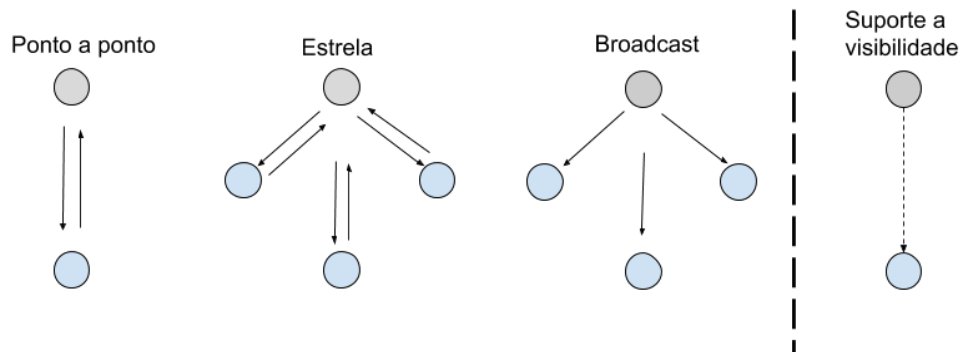
$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)Ad \rho dA}{2\pi D^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) \cos(\beta) \cos(\alpha) g(\psi) \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (8)$$

Onde $d1$ e $d2$ são a distância entre um LED e um ponto de reflexão e a distância entre um ponto de reflexão e um receptor respectivamente; ρ é o fator de reflectância; dA é a menor área de reflexão considerada; α é o ângulo de incidência do ponto de reflexão e β é o ângulo de irradiância para o receptor.

2.2.5 Topologia MAC para VLC

Além da topologia de link LOS, o VLC suporta três topologias da camada *Media Access Control* (MAC) que são Ponto-a-ponto, estrela, *broadcast* topologias e está ilustrada na Figura 9 (IEEE-802.15.7, 2011).

Figura 9 – Topologia MAC



Fonte: IEEE-802.15.7 (2011)

A comunicação em estrela centraliza o tráfego em um nó central responsável por gerenciar os demais receptores na rede. A comunicação ponto a ponto acontece exclusivamente entre dois nós. Já na comunicação em *broadcast*, um único nó é responsável por transmitir os dados aos outros nós sem receber nenhuma confirmação de recebimento, portanto é um tráfego unidirecional.

2.2.6 Modulação de sinal VLC

No VLC a quantidade de dados transmitidos vai depender da intensidade da potência do LED. como resultado, é desejado que toda informação transmitida chegue a seu destino com baixa taxa erro de bits de modo mais eficiente possível (CHOWDHURY; KATZ, 2014). Ao projetar uma modulação no VLC deve-se levar em conta a dimerização e cintilação, pois são fatores que influenciam diretamente no comportamento de propagação da luz (RAJAGOPAL; ROBERTS; LIM, 2012).

O controle da dimerização tem um papel importante, pois tentar criar um mecanismo que vise balancear o consumo do LED sem que haja prejuízo à comunicação de dados. Enquanto que as cintilações se referem às flutuações proveniente do brilho da luz e podem alterar causar alterações fisiológicas, desconforto visual, ao ser humano. Para que isso não aconteça é necessário que mudanças no brilho sejam ajustadas dentro de um intervalo de tempo máximo de cintilação. Frequência de oscilações inferior a 200 Hz já é considerada problemáticas aos olhos humanos. Portanto, as técnicas de modulação devem considerar o suporte a oscilação de modo a não interferir na iluminação garantido altas taxas de transmissão de dados (NTOGARI et al., 2010; LEE; PARK, 2011).

Existem alguns métodos de modulação dos dados que possibilitam trabalhar no espectro de luz visível. dentre esses métodos estão: *on-off keying* (OOK), pulse width modulation (PWM), pulse position modulation (PPM), variable pulse position modulation (VPPM), color shift keying (CSK), and orthogonal frequency division multiplexing

(OFDM)(IEEE-802.15.7, 2011; CHO et al., 2011; CHOI et al., 2010). A Tabela 1 exibe a modulação e suas respectivas características.

Tabela 1 – Tabela Modulações VLC

Modulação	Características
OOK	Esta modulação trabalha de forma binária, isto é o bit '1' (on) representa um pulso óptico enquanto o bit '0'(off) significa a ausência de pulso.
PWM	Nesta modulação codifica-se digitalmente o sinal analógico e um pulso de sinal. Nesse caso, o sinal é codificado durante o período de transmissão do pulso; É possível transmitir mais de um bit de dados em um pulso mais longo que o OOK.
PPM	No PPM a informação é representada nas posições dos pulsos dentro de limites fixo de frames; Se comparado com OOK possui maior largura de banda e eficiência de energia.
VPPM	Esta modulação é semelhante ao PPM, no entanto leva em consideração a dimerização da luz e permite a utilização do duty cycle, variável responsável por gerenciar a largura do pulso para obter o desvanecimento da luz ideal; Não altera a amplitude do pulso; VPPM combina 2-PPM com PWM para um controle de dimerização. Bits "1" e "0" em VPPM são distinguidos pela posição de um pulso, enquanto a largura do pulso é determinado pela dimerização da luz.
CSK	É o método de modulação usado para transmitir dados baseado na propriedade de cor da luz de uma fonte de luz multicolorida(RGB)

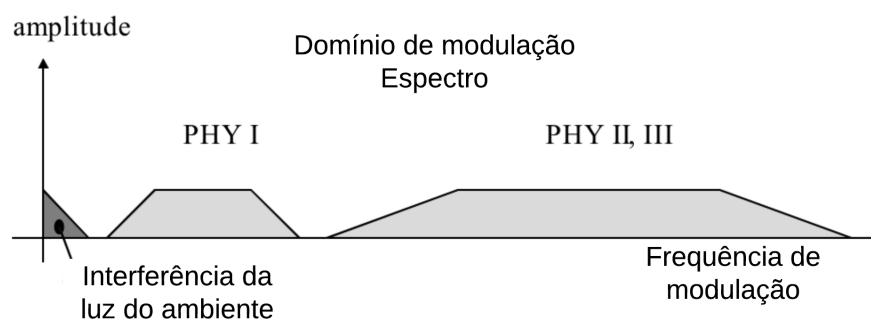
Fonte: CHOWDHURY (2016)

Essas são as modulações estabelecidas pela comunidade que investiga estudos e alternativas e métodos de comunicação. Existem muitos trabalhos que utilizam as modulações OFDM e OFDMA na transmissão VLC, essas modulações serão abordadas mais à frente na subseção LTE.

O IEEE-802.15.7 (2011) definiu três camadas físicas (PHY) e suas respectivas técnicas de modulação de acordo com as aplicações utilizadas. O PHY I destina-se ao uso externo com aplicativos de taxa de dados baixa. Este modo usa modulação OOK e o VPPM com taxas de dados entre dezenas e centenas de Kbps. O PHY II destina-se ao uso interno com aplicações de taxa de dados moderada. Este modo também usa o OOK e o VPPM com taxas de dados nas dezenas de Mbps. Em PHY III, o método de modulação CSK é usado para transmitir dados através da propriedade de cor da luz de uma fonte de

luz multicolorida. A Figura 10 mostra a interoperabilidade e coexistência entre os tipos PHY definidos.

Figura 10 – separação entre o tipos PHY no domínio das modulações



Fonte: IEEE-802.15.7 (2011)

Diante das várias opções de topologia e modulações, o VLC apresenta diversas características vantajosas, tais como alta largura de banda, baixo consumo de energia, uso de canais não licenciados, além de não oferecer riscos à saúde, o VLC se mostra como uma solução atraente para uso prático em diversos cenários de aplicação (KHAN, 2017). O Tabela 2 exhibe alguns desses cenários.

Tabela 2 – Cenários de Aplicação

Cenário de aplicação	Justificativas
Li-Fi	<p>O termo Li-Fi ou <i>Light Fidelity</i> - em alusão ao Wi-Fi (<i>Wireless Fidelity</i>) - foi usado pela primeira vez pelo físico alemão Harald Haas em 2011, em sua palestra no TED Global sobre VLC, e é caracterizado por se rum sistema de comunicação sem fio de luz visível totalmente conectado e de alta velocidade (SARKAR; AGARWAL; NATH, 2015; PURELIFI, 2018);</p> <p>Em áreas sensíveis à radiação eletromagnética (como em aeronaves) o Li-Fi pode ser uma solução bastante eficiente e também é uma boa solução para atender a crescente demanda da Internet das Coisas (IoT) (HAAS et al., 2016; COUNCIL, 2013).</p>
Vehicle to vehicle communication (V2V)	<p>As possíveis aplicações de segurança da comunicação veicular incluem aviso de colisão frontal, sensoriamento antes da colisão, luzes de freio eletrônicas de emergência, aviso de mudança de faixa, assistente de movimento de sinal de parada, assistente de viragem à esquerda, aviso de violação de sinal de trânsito e aviso de velocidade de curva (CONSORTIUM et al., 2005);</p> <p>Os aplicativos de alta prioridade exigem acessibilidade confiável com latência extremamente baixa. O que Torna a comunicação por luz visível altamente qualificada para tal propósito (KIM et al., 2012).</p>
Hospitais	<p>Por serem locais restritos quanto a propagação de ondas eletromagnéticas, é altamente recomendado o uso do VLC em hospitais por não interferir em equipamentos, tais como <i>scanner</i> de ressonância magnética baseados em radiofrequência (NG; CHUNG, 2012).</p>
Underwater communication	<p>Em virtude da deficiência das RFs em propagar em oceanos (alta condutividade), a VLC pode ser uma alternativa para rede de comunicação submarina (FARR et al., 2010).</p>

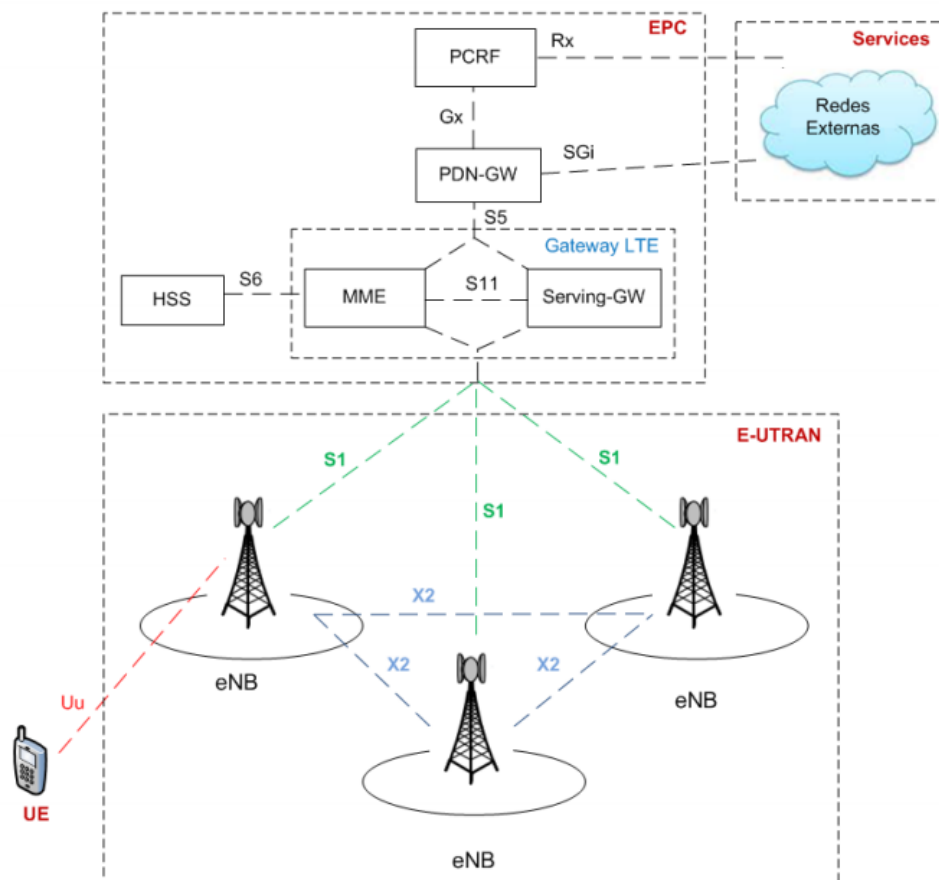
2.3 LTE

O LTE foi desenvolvida pela Third Generation Partnership Project (3GPP) e é uma tecnologia predominantemente usada em redes celulares, pois oferece uma vazão de dados consideravelmente mais alta que as demais tecnologias de redes móveis, com custo benefício satisfatório. No entanto, apesar disso está muito distante das taxas de tráfego de dados oferecidas pelas redes de comunicação por luz (EVOLUTION, 2014; TELECO, 2016). Nesta subseção será realizada uma revisão a respeito dos principais conceitos acerca do sistema LTE.

2.3.1 Arquitetura LTE

A arquitetura LTE permite a implantação de uma infraestrutura de serviços baseados em IP, voltada para comunicações móveis. A alta qualidade de serviço e a necessidade por conexões mais velozes são considerados fatores importantes para o desenvolvimento de conteúdos multimídia de alta qualidade e o grande desafio é manter a estabilidade em grande escala, com o mínimo de interrupções possíveis. Os principais objetivos do LTE são: maior capacidade de transmissão, menor latência e eficiência na entrega de dados (TELECO, 2016). A arquitetura LTE está dividida em quatro principais domínios de alto nível: User Equipment (UE), E-UTRAN, EPC e Serviços, conforme mostra Figura 11.

Figura 11 – Arquiteura LTE



Fonte: Adaptada de Toskala e Lunttila (2011)

2.3.1.1 E-UTRAN

A E-UTRAN é formada por um conglomerado de eNodeB e constituído por uma nova arquitetura que se difere das que vinham sendo utilizadas anteriormente (2G, 3G), como por exemplo a estação base de rádio *Enhanced NodeB* (eNodeB), que passa a realizar tarefas de processamento, antes realizados por camadas mais internas. A eNodeB também é responsável por gerenciar os *handovers*, que é a transição do usuário entre diferentes células de comunicação (*handover* horizontal), ou até mesmo quando o usuário troca de enlace de comunicação (*handover* vertical). LTE suporta somente o *hard handover*, ou seja, apenas uma única célula irá se comunicar com o móvel em um mesmo momento. A eNodeB é conectada com o a porta de comunicação através da interface baseada em IP. No LTE a eNodeB é preparada para trabalhar com portas *Ethernet* de 100 Mbps e 1 Gbps (TELECO, 2016).

As principais funcionalidades da eNodeB são baseadas na qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) e na qualidade de experiência (QoE, *Quality of Experience*) oferecidos. A eNodeB é responsável pela modulação e demodulação dos sinais, bem como

pela codificação e decodificação do sinal de modo a efetuar a gestão dos recursos de rádio e manter controlada a interferência entre diferentes células. Também realiza o balanceamento de carga, garantindo QoS aos utilizadores sem perder o sincronismo com a eNodeB ativa. A mobilidade é possível graças a existência de medidas da qualidade do canal, bem como a existência de algoritmos de *handover* que determinam o momento em que o mesmo deve ser executado (ALMEIDA, 2013).

2.3.1.2 EPC

O *Evolved Packet Core* (EPC) é o núcleo da rede LTE o qual é dividido em cinco elementos fundamentais: *Serving Gateway* (Serving-GW), *Mobility Management Entity* (MME), *Packet Data Network Gateway* (PDN-GW), *Policy and Charging Rules Function* (PCRF) e o *Home Subscriber Server* (HSS). O Tabela 3 apresentam as funcionalidades dos elementos constituintes do EPC (SESIA; BAKER; TOUFIK, 2011; TELECO, 2016)

Tabela 3 – Elementos constituintes do EPC

Elementos	Funcionalidades
Serving-GW	Ponto de referência para mobilidade; Bufferização de pacote de <i>downlink</i> ; Roteamento e encaminhamento de pacote; Monitoramento de VoIP (Voice over IP) e outros serviços de dados; Suporte GTP/PMIP.
MME	Responsável pela mobilidade do usuário (autenticação, estabelecimento de conexões, suporte ao handover); Responsável pela seleção do PDN-GW
PDN-GW	Filtragem dos pacotes; Gerência de tráfegos de dados; Alocação de endereço IP; Marcação de nível de transporte de pacotes; Serve como âncora de mobilidade para interoperabilidade com as tecnologias não-3GPP como o WLAN.
PCRF	Dá permissão ou rejeita pedidos de multimídia; Controla a atribuição de recursos de rádio; Fornece as regras de tarifação com base no fluxo de serviços de dados.
HSS	Banco de dados de registro do usuário. Executa funções equivalentes às do HLR, AuC e EIR definidos nos releases anteriores.

Fonte: Teleco (2016)

2.3.2 Características LTE

A flexibilidade espectral no sistemas LTE permite que seja implantado conforme as necessidades de banda. Essa alocação pode operar com larguras de banda de : 4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz (CORNELIO, 2011; GSA, 2017). As faixas de frequência utilizadas são 700, 800, 850, 1500, 1700, 1800, 1900, 2100, 2300, 2500, 2600 MHz e dentre essas mencionadas, as faixas de 700 e 800 MHz são as que garantem melhor desempenho por serem as frequências mais baixas . Em setembro de 2014, a Anatel licitou a faixa de frequência de 700 MHz para a implantação de 4G, sendo liberada com o fim da transição da TV Aberta analógica para a TV aberta digital. A Tabela 4 abaixo traz alguns parâmetros de configuração do LTE e seu respectivos benefícios:

Tabela 4 – Alguns Parâmetros do LTE

Parâmetros	Benefícios
Espectro: 20 MHz. Downlink: 100Mbps. Uplink: 50 Mbps.	Suporta interatividade em tempo real e aplicação ricas em multimidia
Plano de controle (inativo para ativo): <100ms. plano de utilizador: <5ms. Latência do Utilizador: <10ms.	Suporta web, FTP, video streaming, VoIP e jogos online
Mobilidade.	Suporta passagem para outras tecnologias; Suporta velocidades até 350 km/h, no entanto é focada em velocidades mais baixas.
Qos otimizada.	São criados mecanismos que garantem diferentes tráfegos

Fonte: RODRIGUES (2012)

Toda essa flexibilidade fazem do LTE uma ótima escolha para um cenário dinâmico. A transmissão do sinal, tanto no uplink com no downlink, segue uma padronização de modulação que objetiva atender um grande número de usuários móveis com baixo custo computacional e financeiro, garantindo a qualidade de conexão do usuário, tornando-a estável com o mínimo de oscilações.

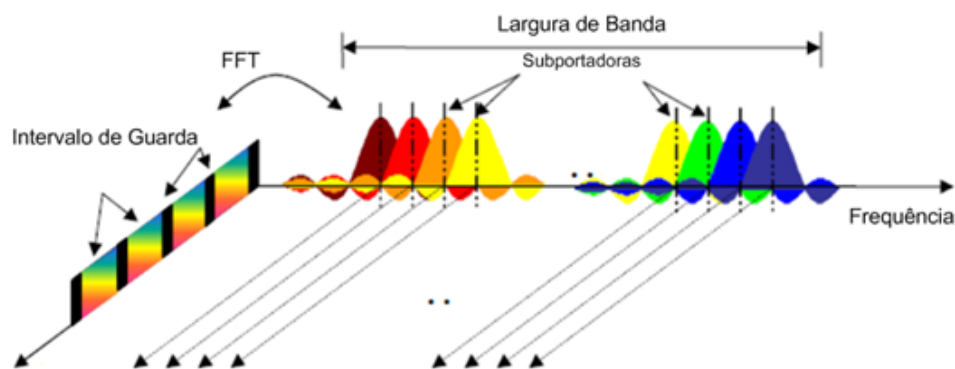
2.3.3 Modelo de Transmissão LTE

Para acessos múltiplos na camada física o LTE usa o OFDMA e OFDM para downlink enquanto que para o uplink é utilizado o SC-FDMA, SC-FDM.

2.3.3.1 OFDM/MA

O *Orthogonal frequency-division Multiplexing/Multiple Access* (OFDM/MA) é uma técnica de multiplexação digital que divide a largura de banda disponível em diversas subportadoras, que são dinamicamente alocadas à múltiplos usuários tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, daí o conceito de ortogonalidade. As subportadoras não se sobrepõem na frequência, dessa forma não interferem umas com as outras. No OFDM é introduzido um tempo de guarda a cada símbolo de modo a compensar o atraso da propagação do canal, diminuindo a interferência entre símbolos conforme mostrado na Figura 12. No OFDM é introduzido um tempo de guarda a cada símbolo de modo a compensar o atraso da propagação do canal, diminuindo a interferência entre símbolos. As vantagens de se utilizar essa modulação está no paralelismo de subportadoras de taxas baixas, já que garante maior resistência a condições ruins do meio, como atenuação de altas frequências, interferência inter-símbolo, interferência causada por múltiplos caminho (TOSKALA; LUNTTILA, 2011).

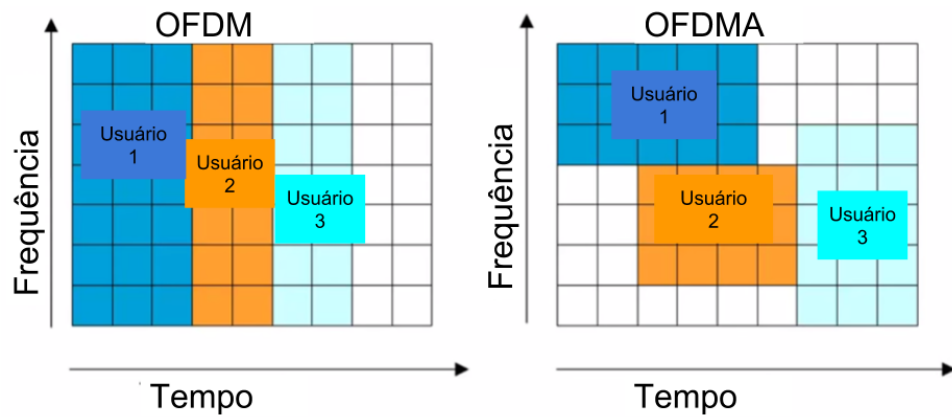
Figura 12 – Estrutura de modulação OFDM



Fonte: Kakadia, Yang e Gilgur (2017)

A diferença entre o OFDM e o OFDMA é que o primeiro utiliza a toda banda disponível para um único usuário enquanto o segundo compartilha a banda para diversos usuários simultaneamente. A Figura 13 exibir esse comportamento da banda.

Figura 13 – Diferença entre o OFDM e o OFDMA



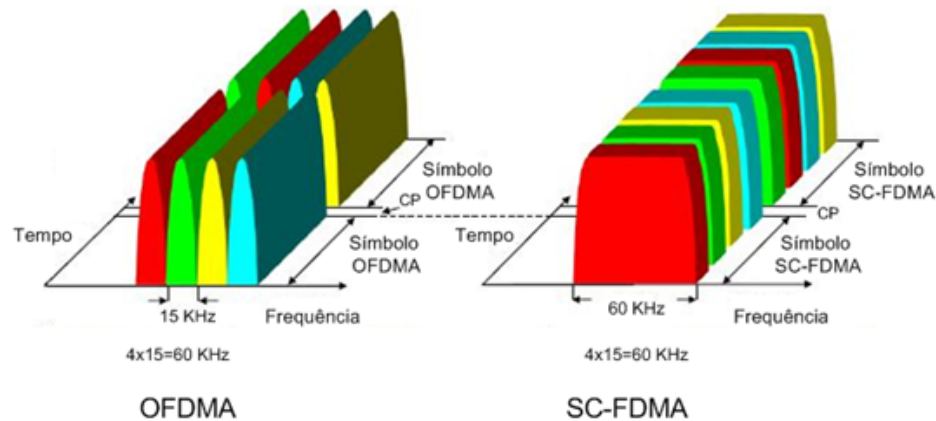
Fonte: Evolution (2014)

2.3.3.2 SC-FDM/MA

Single Carrier Frequency Division Multiplexing/Multiple Access (SC-FDM/MA) é utilizado no sentido dispositivo móvel para eNodeB (*uplink*). Sua lógica de gerenciamento é semelhante ao OFDMA, no entanto se diferem pois apresentam flutuações de potência que resultam em um elevado *Peak to Average Ratio Power* (PARP). O PARP é a relação entre a potência média e a potência de pico do sinal. Devido ao alto nível de PARP é necessária a utilização de amplificadores de altas potências, tornando inviável para os terminais móveis (TELECO, 2016).

O SC-FDMA resolve esse problema fazendo com que um símbolo seja transmitido por todas as subportadoras, o que reduz o consumo de potência em até quatro vezes (WIMAX, 2011). Assim, o SC-FDMA é utilizado devido à similaridade com OFDMA, porém com seus benefícios nos níveis de PARP, tais como a redução de consumo de bateria do móvel e melhoria na cobertura e desempenho na borda das células (ALMEIDA, 2013). A Figura kkkk mostra um breve paralelo entre OFDMA e o SC-FDMA.

Figura 14 – OFDMA x SC-FDMA



Fonte: knowledge (2018)

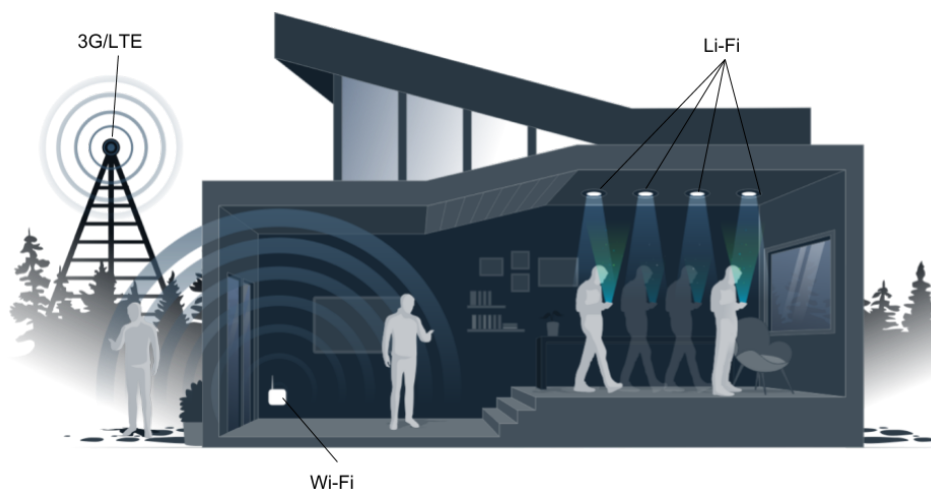
2.4 Offloading

O offloading de dados móveis é geralmente utilizado quando deseja-se reduzir a quantidade de dados trafegados na banda e por conseguinte liberar disponibilidade de acesso a outros usuários. Também é usado em outra situação, quando em um determinado lugar a recepção de sinal da operadora de celular esteja ruim, permitindo que o usuário tenha acesso a outras redes de comunicação como o Wi-Fi e o Li-Fi (LI et al., 2016c; CHEN et al., 2016a).

O surgimento dos cenários híbridos, trouxe a oportunidade de juntar uma ou mais tecnologias de comunicação para extrair vantagens particulares de cada tecnologia. Por exemplo, em ambiente composto APs VLC dando suporte ao usuário LTE. Podemos extrair então os benefícios da primeira tecnologia que são o seu baixo custo de implantação e sua alta eficiência, tanto energética quanto espectral (SHAABAN; FARUQUE, 2017). O LTE por sua vez é uma tecnologia já consolidada, e suas características de propagação possibilita transpor as limitações do VLC, como a capacidade de atravessar objetos opacos (IEEE-802.15.7, 2011; KASHEF et al., 2016). A partir dessa característica, o modelo híbrido traz as vantagens de cada tecnologia que são importantes quando relacionados a fatores econômico e qualidade de serviço (QoS).

A Figura 15 mostra a composição conceitual de um cenário híbrido móvel constituído por três tecnologias de acesso (3g-Lte, Wi-Fi e Li-Fi) dando suporte a vazão de dados para os usuários no ambiente residencial.

Figura 15 – modelo conceitual de cenário híbrido móvel



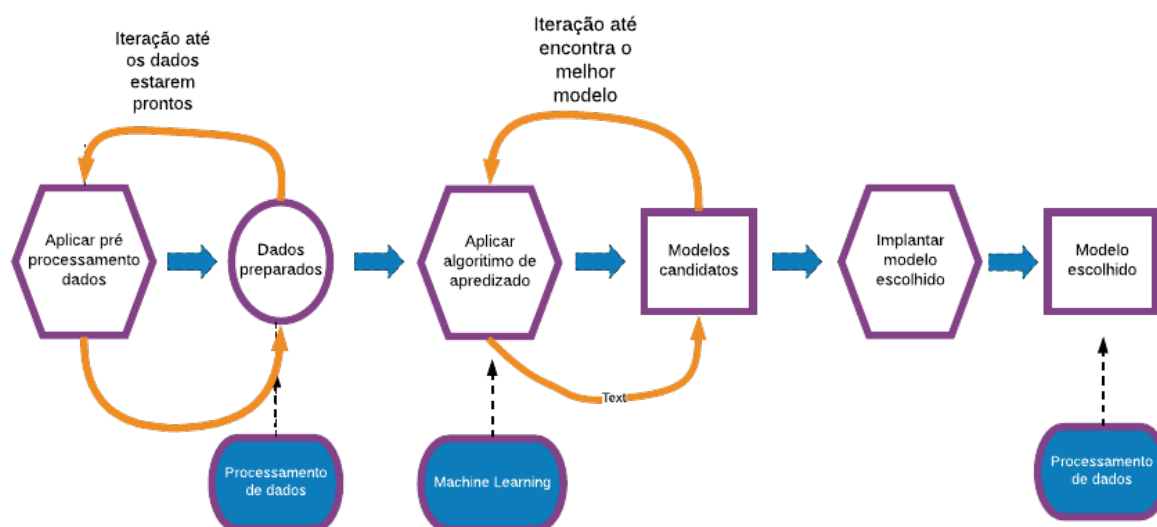
Fonte: purelifi (2018)

2.5 Machine Learning

O Machine Learning (ML) pode ser entendido como um subgrupo de inteligência Artificial (IA). É constituída com base nos conceitos dos métodos estocásticos, que possibilita analisar uma grande quantidade de dados e a partir disso, determinar ações e predições relacionados a alguma área do conhecimento. A sua principal característica é que as rotinas são autoconfiguráveis, ou seja, o próprio sistema tem a habilidade de aprender com a análise de dados e executar tarefa com uma precisão cada vez maior (SHALEV-SHWARTZ; BEN-DAVID, 2014).

A Figura 16 exibe um fluxograma genérico de *Machine Learning* em que é possível notar vários estágios até a concepção do modelo final. Primeiro é realizado um pré processamento dos dados para encontrar possíveis falhas que possam comprometer futuramente a precisão dos resultados, em seguida é aplicada uma técnica de *Machine Learning* responsável por identificar padrões nos dados que mapeiam os atributos de dados de entrada para encontrar o modelo candidato que posteriormente será responsável pelo processamento de dados que dará origem aos resultados finais.

Figura 16 – Modelo conceitual de cenário híbrido móvel



Fonte: Folter (2018)

Existem diversas técnicas de machine learning. Elas podem ser divididas em grupos relacionados ao tipo de aprendizado. O Tabela 5 ilustra as técnicas de ML com suas respectivas descrições.

As técnicas de ML são utilizadas em diversas áreas do conhecimentos como na medicina, negócios e redes de computadores. Kononenko (2001) fornece uma visão geral do desenvolvimento da análise inteligente de dados em medicina a partir de uma perspectiva de aprendizado de máquina. No âmbito dos negócios, o trabalho em Li e Zhan (2012) faz uso do ML para satisfazer as necessidades do cliente em tempo hábil, consideramos a automação do processo de gerenciamento de mudanças de mercado com perspectiva orientada ao negócio, de modo a reduzir o tempo de interrupção do serviço e o custo trazido por essas mudanças.

Em redes de computadores existem vários trabalhos que buscam otimizar algum tipo de custo que vise trazer alguma contribuição para a área de conhecimento. As redes sem fio de última geração estão evoluindo para sistemas muito complexos, devido aos requisitos de serviços muito diversificados, à heterogeneidade em aplicativos, dispositivos e redes. Os operadores de rede precisam fazer o melhor uso dos recursos disponíveis, por exemplo, energia, espectro e infra-estruturas (KIBRIA et al., 2018).

Em Syed et al. (2014) a técnica de aprendizado por reforço é utilizada para a seleção do melhor canal em uma rede *Cognitive Radio* (CR) de múltiplos saltos em um sistema de vigilância baseado em *streaming* de vídeo. Já em Koda et al. (2018) são aplicados os conceitos de aprendizado por reforço para o *Handover* em redes de comunicação que utilizam *millimeter-wave* (mmWave) usando informações de movimento dos pedestres.

Tabela 5 – Técnicas de Machine Learning

Técnicas de ML	Descrição
Supervisionado	É utilizada quando se tem a ideia de que existe uma relação entre os dados de entrada e os de saída; Problemas de aprendizagem supervisionados são classificados em problemas de “regressão” e “classificação”.
Não supervisionado	Nesta técnica as saídas não são fornecidas, o algoritmo tenta identificar semelhanças entre as entradas para então encontrar um conjunto padrão entre elas; Abordagens comuns de aprendizagem não supervisionada incluem armazenamento em Cluster K-Médio, Hierárquico, e Mapas Auto-organizadores;
Aprendizado por reforço	É um meio termo entre o supervisionado e o não supervisionado; Essa técnica explora e experimenta diferentes possibilidades até encontrar um modelo de solução ótimo; Esse tipo de algoritmo faz com que agentes (um robô, por exemplo) aprendam uma política de ações para estados que maximizem a recompensa esperada.
Evolucionários	Os algoritmos evolucionários podem ser vistos como um processo de aprendizagem biológico no qual os organismos se adaptam para melhor suas taxas de sobrevivência e a chance de ter descendentes mais aptos ao ambiente. No término do processamento do algoritmo, teremos um score que determina o quão boa é a solução atual. Dentre essas técnicas evolucionária estão: algoritmo genético e o enxame de partícula.

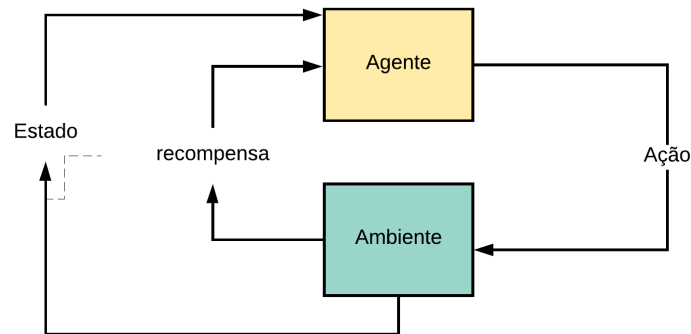
Fonte: Marsland (2011)

Por fim, o trabalho Fakhfakh e Hamouda (2017) utiliza o *Q-learning* como algoritmo para o gerenciamento do *offloading*.

2.5.0.1 *Q-learning*

O *Q-learning* é uma técnica de aprendizado por reforço criada por Watkins em 1989 que permite estabelecer autonomamente uma política de ações de maneira iterativa (Figura 17) e fornece aos agentes a capacidade de aprender e agir otimamente em domínio markoviano para eventualmente encontrar uma solução ótima para problemas finitos (WATKINS; DAYAN, 1992).

Figura 17 – Fluxograma do algoritmo baseado em aprendizado por reforço



Fonte: Autor

O algoritmo coleta os dados proveniente de um agente conforme uma política de otimização, ou seja, todas as ações tomadas vão depender do problema que pretende-se resolver. A cada estado, o agente interage com o ambiente podendo tomar ações dependendo do valor da recompensa atribuída. Uma matriz Q é criada e para considerar a qualidade de uma ação tomada em um determinado estado. O Cálculo de Q está exibido na Equação 9

$$Q = Q(s, a) + \alpha \left(r + \gamma \max_{a'} [Q(s', a') - Q(s, a)] \right) \quad (9)$$

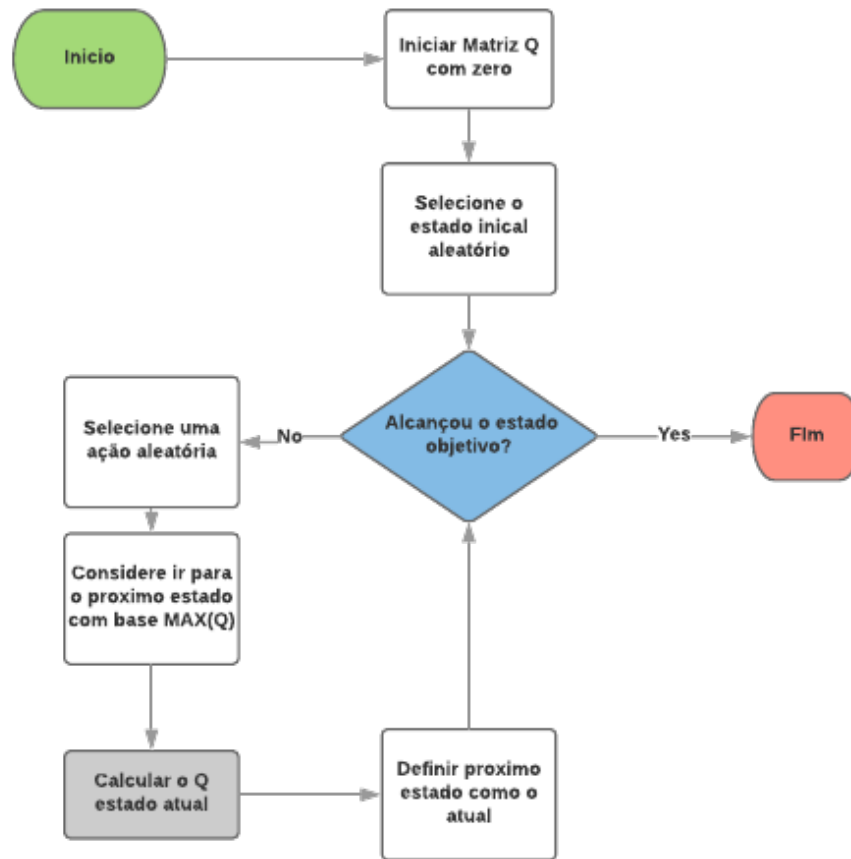
Onde s , a , s' e a' são respectivamente o estado atual, ação atua, estado próximo e ação próxima na matriz Q . E α , γ e r são a taxa de aprendizado, fator de desconto e a recompensa.

A função Q incorpora dois fatores importantes. O primeiro é uma taxa de aprendizado (α), que define quanto de um novo Q substituirá o antigo. Um valor de 0 significa que o agente não aprenderá nada (o que importa são as informações antigas), em que um valor de 1 significa que as informações recém-descobertas são as únicas que importam. O fator seguinte é denominado fator de desconto (γ) e define a importância de futuras recompensas. Um valor de 0 significa que apenas recompensas de curto prazo são levadas em consideração, em que um valor de 1 dá mais importância as recompensas de longo prazo.

A cada estado atual, o algoritmo armazena na matriz Q valores baseados nas suas futuras ações, esses podem ser maximizado ou minimizado isso vai depender do objetivo da otimização. Por exemplo, um agente deseja se deslocar para um determinado ponto, porém, para que chegue ao destino pretendido é necessário que percorra diversos pontos com menor consumo de energia possível em um conjunto de múltiplos caminhos. O algoritmo analisa as possibilidade baseado na recompensa, que neste caso é igual ao custo da energia consumida. Logo, para um resultado ótimo da solução é necessário que

haja uma minimização dos valores da matriz Q . A Figura 18 ilustra o comportamento do *Q-Learning* detalhadamente.

Figura 18 – Fluxograma *Q-learning*



Fonte: Autor

É possível que ao final da execução do *Q-learning* seja obtido um resultado ótimo e o desempenho deste é medido pelo número de iterações necessárias para a convergência de uma solução (MARSLAND, 2011).

2.5.1 Simulação

A simulação então representa, de certa forma, um meio termo entre a modelagem analítica e a aferição. Por meio desta abordagem, é possível fazer uso de diversos conceitos com uma certa rapidez, e assim verificar a interação entre variadas técnicas. Essas operações seriam muito custosas, se não impraticáveis, utilizando uma metodologia puramente teórica ou baseada em sistemas reais, que são muito caros e pouco flexíveis a mudanças (JAIN, 2015).

Assim, experimentos realizados utilizando simulação surgem como uma escolha bastante viável para a obtenção precisa de tais parâmetros. Simulações podem ser repetidas, são configuráveis e geralmente demandam menos tempo que execuções reais. Conforme descrito em (JAIN, 2015) e (HU; GORTON, 1997), diferentes estratégias de simulações são encontradas, tais como simulação, método de Monte Carlo, *trace-driven*, *discret-event* e *execution-driven*.

A precisão desejada é outra consideração importante, pois de modo geral, a modelagem analítica exige minimizações e suposições que podem levar a resultados pouco precisos. Simulações podem incorporar mais detalhes e exigem menos hipóteses que a modelagem analítica e, portanto, com mais frequência estão mais próximos da realidade (JAIN, 2015).

Para o estudo de caso apresentado nesta dissertação, utilizou-se a simulação discreta, pois considera somente os eventos onde há alteração do sistema, ou seja, o tempo decorrido entre alterações do estado do sistema não são relevantes para a obtenção dos resultados da simulação. Alguns autores a chamam de simulação de eventos discretos, exatamente para enfatizar que a discretização se refere apenas à ocorrência dos eventos ao longo do tempo.

2.6 Considerações finais

O objetivo deste capítulo foi demonstrar os principais elementos que foram necessários para o desenvolvimento deste trabalho, detalhando todos enlaces de comunicação utilizados e também foi abordado os conceitos de *Machine Learning* com em aprendizado por reforço e todos os itens teóricos que serviram de apoio para o desenvolvimento da estratégia de *offloading*.

3 Trabalhos correlatos

3.1 Considerações iniciais

Nesta seção serão abordados alguns estudos relacionados ao uso de tecnologias híbridas para a otimização de *offloading*, como também serão abordadas algumas metodologias de gerenciamento de tráfego de dados em função da qualidade de serviço. Este capítulo inicia com a apresentação de estudos que, como este, investigam os principais desafios envolvidos neste tipo de solução e traz algumas abordagens que se relacionam com o objetivo desta proposta de trabalho.

3.2 Correlatos

As soluções híbridas para *offloading* de tráfego de rede têm ganhado cada vez mais atenção e se mostram como uma tendência importante dentro do contexto das redes da próxima geração.

Fakhfakh e Hamouda (2017) apresenta uma solução de balanceamento de carga entre redes Wi-Fi e redes móveis celulares. A proposta utiliza o *Q-Learning* para aprender sobre as variáveis do ambiente. O usuário se desloca em linha reta em um ambiente outdoor, e durante o seu trajeto uma matriz de recompensa é preenchida com base nos pontos de conexão (APwifi + estação base). As variáveis coletadas são o SINR, atraso de *Handover*, distância e congestionamento de canal. Ou seja, aqueles APs que tiverem os melhores resultados nesses quesitos serão os mais prováveis eleitos à conexão. Ao final, um comparativo de resultados é feito entre o modelo ótimo (com a técnica *Q-Learning*) e um modelo baseado na potência de sinal recebido, a fim de comprovar a eficiência do modelo proposto.

No artigo de Ho, Park e Song (2018) é explanado o *offloading* na perspectiva do algoritmo *Game-Theoretic*. Esta heurística é responsável por gerir o escalonamento das tecnologias WIFI e LTE para um determinado serviço de *streaming* de vídeo. Neste trabalho, é transmitido um vídeo, simultaneamente, pelos dois enlaces de comunicação para mitigar a degradação dos dados por ambos os canais. As duas tecnologias concorrem pela entrega de qualidade serviço à um baixo custo computacional. Aquela que conseguir os melhores resultados em termos de vazão, atraso e *jitter* é eleita para a transmissão de dados. Foi utilizado o NS-3 como ferramenta de simulação e o cenário foi composto por 25 usuários alocados aleatoriamente, 2 estações base e 4 APs Wi-Fi.

No trabalho Li et al. (2016d) é proposto um mecanismo híbrido entre WiFi e LTE, no qual o objetivo é a otimização da vazão e a divisão justa da largura de banda entre os usuários da rede. O cenário é composto por várias microcélulas Wi-Fi dispostas dentro da área da macrocélula LTE., Ambas são configuradas com potência de transmissão de 40dBm e largura de banda de 20MHz. A estação base LTE está implantada no centro do cenário enquanto que os demais pontos de acesso Wi-Fi (AP, *Access Point*) estão dispostos aleatoriamente. As áreas de cobertura dos APs não se sobrepõem entre si, a fim de evitar interferência entre as microcélulas, que por sua vez são acessadas por um número máximo de usuários. O objetivo do trabalho é desafogar as células WiFi de modo a maximizar a taxa de transferência da rede LTE sem desconsiderar o nível de justiça entre os usuários residentes nas microcélulas.

Em Beyranvand et al. (2017) é mensurada a vazão máxima do sistema e a eficiência do *offloading* em relação ao desempenho das redes heterogêneas LTE-Advanced (LTE-A) aprimoradas com *fiber-wireless* (FiWi). A arquitetura é constituída por três subconjuntos de redes óticas: a primeira abrange vários usuários conectados via cabo; o segundo subconjunto estão conectados por uma estação base LTE; O terceiro subconjunto é equipado com pontos de acesso Wi-Fi, que atuam como nós de retransmissão intermediários entre os pontos de acesso dentro da área cobertura. É utilizado um algoritmo desenvolvido pelos autores que faz o roteamento otimizado que tem o objetivo de minimizar a sobrecarga de dados, descentralizando os usuários dos pontos de acesso densamente povoados baseando-se em estatísticas provenientes da própria rede. Para a simulação foi utilizada a ferramenta OMNeT++, onde a estação foi configurada com largura de banda de 20 MHz e a taxa de dados média estipulada para as redes LTE, WiFi e ótica foram, respectivamente, 3.3 Mbps, 300 Mbps, 1Gbps.

No trabalho Chen et al. (2016b) o objetivo é alocar dinamicamente o usuário nas redes LTE e WiFi. A abordagem é baseada em três estratégias: na primeira, os usuários da rede WiFi são transferidos aleatoriamente para o sistema LTE sem qualquer restrição; Na segunda, o usuário com menor distância em relação ao AP WiFi tem maiores chances de conexão; Enquanto a terceira considera a informação do estado do canal (CSI, *Channel State Information*) para priorizar usuários com a maior qualidade de canal para estabelecer conexão. Finalmente, os autores fazem um comparativo entre os três métodos e revelam que o método por distância alcança melhores resultados em cenários de baixa complexidade enquanto que o baseado por CSI tem o melhor desempenho em cenários de maior complexidade. O trabalho considera apenas um AP WiFi e uma estação base.

Com relação a utilização da tecnologia VLC, alguns trabalhos serão apresentados a seguir como discussão da utilização desta tecnologia como alternativa para realizar balanceamento de carga.

O trabalho de Li et al. (2016b) utiliza conceitos de balanceamento de carga entre

tecnologias de acesso baseadas em luz visível e em radiofrequência. O trabalho aborda a criação de um algoritmo de distribuição de carga que leva em consideração a cobertura dos APs WiFi e seus vizinhos em detrimento do SINR que podem ser afetados tanto pelos ângulos $(0, 360)$ de inclinação dos dispositivos como também pela distância em relação ao AP Li-Fi. O autor limita em 4 ou 8 o número de usuários para cada AP VLC. O algoritmo considera as áreas de *overlap* entre os APs VLC como centro de interferência. A simulação acontece em um ambiente *indoor* de dimensões 18m x 18m x 3m, coberto por 18 APs VLC e uma estação Base LTE. O modelo de mobilidade dos usuários é aleatório. Ao final, um comparativo dos resultados é feito entre o modelo proposto e um modelo baseado na potência do sinal recebido de modo a comprovar a eficiência do modelo otimizado.

Em Khallaf et al. (2017) é abordado a eficiência do *offloading* quando utilizado a VLC como alternativa para desvio de tráfego na rede. Nele é feito um acordo entre a tecnologia legada LTE e o promissor VLC. Durante a simulação, são levados em consideração o bloqueio do sinal e as características de cada tecnologia em função da variação dinâmica da densidade de usuários no ambiente. Mais especificamente, o dispositivo móvel verifica se há cobertura VLC, caso não haja, solicita o serviço a rede celular. Durante todo tráfego realizado na rede LTE, o algoritmo mantém uma rotina de busca por uma nova conexão AP VLC possivelmente disponível no ambiente. Os usuários são cobertos pela rede celular em tempo integral enquanto um algoritmo é responsável por coletar dados relacionados a qualidade de sinal e na maioria das vezes prioriza as células VLC para comunicação.

No trabalho de Wu e Haas (2017) é apresentado um balanceamento de carga entre as redes WiFi e o LiFi visando melhores taxas de vazão em ambiente *indoor*. Neste, é considerado um cômodo residencial de dimensões 5m x 5m x 3m e tanto os APs Li-Fi quanto Wi-Fi são configurados com uma largura de banda de 20MHz. A potência do LED é de 3W e a do AP WiFi é de 20dBm. A simulação é baseada no método de Monte Carlo, que é uma técnica matemática computadorizada que possibilita levar em conta análises quantitativas para a tomada de decisão. A heurística de *handover* vertical leva em consideração o bloqueio ou interrupção do sinal Li-Fi. Caso aconteça, o usuário é automaticamente alocado para a rede WiFi.

O trabalho de Zhang et al. (2015) propõe uma solução híbrida entre VLC e RF onde é levado em consideração aspectos como qualidade de sinal, sistema de controle e fornecimento de serviço. Neste estudo, os usuários são dispostos aleatoriamente no cenário. O *download* é feito por meio APs VLC, enquanto o *upload* acontece via AP Wi-Fi. A simulação acontece em um ambiente *indoor* onde é analisado a probabilidade de bloqueio e capacidade de transferência.

Em Wang, Wu e Haas (2016) propõe uma solução que apresenta um acordo entre as tecnologias RF e o LiFi. Nele, uma unidade central (UC) é responsável por gerenciar os *handovers* entre todos os pontos de acesso baseada em uma lógica *fuzzy* que considera

as seguintes variáveis: taxa de transferência, velocidade de deslocamento, SINR entre o usuário e os APs e a média da SINR durante o percurso. A simulação acontece em cenário *indoor*, composto por 36 LEDs (APs Li-Fi) e apenas um AP Wi-Fi colocado no centro. Os usuários caminham aleatoriamente com uma variação de velocidade entre 0 a 1.2 m.

Todos os trabalhos apresentados possuem contribuições na área desta dissertação e, em alguma medida, colaboraram para a construção desta dissertação. A Tabela 6 abaixo descreve a síntese dos principais trabalhos abordados neste capítulo.

Tabela 6 – Lacunas encontradas na literatura

Referências	Principais lacunas encontradas
(FAKHFAKH; HAMOUDA, 2017).	<ul style="list-style-type: none"> - Seu modelo de mobilidade não é randômico; - Não leva em consideração número de usuários; - Não leva em consideração a velocidade de deslocamento.
(HO; PARK; SONG, 2018).	<ul style="list-style-type: none"> - Considera um número baixo de usuários; - Utiliza o modelo de propagação Friis na conexão LTE.
(LI et al., 2016d).	<ul style="list-style-type: none"> - Não leva em consideração prioridade de conexão; - Não considera a velocidade como fator decisão.
(BEYRANVAND et al., 2017).	<ul style="list-style-type: none"> - Infraestrutura de alto custo - Não leva em consideração a mobilidade
(CHEN et al., 2016b).	<ul style="list-style-type: none"> - Não considera múltiplos Aps - Não considera a velocidade como fator decisão
(LI et al., 2016b).	<ul style="list-style-type: none"> - Limita quantidade de usuários por Ap; - Não considera a velocidade.
(KHALLAF et al., 2017).	<ul style="list-style-type: none"> - Seu modelo de mobilidade não é randômico; - Não leva em consideração número de usuários; - Não considera a velocidade como fator decisão; - Não leva em consideração prioridade de conexão. - Não considera a variação do ângulo do dispositivo móvel em relação a luz
(WU; HAAS, 2017; ZHANG et al., 2015).	<ul style="list-style-type: none"> - Não considera o Handover Horizontal; - Não considera a velocidade como fator decisão. - Não considera a variação do ângulo do dispositivo móvel em relação a luz
(WANG; WU; HAAS, 2016).	<ul style="list-style-type: none"> - Não considera a densidade de usuários no cenário - Não considera a variação do ângulo do dispositivo móvel em relação a luz

Fonte: O Autor

3.3 Considerações finais

Com este levantamento é possível apontar lacunas quanto às soluções híbridas para *offloading* de carga existentes na literatura atual, que podem ser utilizadas como objeto de estudo desta dissertação. Neste sentido, pode-se listar algumas que requerem mais atenção e que são contemplados ao longo deste trabalho: densidade de usuários, velocidade de deslocamento, qualidade de sinal, movimento de inclinação, *Handover* vertical e horizontal, mobilidade randômica e prioridade de conexão. Desta forma, com este trabalho espera-se oferecer uma estratégia ainda mais robusta e completa, em relação às abordagens mencionadas acima.

4 Estratégia de offloading aplicadas à tecnologias de comunicação VLC e LTE

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem o objetivo de descrever a metodologia de estudo proposto para avaliar a eficiência da estratégia de otimização de *offloading* incorporados pelas tecnologia de comunicação VLC e LTE, além disso, apresenta as métricas de avaliação de desempenho adotadas para validação da proposta e da utilização da plataforma de desenvolvimento das simulações.

4.2 Simulação

O ambiente de comunicações móveis é notoriamente difícil de tratar analiticamente, devido à sua aleatoriedade observada em diversos pontos cruciais do desempenho, tais como o tráfego, a mobilidade e a qualidade do canal (JAIN, 1990). Essas características são bastante influenciadas pela composição do ambiente em questão, como por exemplo, em cenários densamente povoados e com aplicações mais robustas que necessitam de um suporte de hardware mais eficiente, ao contrário de zonas com poucos usuários com aplicações exclusivas para troca/envio de mensagem de texto.

Neste sentido, optou-se por se utilizar a simulação como ferramenta de análise da estratégia proposta nesta dissertação, para isso foi utilizado duas ferramentas para realizar as simulações: Matlab[®] e NS-3. No Matlab[®] 2016 foi feita a modelagem do canal VLC e toda a heurística de *offloading*. Enquanto que o *Network simulator* geração 3 (NS3) foi utilizado para a simulação do tráfego de dados na rede LTE.

O NS-3 é uma ferramenta bastante utilizada na simulação de eventos discretos, sendo uma opção para quem deseja analisar o desempenho de uma solução, pelo fato de ser *Open Source* possui uma grande comunidade e oferece uma implementação básica de dispositivos LTE, incluindo modelos de propagação PHY e camadas MAC. Além disso, permite simular uma interface E-UTRAN em que um eNodeB e vários UEs podem se comunicar entre si usando canal *downlink* ou *uplink* compartilhado (NSNAM, 2018).

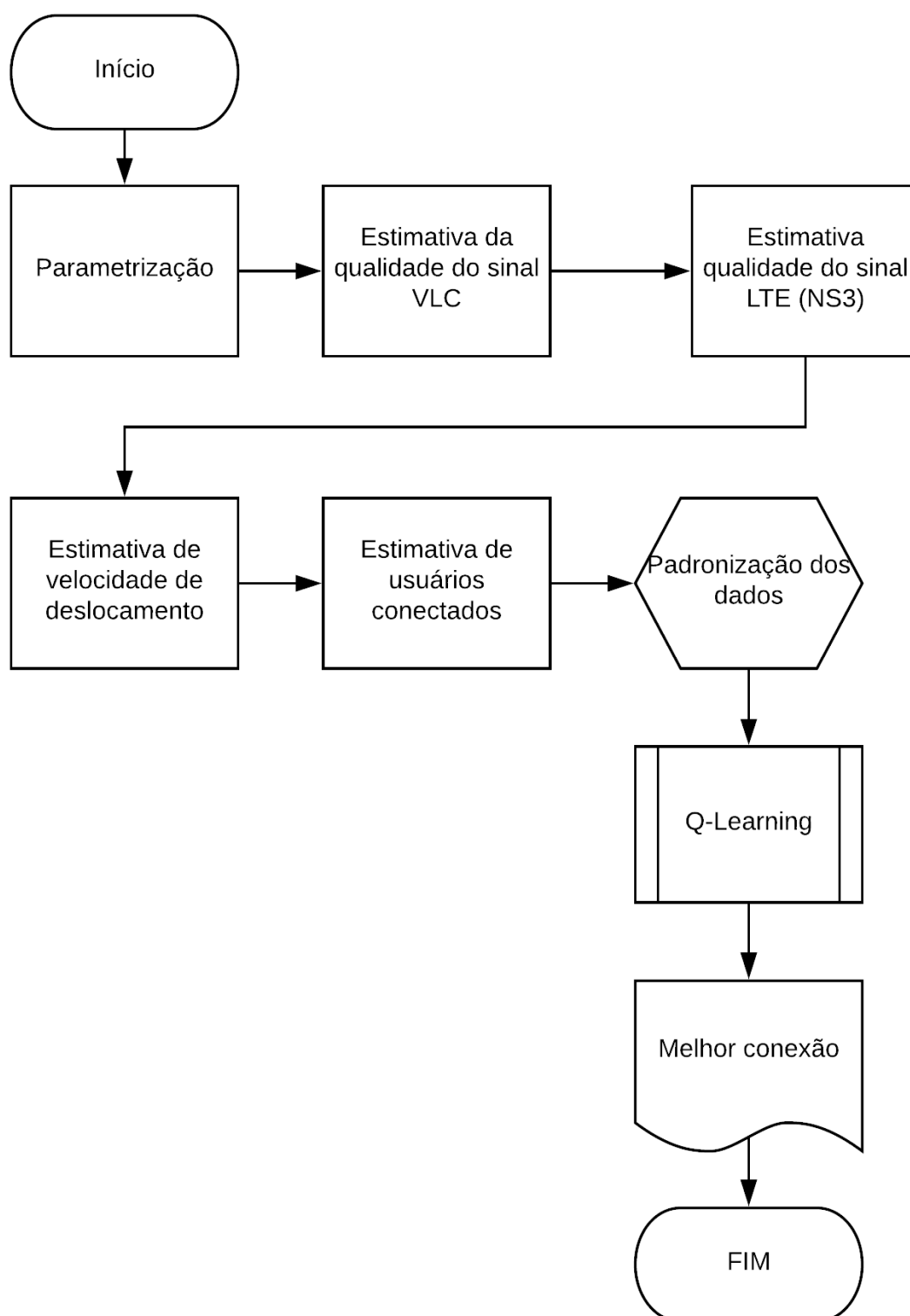
Apesar do Ns3 fornecer uma gama alta de possibilidade de simulação utilizando variados enlaces de comunicação, o suporte para VLC ainda é precário tendo pouco suporte ao desenvolvimento de tal tecnologia, por esse motivo escolheu-se a ferramenta de

desenvolvimento Matlab[®] para modelar todo o canal da VLC e também criar toda a programação por trás da lógica de *offloading* empregada.

O cenário é parametrizado com o número de usuário, número de Aps e dimensão para do ambiente. Após essas definições iniciais, a simulação inicia e então começam a ser estimado os valores de qualidade de sinal, tanto no VLC quanto no LTE, a velocidade do usuário e a densidade de usuários presente na célula de possível conexão. O código construído no Matlab[®] repassa as posições do usuário alvo para o NS3, por meio do arquivo de texto *Comma-separated values* (CSV), que é incubido de simular a comunicação LTE nesses pontos e em seguida retorna o valor SINR.

A mensuração da qualidade do sinal é realizada no NS3, cada ponto do cenários que o usuário alvo transita são coletados valores pertinentes a *Signal to Interference plus noise ratio* (SINR). Tendo em vista todos esses dados, começa o processo de preparação de dados que consiste em criar faixa de valores entre 0 e 1 para cada uma das variáveis do problema, depois de padronizado, entra o *Q-learning* com a responsabilidade de decidir a melhor conexão no dado momento. A Figura 19 ilustra exatamente o fluxograma do comportamento do algoritmo.

Figura 19 – Fluxograma da Heurística de otimização de *offloading*



Fonte: O Autor

4.3 Metodologia de otimização de *offloading* baseado nos princípios do *Q-learning*

Como foi explorado no Capítulo 2, o *Q-learning* é um modelo de aprendizado composto por um conjunto de estados e ações e tem como propósito encontrar a solução ótima de um determinado problema (WATKINS; DAYAN, 1992). O algoritmo trabalha com a estrutura de recebimento de recompensa, ou seja, um determinado agente observa seu estado atual e percebe as variáveis do ambiente, de modo a tomar a melhor decisão sobre sua próxima ação.

A proposta do *Q-learning* é encontrar a política ótima em decorrência da maximização do acumulado das recompensas adquirida durante o aprendizado do agente, que neste caso é usuário móvel que se desloca pelo cenário *indoor*. O agente observa todas as variáveis que influenciam no *offloading* e a partir disso, toma a melhor decisão com base nas ações possíveis. Durante esse processo de aprendizado, o agente recebe uma recompensa R em vigência das ações realizada para alcançar um próximo estado. Sucessivas iterações acontecem, de modo que cada resultado obtido por esse processo é contabilizado como aprendizado, por tanto responsável pela construção da política ótima para o sistema. Ao fim da computação do *Q-learning* é esperado encontrar as melhores conexões, que ofereçam maiores taxa de vazão de dados com menos interrupções de serviço para o usuário móvel.

Para este cenário em especial, o *Q-learning* considera as seguintes variáveis:

- **Agente**

- O agente (usuário alvo) é aquele que transita pelo cenário e perceber todas as variações do ambiente.

- **Estado**

- Os estados (E) representam a tecnologia de acesso atual do usuário em uma dada fração no tempo. $E^t = (\{P_k^t, k \in \{1, \dots, N\}\}, LAPs_p^t)$.

onde:

- * $P_k^t = \{P_1^t, \dots, P_N^t\}$, representa a posição do usuário alvo em um dado instante no tempo t . N é definido como o limite de posições P em um espaço discreto.
- * $LAPs_p^t = \{AP_1, \dots, AP_V\}$, representa a lista de APS (de 1 até V) detectado pelo usuário alvo em dada posição p em instante de tempo.

- **Ação**

- A ação $a_p^t = \{1, \dots, V_p\}$, representa uma possibilidade de *offloading* (APs VLC ou estação base LTE). p é dito como a posição em um dado instante de tempo, e quando $a_p^t = j$ significa dizer que o usuário decidiu fazer conexão com o $\{AP_j | 0 < j \leq V_p\}$ em dada posição p em um instante de tempo t .

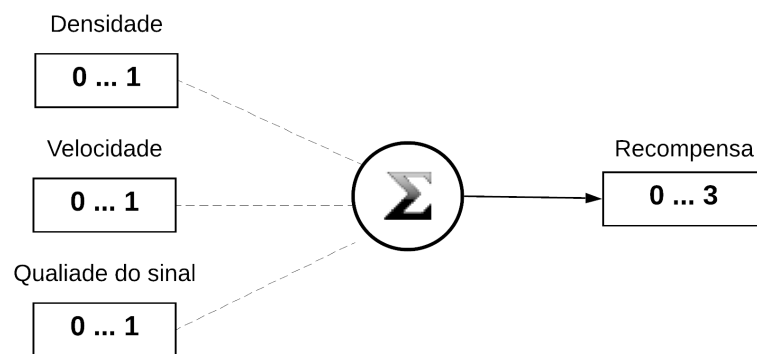
- **Recompensa**

- Para a construção da estrutura de recompensa do *Q-learning* baseado em *offloading*, considera-se as variáveis: densidade de usuários (*densF*), velocidade de deslocamento do usuário (*idxV*) e a qualidade de sinal (*SINRf*) que o usuário está percebendo naquele instante. Cada um desses atributos tem uma especificidade em relação ao enlace de comunicação adotado, VLC ou LTE. Ao final, tem-se a Equação 9 caracterizada como a recompensa (R) do sistema.

$$R = SINRF + densF + idxV \quad (9)$$

- A metodologia do cálculo da recompensa do *Q-learning* foi elaborada de modo a deixar as variáveis densidade, velocidade e qualidade de sinal no mesmo nível de importância, ou seja, os valores são padronizados entre 0 e 1 para posteriormente mensurar recompensa final para determinada ação. A Figura 20 exibiu o esquema da metodologia da recompensa.

Figura 20 – Metodologia do cálculo da recompensa do *Q-learning*



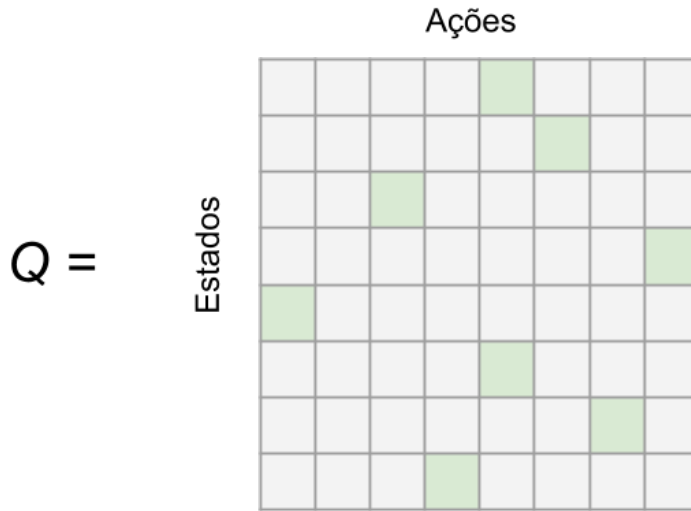
Fonte: O Autor

Nos próximos subcapítulos (5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3) serão abordado detalhadamente a metodologia responsável pela construção da estrutura de recompensa atribuída ao *Q-learning*.

Ao final do processamento do *Q-learning*, uma tabela Q (e,a) é gerada, e nela conterá as melhores conexões possíveis a se fazer. A Figura 21 ilustra uma tabela Q

(e,a) simplificada, onde os quadros preenchidos na cor verde significam as melhores ações (conexões) tomadas em cada estado.

Figura 21 – Resultado do aprendizado acumulado na tabela $Q(e,a)$



Fonte: O Autor

4.3.1 Densidade de usuários ($densF$)

Na estimativa da densidade de usuários no sistema, é levado em consideração o número de usuários distribuídos entre os APs VLC. Para isso toma-se como parâmetro a densidade geral do ambiente ($densG$), que é um cálculo que estima a quantidade de usuários distribuídos por Ap VLC. Outro ponto é a densidade de usuário por AP ($densLoc$), ou seja, como está distribuído o acesso em uma célula VLC. Nesse cálculo é considerado também uma prioridade arbitrária (Tabela 7) para cada usuário, isto é, uma importância definida para cada conexão na rede. Por fim, é possível mensurar o valor $densF$ por meio da seguinte Equação 12:

$$densG = \frac{N_{APs}}{\sum_1^n user} \quad (10)$$

Onde $densG$, N_{APs} , n são respectivamente a densidade geral do sistema, o número de APs e o número de usuários no sistema.

$$densLoc = \frac{1}{\sum_1^j user} \quad (11)$$

Onde $densLoc$ é a densidade do AP alvo e j é número de usuários na cobertura do

AP específico.

$$densF = 1 - \left[densG - \left(densLoc \times \frac{\sum_{i=1}^j p^i}{j} \right) \right] \quad (12)$$

Onde p representa o peso de conexão.

Tabela 7 – Prioridade de conexão dos usuários

Prioridade de conexão	Peso (p)
baixa	0.50
moderada	1
alta	1.5
muito alta	2

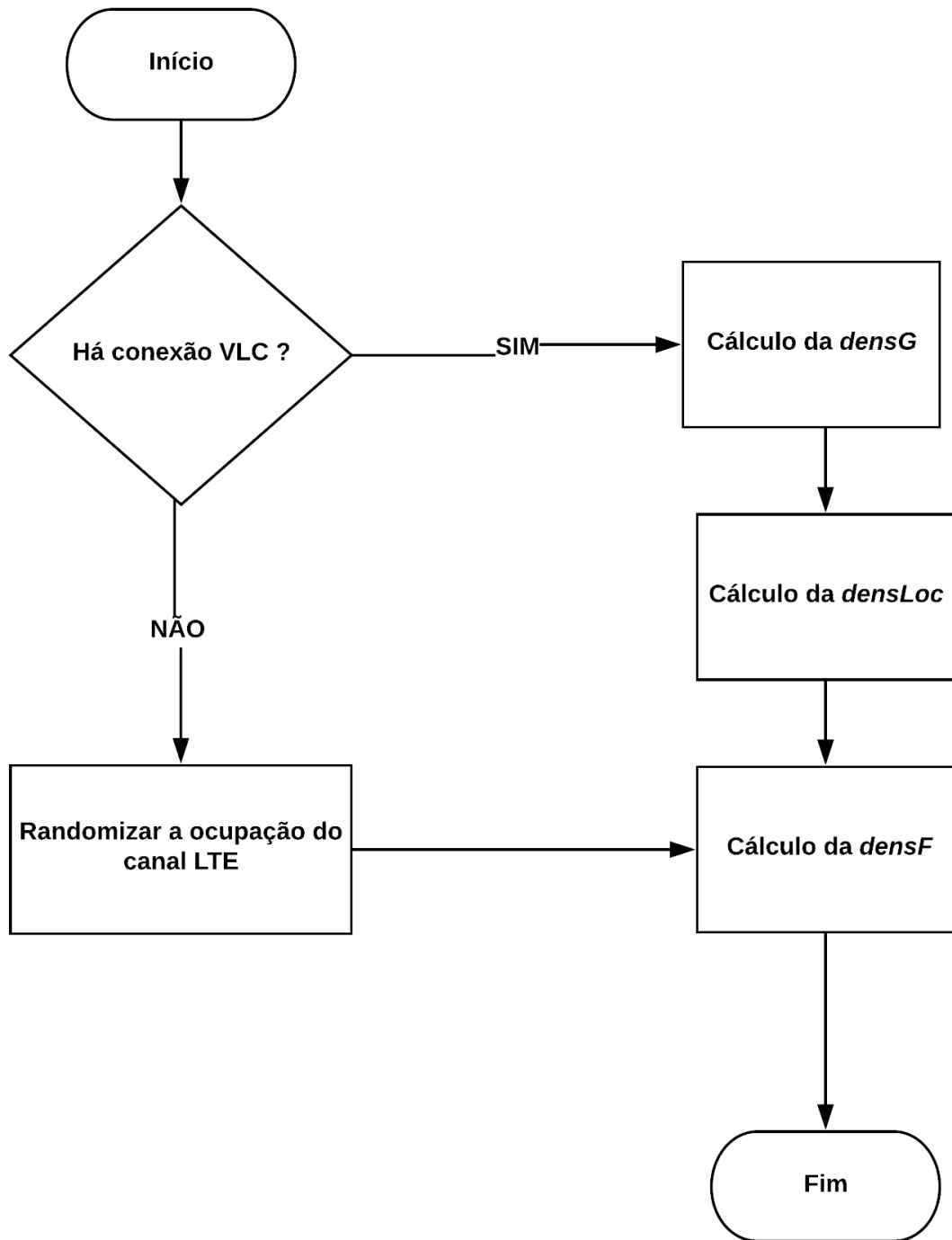
Fonte: O Autor

No LTE a densidade é dada por meio de um valor aleatório, que muda a cada instante de tempo com o objetivo de simbolizar a ocupação do canal. Seu valor varia entre 50% e 90% representado por $ocAl$, já que o objetivo é descongestionar as redes LTE por meio do VLC para melhorar a qualidade do serviço de conexão. A Equação 13 exibe o cálculo da $densF$ para o LTE.

$$densF = 1 - ocAl \quad (13)$$

A Figura 22 fluxograma do algoritmo densidade de usuários ilustra uma representação da estimativa de densidade para ambos os enlaces de comunicação

Figura 22 – Fluxograma do algoritmo densidade de usuários



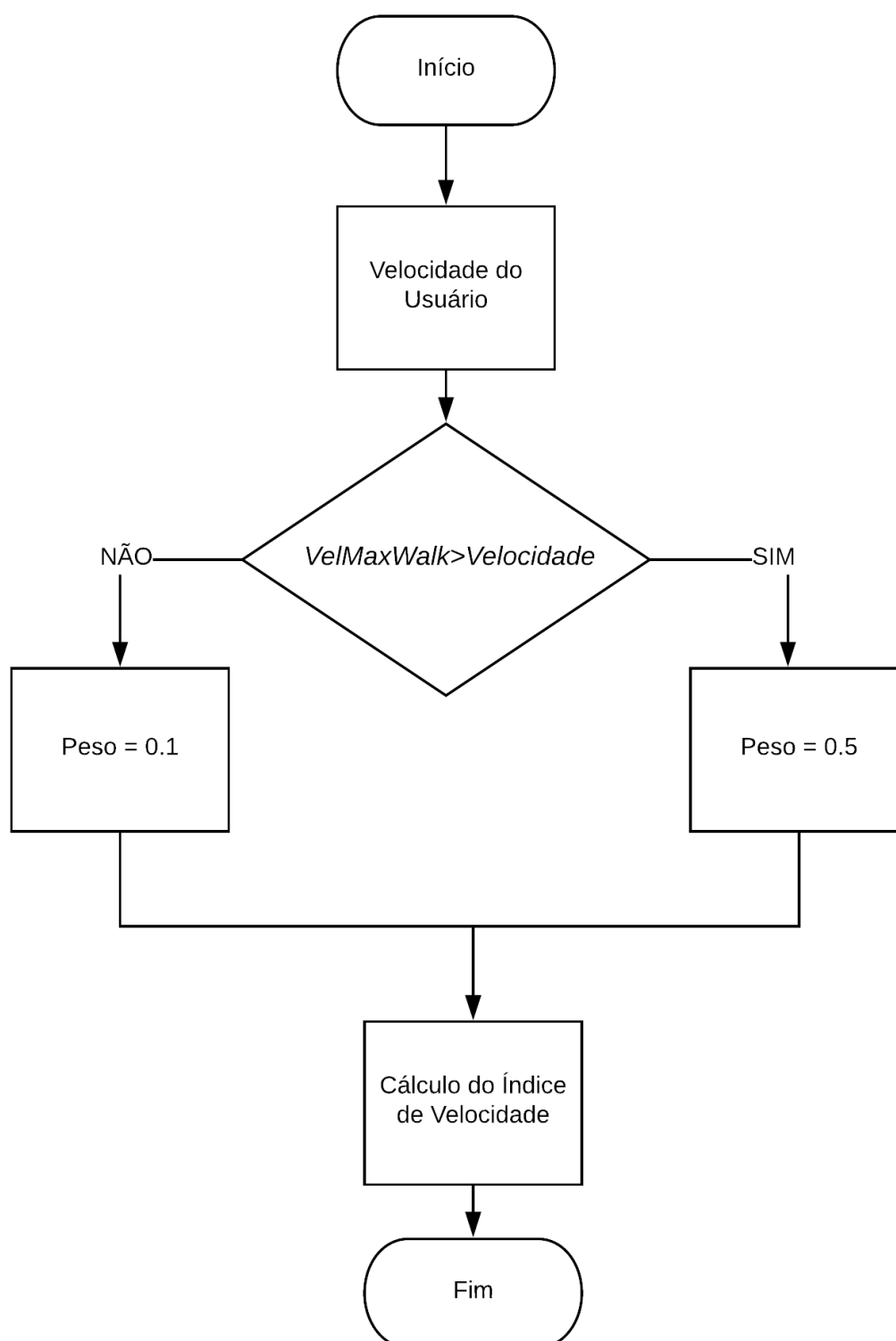
Fonte: O Autor

4.3.2 Velocidade de deslocamento do usuário

Quando analisado a velocidade de deslocamento do usuário, deve-se observar fatores como o aumento no número de *handovers*, já que usuários com alta velocidade

tendem a fazer sucessivas trocas de conexão com APs por percorrerem diferentes células de cobertura (BUI et al., 2016). Outros fatores importantes devem ser considerados como a variação do ângulo e do raio entre a fonte emissora e receptora, que influenciam diretamente na qualidade de canal e, por consequência, no QoS experimentado pelo usuário. No VLC essa variação é muito mais sensível quando comparada com as tecnologias por radiofrequência, por possuir um raio de cobertura inferior e também por ser mais sensível a bloqueios de sinal (IEEE-802.15.7, 2011). Em virtude dessas características, é considerado uma penalidade em relação ao aumento da velocidade quando ultrapassa o limite da velocidade de caminhada *VelMaxWalk* estipulado. A Figura 23 abaixo ilustra o fluxograma de como é tratada a penalidade no aumento da velocidade.

Figura 23 – Fluxograma do algoritmo índice de velocidade



Fonte: O Autor

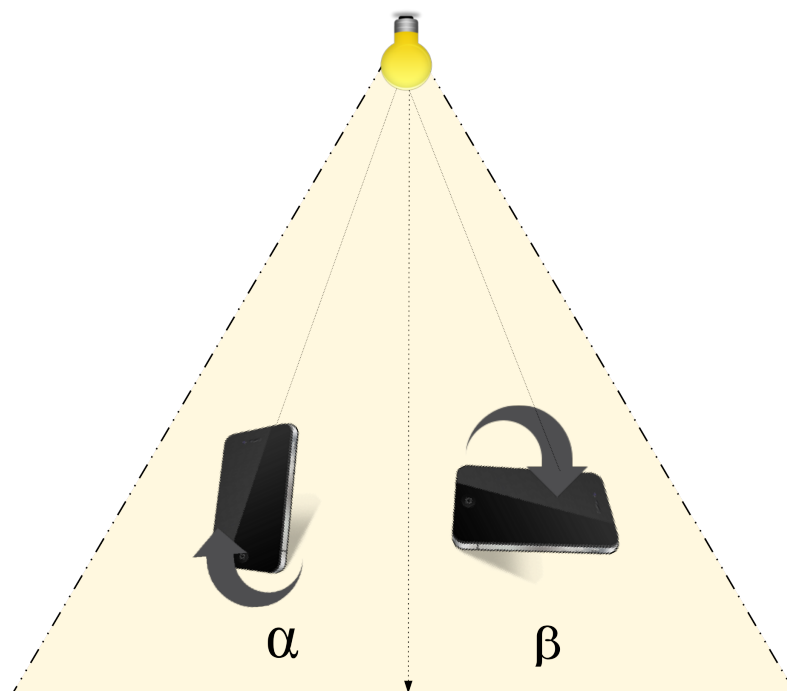
O cálculo do índice da velocidade ($idxV$) está descrito na Equação 13:

$$idxV = velocidade \times peso \quad (13)$$

4.3.3 Qualidade do sinal

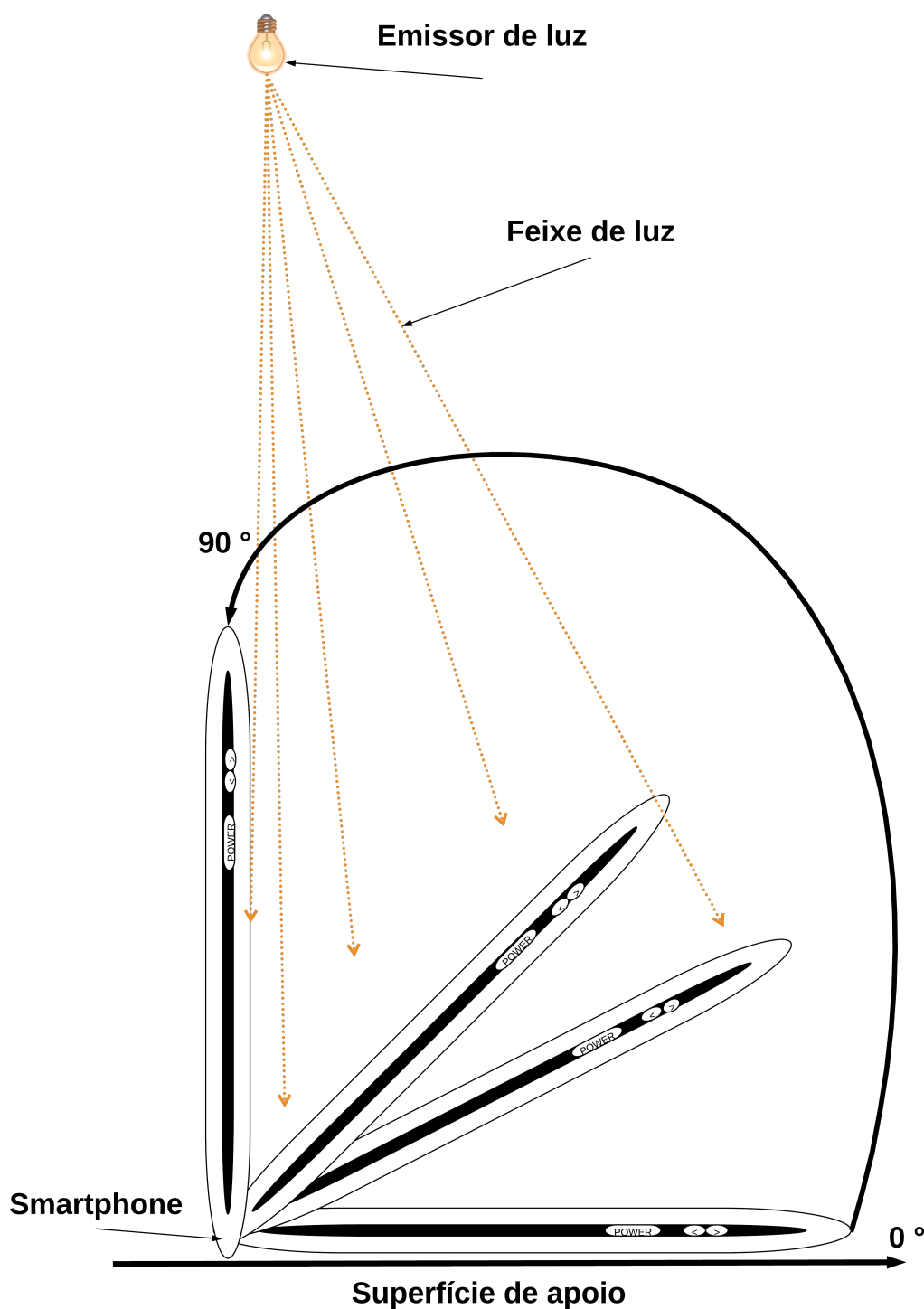
Para os APs VLC são considerados os ângulos de inclinação alfa (α) e beta (β), que representam a inclinação do *smartphone* (equipamento receptor) em relação ao plano de apoio, na vertical e na horizontal, respectivamente, como ilustra a Figura 24. Estes ângulos estão relacionados com o ângulo de incidência do emissor Li-Fi. Portanto, a potência do sinal recebido pelo dispositivo móvel depende de como o mesmo é carregado pelo usuário (SOLTANI et al., 2017). Quanto mais próximo os ângulos alfa (α) e beta (β) estiverem de 90 graus, maior será a degradação do sinal, isto porque o receptor estará paralelo ao feixe de luz. A Figura 25 ilustra esse comportamento.

Figura 24 – Imagem representativa do variação dos ângulos de inclinação α e β



Fonte: O Autor

Figura 25 – Inclinação do receptor VLC em relação aos feixes de luz



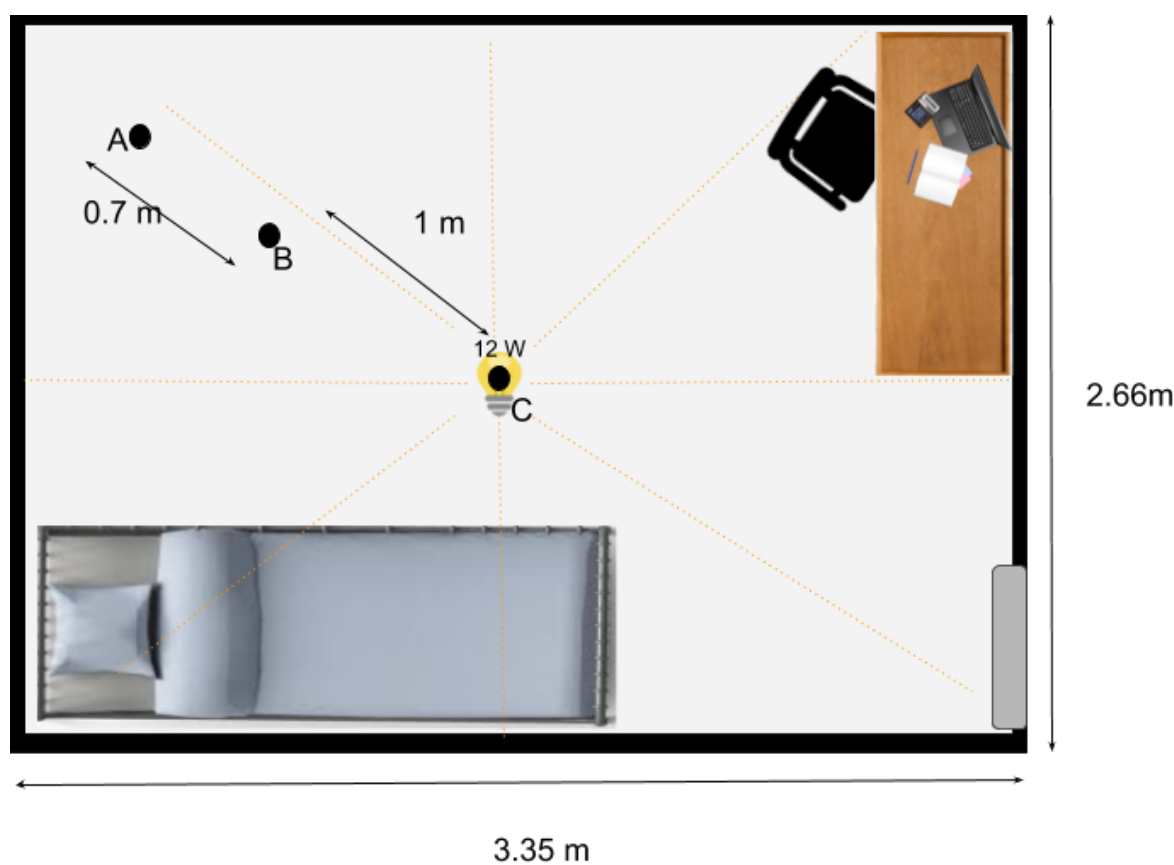
Fonte: O Autor

Para fins de comprovação, foi realizado uma campanha de medições de iluminação, cujo Lux (lx) é a unidade de medida no Sistema Internacional de Unidades (SI),

em um cômodo com dimensões de 3.35m (comprimento) x 2.66m (largura) x 3.1m (altura) iluminado por um LED de 12W de potência. O objetivo dessas medições foi verificar como é o comportamento da intensidade do sinal percebida pelo dispositivo móvel conforme a inclinação do mesmo. Foram definidos três pontos de coleta (A, B e C), conforme ilustrado na Figura 26, cada ponto foi medido variando o ângulo entre 0 à 90 graus em relação ao plano de apoio.

O dispositivo foi inclinado tanto na vertical como na horizontal. O aplicativo Lux¹ foi utilizado para calcular o lux recebido pelo dispositivo móvel. Nas medições foi utilizado um *smartphone* modelo Xiaomi A1 com sistema Android versão 8.1.

Figura 26 – Imagem representativa do ambiente de aferição



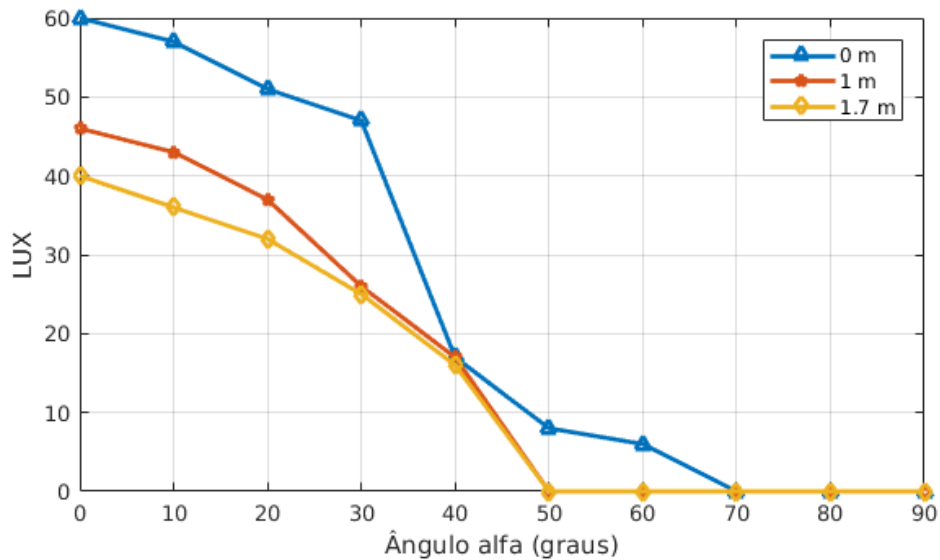
Fonte: O Autor

Vale ressaltar que o lux é uma unidade de medida referente a iluminância, que mede a incidência perpendicular de 1 lúmen em uma superfície de um metro quadrado. O lúmen é uma medida de fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz. Quanto menor for a quantidade lux em determinado espaço, menor vai ser a iluminação do ambiente, ou seja, maiores serão as chances de haver bloqueio do sinal em redes baseadas em VLC,

¹pode ser encontrado na Play Store e instalado em qualquer dispositivo Android <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vitocassisi.luxlite>

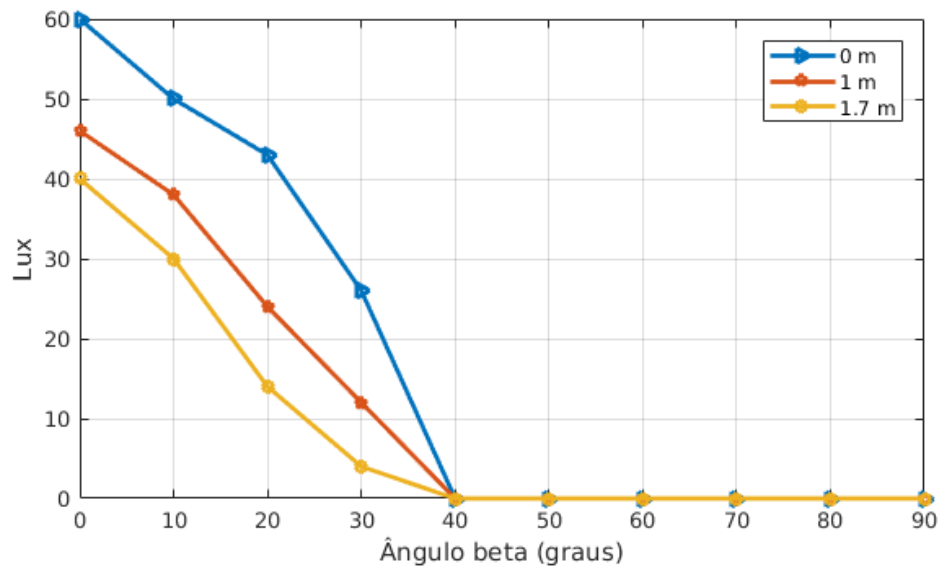
impedindo assim a comunicação de dados (WANG et al., 2017). As Figura 27 e Figura 28 exibem o gráfico de lux recebido, conforme a inclinação do dispositivo móvel.

Figura 27 – Aferição para o angulo α



Fonte: O Autor

Figura 28 – Aferição para o ângulo β



Fonte: O Autor

Com relação a alteração dos ângulos do dispositivo móvel, é possível perceber que os valores de lux decrescem à medida que os ângulos de inclinação se distanciam de 0 em relação ao plano de apoio. O angulo α a percepção do lux e reduzido a zero quando o angulo chega a 50 graus de inclinação para as distancia 1m e 1.7m equanto que para o.

Por apresentar um comportamento exponencial decrescente em relação ao aumento do ângulo com a superfície, foi utilizada a fórmula que calcula o (Equação 13) desenvolvida em (LI et al., 2016a), no entanto houve uma otimização, que neste caso, foi a inserção do ângulo beta na composição do cálculo do $SINR_f$. Isso difere das metodologias encontradas na literatura, pois garante maior precisão do sinal recebido pelo usuário. A Equação 14 descreve o cálculo do adaptado sinal recebido pelo dispositivo móvel quando conectado com ao Ap VLC.

$$R = SINR \times e^{-\alpha} \quad (13)$$

$$SINR_f = \frac{SINR \times e^{-\alpha} + SINR \times e^{-\beta}}{2} \quad (14)$$

Onde R , $SINR$ são respectivamente as o resultado do calculo proposto em Li et al. (2016a) e o *Signal-to-interference-plus-noise ratio*.

Para o cálculo do $SINR_f$ no LTE foram utilizados os resultados obtidos da simulação realizada no NS3, onde foi considerado variados fatores pertinente a esse enlace de comunicação, como por exemplo modelo de propagação (COST-231 Hata) do sinal.

4.4 Indicadores de Desempenho

Nesta seção, são descritas as principais métricas de avaliação utilizadas como indicadores de desempenho da estratégia de offloading[2], sendo:

Vazão de dados: esta métrica é utilizada para medir a capacidade de distribuição de banda, proveniente de uma tecnologia de comunicação, isto é, quantos bits por segundo é possível alcançar em determinada conexão de dados. A Equação 15 exhibe o cálculo.

$$V = \frac{LB}{Nu} \log_2(1 + SNIR); \quad (15)$$

Onde V é a vazão de dados e LB e Nu são respectivamente a largura de banda e o número de usuários concorrentes.

Probabilidade de Bloqueio: é utilizada para calcular algum tipo de interrupção de sinal com base na área de cobertura e número usuários solicitantes. A Equação 16 exhibe o cálculo da Probabilidade de bloqueio (VAVOULAS et al., 2015).

$$P_{det,f} = 1 - \left(1 - \frac{\pi R^2}{A}(1 - P_f)\right)^n \quad (16)$$

Onde R e A são respectivamente o raio e a área de cobertura do sinal. n é o número de usuários no sistema e P_f é probabilidade de falha do receptor devido a defeito de hardware ou vida útil do equipamento transmissor.

Análise de Convergência *Q-learning*: O teste de convergência consiste em investigar numericamente o comportamento do algoritmo. A seguinte estratégia descreve as etapas dessa análise:

- Execução do algoritmo *Q-learning*;
- Armazenamento dos pares estado-ação;
- Cálculo da média dos Q-valores de cada iteração;
- Observa-se os dados referentes à média dos Q-valores em busca de valor que mais se estabiliza;
- Determinar quantas iterações foram necessárias para encontrar o valor ótimo, ou seja, em qual iteração a média mais se estabilizou;

4.5 Considerações finais

Este capítulo teve como objetivo demonstrar toda a metodologia necessária para realizar a otimização de *offloading*, baseado em requisitos fundamentais para a garantia de qualidade de serviço. Para isso, fez-se uma explanação a respeito da simulação e de como as variáveis densidade de usuários no sistema, a velocidade de deslocamento e qualidade do sinal recebida influenciam nos ambientes móveis. Todas essas variáveis serviram de indicadores de recompensa para o *Q-learning*, possivelmente, retornar a melhor das soluções.

5 Capítulo: Estudo de caso e análise dos resultados

5.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem o objetivo de descrever o estudo de caso proposto para validar a eficiência da estratégia de *offloading* tal como analisar o desempenho por meio de um comparativo entre a solução baseada em *Q-learning* e outra baseada por RSS.

5.2 Cenário

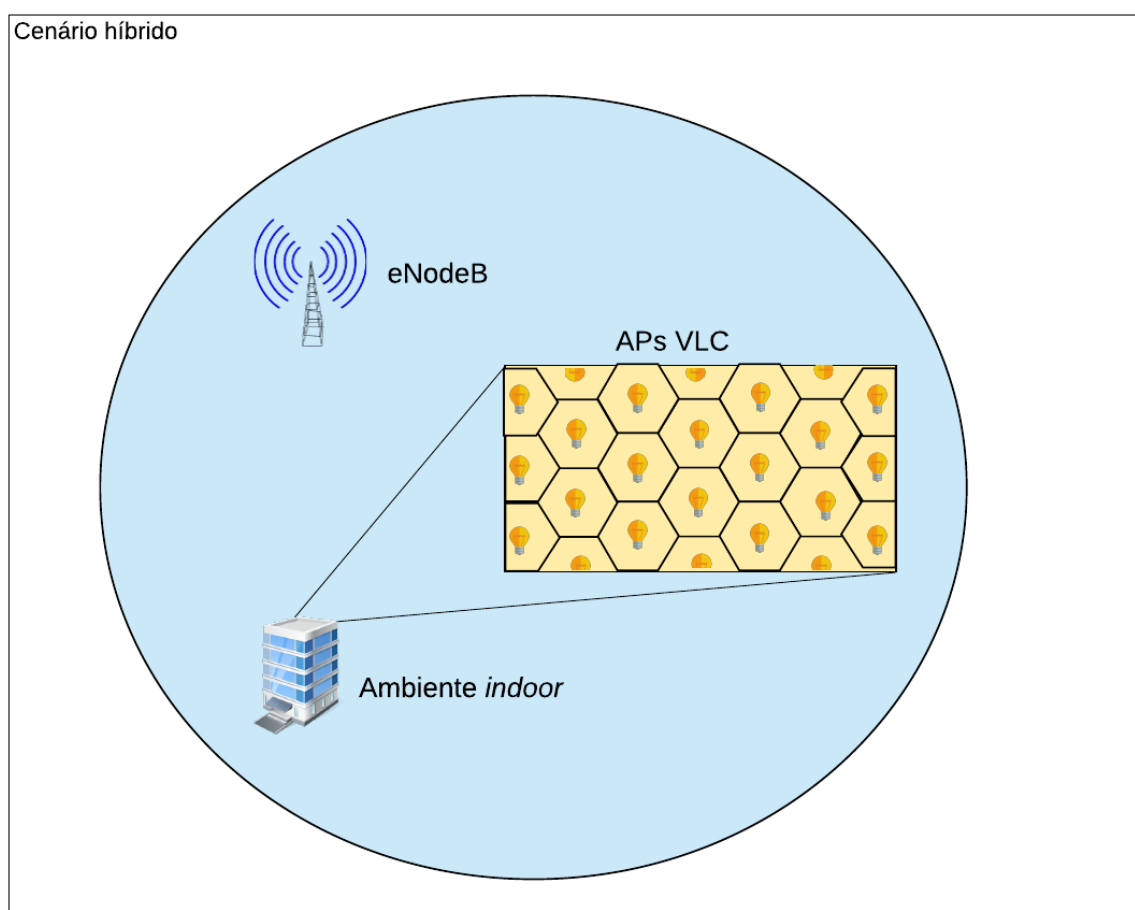
Para a realização do trabalho proposto, são necessário alguns dados relativos à configuração do cenário, como ilustra a Figura 29. O número de usuários, número de APs e todos os fatores pertinentes para o desenvolvimento da simulação estão descritos nas Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 8 – Parâmetros gerais

Parâmetros do Sistemas	Valor
Número de Usuários	50, 100, 150, 200, 250, 300 e 350
Tempo de simulação	100 segundos
Área indoor	20m (comprimento) x 9 m (largura) x 3.1m (altura)
Velocidade	0.8 - 1.2 ms
Taxa de aprendizado (α)	0.8
Fator de desconto (γ)	0.6

Fonte: O Autor

Figura 29 – Cenário proposto no estudo de caso



Fonte: O Autor

Tabela 9 – Parâmetros VLC

Parâmetros VLC	Valor
Altura da LED	3.1 m
Número de LEDs	40
Potência de transmissão	12 W
Largura de banda	20 MHz
Área física do fotodetector	1 cm
Filtro ganho óptico	1
Índice de refração	1.5
Responsividade do fotodetector	0.5 A/W
Corrente de fundo	5100 A
Fator de ruído 1	0.562
Fator de ruído 2	0.0868
Temperatura absoluta do circuito	295 K
Transcondutância do FET	30 ms
Fator de ruído do canal FET	1.5
Campo de capacitância por unidade área do fotodetector	112 pF/cm

Fonte:O Autor

Tabela 10 – Parâmetros LTE

Parâmetros LTE	valor
Número de eNodeB	1
Potência de transmissão	28 dBm
Altura da Antena	41 m
Modelo de Propagação	<i>COST-231</i> <i>Hata</i>
Largura de banda	20 MHz
Frequência (DL)	2500 MHz

Fonte: O Autor

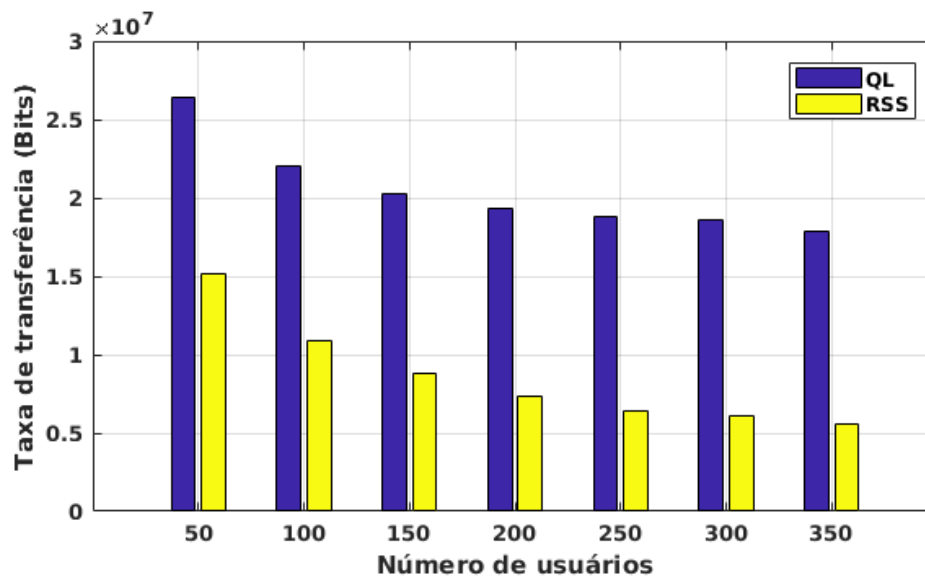
5.3 Análise dos resultados

Com o levantamento das configurações iniciais, a simulação então foi realizada. Foram executadas diversas instâncias de simulação. A repetição dos cenários ocorreu com mesma configuração, mesma duração e mesmos parâmetros de entrada, exceto pelo número de usuário e número de APs presentes no cenário, com semente de geração de números aleatórios diferente.

O tempo de simulação foi de aproximadamente 100 segundos, tempo este tido como suficiente para que o ambiente apresentasse um comportamento estável e os usuários de testes pudessem percorrer a trajetória estabelecida. No entanto, devido ao cenário de alta mobilidade proposto, as simulações demandaram um tempo computacional de 2 a 4 horas, isso porque o tempo aumentava conforme a inserção de usuários no sistema. Também foi considerado uma comparação entre o algoritmo *Q-learning* e o esquema *Received Strength Signal* (RSS), amplamente utilizado nas literaturas especializadas da área como (LI et al., 2016a; FAKHFAKH; HAMOUDA, 2017).

Na Figura 30 ilustrada a seguir, pode-se observar o gráfico que expressa uma visualização do comportamento da vazão do usuário alvo ao transitar pelo ambiente.

Figura 30 – Taxa de transferência máxima

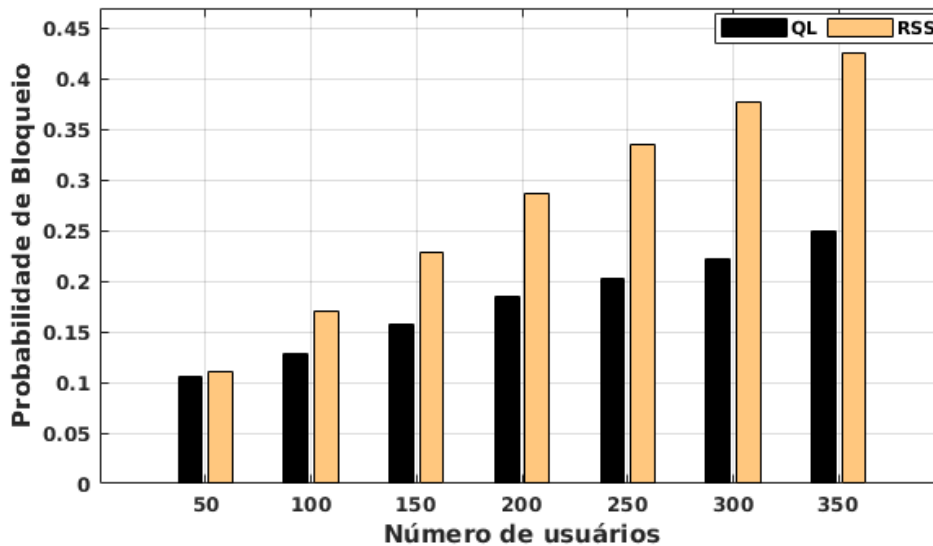


Fonte: O Autor

Conforme pode ser visualizado na Figura 30 o algoritmo proposto teve uma maior taxa de transferência e uma estabilidade superior quando o número de usuários aumenta, o que acarreta em maior QoS oferecido. Isso se dá já que o *Q-learning*, na sua metodologia de construção, considera não somente a potência do sinal recebido como também a densidade de usuários e a velocidade de deslocamento. Vale ressaltar que a metodologia proposta foi

comparada ao algoritmo RSS, como mostra a figura, que se baseia somente na potência de sinal recebido para realizar a escolha da conexão.

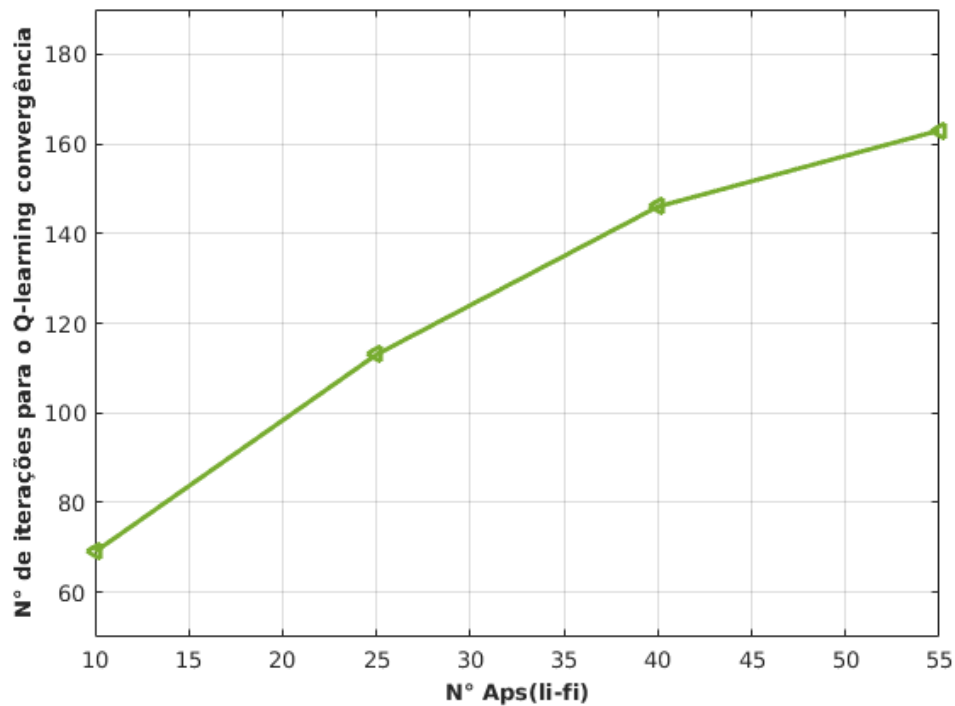
Figura 31 – Probabilidade de bloqueio



Fonte: O Autor

A Figura 31 traz os resultados acerca da probabilidade de bloqueio. Percebe-se que para 50 usuários, os algoritmos QL e RSS apresentam praticamente a mesma probabilidade de bloqueio. Esta diferença cresce à medida que o número de usuários também aumenta. Por exemplo, para o cenário com o número máximo de usuários (350), esta diferença é de cerca de 18%, quando a probabilidade de bloqueio do algoritmo RSS atinge 43% e a do QL é de 25%. Portanto, com o algoritmo QL as chances do usuário sofrer algum evento de interrupção de sinal são menores.

Por fim, é analisada a convergência do Q-Learning em relação ao número de AP's disposto no cenário (Figura 32). Para isto, variou-se o número de APs entre 10 e 55 em todo o cenário. Para 15 APs, o número de iterações para encontrar a solução ótima é de aproximadamente 85 iterações. Ao aumentar para 55 AP's, o número de iterações quase duplica, reproduzindo um comportamento exponencial. Isso se justifica pelo aumento das possibilidades de conexão que necessariamente influenciam no aumento do espaço amostral do problema, de modo a demandar maior custo computacional na busca da solução ótima.

Figura 32 – Desempenho do algoritmo *Q-learning* baseado no número de iteração

Fonte: O Autor

5.4 Considerações finais

Neste capítulo realizou-se as simulações, os dados obtidos foram tratados, para composição dos gráficos e tabelas utilizados no estudo comparativo aqui descrito. Por fim, as métricas de desempenho de QoS foram analisadas. Diante dos cenários propostos e dos parâmetros adotados, o estudo de caso realizado, baseado na metodologia elaborada nesta dissertação, aponta para uma melhora na eficiência do *offloading* e conseqüentemente um aumento no QoS oferecido quando utilizado o *Q-learning* como mecanismo de *tradeoff* entre as tecnologias móveis VLC e LTE.

6 Conclusão

Com a evolução das comunicações móveis e o surgimento de novas aplicações mais exigentes em termos de largura de banda, tornam-se necessários estudos sobre os parâmetros de qualidade de serviço e influência da mobilidade dos usuários nesses sistemas. Em consequência disso, é preciso que haja alternativas que visem suprir o fluxo de carga de dados. Nesse contexto, a adoção de soluções híbridas é uma possível alternativa para atender a essas limitações, já que busca intercambiar as vantagens de duas ou mais tecnologias em prol dos benefícios da alta qualidade de serviço.

Esta dissertação apresentou um levantamento do estudo da arte das áreas envolvidas na pesquisa, a partir de busca em periódicos, conferências e em grupo de pesquisa/instituições de referência. Por conseguinte, realizou-se uma revisão acerca das diversas técnicas e ferramentas de avaliação de desempenho (aferição, solução por modelagem analítica e por simulação), compreendendo também questões relevantes relacionadas à qualidade de serviço, indicadores de desempenho do *offloading*, planejamento, implantação e otimização considerando a velocidade do usuário alvo, a densidade de usuários no sistema e a potência do sinal recebida conforme a inclinação do dispositivo móvel. Para tanto, uma estratégia para *offloading* foi proposta, elaborada e validada por meio de um conjunto de simulações, utilizando-se as ferramentas NS3 e Matlab.

As simulações permitiram analisar como as tecnologias de acesso testadas se comportam em situações específicas para um cenário móvel, como é esperado ser em um sistema real. Para isso, utilizou-se um cenário composto por vários LEDs que seriam responsáveis por oferecer o enlace VLC dentro de uma macrocélula composta por uma antena LTE. Esse cenário de aplicação poderia ser caracterizado a qualquer ambiente *indoor* como academias, escritórios e hospitais. Basicamente, um usuário alvo ao se deslocar dentro do cenário e disputa recursos de banda com vários outros usuários. A cada simulação, o número de usuários foi alterado o que permitiu fazer análises referentes à qualidade de serviço oferecida pelo sistema e percebeu-se que o impacto da proposta com *Q-learning* é uma opção satisfatória e que atende perfeitamente cenários densamente povoados e não muito indicado para ambientes com pouco usuários, já que nesses casos o desempenho é similar as estratégias já existentes (baseadas por RSS).

Por fim, conclui-se que a coexistência de duas ou mais tecnologias em um cenário móvel são viáveis, quando almeja-se melhorar o fluxo de dados móveis em ambiente densamente povoados, no qual possivelmente haja sobrecarga quando utilizados apenas uma tecnologia. Para isso, a VLC vem como uma alternativa a suprir essa lacuna, já que

garante uma quantidade extensa desvantagens em prol do custo benefício e da qualidade de serviço oferecido. Os resultados dessa dissertação provou o quão eficiente pode ser a solução híbrida nos quesitos qualidade e interrupção de serviço.

6.1 Contribuições da dissertação

Como principais contribuições desta dissertação, destacam-se:

- A proposta de uma metodologia de otimização de *offloading* para o estudo de avaliação dos impactos do hibridismo entre tecnologias de comunicação VLC e LTE.
- A metodologia proposta, é flexível, podendo incorporar um conjunto de outras variáveis aleatórias, de acordo com a função densidade ou estudo de interesse, permitindo a geração de inúmeros cenários de simulação;
- A realização de um estudo aprofundado das tecnologias VLC e LTE, compreendendo as principais características de ambas as tecnologias;
- A realização de um estudo aprofundado do *Q-learning* como técnica de *Machine Learning*, compreendendo as principais características e parâmetros envolvidos.
- Caracterização de um cenário híbrido (VLC e LTE) de *offloading*, simulado no Matlab e NS3;
- Disponibilização do código e todos artefatos para construção deste trabalho em uma plataforma de acesso livre.
- Por intermédio da utilização das métricas de QoS, foi possível validar a estratégia de otimização e *offloading* envolvendo tecnologias distintas em um cenários com alto número de usuários;

Como forma de divulgação do trabalho realizado ao longo do desenvolvimento desta dissertação de mestrado, vários artigos em periódicos e conferências foram publicados/aceitos. Publicação relacionada ao tema desta dissertação:

- Artigo que possibilitou o credenciamento para defesa de mestrado “Estratégia para Otimização de *Offloading* entre as Redes Móveis VLC e LTE baseada em *Q-Learning*” vai ser publicado na oitava conferência nacional em comunicações, redes e segurança da informação outubro de 2018, Bahia-Salvador ;

Outras publicações:

- Aceite do trabalho no Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (Jmoe): Edvar da L. Oliveira, Rodrigo D. Alfaia, Anderson V. F. Souto, Marcelino S. Silva, Carlos Renato L. Francês, “SmartCoM: Smart Consumption Management Architecture for Providing a User-Friendly Smart Home based on Metering and Computational Intelligence”, classificação qualis CAPES: B1, 2017;
- Publicação de trabalho na conferência The Third International Symposium on Ubiquitous Networking 2017, Casablanca - Marrocos, com o título "*Adopting fuzzy technique to save energy in smart home control systems*" e também no Springer Lecture Notes in Computer Science (LNCS – fator: 0.8);
- Publicação de trabalho no Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, com o seguinte título "Inclusão do Módulo de Gerenciamento Inteligente na Arquitetura SmartCoM, Visando ao Gerenciamento Eficiente do Consumo de Energia em Sistemas de Refrigeração em *Smart Home*, baseado em IoT".

6.2 Trabalhos futuros

Como possíveis desdobramentos deste trabalho, seguem os principais objetivos futuros:

- Explorar novas técnicas de Machine Learning a fim de obter maior eficiência ao encontrar a solução ótima com um menor custo computacional;
- Utilizar outras tecnologia de acesso como por exemplo o WI-FI e o Bluetooth para descentralização da carga de dados. e a partir disso analisar o comportamento em um cenário híbrido;
- Desenvolver um modelo de mobilidade que considere com mais afinco a movimentação do dispositivo móvel;
- Utilizar técnicas de Inteligência computacional que vise otimizar o custo benefício da implantação do enlace de comunicação por luz visível;
- Considerar fatores como o consumo de energia e vida da bateria nos dispositivos móveis, quando conectados a determinado enlace de comunicação;
- Explorar novos cenários de utilização passíveis de interferência de outras fontes luminosas.

6.3 Dificuldades encontradas

- A principal dificuldade que norteou o trabalho foi a pouca disponibilidade de conteúdo relacionados a *offloading* que utilizassem o VLC como tecnologia de acesso. Apesar da VLC ser utilizada desde o início do século 21, ainda existem poucos trabalhos que abordam o VLC como alternativa de descarga de dados;
- Outro ponto oneroso foi o estudo relacionado ao modelo de canal da VLC, pois se diferia dos modelos tradicionais de enlaces de comunicação como os enlaces por radiofrequência. Portanto, foi necessário um levantamento detalhado do que se tinha na literatura para então realizar a modelagem no Matlab;
- Para garantir uma verossimilhança entre o modelo de mobilidade e a realidade foi necessário fazer uma aferição do como o sinal é recebido pelo dispositivo móvel conforme o mesmo é inclinado durante o deslocamento do usuário pelo ambiente. Isso demandou um certo esforço físico, já que era necessário posicionar o *smartphone* em diferentes pontos do cenário de modo a variar manualmente os ângulos de inclinação do mesmo, com o máximo de precisão possível.

Referências

- ALMEIDA, M. A. - *Apostila PADRÕES DE TELEFONIA MÓVEL DIGITAL, do curso de Pós Graduação de Sistemas de Telecomunicações da PucMG no ano de 2013*. Scribd, 2013. Disponível em: <<https://www.scribd.com/document/50826788/Apostila-de-Telefonia>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- BELL, A. G. On selenium and the photophone. *Electrician*, 1880. v. 5, p. 214–220, 1880. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- BEYRANVAND, H. et al. Toward 5g: Fiwi enhanced lte-a hetnets with reliable low-latency fiber backhaul sharing and wifi offloading. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017. v. 25, n. 2, p. 690–707, April 2017. ISSN 1063-6692. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- BUI, T.-C. et al. A comprehensive lighting configuration for efficient indoor visible light communication networks. *International Journal of Optics*, 2016. Hindawi, v. 2016, 2016. Citado na página 44.
- BURNS, R. W. *Communications: an international history of the formative years*. [S.l.]: IET, 2004. Citado na página 5.
- CHEN, Q. et al. Rethinking mobile data offloading in lte and wifi coexisting systems. In: *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. ISSN 1558-2612. Citado na página 24.
- CHEN, Q. et al. Rethinking mobile data offloading in lte and wifi coexisting systems. In: *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. ISSN 1558-2612. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- CHO, E. et al. Nrz-ook signaling with led dimming for visible light communication link. In: *2011 16th European Conference on Networks and Optical Communications*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 32–35. Citado na página 15.
- CHOI, J. et al. Pulse width modulation based signal format for visible light communications. In: *OECC 2010 Technical Digest*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 276–277. ISSN 2166-8884. Citado na página 15.
- CHOWDHURY, H. *Data download on the move in visible light communications: design and analysis*. Tese (Doutorado), 2016. Citado 5 vezes nas páginas 8, 10, 11, 13 e 15.
- CHOWDHURY, H.; KATZ, M. Cooperative data download on the move in indoor hybrid (radio-optical) wlan-vlc hotspot coverage. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2014. v. 25, n. 6, p. 666–677, 2014. Citado na página 14.
- CISCO. *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper*. Mar 2017. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>>. Citado na página 1.

- COMPTIA. *Sizing Up the Internet of Things*. Aug 2015. Disponível em: <<https://www.comptia.org/resources/sizing-up-the-internet-of-things>>. Citado na página 1.
- CONSORTIUM, C. V. S. C. et al. Vehicle safety communications project: Task 3 final report: identify intelligent vehicle safety applications enabled by dsrc. *National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation, Washington DC*, 2005. 2005. Citado na página 17.
- CORNELIO. *Inovações Tecnológicas no Setor de Telecomunicações no Brasil: Desafios e Oportunidades do LTE para expansão da Telefonia Móvel*. Tese (Doutorado), 2011. Citado na página 21.
- COUNCIL. *LI-FI TO SPEED UP IOT?* 2013. Disponível em: <https://www.theinternetofthings.eu/li-fi-speed-iot>. Acesso em: 28 julho 2018. Citado na página 17.
- EVOLUTION. *Wiley Series on Information and Communications Technologies Wireless Internet and Mobile Computing*, 2014. p. 109–132, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 23.
- FAKHFAKH, E.; HAMOUDA, S. Optimised q-learning for wifi offloading in dense cellular networks. *IET Communications*, 2017. IET, v. 11, n. 15, p. 2380–2385, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 2, 27, 31, 34 e 55.
- FARR, N. et al. An integrated, underwater optical/acoustic communications system. In: IEEE. *OCEANS 2010 IEEE-Sydney*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado na página 17.
- FOLTER, R. *Soccer and Machine Learning: 2 hot topics for 2018*. 2018. Disponível em: <<https://www.datasciencecentral.com/profiles/blogs/soccer-and-machine-learning-2-hot-topics-for-2018>>. Citado na página 26.
- GFELLER, F.; BAPST, U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation, rz 941 (32513). *Information Systems*, 1980. Pergamon, v. 5, n. 3, p. 248, 1980. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- GHASSEMLOOY, Z.; POPOOLA, W.; RAJBHANDARI, S. *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. [S.l.]: CRC press, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 12.
- GSA. *Evolution to LTE Report - January 2017*. 2017. Disponível em: <<https://gsacom.com/paper/gsa-evolution-lte-report-january-2017/>>. Citado na página 21.
- HAAS, H. et al. What is lifi? *Journal of Lightwave Technology*, 2016. IEEE, v. 34, n. 6, p. 1533–1544, 2016. Citado na página 17.
- HAZAN, Y.; RAN, M. Study of indoor lte green small-cells using mobile fronthaul architecture over hybrid fiber-wireless channels. In: IEEE. *Networks and Communications (EuCNC), 2016 European Conference on*. [S.l.], 2016. p. 185–189. Citado na página 2.
- HO, D.; PARK, G. S.; SONG, H. Game-theoretic scalable offloading for video streaming services over lte and wifi networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018. v. 17, n. 5, p. 1090–1104, Jan 2018. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.

- HU, L.; GORTON, I. *Performance Evaluation for Parallel Systems: A Survey*. 1997. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ian_Gorton/publication/2562485_Performance_Evaluation_for_Parallel_Systems_A_Survey-/links/0fcfd50b55d438f9b1000000-.pdf?inViewer=truepdfJsDownload=truedisableCoverPage=trueorigin=publication_detail>. Citado na página 30.
- HUSSAIN, B. et al. Visible light communication system design and link budget analysis. *Journal of Lightwave Technology*, 2015. v. 33, n. 24, p. 5201–5209, Dec 2015. ISSN 0733-8724. Citado na página 2.
- IEEE-802.15.7. Ieee std. for local and metropolitan area networks-part 15.7: Short-rang wireless optical communication using visible light. *IEEE computer Society*, 2011. 2011. Citado 7 vezes nas páginas 8, 13, 14, 15, 16, 24 e 44.
- JAIN, R. *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1990. Citado na página 36.
- JAIN, R. K. *Art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design measurements ... simulation and modeling*. [S.l.]: John Wiley, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- JHA, P. K.; MISHRA, N.; KUMAR, D. S. Challenges and potentials for visible light communications: State of the art. In: AIP PUBLISHING. *AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2017. v. 1849, n. 1, p. 020007. Citado na página 2.
- KAHN, J. M.; BARRY, J. R. Wireless infrared communications. *Proceedings of the IEEE*, 1997. IEEE, v. 85, n. 2, p. 265–298, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 12.
- KAKADIA, D.; YANG, J.; GILGUR, A. Evolved universal terrestrial radio access network (eutran). *Network Performance and Fault Analytics for LTE Wireless Service Providers*, 2017. p. 61–81, 2017. Citado na página 22.
- KASHEF, M. et al. Energy efficient resource allocation for mixed rf/vlc heterogeneous wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016. IEEE, v. 34, n. 4, p. 883–893, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 24.
- KHALLAF, H. S. et al. Efficiency of opportunistic cellular/lifi traffic offloading. *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2017. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- KHAN, L. U. Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 2017. Elsevier, v. 3, n. 2, p. 78–88, 2017. Citado na página 16.
- KIBRIA, M. G. et al. Big data analytics, machine learning, and artificial intelligence in next-generation wireless networks. *IEEE Access*, 2018. v. 6, p. 32328–32338, 2018. ISSN 2169-3536. Citado na página 26.
- KIDWELL, P. The early history of data networks [reviews]. *IEEE Annals of the History of Computing*, 1996. v. 18, n. 3, p. 77, 1996. Citado na página 6.

- KIM, D.-R. et al. Outdoor visible light communication for inter-vehicle communication using controller area network. In: IEEE. *Communications and Electronics (ICCE), 2012 Fourth International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 31–34. Citado na página 17.
- KNOWLEDGE interactivate your. 2018. Disponível em: <https://www.exploreagate.com/Video.aspx?video_id=55>. Citado na página 24.
- KODA, Y. et al. Reinforcement learning based predictive handover for pedestrian-aware mmwave networks. In: *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 692–697. Citado na página 26.
- KONONENKO, I. Machine learning for medical diagnosis: history, state of the art and perspective. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2001. v. 23, n. 1, p. 89–109, 2001. Citado na página 26.
- KRAEMER, R.; KATZ, M. *Short-range wireless communications: Emerging technologies and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- LEE, K.; PARK, H. Modulations for visible light communications with dimming control. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011. v. 23, n. 16, p. 1136–1138, 2011. Citado na página 14.
- LI, H.; ZHAN, Z. Bussiness-driven automatic it change management based on machine learning. *2012 IEEE Network Operations and Management Symposium*, 2012. 2012. Citado na página 26.
- LI, L. et al. Mobility-aware load balancing scheme in hybrid vlc-lte networks. *IEEE Communications Letters*, 2016. IEEE, v. 20, n. 11, p. 2276–2279, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 2, 50 e 55.
- LI, L. et al. Mobility-aware load balancing scheme in hybrid vlc-lte networks. *IEEE Communications Letters*, 2016. v. 20, n. 11, p. 2276–2279, Nov 2016. ISSN 1089-7798. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- LI, Z. et al. Traffic offloading from lte-u to wifi: A multi-objective optimization approach. In: *2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. Citado na página 24.
- LI, Z. et al. Traffic offloading from lte-u to wifi: A multi-objective optimization approach. *2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, 2016. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- MARSLAND, s. Machine learning; an algorithmic perspective. *SciTech Book News*, 2011. Sep 2011. Disponível em: <http://www.highbeam.com/doc/1G1-207122518-.html?refid=easy_hf>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- NG, X.-W.; CHUNG, W.-Y. Vlc-based medical healthcare information system. *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications*, 2012. World Scientific, v. 24, n. 02, p. 155–163, 2012. Citado na página 17.
- NSNAM. 2018. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/>>. Citado na página 36.

- NTOGARI, G. et al. Combining illumination dimming based on pulse-width modulation with visible-light communications based on discrete multitone. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2010. v. 3, n. 1, p. 56, 2010. Citado na página 14.
- PATHAK, P. H. et al. Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2015. IEEE, v. 17, n. 4, p. 2047–2077, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 10 e 11.
- PURELIFI. *historia do Li-Fi*. 2018. Disponível em: http://purelifi.com/what_is_li-fi/the-lifi-story/. Acesso em: 28 julho 2018. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 25.
- RAJAGOPAL, S.; ROBERTS, R.; LIM, S.-K. Ieee 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support. *IEEE Communications Magazine*, 2012. v. 50, n. 3, p. 72–82, 2012. Citado na página 14.
- RODRIGUES, C. F. R. . *Avaliação da qualidade e desempenho de serviços em redes LTE*. Tese (Doutorado), 2012. Citado na página 21.
- ROHILLA, N.; KAMBOJ, A. Survey of lte and lte advanced system. *IMPACT Int. J. Res. Eng. Technol.(IMPACT IJRET)*, 2014. v. 2, p. 1–6, 2014. Citado na página 2.
- SARKAR, A.; AGARWAL, S.; NATH, A. Li-fi technology: Data transmission through visible light. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 2015. v. 3, n. 6, 2015. Citado na página 17.
- SEZIA, S.; BAKER, M.; TOUFIK, I. *LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado na página 20.
- SHAABAN, R.; FARUQUE, S. A survey of indoor visible light communication power distribution and color shift keying transmission. In: *2017 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 149–153. ISSN 2154-0373. Citado na página 24.
- SHALEV-SHWARTZ, S.; BEN-DAVID, S. *Understanding machine learning: From theory to algorithms*. [S.l.]: Cambridge university press, 2014. Citado na página 25.
- SKLAVOS, N. et al. *System-level design methodologies for telecommunication*. [S.l.]: Springer, 2013. Citado na página 5.
- SOLTANI, M. D. et al. Handover modeling for indoor li-fi cellular networks: The effects of receiver mobility and rotation. In: IEEE. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado na página 46.
- SYED, A. et al. Channel selection in multi-hop cognitive radio network using reinforcement learning: an experimental study. *International Conference on Frontiers of Communications, Networks and Applications (ICFCNA 2014 - Malaysia)*, 2014. 2014. Citado na página 26.
- TANAKA, Y. et al. Indoor visible light data transmission system utilizing white led lights. *IEICE transactions on communications*, 2003. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 86, n. 8, p. 2440–2454, 2003. Citado na página 7.

- TELECO. *teleco.com.br*. 2016. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwifioffload/pagina_2.asp>. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 20 e 23.
- TOSKALA, A.; LUNTTILA, T. Introduction to ofdma and sc-fdma and to mimo in lte. *LTE for UMTS*, 2011. p. 67–82, Apr 2011. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- VAVOULAS, A. et al. Coverage aspects of indoor vlc networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2015. IEEE, v. 33, n. 23, p. 4915–4921, 2015. Citado na página 50.
- WANG, W.-C. et al. Long distance non-line-of-sight (nlos) visible light signal detection based on rolling-shutter-patterning of mobile-phone camera. *Optics Express*, 2017. v. 25, n. 9, p. 10103, 2017. Citado na página 49.
- WANG, Y.; WU, X.; HAAS, H. Fuzzy logic based dynamic handover scheme for indoor li-fi and rf hybrid network. In: *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. ISSN 1938-1883. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- WATKINS, C. J.; DAYAN, P. Q-learning. *Machine learning*, 1992. Springer, v. 8, n. 3-4, p. 279–292, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 39.
- WIMAX. *LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*, 2011. p. 341–408, 2011. Citado na página 23.
- WU, X.; HAAS, H. Access point assignment in hybrid lifi and wifi networks in consideration of lifi channel blockage. In: *2017 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. ISSN 1948-3252. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- ZHANG, R. et al. Visible light communications in heterogeneous networks: Paving the way for user-centric design. *IEEE Wireless Communications*, 2015. v. 22, n. 2, p. 8–16, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.