

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



DANIEL RESENDE FRASSON

**SIMULAÇÃO DE REDE LI-FI COM *HANDOVER*
SKIPPING PARA AMBIENTES INTERNOS**

VITÓRIA
2023

DANIEL RESENDE FRASSON

**SIMULAÇÃO DE REDE LI-FI COM *HANDOVER*
SKIPPING PARA AMBIENTES INTERNOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Daniel Resende Frasson**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

VITÓRIA
2023

DANIEL RESENDE FRASSON

**SIMULAÇÃO DE REDE LI-FI COM *HANDOVER*
SKIPPING PARA AMBIENTES INTERNOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Daniel Resende Frasson**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 12 de julho de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt
Castellani
Orientador



Profa. Dra. Maria José Pontes
Examinadora



Prof. Dr. Anilton Salles Garcia
Examinador

RESUMO

Este trabalho consiste na análise do esquema de *handover* como proposto por WU e HAAS (2019) para redes de *light fidelity* (Li-Fi) em ambientes internos, através de simulações no *software* MATLAB. O Li-Fi é uma tecnologia de comunicação sem fio semelhante ao *wireless fidelity* (Wi-Fi) que utiliza comunicação por luz visível (VLC, do inglês *visible light communication*) para transmitir e receber dados, ao invés de utilizar ondas de rádio frequência (RF), como outras tecnologias de comunicação sem fio. Como a frequência da luz visível é muito maior do que das ondas RF, as perdas por propagação tornam o alcance do sinal de um ponto de acesso (AP, do inglês *access point*) Li-Fi muito menor, o que por consequência acarreta em uma quantidade de APs requeridos em uma rede maior em comparação com uma rede Wi-Fi. Logo, a quantidade de *handovers* aumenta significativamente para um usuário que se movimentar dentro da área de cobertura da rede. Por esse motivo, é necessária a aplicação de técnicas de *handover skipping* em uma rede desse tipo. A técnica de *handover skipping* analisada neste trabalho faz uso do valor atual e a variação da potência recebida do sinal de referência (RSRP, do inglês *reference signal received power*) para determinar o alvo do *handover*, evitando uma troca excessiva de dados entre o usuário e o AP. Os resultados obtidos da simulação realizada são apresentados e analisados ao final deste trabalho de maneira comparativa a outros dois esquemas de *handover* comumente utilizados para inferir a eficácia do método de *handover* em análise e sua capacidade em melhorar o desempenho de uma rede Li-Fi para um usuário.

Palavras-chave: Simulação. Rede. *Light fidelity* (Li-Fi). *Handover Skipping*. *Reference Signal Received Power* (RSRP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Os principais blocos construtivos do Li-Fi e suas áreas de aplicação.....	16
Figura 2 – A simetria hermitiana garante um sinal positivo no domínio do tempo: (a) as partes reais dos componentes de frequência positiva e negativa correspondentes são iguais; (b) as partes imaginárias dos componentes de frequência positiva e negativa correspondentes são iguais em valor absoluto, mas têm sinais opostos.....	18
Figura 3 – Sinal OFDM real tornado bipolar através da adição de uma polarização DC – DCO-OFDM.....	19
Figura 4 – Exemplo de possível movimentação dentro de uma área coberta por uma rede Li-Fi.....	23
Figura 5 – Os caminhos LoS e NLoS de primeira ordem de um canal Li-Fi.....	25
Figura 6 – O esquema de <i>handover</i> no LTE.....	27
Figura 7 – Possíveis movimentos de um usuário dentro de uma célula de um AP Li-Fi.....	31
Figura 8 – Taxa de handover pela velocidade do usuário dados diferentes parâmetros de entrada.....	47
Figura 9 – Probabilidade de cobertura por SNR limite dados diferentes parâmetros de entrada.....	48
Figura 10 – Taxa de handover por velocidade do usuário dos três métodos.....	49
Figura 11 – Queda na taxa de handover por velocidade do usuário.....	50
Figura 12 – Probabilidade de cobertura por SNR limite dos três métodos.....	51
Figura 13 – Taxa de transferência por velocidade do usuário dos três métodos.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	<i>Access Point</i>
HOM	<i>Handover Margin</i>
TTT	<i>Time To Trigger</i>
IEEE	<i>Institute Of Electrical And Electronics Engineers</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
Li-Fi	<i>Light Fidelity</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i>
SNR	<i>Signal-To-Noise Ratio</i>
SSS	<i>Signal Strength Strategy</i>
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
IM	<i>Intensity Modulation</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
PoE	<i>Power-Over-Ethernet</i>
OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>
SPAD	<i>Single-Photon Avalanche Diode</i>
IM/DD	<i>Intensity Modulation And Direct Detection</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
PPM	<i>Pulse-Position Modulation</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
M-PAM	<i>Unipolar M -Ary Pulse-Amplitude Modulation</i>
DCO-OFDM	<i>DC-Biased Optical OFDM</i>
ACO-OFDM	<i>Asymmetrically Clipped Optical OFDM</i>
PAM-DMT	<i>Pulse-Amplitude-Modulated Discrete Multitone Modulation</i>
U-OFDM	<i>Unipolar OFDM</i>
SFO-OFDM	<i>Spectrally-Factorized Optical OFDM</i>
TDMA	<i>Time-Division Multiple Access</i>
GSM	<i>Global System For Mobile Communications</i>
PDC	<i>Personal Digital Cellular</i>

LoS

Line-Of-Sight

NLoS

Non Line-Of-Sight

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 JUSTIFICATIVAS.....	10
3 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS.....	12
3.1 Objetivo Geral.....	12
3.2 Objetivos Específicos.....	12
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
4.1 Li-Fi.....	13
4.2 Li-Fi versus VLC.....	15
4.3 Modulação de Sinal em OWC.....	17
4.4 <i>Handover</i>	20
4.5 <i>Handover Skipping</i>	22
4.6 Modelagem do Sistema.....	24
4.7 Esquema de <i>Handover</i> do LTE (4G).....	27
4.8 Esquema de <i>Handover</i> Proposto.....	28
4.9 Análise Teórica da Performance do Esquema Proposto.....	30
4.9.1 Derivação de.....	30
4.9.2 Probabilidade de Ocorrência de um <i>Handover Skipping</i>	32
4.9.3 Taxa de <i>Handover</i> Teórica.....	36
4.9.4 Probabilidade de cobertura.....	36
4.9.5 Taxa de transferência.....	37
5 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	40
5.1 Metodologia.....	40
5.2 Desenvolvimento.....	41
5.2.1 Cálculo da taxa de <i>handover</i>	42
5.2.2 Cálculo da probabilidade de cobertura.....	44
5.2.3 Cálculo da taxa de transferência.....	45
6 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	46
6.1 Resultados.....	46
6.2 Conclusões e considerações futuras.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

ANEXO A.....	60
ANEXO B.....	74

1 INTRODUÇÃO

O uso de redes móveis cresce cada vez mais através do globo. Havendo em 2017 cerca de 124 milhões de pontos de acesso públicos de Wi-Fi (do inglês, *wireless fidelity*, fidelidade sem fio), estimava-se que em 2022 haveriam em torno de 549 milhões de pontos de acesso público de Wi-Fi (BARNETT et al., 2018).

O uso excessivo de tecnologias de comunicação por ondas de rádio frequência (RF) poderia causar altos níveis de interferência entre os sinais, dado o espectro limitado das ondas de RF. Assim, surgiu um receio de uma "crise de espectro RF" (OFCOM, 2014), dado que a demanda por dados móveis continua aumentando enquanto a eficiência espectral da internet se satura, apesar dos avanços tecnológicos na área.

Por essa razão, tecnologias de comunicação sem fio através de ondas de altíssimas frequências vêm ganhando bastante notoriedade, como a comunicação por onda milimétrica (mmWave, do inglês *millimetre wave*) (RAPPAPORT et al., 2013), múltipla entrada e múltipla saída massivas (*massive MIMO*, do inglês *massive multiple-input multiple-output*) (NGO et al., 2017), e a comunicação por luz visível (VLC, do inglês *visible light communication*) (BURCHARDT et al., 2014).

A tecnologia de rede utilizadora de VLC para troca de dados foi chamada de Li-Fi (do inglês, *light-fidelity*, fidelidade de luz) (HAAS et al., 2016). A tecnologia Li-Fi apresenta diversas vantagens em comparação ao Wi-Fi: i) seus pontos de acesso (AP, do inglês *access points*) podem ser integrados com lâmpadas de diodos emissores de luz (LED, do inglês *light-emitting diodes*), o que torna possível o aproveitamento da infraestrutura de iluminação de ambiente para comunicação; ii) é capaz de fornecer cobertura de dados móveis em ambientes sensíveis à radiações eletromagnéticas, como hospitais, aviões e usinas nucleares entre outros (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013); iii) segurança de dados, dado que ondas de luz visível não atravessam objetos opacos, como paredes, a troca de dados se restringe à regiões fechadas; e iv) possui um amplo espectro livre de licença, 10 mil vezes mais espectro do que em comparação com o espectro disponível de RF. Pesquisas recentes realizadas na Escola de Engenharia da Universidade de Edimburgo mostraram que com LEDs de quatro cores

disponíveis no mercado por menos de 50 centavos de dólar americano e utilizando modulação por multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM, do inglês *orthogonal frequency-division multiplexing*) no sinal, o Li-Fi é capaz de transmitir dados a uma taxa de aproximadamente 15,7 Gb/s (equivalente a 1,96 gigabytes por segundo) (BIAN; TAVAKKOLNIA; HAAS, 2019).

Tendo uma frequência muito maior do que das ondas RF, as perdas por propagação das ondas de luz visível tornam o alcance do sinal VLC muito menor (FRIIS, 1946), sendo no caso do Li-Fi, o alcance médio de um AP de 2 a 3 metros em diâmetro (HAAS, 2015). Por esse motivo, para cobrir uma mesma área, uma rede Li-Fi acaba necessitando de um número muito maior de APs do que uma rede Wi-Fi. Possibilitando assim um maior reuso de frequência, o que torna a rede Li-Fi bem mais espectralmente eficiente (WU; HAAS, 2019). O desafio seria então lidar com a grande quantidade de *handovers* que irá ocorrer para um usuário da rede se movendo dentro da área de cobertura, pois, tendo cada AP uma pequena área de cobertura, um usuário em movimento passaria pouco tempo dentro de cada célula da rede e a chance de ocorrer um efeito *ping-pong* no *handover* acaba sendo consideravelmente alta (WU; HAAS, 2019).

Em razão desse desafio, neste trabalho é apresentado um estudo sobre diferentes esquemas de *handover* dentro de uma rede Li-Fi em ambientes internos, visando a construção de um modelo de simulação através do *software* MATLAB que permita a realização de cálculos capazes de efetivamente gerar uma análise comparativa do esquema utilizador de histerese do *long-term evolution* (LTE) (WU; HAAS, 2019) e do esquema de *handover skipping* como proposto por WU e HAAS (2019) perante múltiplos parâmetros de entrada considerando diversas redes hipotéticas.

2 JUSTIFICATIVAS

Como numa rede Li-Fi o número de APs é relativamente alto, se torna necessário o estabelecimento de um método de *handover* que seja eficaz para a rede, para melhorar sua usabilidade para o usuário ao máximo.

O método SSS (do inglês, *signal strength strategy*, estratégia de força do sinal), que sempre escolhe como alvo do *handover* o AP com maior potência recebida do sinal de referência (*reference signal received power*, RSRP), é normalmente usado em redes de telefonia celular pela área relativamente grande das células, mas se torna ineficaz no caso do Li-Fi por não resolver os problemas do efeito *ping-pong* e do curto tempo que um usuário passa dentro de cada célula (WU; HAAS, 2019).

O método padrão utilizado pelo LTE, que prolonga a decisão de *handover* por determinado período de tempo, é capaz de resolver o problema do efeito *ping-pong*, mas não resolve o segundo problema, já que um usuário em movimento dentro da rede só observaria a ocorrência de um *handover skipping* caso permanecesse dentro de uma célula por um período menor que o predeterminado (WU; HAAS, 2019), tornando esse método insensível à velocidade do usuário, não prevenindo *handovers* desnecessários em muitos casos.

Para evitar o excesso de *handovers* dentro de uma rede densa como a estudada, diferentes métodos de *skipping* foram introduzidos por Arshad et al. (2016), Demarchou et al. (2018) e Arshad et al. (2017) que propuseram soluções pensando na densificação de redes 5G (quinta geração da telefonia) para incrementar a eficiência espectral da rede através do aumento do reuso de frequência.

Arshad et al. (2016) propõem um método baseado na topologia espacial dos limites de alcance predefinidos para cada célula de estações base de 5G, Demarchou et al. (2018) propõem um método semelhante analisando a trajetória do usuário dentro de uma célula com topologia pré-configurada mas utilizando associação entre os APs e Arshad et al. (2017) propõem um esquema baseado na velocidade da trajetória do usuário dentro da rede, realizando diferentes tipos de *skipping* para diferentes velocidades.

Todos esses diferentes métodos apresentaram bons resultados, porém requerem que a rede obtenha informações sobre a trajetória do usuário, aumentando a troca de dados entre o usuário e a rede e, por consequência, diminuindo a capacidade de uso de dados pelo usuário.

Já o método como proposto por WU e HAAS (2019) exige menor troca de dados entre a rede e o usuário, pois não necessita de *feedback* extra do usuário para determinar sua velocidade. O método utiliza o valor atual e a variação do RSRP, e, assim, determina se o usuário está se aproximando ou se afastando de cada AP e em qual velocidade.

Redes muito densas estão sendo cada vez mais estudadas para avanços na comunicação celular, e a tecnologia Li-Fi está se mostrando como uma forte competidora com a tecnologia Wi-Fi para redes de dados móveis em ambientes internos, em especial em ambientes sensíveis a radiações eletromagnéticas (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013). Portanto, o estudo acerca de esquemas de *handover* em uma rede Li-Fi que este trabalho se propõe a fazer se torna relevante, visto que é capaz de contribuir para o conhecimento produzido acerca de temas tão atuais dentro das pesquisas no avanço tecnológico na área de telecomunicações.

3 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral um estudo aprofundado acerca do esquema de *handover* como proposto por WU e HAAS (2019) para uma rede Li-Fi projetada para ambientes internos, considerando-se um ambiente com pontos de acesso distribuídos de maneira uniforme através de uma área onde um usuário possa se mover de maneira livre em todas as direções, sentidos, com qualquer velocidade.

3.2 Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral deste trabalho como descrito, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Realizar uma revisão bibliográfica de trabalhos que estudam a tecnologia Li-Fi;
- ii. Estudar a bibliografia existente acerca do processo de *handover*;
- iii. Estabelecer um modelo matemático para uma rede Li-Fi para ambientes internos;
- iv. Estudar o método de *handover* utilizado pela tecnologia LTE, a quarta geração da telefonia celular;
- v. Estudar o esquema de *handover* proposto;
- vi. Realizar uma análise probabilística do desempenho de esquema de *handover*;
- vii. Realizar uma série de cálculos e simulações computacionais no *software* MATLAB do esquema de *handover* proposto;
- viii. Analisar os resultados obtidos dessas simulações e tirar conclusões comparativas entre os esquemas de *handover* para concluir-se qual se mostra mais eficiente dados os parâmetros que serão avaliados.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos utilizados para o entendimento e execução deste trabalho. Sendo na primeira seção explorado o conceito do Li-Fi, e na segunda, o do *handover*.

4.1 Li-Fi

A conectividade sem fio se tornou um bem fundamental na vida no mundo civilizado, como a água, o gás e a eletricidade. Após os 30 anos da introdução dos primeiros sistemas de comunicação móvel no mercado, pode ser observado um aumento exponencial na demanda por dados, o que ocasionou numa implantação em massa de sistemas sem fio baseados em ondas eletromagnéticas na faixa de frequência de rádio (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013). Sendo o espectro das ondas de rádio limitado, ele se tornou sujeito a uma reutilização espacial agressiva e sua capacidade se tornou cada vez mais limitada pela interferência de co-canal. Portanto, apesar de grandes avanços tecnológicos no campo e de padrões e protocolos introduzidos recentemente, pode-se observar o espectro de ondas de rádio caminhando para uma gradual saturação, enquanto a demanda por dados móveis não para de crescer cada vez mais (OFCOM, 2014).

No decurso da última década, esforços consideráveis foram direcionados em pesquisas que pudessem explorar partes alternativas do espectro eletromagnético capazes de suprir a demanda crescente por dados móveis e de descarregar parte dessa demanda do espectro das ondas de rádio (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013). Prominentes e notáveis resultados foram relatados em estudos recentes utilizando ondas de frequência acima de 10 GHz, conhecidas como ondas milimétricas (mmWave) (RAPPAPORT et al., 2013). Todavia, como observado a partir da equação do espaço livre de Friis, as perdas de caminho do sinal eletromagnético são proporcionais ao inverso do quadrado da frequência da onda (FRIIS, 1946), assim dizendo, quanto maior a frequência de uma onda eletromagnética, menor o alcance de um sinal transmitido por essa onda e mais difícil se torna de se superar bloqueios e sombras na

comunicação. Por este motivo, sistemas de comunicação baseados em ondas eletromagnéticas de frequências mais altas requerem que sejam projetados para que a probabilidade de linha de visão seja maior, o que normalmente é feito se utilizando técnicas de formação de feixes e se utilizando células menores (HAAS et al., 2016). A utilização de células de menor tamanho não é um problema na perspectiva de capacidade de sistema, afinal, a redução do tamanho das células no sistema de comunicação celular atual foi um dos principais contribuintes para o aprimoramento em seu funcionamento (HAAS et al., 2016). No entanto, uma relevante desvantagem de se projetar um sistema de comunicação se utilizando células de tamanho reduzido é o aumento significativo na infraestrutura do sistema, que requer mais materiais, equipamentos, e, por consequência, maior sofisticação.

Por conseguinte, a utilização de ondas de luz visível se torna particularmente atraente: as altas frequências de seu espectro estão na faixa das ondas nanométricas (nmWave, do inglês *nanometric wave*) e uma infraestrutura sofisticada de iluminação já é existente em quase todos os ambientes habitados. O advento do diodo emissor de luz (LED, do inglês *light emitting diode*) é o que possibilitou a troca de dados em alta velocidade através da luz visível, que está ao mesmo no centro da nova onda de iluminação energeticamente eficiente no mercado. Desse modo, com a utilização dessa tecnologia se torna possível combinar as funções de iluminação e comunicação, oferecendo um grande potencial em economia de custos e de energia. Com o sistema de iluminação em ambientes internos ligado por grande parte do tempo, até mesmo durante o dia, o custo energético para comunicação se tornaria praticamente zero. Mesmo quando a iluminação não é necessária, técnicas de modulação de intensidade de eficiência energética (IM, do inglês *intensity modulation*) tornam a comunicação de dados possível com uma iluminação imperceptível ao olho humano (TSONEV; SINANOVIC; HAAS, 2012). Além disso, tecnologias já firmadas no mercado, como a comunicação por linha de energia (PLC, do inglês *power line communication*, comunicação por linha de potência) e o PoE (do inglês, *power-over-ethernet*, potência por ethernet), tornam viáveis a implementação de uma infraestrutura de *backhaul* em instalações novas ou até já existentes. Além desses fatores que já evidenciam grandes vantagens do uso da luz visível, o espectro de luz visível inclui centenas de THz de largura de banda livre de licença, 10.000 vezes mais do que todo o espectro das ondas de rádio frequência até 30 GHz, incluindo o espectro das ondas milimétricas. A radiação óptica, em geral, não interfere com outras ondas de rádio ou com o funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis.

Portanto, é ideal para fornecer cobertura sem fio em áreas sensíveis à radiação eletromagnética – alguns exemplos incluem: hospitais, aviões, usinas petroquímicas e nucleares, etc. Além disso, a incapacidade da luz de se propagar através de paredes oferece um nível inerente de segurança da rede. O mesmo recurso pode ser explorado para eliminar a interferência entre células vizinhas (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013).

Até hoje, as pesquisas no campo de OWC (do inglês, *optical wireless communication*, comunicação ótica sem fio) tem sido focada em implementações bem-sucedidas de conexões de *link* físico (ELGALA; MESLEH; HAAS, 2011). Entretanto, para se realizar um sistema de comunicação móvel se faz necessária uma solução de rede completa. O que é chamado de Li-Fi é, então, a solução VLC em rede móvel e de alta velocidade para comunicação sem fio (BURCHARDT et al., 2014), desenvolvida com a visão de ser uma rede sem fio que complementaria as redes sem fio de rádio frequência heterogêneas existentes e forneceria um alívio de espectro significativo, permitindo que os sistemas celulares e de Wi-Fi descarregassem uma parte significativa do tráfego de dados sem fio (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013).

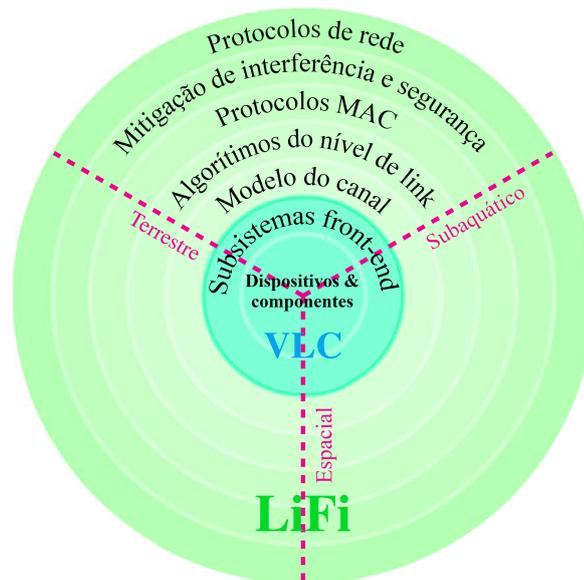
4.2 Li-Fi versus VLC

A tecnologia conhecida por VLC é a utilização de LEDs para a transmissão de dados sem fio utilizando-se métodos de modulação baseados em variação de intensidade, e fotodiodos para a recepção do sinal através do princípio de detecção direta, que foi criada como uma substituição da comunicação por cabos para comunicação de dados ponto a ponto (HAAS et al., 2016). O advento do VLC ocasionou nas primeiras atividades de sua padronização pela IEEE, como visto na IEEE 802.15.7, que hoje está sendo revisada para também englobar o Li-Fi (RAJAGOPAL; ROBERTS; LIM, 2012).

Já o Li-Fi foi concebido não só como um sistema de comunicação ponto a ponto sem-fio, mas como um sistema de rede sem fio completo, incluindo comunicação multiusuário bidirecional, isto é, uma comunicação multiponto e multiponto a ponto, também envolvendo diversos pontos de acesso formando uma rede sem fio de células ópticas de tamanhos pequenos com transferência contínua, permitindo assim a mobilidade total do usuário na rede. O fato de que

os LEDs formam feixes de luz visível permite ao sinal a sua contenção local, devido ao bloqueio gerado pela opacidade das paredes dos ambientes internos, o que também proporciona um gerenciamento eficaz da interferência de co-sinal tornando a camada física da rede muito mais segura (HAAS et al., 2016).

Figura 1 – Os principais blocos construtivos do Li-Fi e suas áreas de aplicação.



Fonte: HAAS et al., (2016)

As principais técnicas para a criação de uma rede óptica Li-Fi são ilustradas na Figura 1. Nota-se que o VLC compreende apenas as duas primeiras camadas do que constitui-se o Li-Fi, sendo elas a camada física e seus subsistemas *front-end* de alimentação do transmissor e o tratamento do sinal no receptor. Já o Li-Fi compreende mais camadas além das duas constituintes do VLC, o que o torna uma solução em rede sem fio completa.

No núcleo estão dispositivos como micro-LEDs de nitreto de gálio (GaN) e diodos de avalanche de fóton único (*single-photon avalanche diode*, SPAD), que são então embutidos em um *front-end* ópticos e em subsistemas contendo óptica adaptativa e também circuitos analógicos que acionam os LEDs e modulam os sinais transmitidos e recebidos nos fotodiodos receptores. Modelos de canal precisos que têm em conta a composição espectral do sinal são necessários para modelar corretamente as margens do enlace, estabelecer a

largura de banda de coerência do canal e modelar corretamente a interferência de co-canal (SARBAZI et al., 2014). Para se modular o sinal de maneira a maximizar a taxa de transferência de bits são necessários algoritmos de nível de *link*. Para o acesso multiusuário, novos protocolos de controle de acesso ao meio (MAC) adaptados e pensados na camada física de OWC são fundamentais. Técnicas de mitigação de interferência também são assim fundamentais no sistema para se obter altas taxas de transferência. E, por último, a rede óptica tem de ser integrada a redes governadas pela separação dos planos de controle e dados definidas por softwares e pela virtualização da rede (ROFOEE et al., 2015).

4.3 Modulação de Sinal em OWC

Uma rede sem fio que utilizaria apenas de ondas na frequência da luz visível exigiria uma cobertura abrangente provido pelos elementos de *front-end* da rede, o que exigiria de uma ampla quantidade de pontos de iluminação compatibilizadas para uma rede Li-Fi. Para isso, a melhor forma que se tem com a tecnologia de hoje de se implementar uma rede dessas seria através de LEDs de estado sólido, devido ao seu baixo custo e fácil operabilidade. Porém, as características físicas desse componente apresentam uma série de limitações às técnicas de modulação aplicáveis a ele, já que a informação apenas pode ser modulada através da intensidade do sinal emitido, não sendo possível se modular um sinal em sua fase ou em sua amplitude (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013).

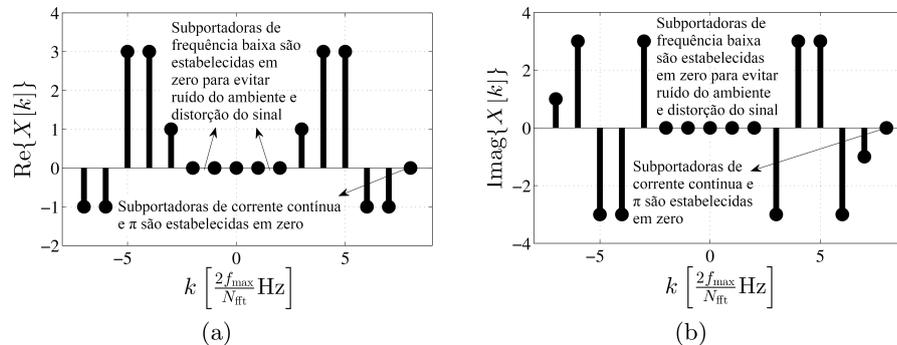
O sinal em VLC, pode apenas ser implementado através de um sistema IM/DD, ou seja, com o sinal transmitido sendo modulado por variação de intensidade e recebido através do princípio de detecção direta. Isso significa que o sinal modulado deve ser de valor real e unipolar, limitando assim a aplicação dos esquemas de modulação bem pesquisados e desenvolvidos para sinais de rádio frequência numa rede com sinais ópticos. Técnicas como chaveamento *on-off* (OOK), modulação de posição de pulso (PPM), modulação de largura de pulso (PWM) e modulação de amplitude de pulso unipolar M-ária (M-PAM) podem ser aplicadas de maneira relativamente direta, porém, submetidas a uma velocidade de modulação cada vez maior, começam a sofrer de uma interferência intersimbólica cada vez maior causada pela resposta de frequência não plana do sinal OWC, tornando assim necessária uma

técnica de modulação mais resiliente, como é o caso do OFDM (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013).

O OFDM permite, de acordo com as propriedades do canal de comunicação, o carregamento adaptativo de bits e energia de diferentes sub-bandas de frequência (VUCIC; LANGER, 2012), resultando numa otimização na utilização dos recursos disponíveis, atingindo a capacidade de transmissão em um canal de comunicação não plano mesmo na presença de distorções não lineares (DIMITROV; HAAS, 2013). Tais condições de canal são possibilitados pelas características de transferência de um LED, que possui uma largura de banda de modulação máxima de 3 dB na ordem de 20 MHz (COSSU et al., 2012; KHALID et al., 2012). Algumas outras vantagens desse esquema são a capacidade de distorção de baixa frequência causado pela radiação de fundo cintilante e o efeito *baselinewander* nos circuitos elétricos e a equalização simples com equalizadores de toque único no domínio da frequência (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013).

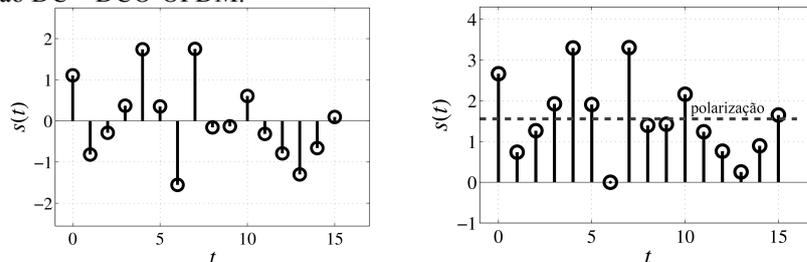
Os sinais gerados pela modulação em OFDM padrão são de valor complexo e bipolar, o que gera a necessidade de se modificar o OFDM para se adequar a implementação em um sistema IM/DD. Uma maneira prática de transformar um sinal modulado em OFDM em um sinal real é a imposição de uma restrição Hermitiana nas subportadoras no domínio da frequência, como ilustrado na Figura 2. Porém, sendo o sinal resultante ainda bipolar, se faz necessário também mais uma modificação, que pode ser facilmente obtida adicionando-se um sinal em corrente contínua ao sinal modulado, para que o sinal modulado possa variar em torno, como ilustrado na Figura 3. Este esquema de modulação que resulta dessas modificações é o que é chamado de OFDM óptico com polarização em corrente contínua, ou DCO-OFDM (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013).

Figura 2 – A simetria hermitiana garante um sinal positivo no domínio do tempo: (a) as partes reais dos componentes de frequência positiva e negativa correspondentes são iguais; (b) as partes imaginárias dos componentes de frequência positiva e negativa correspondentes são iguais em valor absoluto, mas têm sinais opostos.



Fonte: TSONEV; VIDEV, HAAS (2013).

Figura 3 – Sinal OFDM real tornado bipolar através da adição de uma polarização DC – DCO-OFDM.



(a) Sinal OFDM bipolar não polarizado. (b) Sinal OFDM unipolar polarizado

Fonte: TSONEV; VIDEV, HAAS (2013).

Um empecilho causado pela adição do sinal em corrente contínua ao sinal modulado é o aumento significativo do consumo de energia, mas sendo o ponto de acesso Li-Fi incorporado ao sistema de iluminação por LEDs do ambiente, a própria iluminação pode ser usada como o sinal em corrente contínua do DCO-OFDM. A outra barreira a ser superada se torna então o sinal de *uplink* da rede, já que o usuário não utilizaria de um sistema de iluminação de seu dispositivo. Para superar isso, foram desenvolvidas outras técnicas de modulação baseadas no OFDM que seja unipolares, como por exemplo o OFDM óptico recortado assimetricamente (ACO-OFDM) (ARMSTRONG; LOWERY, 2006), a modulação multitons discreta modulada por amplitude de pulso (PAM-DMT) (LEE et al., 2009), o OFDM unipolar (U-OFDM) (TSONEV; SINANOVIC; HAAS, 2012), o Flip-OFDM (FERNANDO; HONG; VITERBO, 2011) e o OFDM óptico espectralmente fatorado (SFO-OFDM) (ASADZADEH; FARID; HRANILOVIC, 2011).

Também têm sido desenvolvidas pesquisas com técnicas de modulação baseadas em modulação CAP (do inglês *carrier-less amplitude and phase*, modulação em amplitude e em

fase sem portadora), originada a partir das tecnologias recentes de comunicação por fibra óptica, que modula o sinal em amplitude e em fase e trata o sinal para transmissão em IM para LED. Esquemas de modulação com base em CAP com múltiplas sub-portadoras se mostraram espectralmente eficientes em comparação a outras tecnologias, acarretando num aumento na taxa de dados (CHVOJKA et al., 2017).

A utilização de esquemas de modulação semelhantes ao OFDM e ao CAP trazem também outra vantagem da perspectiva de rede, já que trazem a possibilidade de se implementar o múltiplo acesso na rede, já que as diversas subportadoras do sinal podem ser alocadas a diferentes usuários em um acesso múltiplo por divisão de frequência ortogonal (TSONEV; VIDEV; HAAS, 2013).

4.4 Handover

Handover (do inglês, entrega; também comumente chamado de *handoff* nos Estados Unidos da América) é um conceito muito utilizado na área da telefonia celular, que se refere ao processo no qual uma sessão de transferência de dados entre uma estação móvel e uma estação base é transferida entre estações bases quando uma estação móvel atravessa o limite da célula de uma estação base e adentra a célula de outra, sem que a estação móvel perca sua conexão a rede (MIAO et al., 2016). O *handover* entre células é necessário para que uma qualidade de *link* aceitável possa ser mantida sem causar interferência desnecessária de co-canal e de canal adjacente, e é o que garante a mobilidade total de um usuário dentro de uma rede celular, pois assim ele se movimenta livremente entre células sem perder sua conexão com a rede (STÜBER, 2012).

Entre as principais atribuições de um sistema celular é o monitoramento da qualidade do *link* para conseguir determinar a necessidade do *handover*. A capacidade do sistema diminui consideravelmente devido à interferência excessiva de co-canal e/ou a cargas de comutação indevida caso seu algoritmo de *handover* não conseguir detectar uma qualidade ruim de sinal com rapidez o suficiente. Uma variedade de parâmetros como taxa de erro de *bit* (*bit error rate*, BER) (CORNETT; WICKER, 1991), relação portadora-interferência (C/I) (FRECH; MESQUIDA, 1989), distância (MANDE, 1990), carga de tráfego (MANDE, 1990),

intensidade do sinal (MANDE, 1990), (GRIMLUND; GUDMUNDSON, 1991), (GUDMUNDSON, 1991), (MURASE et al., 1991), (CHIA; WARBURTON, 1990), (VIJAYAN; HOLTZMAN, 1992), e várias combinações desses esquemas fundamentais foram sugeridas para avaliar a qualidade do enlace e decidir quando um *handover* deve ser executado. Desses, algoritmos de *handover* baseados na força do sinal temporal que medem a portadora recebida mais a potência de interferência (C+I) acabaram recebendo uma maior atenção de pesquisadores devido à sua simplicidade e bom desempenho em sistemas macrocelulares. No entanto, sistemas celulares espectralmente eficientes são limitados por interferência e um C+I grande não implica necessariamente um C/I grande. Uma vez que a qualidade do *link* está mais intimamente relacionada com C/I do que com C+I, fica claro que algoritmos de *handover* baseados em C/I são altamente desejáveis para sistemas microcelulares com seus ambientes de propagação caracteristicamente erráticos (STÜBER, 2012).

Sistemas celulares projetados para serem compostos de células de tamanhos reduzidos exigem maior rapidez e confiabilidade de avaliação de qualidade de *link*, já que uma estação móvel que se move no espaço desse sistema atravessa um número maior de células do que em um sistema de macrocélulas. Como mostrado por Labeledz et al. (1987), o número de cruzamentos de fronteira celular é inversamente proporcional ao tamanho da célula. Além do mais, foi demonstrado por Nanda (1993) que a taxa de *handover* aumenta apenas com a raiz quadrada da densidade de chamadas em macrocélulas, mas linearmente com a densidade de chamadas em microcélulas. Como também a probabilidade de falha de *handover* aumenta com o número de tentativas de *handovers*, é evidente que a necessidade de maior robustez e confiabilidade se torna cada vez maior a medida que o tamanho das células diminui.

Os diversos algoritmos de *handover* diferem entre si na maneira em que transferem uma sessão de transferência de dados, ou, uma chamada no caso da telefonia, de um *link* para o outro uma vez que um processo de *handover* se inicia, podendo ser categorizados como *forward handovers* ou *backward handovers*. Algoritmos de *backward handover* iniciam o processo de *handover* através da estação base hospedeira e não acessam o novo canal da estação base alvo até que a entidade de controle do novo canal tenha confirmado a alocação de recursos. O benefício trazido por esse tipo de *handover* é que as informações de sinalização são transmitidas através de um *link* existente e, portanto, o estabelecimento de um

novo canal de sinalização não é necessário durante os estágios iniciais do processo de *handover*. Porém a desvantagem é que caso a deterioração da qualidade de *link* com a estação base hospedeira ocorra muito rapidamente, o processo de *handover* pode falhar. Esse tipo de *handover* é usado na maioria dos sistemas celulares TDMA, como o GSM. Já os algoritmos de *forward handover* iniciam o processo de *handover* através de um canal na estação base alvo, sem depender da *link* com a estação base hospedeira durante a fase inicial do processo de transferência do *link*, o que traz uma velocidade maior para o processo, porém a confiabilidade se torna reduzida. Sistemas desse tipo são utilizados em sistemas de telefonia digital sem fio, como o DECT (STÜBER, 2012).

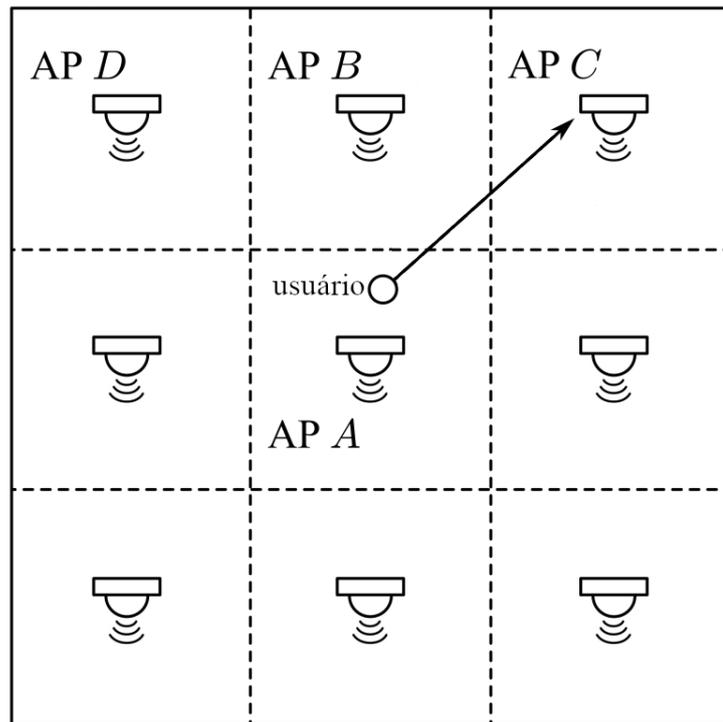
Também pode-se diferenciar os algoritmos de *handover* de acordo com a maneira que a estação móvel se conecta as estações base durante o processo, podendo ser caracterizadas como *hard handovers* ou *soft handovers*. Em algoritmos de *hard handover*, a estação móvel pode se conectar a apenas uma estação base de cada vez, fazendo uma decisão binária e absoluta de se iniciar e executar um *handover* sem que várias conexões simultâneas entre as estações base candidatas sejam feitas. A estação base alvo já está selecionada antes de o *handover* ser executado com base nas medições do *link* e a conexão ativa é transferida quase que instantaneamente, com o *handover* sendo iniciado com base em uma histerese imposta sobre o *link* atual. Por a estação móvel só poder se conectar a uma estação base por vez, a conexão acaba sofrendo uma breve interrupção no processo. No entanto, é uma maneira barata e simples de se implementar o *handover*. Esse tipo de *handover* é usado na maioria dos sistemas celulares TDMA, como IS-54, PDC e GSM. Já nos algoritmos de *soft handover*, uma estação móvel pode se conectar a várias estações base candidatas durante um processo de *handover*, concluindo, eventualmente, o *handover* quando a estação móvel seleciona a melhor estação base candidata como alvo. O *soft handover* é mais cuidadoso na seleção da estação base alvo, já que ela precisa ser a melhor candidata, fornecer o sinal mais forte dentre as disponíveis. Durante o processo de *handover*, o *soft handover* melhora ainda mais o desempenho do sistema através da recepção de diversidade. Ao contrário do *hard handover*, as medições de qualidade de *link* necessárias para *handover* são feitas pela estação móvel, onde ela monitora constantemente os sinais piloto das estações base circundantes. Apesar de suas vantagens, o *soft handover* é complexo e caro de implementar, além de que em seu processo a interferência direta aumenta, já que várias estações base podem se conectar à mesma estação móvel ao invés de apenas uma. Esse aumento na interferência direta pode se

tornar um problema se a região de transferência for grande, de modo que haja muitas estações móveis no modo de *soft handover* (STÜBER, 2012).

4.5 Handover Skipping

Handover skipping é o nome dado ao processo no qual se ignora o *handover* para uma estação base da qual a estação móvel tenha um tempo de permanência consideravelmente curto em sua célula, e realizar o processo de *handover* diretamente para a estação base da qual a estação móvel terá maior tempo de permanência na célula (WU; HAAS, 2019) (ARSHAD et al., 2016). A Figura 4 ilustra um exemplo onde o *handover skipping* seria aplicável.

Figura 4 – Exemplo de possível movimentação dentro de uma área coberta por uma rede Li-Fi.



Fonte: WU e HAAS (2019).

Nessa figura se exemplifica o caso onde uma estação móvel deixa a célula da estação base A, adentra a célula da estação base B por um curto trecho e, então, adentra a célula da estação base C. A variável determinante para se concluir como necessário um *handover skipping* é o tempo de permanência dentro de uma célula, que por sua vez é determinado por duas variáveis, uma delas sendo o comprimento do trecho percorrido dentro de uma célula e a outra

sendo a velocidade em que se percorre o trecho. No caso exemplificado, dependendo da velocidade em que se percorre o trecho dentro da célula da estação base B, seria justificável um *handover skipping*, ou seja, um *handover* da estação base A direto para a estação base C, sem se conectar à estação base B ao atravessar sua célula.

Dado a crescente densidade das redes com a gradual evolução das tecnologias de telecomunicações, o conceito de *handover skipping* foi desenvolvido para se evitar o efeito *ping-pong*, quando um processo de *handover* se repete um número considerável de vezes entre duas estações base, e também para se evitar processos de *handover* desnecessários para se manter um *link* dado ao tempo de permanência em células reduzido. Processos de *handover* gastam processamento, tomam tempo, e acabam diminuindo a velocidade dentro de um *link*, dado a breve interrupção inevitável que o processo causa. Logo, quanto mais *handovers* puderem ser evitados, melhor será para se manter um bom *link* com máxima velocidade dentro da mesma rede (WU; HAAS, 2019) (ARSHAD et al., 2016).

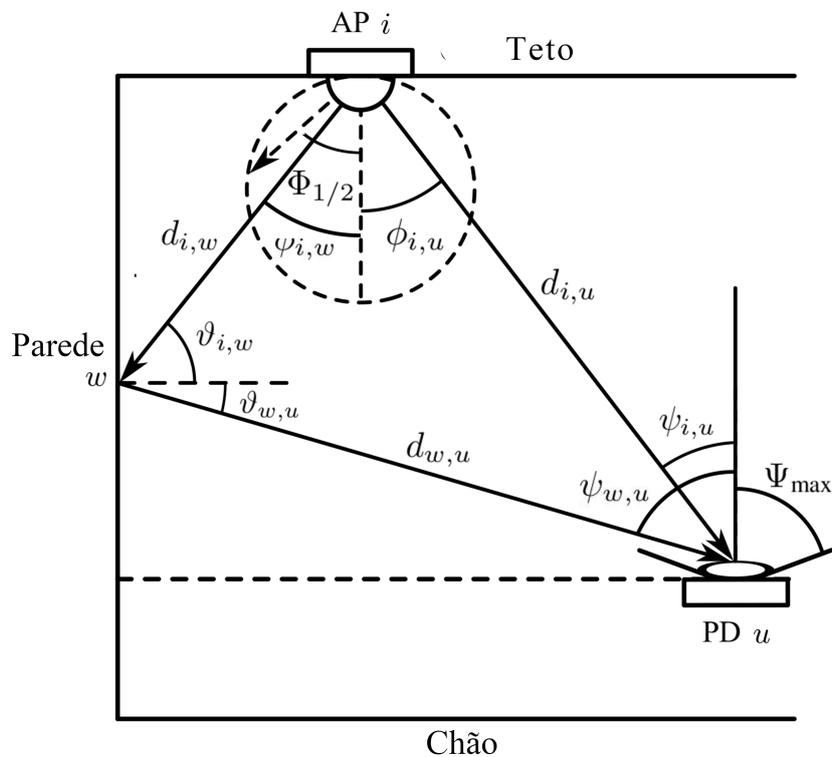
A partir desta seção, a linguagem de redes celulares será substituída pela linguagem de redes internas. Logo, o que anteriormente foi chamado de "estação base" será agora chamado de "ponto de acesso", abreviado para apenas "AP", e o que foi anteriormente chamado de "estação móvel" será chamado agora simplesmente de "usuário", fazendo referência ao dispositivo móvel conectado a rede utilizado pelo indivíduo que usufrui da rede.

4.6 Modelagem do Sistema

Considerando uma rede Li-Fi consistida de vários pontos de acesso (APs), onde o sistema seja duplex de divisão de tempo, e que cada AP esteja integrado em uma luminária LED de teto direcionada perpendicular ao piso. Cada AP empregando espectros diferentes, acabam não interferindo entre si. Um receptor equipado de um único fotodiodo direcionado perpendicularmente ao teto se move pelo espaço seguindo um modelo aleatório de trajetória de pontos (RPW, do inglês, *random point way*). A modelagem como apresentada a seguir e as equações 1 a 6 são derivadas do modelo de WU e HAAS (2019).

Um canal Li-Fi é composto por duas componentes: os caminhos na linha de visão (LoS, do inglês *line-of-sight*) e fora da linha de visão (NLoS, do inglês *non line-of-sight*). Apenas reflexões de primeira ordem serão consideradas dado que as de segunda ordem ou superior contribuem de maneira irrelevante, como demonstrado por KAHN e BARRY (1997). Sendo i e u o AP e o usuário, respectivamente, $d_{i,u}$ é a distância euclidiana entre o AP e o usuário, $\phi_{i,u}$ é o ângulo de irradiação e $\psi_{i,u}$ o ângulo de incidência. Os caminhos LoS e NLoS estão ilustrados na Figura 5 apresentada a seguir:

Figura 5 – Os caminhos LoS e NLoS de primeira ordem de um canal Li-Fi.



Fonte: (WU; SAFARI; HAAS, 2017)

O ganho do canal de LoS é representado pela equação:

$$H_{LoS}^{i,u} = \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi d_{i,u}^2} \cos^m(\phi_{i,u}) g_f g_c(\psi_{i,u}) \cos(\psi_{i,u}) \quad (1)$$

onde m é a ordem de emissão Lambertiana, denotada por $m = -\ln 2 / \ln(\cos(\Phi_{1/2}))$, $\Phi_{1/2}$ é o ângulo de meia intensidade, A_{pd} a área física do fotodiodo, g_f é o ganho do filtro óptico e g_c é o ganho do concentrador óptico, que é dado por:

$$g_c(\psi_{i,u}) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\Psi_{\max})}, & 0 \leq \psi_{i,u} \leq \Psi_{\max} \\ 0, & \psi_{i,u} > \Psi_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

onde n é o índice de refração e Ψ_{\max} representa o semiângulo do campo de visão do fotodiodo.

Uma reflexão de primeira ordem consiste de dois segmentos, do emissor a uma área infinitesimal w da parede e de w até o receptor. As distâncias euclidianas desses dois segmentos são representadas por $d_{i,w}$ and $d_{w,u}$, respectivamente. Os ângulos de radiação e de incidência do primeiro segmento são $\phi_{i,w}$ e $\theta_{i,w}$, e do segundo segmento são $\theta_{w,u}$ e $\psi_{w,u}$. O ganho do canal de NLoS é dado por:

$$H_{\text{NLoS}}^{i,u} = \int_{A_w} \frac{(m+1)A_{\text{pd}}}{2(\pi d_{i,w} d_{w,u})^2} \rho_w g_f g_c(\psi_{w,u}) \cos(\psi_{w,u}) \cos(\theta_{i,w}) \cos(\theta_{w,u}) dA_w \quad (3)$$

Onde A_w é a área de w e ρ_w é a refletância da parede.

A soma dos ganhos dos dois caminhos é o ganho total do canal Li-Fi, que pode ser expressado por:

$$H_{\text{LiFi}}^{i,u} = H_{\text{LoS}}^{i,u} + H_{\text{NLoS}}^{i,u} \quad (4)$$

O fotodiodo do receptor converte o sinal em corrente elétrica, descrita por:

$$I_{\text{elec}} = R_{\text{pd}} H_{\text{LiFi}}^{i,u} P_{\text{opt}} / \zeta \quad (5)$$

Onde R_{pd} é a responsividade do detector, P_{opt} é a potência óptica transmitida, e ζ denota o razão entre P_{opt} e a potência do sinal óptico. A razão entre sinal e ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) do usuário é denotada por:

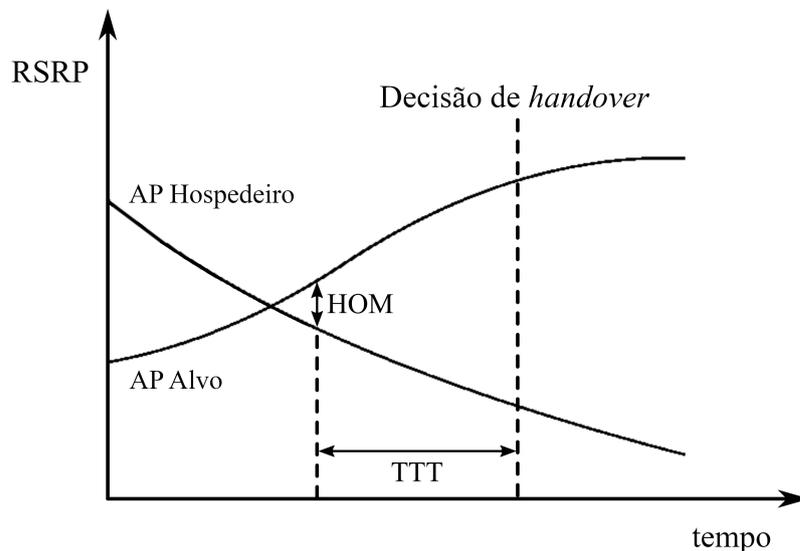
$$\gamma^{i,u} = \frac{(R_{\text{pd}} H_{\text{LiFi}}^{i,u} P_{\text{opt}} / \zeta)^2}{N_{\text{LiFi}} B_{\text{LiFi}}} \quad (6)$$

onde N_{LiFi} denota a densidade espectral de potência (PSD) do ruído no receptor, incluindo ruído de disparo e ruído térmico, enquanto B_{LiFi} é a largura de banda do AP Li-Fi.

4.7 Esquema de *Handover* do LTE (4G)

LTE (do inglês, *long term evolution*, evolução a longo prazo) é o padrão de rede que se tornou conhecido comercialmente como a quarta geração da telefonia celular, ou apenas 4G. No esquema de *handover* deste padrão de rede o *handover skipping* é realizado através do conceito histerese aplicado neste contexto ao se prolongar a tomada de decisão de se realizar um processo de *handover* por um determinado tempo. Para isso, o LTE utiliza dois parâmetros: a margem de *handover* (HOM, do inglês *handover margin*), e o tempo de disparo (TTT, do inglês *time to trigger*) (WU; HAAS, 2019). A Figura 6 ilustra o funcionamento desse esquema de *handover*.

Figura 6 – O esquema de *handover* no LTE.



Fonte: WU e HAAS (2019).

Denotamos então o valor de HOM e o RSRP do AP hospedeiro e do AP alvo por δ_{HOM} , P_{i_H} e P_{i_T} , respectivamente. O esquema dispõe de um cronômetro que é acionado pela

condição abaixo, quando o RSRP do AP alvo se torna maior que o do AP hospedeiro mais a margem de *handover*:

$$P_{i_T} > P_{i_H} + \delta_{\text{HOM}} \quad (7)$$

O cronômetro continuará contando tempo enquanto a condição acima for satisfeita. Caso a contagem não for interrompida, o cronômetro contará até TTT, onde será tomada a decisão de se realizar um *handover* ou não, transferindo o *link* do usuário para o AP alvo caso o RSRP dele for maior ao fim TTT, caso contrário, o *link* com o AP hospedeiro se manterá (WU; HAAS, 2019).

Este esquema de *handover* resolve o problema do efeito *ping-pong*, mas não é capaz de resolver o problema de redes de alta densidade do curto tempo de permanência em cada célula, já TTT costuma estar na casa dos milissegundos. No exemplo da Figura 4, o usuário teria de realizar dois processos de *handover* até se conectar com o AP C, sendo que, dependendo do tempo de permanência na célula de B, um *handover skipping* seria melhor para a qualidade de *link* do usuário. Sendo necessário então, para uma rede Li-Fi, um esquema que realize um *handover skipping* em células onde o tempo de permanência seja demasiadamente curto (WU; HAAS, 2019).

4.8 Esquema de *Handover* Proposto

Sendo o RSRP de cada AP diretamente proporcional ao valor da distância entre o usuário e o AP, valor instantâneo do RSRP de cada AP pode ser utilizado para determinar qual AP está mais perto ou distante do usuário dentre os APs viáveis para conexão. Porém esse dado sozinho não basta para solucionar o problema levantado anteriormente. O esquema proposto por WU e HAAS (2019), cuja análise é o objetivo deste trabalho, introduz uma nova variável, chamada de Γ , que utiliza o valor instantâneo de RSRP por uma determinada faixa de tempo para então concluir a taxa de variação do RSRP de cada AP candidato a um *handover*. A variação no valor do RSRP nos traz então a informação se o usuário se aproxima ou se afasta do AP, nos dando então a possibilidade de realizar um *handover skipping* nas células onde o

usuário se afasta do AP, e realizar um *handover* direto para o AP do qual o usuário se aproxima (WU; HAAS, 2019).

Dessa forma, o esquema proposto consegue resolver o problema de *handover* para redes densas citado anteriormente, poupando o sistema de analisar a posição e velocidade do usuário, resumindo todas essas informações na análise da variação do valor de RSRP em Γ (WU; HAAS, 2019).

O Γ de cada AP i pode ser descrito pela equação abaixo:

$$\Gamma_i = P_i^{(t_0)} + \lambda \Delta P_i, \quad (8)$$

onde P_i denota o RSRP de um AP i , t_0 denota o tempo onde o cronômetro é iniciado, λ sendo o coeficiente de peso e ΔP_i denota a variação do valor RSRP no tempo ente t_0 e t_{TTT} , sendo t_{TTT} o valor de TTT:

$$\Delta P_i = \frac{P_i^{(t_0+t_{TTT})} - P_i^{(t_0)}}{t_{TTT}}. \quad (9)$$

O esquema proposto se baseia no esquema do LTE em sua estrutura, aplicando o mesmo conceito de histerese com HOM e TTT, porém o AP com maior Γ se torna o AP alvo ao fim da contagem do cronômetro, sendo o *handover* realizado assim que o AP alvo atender a condição (7). Se o AP alvo já atendê-la, o *handover* é imediato, caso não atenda o *handover* é retido até que a condição seja atendida. Este tempo de retenção do *handover*, entre a escolha do AP alvo com o maior Γ e seu atendimento da condição para o *handover*, também torna o esquema proposto sensível a mudanças de direção e velocidade do usuário na rede, possibilitando o usuário de se manter conectado ao AP hospedeiro até que seu movimento pela rede acione outro contador. Nota-se também que o AP que aciona o contador não é necessariamente o mesmo que será alvo de um *handover* (WU; HAAS, 2019).

O parâmetro correspondente ao valor de RSRP ao início da contagem do cronômetro, $P_i^{(t_0)}$, é uma função da posição em que o usuário atravessa a fronteira entre células, enquanto ΔP_i reflete a direção e velocidade do usuário. Se o ponto de cruzamento de fronteira entre células

for muito próximo à fronteira de outra célula candidata, o valor de $P_i^{(t_0)}$ será quase igual entre os APs candidatos, tornando ΔP_i o fator decisivo para a decisão de *handover*. Caso o ponto de cruzamento seja longe de outra célula candidata, $P_i^{(t_0)}$ se torna o fator decisivo, já que apesar de ΔP_i poder aumentar para outro AP, um $P_i^{(t_0)}$ maior indica que o usuário se aproxima mais de um AP do que do outro (WU; HAAS, 2019).

4.9 Análise Teórica da Performance do Esquema Proposto

Nesta seção é realizada uma análise teórica do desempenho do esquema proposto utilizando as equações apresentadas previamente e técnicas matemáticas de probabilidade e estatística.

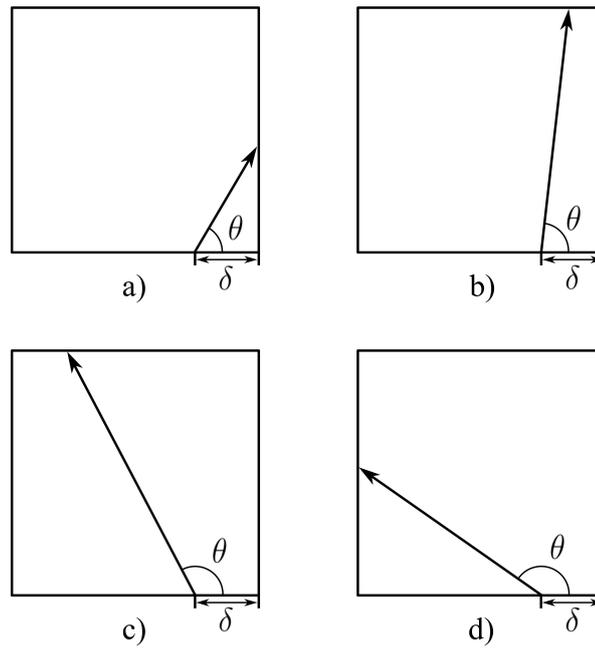
Considera-se uma área infinita coberta por uma rede Li-Fi, com iluminação perfeitamente uniforme, sendo cada ponto de iluminação um AP Li-Fi, onde cada AP tem uma célula perfeitamente quadrada, com cada lado de cada quadrado medindo exatamente r . Considera-se também um usuário que se move de maneira arbitrária dentro da rede. Assume-se que o usuário entra em uma célula de um AP em um ponto arbitrário, chamado ponto de entrada, em um ângulo arbitrário, chamado θ . A distância entre o ponto de entrada e o vértice de referência da célula do AP é denotado por δ .

Na próxima subseção, é estabelecido o valor médio da distância percorrida pelo usuário dentro de uma célula da rede. Na subseção seguinte é analisada a probabilidade da ocorrência de um *handover skipping*. Já na subseção subsequente a essa, é analisada a taxa de *handover* de um usuário na rede em função da velocidade do usuário e do valor de r .

4.9.1 Derivação de \bar{d}_{path}

O comprimento do percurso percorrido por um usuário dentro da célula de um AP é denotado por d_{path} . A Figura 7 ilustra os quatro possíveis caminhos a se tomar dado um ponto de entrada:

Figura 7 – Possíveis movimentos de um usuário dentro de uma célula de um AP Li-Fi.



Fonte: WU e HAAS (2019)

Descrevendo matematicamente d_{path} como uma função de δ , nós temos as seguintes expressões para $d_{path}(\delta)$:

$$d_{path}(\delta) = \begin{cases} \frac{\delta}{\cos(\theta)}, & 0 \leq \theta < \theta_1 \\ \frac{\delta}{\sin(\theta)}, & \theta_1 \leq \theta < \pi/2 \\ \frac{\delta}{\sin(\pi - \theta)}, & \pi/2 \leq \theta < \theta_2 \\ \frac{\delta}{\cos(\theta)}, & \theta_2 \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (10)$$

Onde:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{r}{\delta}\right) \\ \theta_2 = \pi - \arctan\left(\frac{r}{r-\delta}\right) \end{cases} \quad (11)$$

Como $\sin(\pi - \theta) = \sin(\theta)$, o segundo e terceiro tipo podem ser juntados em apenas um. O valor médio de $d_{path}(\delta)$ é expressado por:

$$\bar{d}_{path}(\delta) = \frac{1}{\pi} \left(\int_{\theta=0}^{\theta_1} \frac{\delta}{\cos(\theta)} d\theta + \int_{\theta=\theta_1}^{\theta_2} \frac{r}{\sin(\theta)} d\theta + \int_{\theta=\theta_2}^{\pi} \frac{\delta-r}{\cos(\theta)} d\theta \right) \quad (12)$$

onde se resolvem as integrais do lado direito da equação ao se calcular as antiderivadas, resultando em:

$$\bar{d}_{path}(\delta) = \frac{1}{\pi} \left[\delta \log\left(\frac{r+\delta_1}{\delta}\right) + r \log\left(\frac{\delta+\delta_1}{\delta_1-r+\delta}\right) + (r-\delta) \log\left(\frac{r+\delta_2}{r-\delta}\right) \right] \quad (13)$$

onde:

$$\begin{cases} \delta_1 = \sqrt{\delta^2 + r^2} \\ \delta_2 = \sqrt{(r-\delta)^2 + r^2} \end{cases} \quad (14)$$

O δ será analisado apenas de 0 a $r/2$, dado que a análise de δ de $r/2$ até r seria igual, apenas se espelhando. O que nos dá:

$$\bar{d}_{path} = \frac{2}{r} \int_{\delta=0}^{r/2} \bar{d}_{path}(\delta) d\delta \quad (15)$$

Substituindo (13) em (15), temos então que:

$$\bar{d}_{path} = \frac{r}{\pi} \left[3 \log(\sqrt{2} + 1) + 1 - \sqrt{2} \right] \quad (16)$$

4.9.2 Probabilidade de Ocorrência de um *Handover Skipping*

Analisa-se a trajetória de um usuário que sai da célula de um AP A e adentra a célula de um AP B , que faz fronteira com a célula do AP C a sua direita e com a do AP D a sua esquerda, conforme ilustrado na Figura 4.

Denotaremos o evento de ocorrência de um *handover skipping* dado o método proposto como X . Logo, a probabilidade desse evento é denotado por $\mathbb{P}(X)$ que pode ser descrito como:

$$\mathbb{P}(X) = 1 - \mathbb{P}(\neg X) \quad (17)$$

onde:

$$\mathbb{P}(\neg X) = \mathbb{P}(\Gamma_B \geq \Gamma_i, \forall i \neq B) \quad (18)$$

A chance de ocorrer um *handover skipping* para algum AP fora o C ou D é quase nula, podendo assim ser desconsiderada da análise. Analisando o ponto de entrada dado um δ entre 0 e $r/2$ como explicado anteriormente, o único AP candidato para um *handover skipping* dado um θ entre 0 e $\pi/2$ seria o AP C , caso contrário, o único candidato é o D . O que permite concluir que:

$$\mathbb{P}(\neg X) = \int_{\delta=0}^{r/2} \mathbb{P}(\neg X | \delta) \mathbb{P}(\delta) d\delta \quad (19)$$

onde:

$$\mathbb{P}(\neg X | \delta) = \int_{\theta=0}^{\pi/2} \mathbb{P}(\Gamma_B \geq \Gamma_C | \theta, \delta) \mathbb{P}(\theta) d\theta + \int_{\theta=\pi/2}^{\pi} \mathbb{P}(\Gamma_B \geq \Gamma_D | \theta, \delta) \mathbb{P}(\theta) d\theta \quad (20)$$

Analisa-se então as expressões $\mathbb{P}(\Gamma_B \geq \Gamma_C | \theta, \delta)$ e $\mathbb{P}(\Gamma_B \geq \Gamma_D | \theta, \delta)$. Das equações (1), (5) e (8) pode-se expressar Γ_i como:

$$\Gamma_i = g_{\text{eff}} \left[\left(1 - \frac{\lambda}{t_{\text{TTT}}}\right) \mathcal{P}^{(t_0)} + \left(1 - \frac{\lambda}{t_{\text{TTT}}}\right) \mathcal{P}^{(t_0+t_{\text{TTT}})} \right] \quad (21)$$

onde:

$$g_{\text{eff}} = \left[\frac{(m+1)A_{\text{pd}}h^{m+1}g_f g_c R_{\text{pd}} P_{\text{opt}}}{2\pi\zeta} \right]^2 - \left(h_{i,u}^{(t)}\right)^{2m+2} \quad (22)$$

e:

$$\mathcal{P}_i^{(t)} = \left[\left(h_{i,u}^{(t)}\right)^2 + \left(l_{i,u}^{(t)}\right)^2 \right]^{-m-3} \quad (23)$$

onde $h_{i,u}^{(t)}$ e $l_{i,u}^{(t)}$ representam as distâncias verticais e horizontais, respectivamente, entre o AP e o usuário. sendo a distância vertical entre o usuário e todos os APs constante por toda a área coberta pela rede, abrevia-se $h_{i,u}^{(t)}$ para apenas h .

Considera-se então uma função $Z(\theta)$, expressa por:

$$Z(\theta) = \Gamma_B - \Gamma_C \quad (24)$$

substituindo então (21) em (24):

$$Z(\theta) = \left(1 - \frac{\lambda}{t_{\text{TTT}}}\right) \left(\mathcal{P}_B^{(t_0)} - \mathcal{P}_C^{(t_0)}\right) + \frac{\lambda}{t_{\text{TTT}}} \left(\mathcal{P}_B^{(t_0+t_{\text{TTT}})} - \mathcal{P}_C^{(t_0+t_{\text{TTT}})}\right) \quad (25)$$

O que nos permite afirmar então que:

$$\mathbb{P}(\Gamma_B \geq \Gamma_C \mid \theta, \delta) = \mathbb{P}(Z(\theta) \geq 0 \mid \theta, \delta) \quad (26)$$

Observa-se que $\left(1 - \frac{\lambda}{t_{\text{TTT}}}\right) \left(\mathcal{P}_B^{(t_0)} - \mathcal{P}_C^{(t_0)}\right)$ é uma constante para θ , portanto, $Z(\theta)$ varia apenas com $\left(\mathcal{P}_B^{(t_0+t_{\text{TTT}})} - \mathcal{P}_C^{(t_0+t_{\text{TTT}})}\right)$, que denota-se por $F(\theta)$.

Dado θ e δ , temos que:

$$\begin{cases} l_B^{(t_0)} = \sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2 + \left(\frac{r}{2} - \delta\right)^2} \\ l_B^{(t_0+t_{TTT})} = \sqrt{\left(\frac{r}{2} - vt_{TTT} \sin(\theta)\right)^2 + \left(\frac{r}{2} - \delta + vt_{TTT} \cos(\theta)\right)^2} \\ l_C^{(t_0)} = \sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2 + \left(\frac{r}{2} + \delta\right)^2} \\ l_C^{(t_0+t_{TTT})} = \sqrt{\left(\frac{r}{2} - vt_{TTT} \sin(\theta)\right)^2 + \left(\frac{r}{2} + \delta - vt_{TTT} \cos(\theta)\right)^2} \end{cases} \quad (27)$$

Como comprovado matematicamente por WU e HAAS (2019): para $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$, $Z(\theta)$ aumenta monotonicamente caso $F(\theta) \geq 0$. Caso $F(\theta) < 0$, $Z(\theta)$ decresce monotonicamente primeiro e depois aumenta monotonicamente; Dado θ no mesmo intervalo, existe ao menos uma solução para $Z(\theta) = 0$ na condição de $\lambda > t_{TTT}$, que é satisfeita em quase todos os casos práticos, dado que λ costuma ter um valores entre 1 a 5 e t_{TTT} tem um valor típico de 0,16s (ETSI, 2016); E também que existe ao menos um θ que satisfaz $Z(\theta) \geq 0$.

O que permite concluir existe apenas em θ que satisfaz $Z(\theta) = 0$ quando $F(0) < 0$. Para $F(0) \geq 0$, $Z(\theta)$ seria sempre positivo caso não haja uma solução para $Z(\theta) = 0$. Denota-se então a solução para $Z(\theta) = 0$ como Θ_C , caso ela exista, caso contrário temos $\Theta_C = 0$. Logo, conclui-se que:

$$\mathbb{P}(\Gamma_B \geq \Gamma_C \mid \theta, \delta) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta < \Theta_C \\ 1, & \Theta_C \leq \theta < \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (28)$$

De maneira semelhante:

$$\mathbb{P}(\Gamma_B \geq \Gamma_D \mid \theta, \delta) = \begin{cases} 1, & \frac{\pi}{2} \leq \theta < \Theta_D \\ 0, & \Theta_D \leq \theta < \pi \end{cases} \quad (29)$$

Onde Θ_D é a solução para $\Gamma_B = \Gamma_D$ caso exista uma, caso contrário $\Theta_D = \pi$.

Dado então que θ é uniformemente distribuído de 0 a π , e que δ é uniformemente distribuído de 0 a $\frac{r}{2}$, considerando as equações (28) e (29) podemos então concluir que:

$$\mathbb{P}(\neg X \mid \delta) = \frac{\Theta_D(\delta) - \Theta_C(\delta)}{\pi} \quad (30)$$

e também que:

$$\mathbb{P}(\delta) = \frac{2}{r} \quad (31)$$

Substituindo então (30) e (31) em (20):

$$\mathbb{P}(\neg X) = \frac{2}{\pi r} \int_{\delta=0}^{r/2} [\Theta_D(\delta) - \Theta_C(\delta)] d\delta \quad (32)$$

4.9.3 Taxa de *Handover* Teórica

Analisa-se primeiramente a taxa de *handover* do esquema SSS, onde não há *handover skipping*. A taxa de *handover* é igual a velocidade do usuário, denotada por v , dividido pelo comprimento da trajetória média do usuário dentro de uma célula, \bar{d}_{path} . Sendo assim, expressa-se essa taxa de *handover*, denotada por η , como:

$$\eta = \frac{\pi v}{r} \left[3 \log(\sqrt{2} + 1) + 1 - \sqrt{2} \right]^{-1} \quad (33)$$

Com essa informação, tem-se a taxa de *handover* caso não exista *handover skipping*, logo, a taxa de *handover* havendo *handover skipping* é igual a taxa de *handover* sem haver nenhum *handover skipping* multiplicado pela chance de não ocorrer um *handover skipping*. Denotando então a taxa de *handover* do método proposto por WU e HAAS (2019) por η_{HS} , chega-se na equação:

$$\eta_{\text{HS}} = \frac{\pi v}{r} \left[3 \log(\sqrt{2} + 1) + 1 - \sqrt{2} \right]^{-1} \int_{\delta=0}^{r/2} [\Theta_D(\delta) - \Theta_C(\delta)] d\delta \quad (34)$$

4.9.4 Probabilidade de cobertura

Na área de estatística, a probabilidade de cobertura é uma técnica utilizada para calcular um intervalo de confiança que representa a proporção de vezes que o intervalo contém o valor verdadeiro de interesse (DODGE, 2003). Por outro lado, em telecomunicações, o termo se refere à probabilidade de um usuário estar sendo coberto por uma rede, ou seja, a probabilidade de que o sinal recebido pelo usuário seja maior que o limite mínimo do sinal para manter uma conexão com a rede (RENZO et al., 2018). Esse SNR limite será chamado de γ_T .

Sendo o SNR calculado em função da distância entre o usuário e o AP, pode-se estabelecer uma relação entre o SNR limite γ_T e uma distância horizontal limite l_T . Logo, pode-se computar, a partir da equação (6):

$$l_T = \sqrt{\left[\frac{(m+1)A_{pd}h^{m+1}g_f g_c R_{pd} P_{opt}}{2\pi\zeta\sqrt{\gamma_T} N_{LiFi} B_{LiFi}} \right]^{\frac{2}{m+3}} - h^2} \quad (35)$$

Sendo o SNR do usuário maior que γ_T quando l for menor que l_T , conclui-se que a probabilidade de cobertura do método SSS é igual a probabilidade de que l seja menor do que l_T , como descrito pela equação:

$$\mathbb{P}(l < l_T) = \begin{cases} \pi \left(\frac{l_T}{r}\right)^2, & l_T \leq \frac{r}{2} \\ 2\sqrt{r \left(\frac{l_T}{r}\right)^2 - \frac{1}{4}} + \left(\frac{l_T}{r}\right)^2 \left[\pi - 4 \arccos\left(\frac{r}{2l_T}\right) \right], & \frac{r}{2} < l_T < \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1, & l_T \geq \frac{\sqrt{2}r}{2} \end{cases} \quad (36)$$

A probabilidade de cobertura do método SSS é dependente do tamanho da área de cobertura, que, sendo a área dependente de r , pode-se denotar a probabilidade de cobertura por $\mathcal{P}(r)$. Já para o método proposto, observa-se que a distância entre o AP hospedeiro e o alvo muda de r para $\sqrt{2}r$. Logo, conclui-se que a probabilidade de cobertura do método proposto é igual a $\mathcal{P}(r)$ quando não há *handover skipping*, e é igual a $\mathcal{P}(\sqrt{2}r)$ quando há *handover skipping*. Portanto, estima-se a probabilidade de cobertura do método proposto como:

$$\mathcal{P}_{\text{HS}}(r) = \mathbb{P}(\neg X)\mathcal{P}(r) + \mathbb{P}(X)\mathcal{P}(\sqrt{2}r) \quad (37)$$

4.9.5 Taxa de transferência

A taxa de transferência, também denominada de *throughput* (do inglês de mesmo significado), é uma medida que avalia a capacidade de uma rede sem fio em transmitir dados em um intervalo de tempo específico. Essa medida é definida como a quantidade de pacotes que podem ser transferidos em uma unidade de tempo, geralmente expressa em bits por segundo (bps) ou em bytes por segundo (Bps). A taxa de transferência é influenciada por diversos fatores, como a largura de banda da rede, a qualidade do sinal, a interferência e o número de pacotes transmitidos (TANENBAUM; WETHERALL, 2010).

A avaliação da taxa de transferência é essencial para a análise do desempenho de redes sem fio, dado que a identificação de gargalos e a otimização do desempenho da rede dependem da avaliação da taxa de transferência de pacotes (KUROSE; ROSS, 2016).

O processo de *handover* também é um fator que pode impactar significativamente a taxa de transferência de pacotes da rede. Durante o *handover*, o dispositivo móvel precisa interromper a conexão com o AP atual e estabelecer uma nova conexão com o AP de destino, o que pode gerar interrupções temporárias na comunicação e, conseqüentemente, reduzir a taxa de transferência de pacotes. Essa interrupção pode ser causada pela necessidade de autenticar o dispositivo com o novo AP, definir as configurações de rede e estabelecer uma nova conexão. Portanto, é importante otimizar o processo de *handover* para minimizar o impacto no desempenho da rede (ALNABHAN et al., 2020).

A magnitude do impacto do *handover* na taxa de transferência é influenciada por diversos fatores, como a distância entre o dispositivo móvel e os APs da rede, a qualidade do sinal, a carga da rede de destino e a eficiência do mecanismo de *handover* utilizado. Se o *handover* não for gerenciado corretamente, pode ocorrer perda significativa de pacotes e atrasos na transmissão de dados, o que afeta diretamente a qualidade do serviço e a experiência do usuário (MISHRA; CHAKI; CHOUDHURY, 2015).

Logo, é possível concluir que, quanto maior for a taxa de *handover* em uma rede, maior será o impacto do processo de *handover* na taxa de transferência, já que mais processos como esse ocorrerão num intervalo de tempo.

O custo de um processo de *handover* também é chamado de *handover overhead*. O *handover overhead* é o tempo e os recursos necessários para realizar uma operação de *handover* em uma rede sem fio. Isso inclui a procura por pontos de acesso vizinhos, avaliação do sinal, força e qualidade dos pontos de acesso, decisão sobre qual ponto de acesso é melhor para transferir a conexão, estabelecimento de uma nova conexão com o ponto de acesso selecionado e transferência da comunicação em andamento para o novo ponto de acesso. O *handover overhead* também pode incluir o processamento e energia necessários para realizar essas operações. Esquemas eficientes de *handover*, logo, são esquemas que diminuem o *handover overhead*, tornando a rede mais eficiente. (POLADI; CHINTHAM; KUMAR, 2018).

Levando isso em consideração, calcula-se a taxa de transferência média de um usuário da seguinte maneira:

Primeiro se estabelece a capacidade média do canal. A capacidade do canal pode ser dada através do teorema de Shannon-Hartley (SHANNON, 1948):

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (38)$$

A capacidade média então pode ser obtida substituindo-se o valor de SNR pelo valor médio de SNR medido pelo usuário.

A taxa de transferência de um usuário numa rede sem fio é dada pelo produto da capacidade do canal e a probabilidade de um pacote ser entregue de maneira bem sucedida (ISLAM; JAMIL; RAHMAN, 2015). O que nos permite então concluir que, a taxa de transferência média de uma usuário pode ser computada por:

$$T = C(1 - d_{ho})^n \quad (39)$$

Sendo T a taxa de transferência, C a capacidade média do canal, d_{ho} o *handover overhead* e η a taxa de *handover*.

5 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

5.1 Metodologia

Este capítulo apresenta e detalha o funcionamento de uma nova metodologia adotada para o cálculo dos parâmetros de análise dos diferentes esquemas de *handover* que são comparados a seguir, conceptualizada e desenvolvida pelo próprio autor. Levando-se em consideração as limitações que cálculos computacionais trazem de se realizar cálculos no domínio contínuo, o método desenvolvido pelo autor utiliza métodos matemáticos, primordialmente estatísticos e probabilísticos no domínio discreto, aproveitamento das capacidades de matemática matricial da linguagem de programação MATLAB..

O projeto proposto visa realizar uma análise comparativa entre três métodos de *handover*, o método SSS, o método do LTE e o método proposto por WU e HASS (2019). A análise comparativa tem como objetivo determinar qual método de *handover* é o mais adequado, considerando os parâmetros analisados. Essa análise pode ser útil para o planejamento de frequências, proposição de novos algoritmos de decisão de *handover*, desenvolvimento de novos métodos de *handover* que considerem o balanceamento de tráfego e o consumo de energia, e otimização do *handover* na camada de rede. Dessa forma, os resultados obtidos através da simulação computacional podem contribuir para o avanço do conhecimento na área de redes de comunicação sem fio, além de fornecer informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes no âmbito da tomada de decisão em *handover*.

5.2 Desenvolvimento

Para tanto, o código recebe variáveis e calcula a taxa de *handover* e a probabilidade de cobertura de cada método. O código completo e comentado encontra-se no Anexo A deste documento. O código inicia limpando as variáveis, a tela de comando e fechando todas as janelas abertas com os comandos *clear*, *clc* e *close all*, para evitar interferências de cálculos prévios. Em seguida, são declaradas as variáveis de entrada para os cálculos. As variáveis

utilizadas são baseadas em pesquisas prévias realizadas na Universidade de Edimburgo (WU; HAAS, 2019), e são conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros de entrada da simulação.

Parâmetro	Valor
Tempo de disparo, t_{TTT}	16 [ms]
Margem de <i>handover</i> , δ_{HOM}	$1,225 \times 10^{-9}$
Distância entre APs, r	2 [m]
Distancia vertical entre o usuário e o AP, h	3 [m]
Área do fotodiodo, A_{pd}	1 [cm ²]
Ganho do filtro ótico, g_f	1
Índice de refração, n	1,5
Ângulo de radiação de meia intensidade, $\Phi_{1/2}$	0
Semi ângulo do campo de visão, Ψ_{max}	0
Potência ótica transmitida, P_{opt}	3 [W]
Razão entre potência ótica transmitida e potência ótica do sinal, ζ	3
Responsividade do detetor, R_{pd}	0
Largura de banda de cada AP, B_{LiFi}	0
Densidade espectral de potencia do ruído, N_{LiFi}	10^{-21} [W/Hz]
<i>Handover Overhead</i> , d_{ho}	200 [ms]
Coefficiente de peso, λ	1

Calcula-se então a ordem de emissão lambertiana m dado o valor do ângulo de radiação de meia intensidade e o \bar{d}_{path} dado o valor de r .

5.2.1 Cálculo da taxa de *handover*

O código segue em laços de repetição do tipo *for* e *while*, e para aumentar a velocidade de execução do código, os vetores e matrizes de tamanho fixo que serão utilizados nos laços *for* são criados estaticamente na memória, declarando-os com valores de zero em seus tamanhos totais pré definidos, já os vetores e matrizes dentro do laço *while* são alocados na memória dinamicamente, tendo em vista que o número de interações de um *while* é variável.

O processo de cálculo da taxa de *handover* η para três métodos distintos é iniciado considerando-se um usuário que se desloca da célula do AP A para a célula do AP B, conforme ilustrado na Figura 4, sendo δ a distância entre o ponto de entrada e a extremidade inferior direita da célula do AP B e θ o ângulo entre a fronteira entre as duas células e o vetor

de trajetória do usuário. Esse cálculo é executado realizando uma varredura em todas as velocidades, distâncias e ângulos uniformemente distribuídos. O δ é analisado de zero até o valor correspondente a metade da fronteira entre as células, já que, de um ponto de vista estatístico, a outra metade trará resultados iguais sendo eles apenas um espelho da primeira metade, o que reduz o número de cálculos realizados pela metade. Já o θ é analisado de zero a 180° , já que para valores maiores que 180° a análise é igual a travessia para a célula do AP A, tornando o cálculo de 180° a 360° redundante. O resultado obtido na análise da fronteira entre as células dos hipotéticos APs A e B é considerado constante para qualquer cruzamento de fronteira de células da rede, o que implica que o resultado obtido representa o desempenho da rede de maneira estatisticamente significativa. Em outras palavras, a análise da fronteira entre as células dos APs A e B é um indicador estatístico da taxa de *handover* experimentada por um usuário na rede.

Para cada velocidade, é calculada uma taxa de *handover* η para cada método. Para isso, é verificado se ocorreu ou não um *handover* para cada valor de δ e de θ , respectivamente. São declaradas duas variáveis para contagem da ocorrência de *handover skipings*, uma para a contagem caso seja aplicado o método do LTE e outra para a contagem caso seja aplicado o método proposto, que são zeradas para cada interação no vetor de velocidade, já que a taxa de *handover* é diferente para cada uma. Para cada δ e para cada θ são declaradas as variáveis t_c e t , sendo t_c o contador temporal que se equivale ao cronômetro temporal descrito na seção 4.7, que será ativado assim que a condição (7) for satisfeita, e t é o contador temporal. O tempo nesta análise é analisado discretamente 0,1 em 0,1 milissegundos, já que o t_{TTT} é de 160 milissegundos. É declarada também a variável booleana *activateClock* como falsa. Assim que a condição (7) é satisfeita, ela se torna verdadeira.

O processo em questão consiste na execução de um laço *while* que será finalizado somente quando o valor de t_c atingir t_c , ou seja, após a conclusão do processo de tomada de decisão de execução de um *handover*. A cada iteração temporal, é calculada a distância entre o usuário e cada um dos quatro APs A, B, C e D. Em seguida, é calculado o ângulo de incidência do sinal de cada AP, para então calcular o ganho do captador óptico. Com essas informações, é calculado o RSRP de cada AP no instante temporal analisado.

Após esses cálculos, o código entra em estruturas condicionais, que analisam se no instante temporal em questão, a condição (7) é satisfeita ou não, comparando os RSRP dos APs B, C e D com o RSRP do AP A mais a margem de *handover*. Caso algum dos RSRP satisfaça a condição, *activateClock* recebe verdadeiro, t_0 armazena o valor de t no início da contagem do cronômetro, e os valores de RSRP de cada AP no início da contagem também são armazenados, e t_c então passa a armazenar o tempo decorrido desde o começo da contagem, se tornando o contador da cronometragem até t_{TTT} . Caso a condição não seja satisfeita, *activateClock* continua como falsa, e t_0 recebe o valor de t , fazendo com que t_c seja sempre igual a zero até que o cronômetro se inicie.

Após o cronômetro iniciar, as condições de *if* e *elseif* já não serão satisfeitas e o *while* então continua em incrementos de t até que o cronômetro atinja t_{TTT} . Após o fim do *while*, calcula-se o Γ de cada AP, dado os valores de RSRP no início e no final da contagem, para então averiguar em cada situação se houve *handover skipping* ou não. Primeiramente, compara-se os valores de Γ dos APs C e D com o do AP B. Caso Γ de C ou de D for maior que o Γ de B ao final da contagem, é porque houve *handover skipping* com o método proposto. Caso contrário, o *handover* ocorreu apenas do AP A para o B, não havendo *handover skipping*. Para o método do LTE, compara-se os valores do RSRP dos APs C e D com o do AP B, ocorrendo o *handover* para o AP de maior RSRP ao final da contagem, logo, o *handover skipping* ocorre apenas se o RSRP do AP C ou D for maior do que o do AP B. Essa comparação é feita em dois *ifs* separados, incrementando os contadores de *handover skipping* de cada método.

Então, a probabilidade de um *handover skipping* ocorrer é calculada dividindo a quantidade de ocorrências de *handover skipping* armazenada nos contadores dividido pela quantidade total de interações, que é o tamanho do vetor de δ vezes o do vetor de θ . A probabilidade de não ocorrer o *handover skipping* é 1 menos esse resultado.

A taxa de *handover* do método SSS é calculada conforme a equação (33) e a taxa dos dois outros métodos é igual a do método SSS vezes a probabilidade de um *handover skipping* não ocorrer, conforme explicado na seção 4.9.2.

5.2.2 Cálculo da probabilidade de cobertura

Para a análise da probabilidade de cobertura em um AP Li-Fi, é utilizado um processo de Poisson para distribuir pontos aleatórios em uma célula hipotética. Para isso, são gerados dois vetores de mil inteiros aleatórios que variam de 1 a 1000, utilizando-se a função *randi* do MATLAB. Esses valores são divididos por 1000 e multiplicados por r , gerando dois vetores com mil valores aleatórios que variam de 0,001 a r , que representam as coordenadas no eixo vertical e horizontal dentro de uma célula quadrada de lado r . A distância desses pontos aleatórios ao centro da célula onde se localiza o AP hipotético é calculada, cujas coordenadas são $r/2$ em ambos os eixos. Com essa distância, são calculados os ângulos de incidência para se calcular os ganhos do concentrador ótico para cada ponto. Assim, obtém-se os RSRP medido em cada ponto para se obter o valor de SNR, que é calculado dividindo-se o RSRP pela potência total do ruído, que é calculado multiplicando-se a largura de banda do AP densidade espectral de potência do ruído.

Tendo calculado o SNR observado de cada ponto aleatório dentro da célula, o código entra num laço *for* e compara cada um desses SNR a um vetor de SNR limites γ_T para se determinar a probabilidade de cobertura do método SSS para cada γ_T estabelecido. A probabilidade de cobertura do LTE e do método proposto é determinada então realizando os mesmos cálculos descritos anteriormente porém substituindo-se r por $\sqrt{2}r$, e, tendo os valores de $\mathbb{P}(\neg X)$ e de $\mathbb{P}(X)$ para o LTE e para o método proposto, aplica-se esses valores conforme a equação (37).

5.2.3 Cálculo da taxa de transferência

A taxa de transferência média medida pelo o usuário é calculada nas últimas linhas do *script* do Anexo A. Primeiramente calcula-se o SNR médio que um usuário mediria dentro de uma célula da rede. No caso, esse SNR médio foi calculado a partir da média aritmética dos SNR medidos em cada ponto aleatório gerado no cálculo da probabilidade de cobertura explicada anteriormente. A partir do valor desse SNR médio, calcula-se então a capacidade média do canal em bits por segundo, conforme o teorema de Shannon-Hartley.

Por fim, dado a taxa de *handover* de cada três métodos, a capacidade média do canal e o *handover overhead* de entrada, calcula-se a taxa de transferência média para cada um dos três métodos, seguindo a equação (39).

6 RESULTADOS E CONCLUSÕES

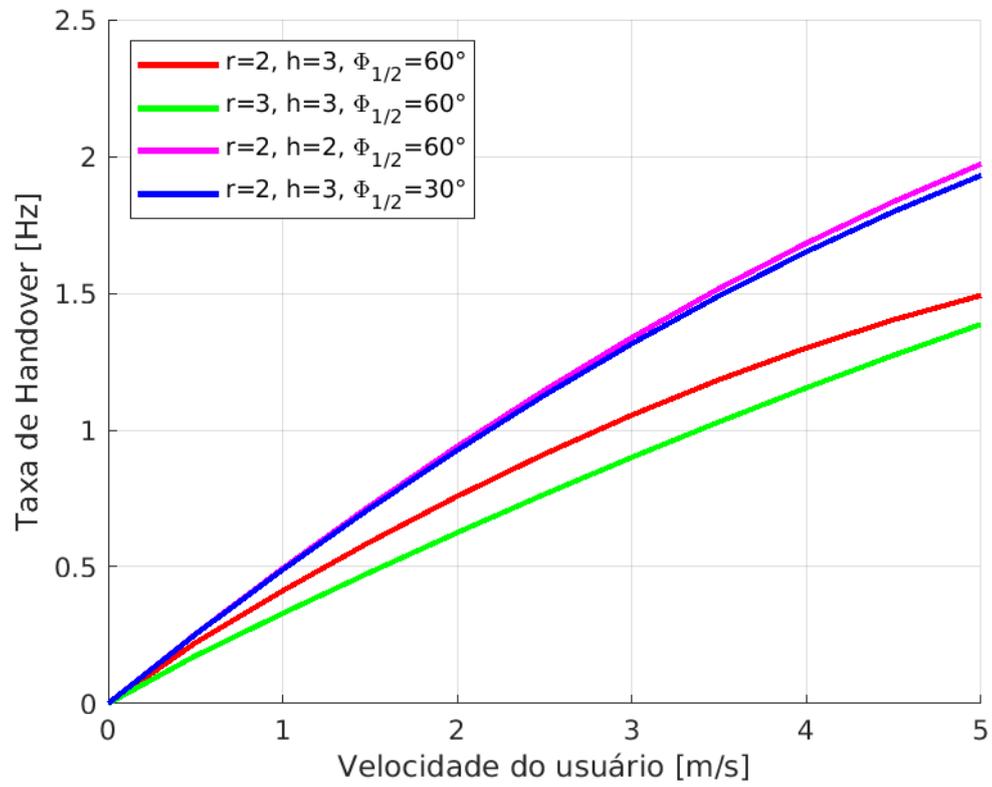
Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação realizada em MATLAB utilizando-se o método desenvolvido pelo próprio autor para medição do desempenho de uma rede Li-Fi utilizando o esquema de *handover* analisado de maneira comparativa. A análise inclui os efeitos do esquema de *handover skipping* na taxa de *handover*, na probabilidade de cobertura e na taxa de transferência da rede Li-Fi, assim como a influência de parâmetros físicos do ambiente, como a distância entre os pontos de acesso, a distância vertical entre transmissor e receptor e a fonte de luz atuante como ponto de acesso no desempenho da rede. A interpretação dos resultados é situada em relação à literatura existente, a fim de contribuir para o desenvolvimento de novas pesquisas e o aprimoramento de tecnologias relacionadas à rede Li-Fi. Por fim, são destacadas também as limitações do estudo e sugestões para futuras pesquisas, a fim de fornecer uma análise crítica e abrangente dos resultados obtidos.

6.1 Resultados

Para a obtenção das representações gráficas apresentadas neste estudo, foi desenvolvido um *script* auxiliar em MATLAB, cujo código-fonte está disponível no Anexo B. O *script* mencionado utiliza os resultados obtidos pelo *script* apresentado no Anexo A como parâmetros de entrada. Para a realização das análises referentes às influências dos parâmetros r , h e $\Phi_{1/2}$ na taxa de *handover* e na probabilidade de cobertura, foram gerados resultados variando-se os parâmetros de entrada do *script* anterior e armazenando-os com a adição de um sufixo de quatro dígitos, sendo o primeiro deles o valor de r , o segundo o valor de h e o terceiro e quarto os valores de $\Phi_{1/2}$.

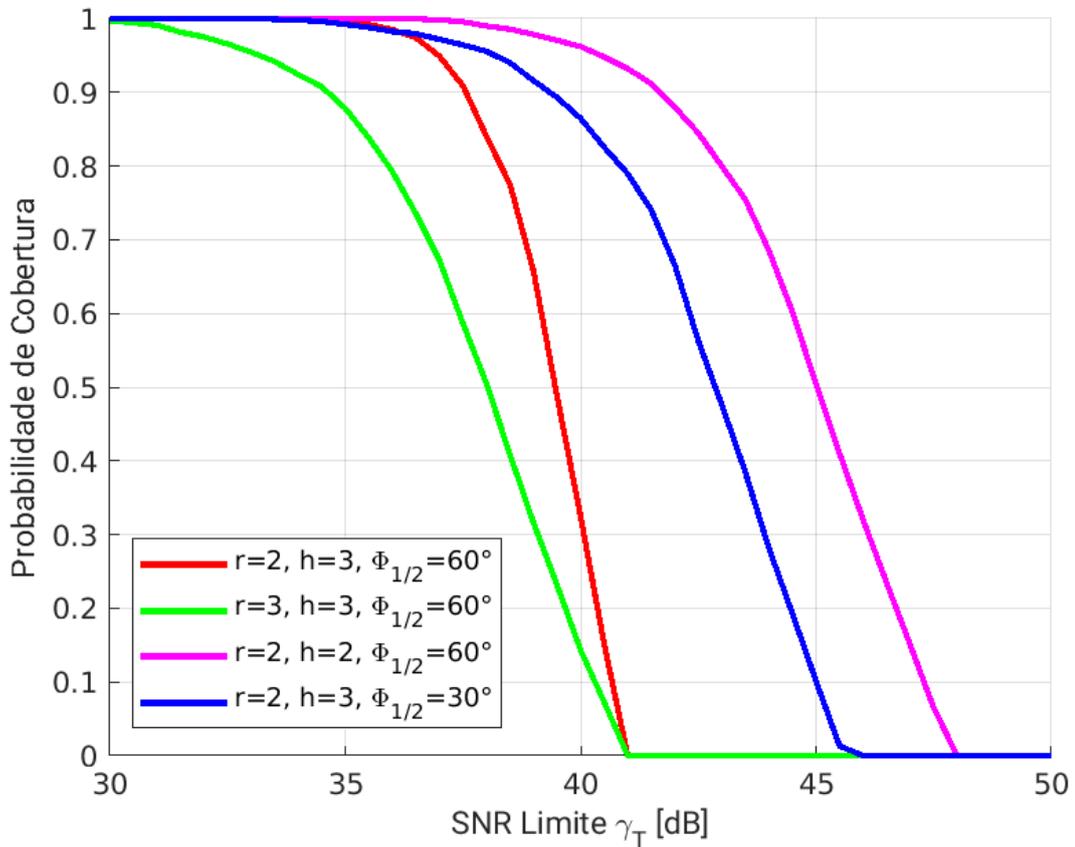
Primeiramente é analisado o impacto dessas três variáveis nas Figuras 8 e 9 a seguir:

Figura 8 – Taxa de handover pela velocidade do usuário dados diferentes parâmetros de entrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 9 – Probabilidade de cobertura por SNR limite dados diferentes parâmetros de entrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

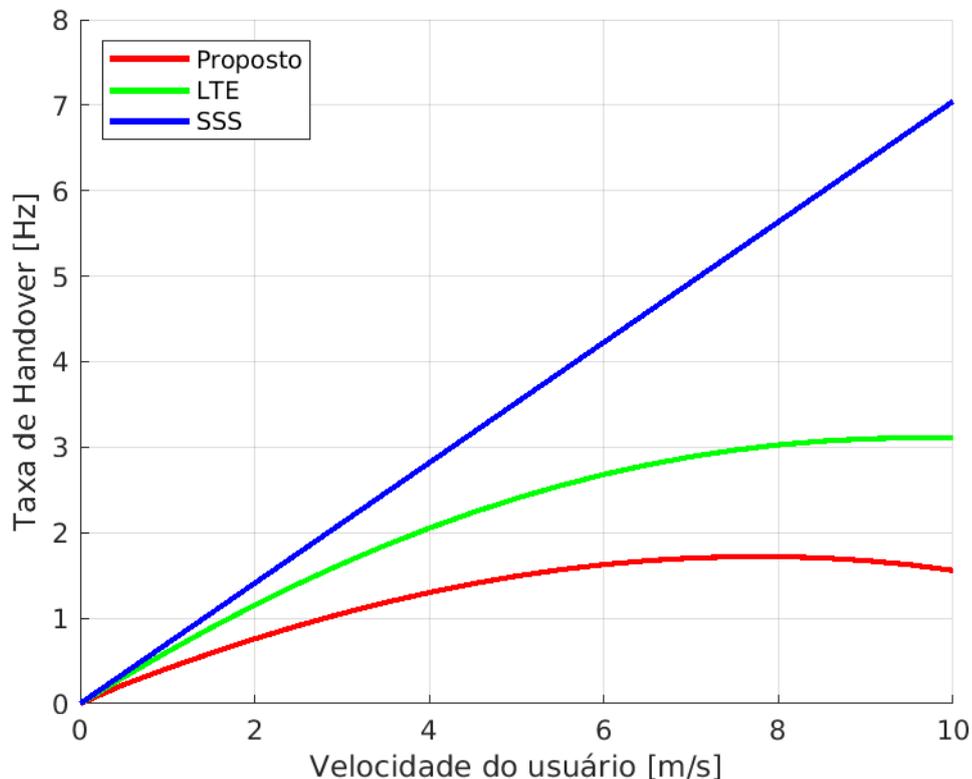
Constata-se através dos resultados observados na Figura 8 que, quanto maior a distância entre os APs, menor a taxa de *handover* observada pelo usuário. Isso pode ser explicado dado que o aumento dessa distância faz com que o usuário dentro de uma mesma velocidade atravesse um número menor de células no mesmo intervalo temporal. Já a distância vertical entre o usuário e o AP afeta também de maneira inversa a taxa de *handover*, aumentando a taxa quanto menor seu valor. O que pode ser explicado pelo aumento do RSRP dos APs recebido pelo usuário, o que leva a decisão de *handover* a ser tomada em um intervalo de tempo menor. Por fim, é possível observar que a redução do ângulo de meia intensidade $\Phi_{1/2}$ pela metade resulta em um aumento na taxa de *handover*, devido à natureza altamente direcional do sinal Li-Fi. Isso ocorre porque a diminuição de $\Phi_{1/2}$ implica em uma redução na área de cobertura de cada transmissor Li-Fi, já que o sinal de luz é transmitido em uma direção mais estreita, acarretando em o sinal de luz se espalhando menos pelo ambiente e, portanto, alcançando uma

área menor. O que exige que o dispositivo receptor realize *handovers* com maior frequência para manter uma conexão confiável com diferentes transmissores Li-Fi.

Já na Figura 9, observa-se que quanto menor r e h , maior a probabilidade de cobertura, o que era previsto dado que quanto menor for a distância euclidiana entre o AP e o usuário, maior será o RSRP medido pelo usuário, posto que a distância euclidiana é composta pela distância vertical, h , e a horizontal, l , que, quanto menor for r , menor será l entre o usuário e os APs da rede. O contrário pode-se afirmar em relação ao ângulo de meia intensidade $\Phi_{1/2}$, que quanto menor for seu valor, menor será a probabilidade de cobertura, visto que a diminuição de seu valor diminui o alcance do sinal dos APs da rede, diminuindo a área de cobertura de cada AP.

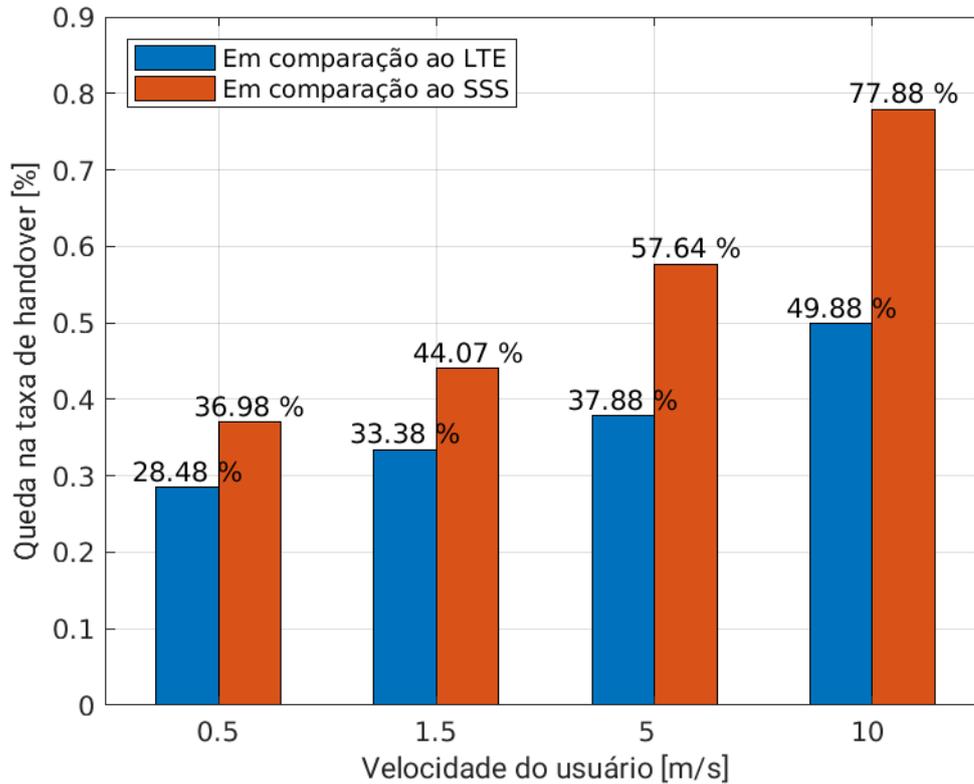
A seguir, são analisados os resultados da análise comparativa. Primeiramente, compara-se a taxa de *handover* dos três métodos nas Figuras 10 e 11:

Figura 10 – Taxa de handover por velocidade do usuário dos três métodos.



Fonte: Produção do próprio autor.

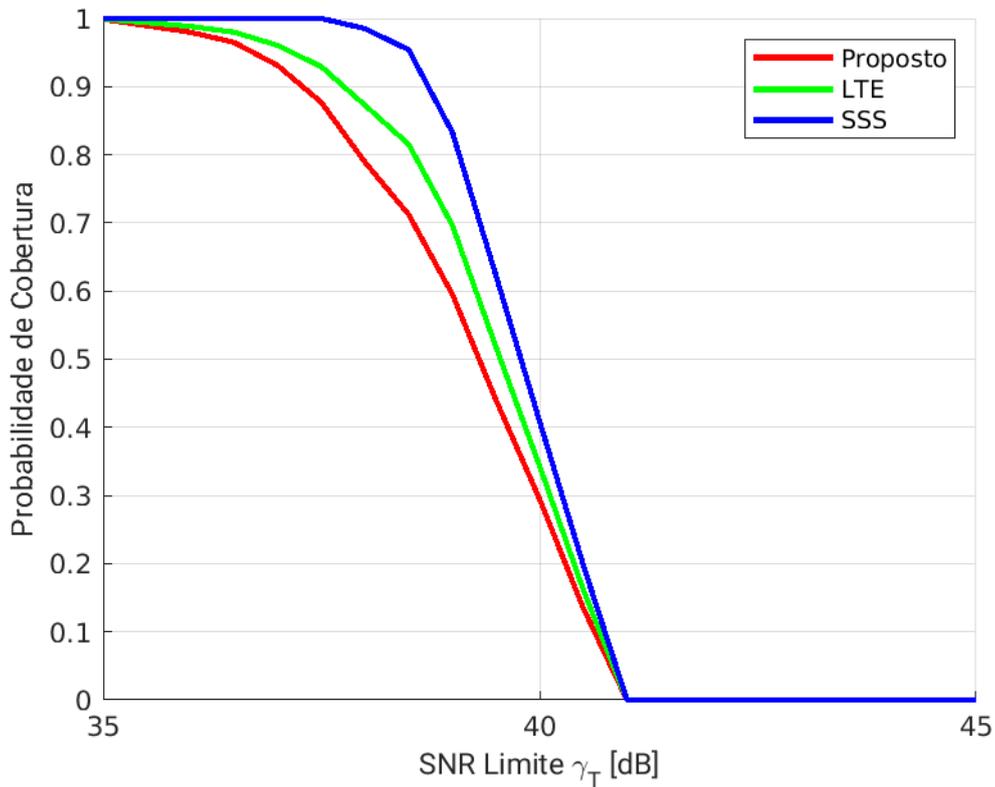
Figura 11 – Queda na taxa de handover por velocidade do usuário.



Fonte: Produção do próprio autor.

Nota-se que o método proposto é muito efetivo em reduzir a taxa de *handover* de um usuário na rede e que, quanto maior a velocidade do usuário, maior a redução da taxa se torna. É possível observar numericamente pela Figura 11 a dimensão dessa diferença: em velocidades baixas como a de 0,5 m/s, a diferença é de 28,48% em relação ao LTE e de 36,98% em relação ao SSS. Já em velocidades mais altas como de 10 m/s a diferença na taxa chega a aproximadamente 50% e a 78% em relação ao LTE e ao SSS respectivamente.

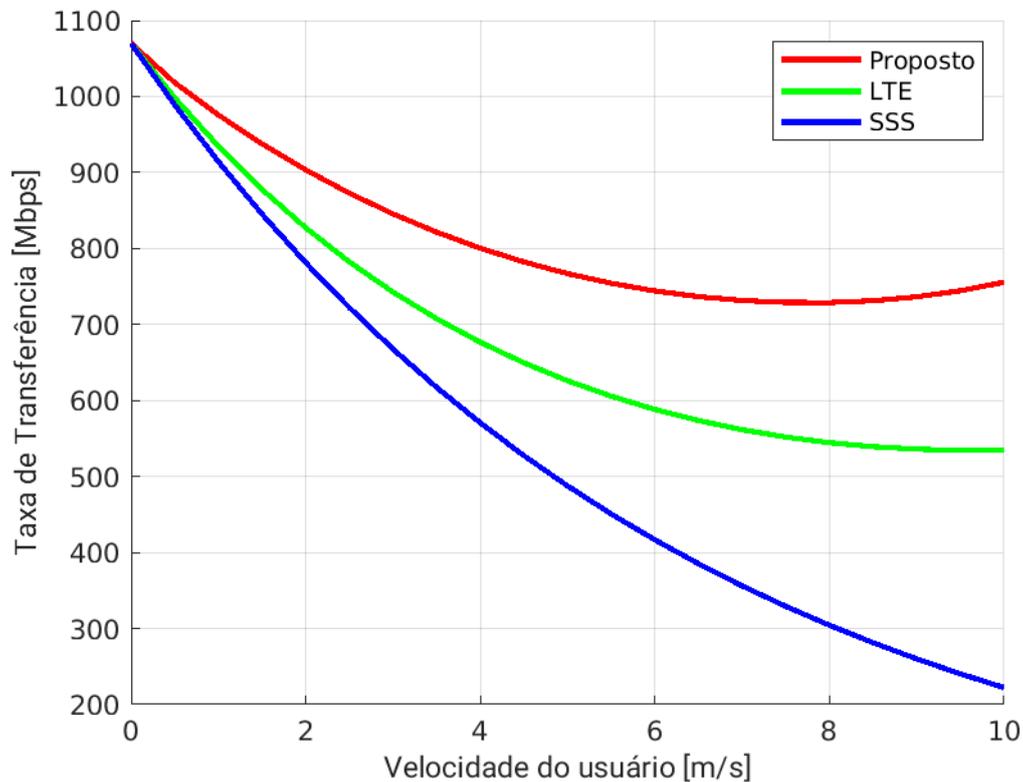
Figura 12 – Probabilidade de cobertura por SNR limite dos três métodos.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 12 mostra a análise comparativa da probabilidade de cobertura dada uma velocidade do usuário de 5 m/s. Observa-se por comparação ao SSS que o *handover skipping* em si diminui a probabilidade de cobertura. Isso ocorre pois o usuário não necessariamente está conectado ao AP de maior RSRP o tempo inteiro como no SSS. Logo, quanto mais processos de *handover* forem pulados, menor será a probabilidade de cobertura da rede como um todo, o que pode ser observado pelo gráfico apresentado. O método proposto acaba tendo a menor probabilidade de cobertura por esse mesmo efeito, e o SSS, a maior. Mesmo assim, a diferença média entre a probabilidade de cobertura do método proposto e do LTE é de 5,08%, e entre o método proposto e o SSS é de 7,99%, o que nos permite concluir que a probabilidade de cobertura permanece em níveis aceitáveis.

Figura 13 – Taxa de transferência por velocidade do usuário dos três métodos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, é analisado o impacto de cada método de *handover* na taxa de transferência observada pelo usuário, visto que a capacidade de transferência de dados é um aspecto crítico para a qualidade da comunicação. Observou-se, através dos resultados exibidos na Figura 13, que a taxa de transferência é máxima quando o usuário está parado, pois o *handover* não afeta a taxa de transferência, mantendo-a igual à capacidade do canal. No entanto, à medida que o usuário se desloca na área de cobertura da rede, *handovers* ocorrem e seu impacto aumenta à medida que a velocidade de deslocamento do usuário aumenta, o que se explica dado que a *handover* ocorre em taxas cada vez maiores com a velocidade como foi mostrado através das Figuras 10 e 11.

Esses efeitos do *handover* podem prejudicar a qualidade da comunicação, levando a perdas de pacotes, atrasos e oscilações na taxa de transferência, o que pode afetar negativamente a

experiência do usuário. No entanto, foi demonstrado que é possível minimizar esses efeitos indesejados com a utilização de métodos mais eficientes de *handover*. Observou-se que o método proposto apresentou uma redução significativa na queda da taxa de transferência em comparação com os outros dois métodos analisados, mantendo a taxa de transferência mais próxima à capacidade do canal em velocidades mais elevadas, apesar do resultado satisfatório entregue pelo LTE.

6.2 Conclusões e considerações futuras

Neste trabalho, foi analisada a abordagem de esquema *handover* especialmente projetada para redes Li-Fi como proposta por WU e HAAS (2019). Divergindo dos métodos tradicionais baseados em medidas da trajetória do usuário, o esquema proposto baseia-se no parâmetro de RSRP, amplamente utilizado em algoritmos de *handover* existentes. O cerne do esquema analisado envolve a utilização da taxa de variação do RSRP para inferir a trajetória de um usuário sem *feedback* adicional para maior eficiência da rede, o que torna possível concluir se um usuário está se aproximando de um AP e de qual AP. Ao computar então Γ através do RSRP, é determinado efetivamente o AP de destino para o *handover*.

A análise referida consistiu em um estudo aprofundado sobre a tecnologia Li-Fi, em uma análise matemática e estatística do desempenho do esquema de *handover* proposto, e principalmente em uma simulação em MATLAB para comparar o referido desempenho com o desempenho de outros dois métodos de grande utilização.

De acordo com os resultados obtidos, o esquema proposto de *handover* é capaz de efetivamente melhorar o desempenho de uma rede Li-Fi, reduzindo a taxa de *handover* e aumentando a taxa de transferência de maneira significativa. Apesar de a probabilidade de cobertura do método proposto se apresentar menor quando comparada a dos outros dois métodos analisados, a diferença média entre as probabilidades de cobertura apresentou-se pequena o suficiente para se considerar irrelevante. Portanto, conclui-se que o esquema proposto, através das simulações realizadas, demonstrou-se superior em parâmetros

desempenho de extrema relevância em uma análise de redes em comparação aos outros dois esquemas.

Esses resultados são significativos, uma vez que redes Li-Fi têm ganhado cada vez mais destaque como uma alternativa promissora para comunicações sem fio, especialmente em ambientes onde o uso de tecnologias como o Wi-Fi é limitado. A eficácia do esquema de *handover*, portanto, pode representar um avanço importante para o desenvolvimento e expansão do uso de redes Li-Fi em diversos setores, como na indústria, saúde, educação e entretenimento.

A interpretação dos resultados obtidos na simulação realizada também se mostrou relevante ao situá-los em relação à literatura existente sobre o tema, uma vez que demonstrou-se que o esquema analisado é capaz de ser mais eficiente que muitos outros sendo estudados tanto para redes Li-Fi como para redes 5G. Assim, destaca-se a importância de considerar a trajetória do usuário na simulação de redes Li-Fi, uma vez que os resultados obtidos indicam que esta pode influenciar significativamente o desempenho da rede, e que é possível inferi-la sem nenhum *feedback* adicional.

Ademais, apesar dos resultados promissores, é importante destacar que este trabalho apresenta algumas limitações que devem ser consideradas para futuras pesquisas. Por exemplo, a simulação foi realizada considerando-se generalizações com configurações específica de rede e de sua área de cobertura, o que pode limitar a interpretação dos resultados para outras configurações de rede específicas. Além disso, a simulação não considerou a possibilidade de interferência de outras fontes de luz e de sombras, o que pode afetar o desempenho da rede Li-Fi em ambientes reais.

Diante dessas limitações, sugere-se que futuras pesquisas possam explorar diferentes topologias de rede, bem como diferentes padrões de mobilidade e interferência, a fim de avaliar a robustez do esquema de *handover* em diferentes condições. Além disso, é importante explorar o impacto do *handover* em outros aspectos do desempenho da rede Li-Fi, como a latência, a eficiência energética e a segurança. Estudos nessa área podem ajudar a identificar os principais desafios e oportunidades no desenvolvimento de técnicas de *handover* mais eficientes e adaptadas às características específicas do Li-Fi. Outra área de pesquisa

interessante é a integração de redes híbridas Li-Fi e Wi-Fi, que pode permitir a complementaridade entre as tecnologias, aproveitando as vantagens de cada uma. Nesse sentido, é importante investigar novas técnicas de *handover* que permitam a transição suave entre as redes, garantindo a continuidade do serviço e a otimização do uso de recursos.

Por fim, conclui-se que os resultados obtidos na simulação representam uma contribuição significativa para a literatura relacionada às redes Li-Fi e, em particular, ao uso do esquema de *handover* com um método particular de *handover skipping*. A análise realizada buscou fornecer informações de valor sobre a eficácia desse esquema em melhorar o desempenho da rede, bem como sobre a influência de outros parâmetros nesse desempenho.

Com isso, é possível afirmar que os resultados obtidos possam ser úteis para pesquisadores e profissionais envolvidos no desenvolvimento de redes Li-Fi, bem como para empresas e organizações que estão considerando a implementação dessa tecnologia em suas atividades. Além disso, espera-se que as limitações deste trabalho e sugestões para futuras pesquisas possam fornecer direções para estudos mais aprofundados e, assim, contribuir para o avanço do conhecimento e aprimoramento da tecnologia Li-Fi.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALNABHAN, M. et al. Efficient Handover Approach in 5G Mobile Networks. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 10, p. 1417, 7 ago. 2020.
- ARMSTRONG, J.; LOWERY, A. Power efficient optical OFDM. **Electronics Letters**, v. 42, p. 370–372, 16 abr. 2006.
- ARSHAD, R. et al. Handover Management in 5G and Beyond: A Topology Aware Skipping Approach. **IEEE Access**, v. 4, p. 9073–9081, 2016.
- ARSHAD, R. et al. Velocity-Aware Handover Management in Two-Tier Cellular Networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, n. 3, p. 1851–1867, mar. 2017.
- ASADZADEH, K.; FARID, A. A.; HRANILOVIC, S. **Spectrally factorized optical OFDM**. 2011 12th Canadian Workshop on Information Theory. **Anais...** Em: 2011 12TH CANADIAN WORKSHOP ON INFORMATION THEORY. maio 2011.
- BARNETT, T. et al. Cisco Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update, 2017–2022. p. 78, 2018.
- BIAN, R.; TAVAKKOLNIA, I.; HAAS, H. 15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs. **Journal of Lightwave Technology**, v. 37, n. 10, p. 2418–2424, maio 2019.
- BURCHARDT, H. et al. VLC: Beyond point-to-point communication. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 7, p. 98–105, jul. 2014.
- CHIA, S. T. S.; WARBURTON, R. J. **Handover criteria for city microcellular radio systems**. 40th IEEE Conference on Vehicular Technology. **Anais...** Em: 40TH IEEE CONFERENCE ON VEHICULAR TECHNOLOGY. maio 1990.
- CHVOJKA, P. et al. **Multi-band carrier-less amplitude and phase modulation for VLC: An overview**. 2017 First South American Colloquium on Visible Light Communications (SACVLC). **Anais...** Em: 2017 FIRST SOUTH AMERICAN COLLOQUIUM ON VISIBLE LIGHT COMMUNICATIONS (SACVLC). nov. 2017.
- CORNETT, K. G.; WICKER, S. B. **Bit error rate estimation techniques for digital land mobile radios**. [1991 Proceedings] 41st IEEE Vehicular Technology Conference. **Anais...** Em: [1991 PROCEEDINGS] 41ST IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE. maio 1991.
- COSSU, G. et al. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED. **Optics express**, v. 20, p. B501-6, 10 dez. 2012.

DEMARCHOU, E.; PSOMAS, C.; KRIKIDIS, I. Mobility Management in Ultra-Dense Networks: Handover Skipping Techniques. **IEEE Access**, v. 6, p. 11921–11930, 2018.

DIMITROV, S.; HAAS, H. Information Rate of OFDM-Based Optical Wireless Communication Systems With Nonlinear Distortion. **Journal of Lightwave Technology**, v. 31, n. 6, p. 918–929, mar. 2013.

DODGE, Y. **The Oxford Dictionary of Statistical Terms**. [s.l.] Oxford University Press, 2003.

ELGALA, H.; MESLEH, R.; HAAS, H. Indoor Optical Wireless Communication: Potential and State-of-the-Art. **IEEE Communications Magazine**, v. 49, n. 9, p. 56–62, 1 set. 2011.

ETSI. LTE; Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Radio resource control (RCC); Protocol specification (Release 13). **ETSI TS 1 Evolved Universal T Radio Re Prot (3GPP TS 36.3 TECHNICAL SPECIFICATION 136 331)**, v. 13, jan. 2016.

FERNANDO, N.; HONG, Y.; VITERBO, E. **Flip-OFDM for optical wireless communications**. 2011 IEEE Information Theory Workshop. **Anais...** Em: 2011 IEEE INFORMATION THEORY WORKSHOP. out. 2011.

FRECH, E. A.; MESQUIDA, C. L. **Cellular models and hand-off criteria**. IEEE 39th Vehicular Technology Conference. **Anais...** Em: IEEE 39TH VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE. maio 1989.

FRIIS, H. T. A Note on a Simple Transmission Formula. **Proceedings of the IRE**, v. 34, n. 5, p. 254–256, maio 1946.

GRIMLUND, O.; GUDMUNDSON, B. **Handoff strategies in microcellular systems**. [1991 Proceedings] 41st IEEE Vehicular Technology Conference. **Anais...** Em: [1991 PROCEEDINGS] 41ST IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE. maio 1991.

GUDMUNDSON, M. **Analysis of handover algorithms (microcellular radio)**. [1991 Proceedings] 41st IEEE Vehicular Technology Conference. **Anais...** Em: [1991 PROCEEDINGS] 41ST IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE. maio 1991.

HAAS, H. **Visible light communication**. 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). **Anais...** Em: 2015 OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS CONFERENCE AND EXHIBITION (OFC). mar. 2015.

HAAS, H. et al. What is LiFi? **Journal of Lightwave Technology**, v. 34, n. 6, p. 1533–1544, mar. 2016.

ISLAM, G.; JAMIL, M.; RAHMAN, R. Throughput Analysis of Numerous Wi-Fi Technologies. **International Journal of Scientific Engineering and Applied Science**, v. 1, p. 18, 1 dez. 2015.

KAHN, J. M.; BARRY, J. R. Wireless infrared communications. **Proceedings of the IEEE**, v. 85, n. 2, p. 265–298, fev. 1997.

KHALID, A. M. et al. 1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation. **IEEE Photonics Journal**, v. 4, n. 5, p. 1465–1473, out. 2012.

KUROSE, J.; ROSS, K. **Computer Networking: A Top-Down Approach**. 7th edition ed. Boston: Pearson, 2016.

LABEDZ, G. et al. Handover control issues in very high capacity cellular systems using small cells. **University of Warwick, UK**, 1987.

LEE, S. C. J. et al. PAM-DMT for Intensity-Modulated and Direct-Detection Optical Communication Systems. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 21, n. 23, p. 1749–1751, dez. 2009.

MANDE, W. R. **Evaluation of a proposed handover algorithm for the GSM cellular system**. 40th IEEE Conference on Vehicular Technology. **Anais...** Em: 40TH IEEE CONFERENCE ON VEHICULAR TECHNOLOGY. maio 1990.

MIAO, G. et al. **Fundamentals of Mobile Data Networks**. [s.l.] Cambridge University Press, 2016.

MISHRA, R.; CHAKI, N.; CHOUDHURY, S. Study on Handover Mechanism in Cellular Network: An Experimental Approach. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 304, p. 203–212, 1 ago. 2015.

MURASE, A.; SYMINGTON, I.; GREEN, E. **Handover criterion for macro and microcellular systems**. [1991 Proceedings] 41st IEEE Vehicular Technology Conference. **Anais...** Em: [1991 PROCEEDINGS] 41ST IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE. maio 1991.

NANDA, S. Teletraffic models for urban and suburban microcells: cell sizes and handoff rates. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 42, n. 4, p. 673–682, nov. 1993.

NGO, H. Q. et al. Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, n. 3, p. 1834–1850, mar. 2017.

OFCOM. Study on the future UK spectrum demand for terrestrial mobile broadband applications. **Ofcom**, n. 3.1, p. 129, 2014.

POLADI, P.; CHINTHAM, S.; KUMAR, S. An overview of the factors affecting handovers and effective highlights of handover techniques for next generation wireless networks. **Indian Journal of Public Health Research & Development**, v. 9, p. 722, 1 nov. 2018.

RAJAGOPAL, S.; ROBERTS, R. D.; LIM, S.-K. IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support. **IEEE Communications Magazine**, v. 50, n. 3, p. 72–82, mar. 2012.

RAPPAPORT, T. S. et al. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! **IEEE Access**, v. 1, p. 335–349, 2013.

RENZO, M. D. et al. A Tractable Closed-Form Expression of the Coverage Probability in Poisson Cellular Networks. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 8, n. 1, p. 249, 2018.

ROFOEE, B. R. et al. **First demonstration of service-differentiated converged optical sub-wavelength and LTE/WiFi networks over GEAN**. 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). **Anais...** Em: 2015 OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS CONFERENCE AND EXHIBITION (OFC). mar. 2015.

SARBAZI, E. et al. **Ray tracing based channel modeling for visible light communications**. 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). **Anais...** Em: 2014 22ND SIGNAL PROCESSING AND COMMUNICATIONS APPLICATIONS CONFERENCE (SIU). abr. 2014.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379–423, jul. 1948.

STÜBER, G. **Principles of Mobile Communication**. [s.l: s.n.].

TANENBAUM, A.; WETHERALL, D. **Computer Networks**. 5th edition ed. Boston: Pearson, 2010.

TSONEV, D.; SINANOVIC, S.; HAAS, H. **Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless**. 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). **Anais...** Em: 2012 IEEE 75TH VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING). maio 2012.

TSONEV, D.; VIDEV, S.; HAAS, H. **Light fidelity (Li-Fi): Towards all-optical networking**. . Em: PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING. 18 dez. 2013.

VIJAYAN, R.; HOLTZMAN, J. M. **Analysis of handoff algorithms using nonstationary signal strength measurements**. [Conference Record] GLOBECOM '92 - Communications for Global Users: IEEE. **Anais...** Em: [CONFERENCE RECORD] GLOBECOM '92 - COMMUNICATIONS FOR GLOBAL USERS: IEEE. dez. 1992.

VUCIC, J.; LANGER, K.-D. **High-speed visible light communications: State-of-the-art**. OFC/NFOEC. **Anais...** Em: OFC/NFOEC. mar. 2012.

WU, X.; HAAS, H. Handover Skipping for LiFi. **IEEE Access**, v. 7, p. 38369–38378, 2019.

WU, X.; SAFARI, M.; HAAS, H. Access Point Selection for Hybrid Li-Fi and Wi-Fi Networks. **IEEE Transactions on Communications**, v. 65, n. 12, p. 5375–5385, dez. 2017.

ANEXO A

```

%% Projeto de Graduação de Daniel Frasson
% Simulações para comparar o método de Handover Skipping
clear; close all; clc

%% ===== Parâmetros =====

ttt = 0.16;           % Tempo de disparo [s]
hom = 1.1225e-9;     % Margem de handover
r = 2;               % Distancia entre APs [m]
h = 3;               % Distancia vertical entre o usuário e o AP [m]
A_pd = 1e-4;         % Área do fotodiodo [m^2]
g_f = 1;             % Ganho do filtro ótico
n = 1.5;             % Índice de refração
phi_half = pi/6;     % Angulo de radiação de meia intensidade [rad]
psi_max = pi/2;      % Semi angulo do campo de visão [rad]
P_tx = 3;            % Potencia ótica transmitida [W]
zeta = 3;            % Razão entre potência ótica transmitida e potência
do sinal
R_pd = 0.53;         % Responsividade do detetor [A/W]
B_lifi = 200e6;      % Largura de banda de cada AP [Hz]
N_lifi = 10^(-21);   % Densidade espectral de potência do ruido [W/Hz]
lambda = 1;          % Coeficiente de peso
ho = 0.2;            % Handover overhead [s]
v = (0.5:0.5:10);    % Vetor de valores de velocidades [m/s]
delta = (0:((r/2)/400):(r/2)); % Vetor de valores de delta [m]
theta = (0:(pi/400):pi); % Vetor de valores de theta [rad]

% ===== Cálculos =====

m = -log(2) / log(cos(phi_half)); % Ordem de emissão Lamber-
tiana
d_path_avg = (r/pi)*((3*log((sqrt(2))+1))+1-(sqrt(2)));

%% ===== Estabelecendo P(-X) =====

```

```
% Declarando vetores e matrizes para melhor alocação de memória
```

```
P_X      = zeros(1,length(v));
P_notX   = zeros(1,length(v));
```

```
P_X_LTE  = zeros(1,length(v));
P_notX_LTE = zeros(1,length(v));
```

```
eta      = zeros(1,length(v));
eta_LTE  = zeros(1,length(v));
eta_HS   = zeros(1,length(v));
```

```
dif_eta_SSS = zeros(1,length(v));
dif_eta_LTE = zeros(1,length(v));
```

```
P_A = zeros(length(delta),length(theta),length(v));
P_B = zeros(length(delta),length(theta),length(v));
P_C = zeros(length(delta),length(theta),length(v));
P_D = zeros(length(delta),length(theta),length(v));
```

```
Gamma_A = zeros(length(delta),length(theta),length(v));
Gamma_B = zeros(length(delta),length(theta),length(v));
Gamma_C = zeros(length(delta),length(theta),length(v));
Gamma_D = zeros(length(delta),length(theta),length(v));
```

```
% Calculando os parâmetros e armazenando-os em matrizes
```

```
for k=1:length(v)
```

```
    count_HS = 0;
    count_LTE = 0;
```

```
    for j=1:length(delta)
```

```
        for i=1:length(theta)
```

```
            tc = 0;
```

```

t = 0;

activateClock = false;

while (tc<ttt)

    l_A = sqrt( ((r/2) + (v(k)*t*sin(theta(i))) )^2 + ((r/2)-
delta(j)+(v(k)*t*cos(theta(i))))^2 );
    l_B = sqrt( ((r/2) - (v(k)*t*sin(theta(i))) )^2 + ((r/2)-
delta(j)+(v(k)*t*cos(theta(i))))^2 );
    l_C = sqrt( ((r/2) - (v(k)*t*sin(theta(i))) )^2 + ((r/
2)+delta(j)-(v(k)*t*cos(theta(i))))^2 );
    l_D = sqrt( ((r/2) - (v(k)*t*sin(theta(i))) )^2 + (((3*r)/
2)-delta(j)+(v(k)*t*cos(theta(i))))^2 );

    psi_A = atan(l_A/h);
    psi_B = atan(l_B/h);
    psi_C = atan(l_C/h);
    psi_D = atan(l_D/h);

    if (psi_A >= 0 || psi_A <= psi_max)

        g_c_A = (n^2)/( sin(psi_max) )^2;

    elseif (psi_A > psi_max)

        g_c_A = 0;

    end

    if (psi_B >= 0 || psi_B <= psi_max)

        g_c_B = (n^2)/( sin(psi_max) )^2;

    elseif (psi_B > psi_max)

        g_c_B = 0;

```

```

end

if (psi_C >= 0 || psi_C <= psi_max)

    g_c_C = (n^2)/( sin(psi_max) )^2;

elseif (psi_C > psi_max)

    g_c_C = 0;

end

if (psi_D >= 0 || psi_D <= psi_max)

    g_c_D = (n^2)/( sin(psi_max) )^2;

elseif (psi_D > psi_max)

    g_c_D = 0;

end

% RSRP dos AP's no tempo final

P_A(j,i,k) = ( (m+1) * A_pd * g_f * g_c_A * R_pd * P_tx *
(1 / (zeta * 2 * pi) )^2) * ( h^((2*m)+2) ) * ( ( l_A^2) + (h^2) )^(-
m-3));

P_B(j,i,k) = ( (m+1) * A_pd * g_f * g_c_B * R_pd * P_tx *
(1 / (zeta * 2 * pi) )^2) * ( h^((2*m)+2) ) * ( ( l_B^2) + (h^2) )^(-
m-3));

P_C(j,i,k) = ( (m+1) * A_pd * g_f * g_c_C * R_pd * P_tx *
(1 / (zeta * 2 * pi) )^2) * ( h^((2*m)+2) ) * ( ( l_C^2) + (h^2) )^(-
m-3));

P_D(j,i,k) = ( (m+1) * A_pd * g_f * g_c_D * R_pd * P_tx *
(1 / (zeta * 2 * pi) )^2) * ( h^((2*m)+2) ) * ( ( l_D^2) + (h^2) )^(-
m-3));

% Verificando condição (7)

```

```

        if (P_B(j,i,k) <= (P_A(j,i,k) + hom) && P_C(j,i,k) <=
(P_A(j,i,k) + hom) && P_D(j,i,k) <= (P_A(j,i,k) + hom))

            t0 = t;

        elseif ( activateClock == false )

            activateClock = true;
            t0 = t;
            P_A_t0 = P_A(j,i,k);
            P_B_t0 = P_B(j,i,k);
            P_C_t0 = P_C(j,i,k);
            P_D_t0 = P_D(j,i,k);

        end

        tc = t - t0;

        t = t + 0.0001;

    end

    % Gamma do AP A

    Gamma_A(j,i,k) = P_A_t0 + (lambda * ( (P_A(j,i,k) - P_A_t0)/ttt
));

    % Gamma do AP B

    Gamma_B(j,i,k) = P_B_t0 + (lambda * ( (P_B(j,i,k) - P_B_t0)/ttt
));

    % Gamma do AP C

    Gamma_C(j,i,k) = P_A_t0 + (lambda * ( (P_C(j,i,k) - P_C_t0)/ttt
));

```

```

% Gamma do AP D

Gamma_D(j,i,k) = P_A_t0 + (lambda * ( (P_D(j,i,k) - P_D_t0)/ttt
));

% Determinando o contador de handover skipping
% para o método proposto

if (Gamma_C(j,i,k) > Gamma_B(j,i,k) || Gamma_D(j,i,k) >
Gamma_B(j,i,k))

count_HS = count_HS + 1;

end

% Determinando o contador de handover skipping
% para o LTE

if (P_C(j,i,k) > P_B(j,i,k) || P_D(j,i,k) > P_B(j,i,k))

count_LTE = count_LTE + 1;

end

end

end

% ===== Estabelecendo P(¬X) =====

% Calculando probabilidade no domínio discreto dado que
% a análise foi feita em cima de uma amostragem

% Estabelecendo P(¬X) do Método Proposto

P_X(k) = count_HS/(length(delta)*length(theta));
P_notX(k) = 1 - P_X(k);

```

```

% Estabelecendo P(-X) do LTE

P_X_LTE(k) = count_LTE/(length(delta)*length(theta));
P_notX_LTE(k) = 1 - P_X_LTE(k);

% ===== Taxa de Handover =====

% Taxa de Handover do método SSS

eta(k)      = v(k) / d_path_avg;

% Taxa de Handover do LTE

eta_LTE(k) = eta(k) * P_notX_LTE(k);

% Taxa de Handover do método proposto

eta_HS(k)  = eta(k) * P_notX(k);

dif_eta_SSS(k) = ( eta(k) - eta_HS(k) ) / eta(k);
dif_eta_LTE(k) = ( eta_LTE(k) - eta_HS(k) ) / eta_LTE(k);

end

%% ===== Probabilidade de Cobertura =====

% A partir deste ponto, tudo calculado relativo a r
% Também sera calculado relativo a  $\sqrt{2}r$ , pelas razões
% Explicadas anteriormente

sq2r = (sqrt(2)) * r;

% Gera valores aleatórios no eixo x e y

x_rand = (randi(1000,1,1000))/1000;
y_rand = (randi(1000,1,1000))/1000;

```

```

%Gera valores proporcionais a r e  $\sqrt{2}r$ 

x_rand_r = x_rand*r;
y_rand_r = y_rand*r;

x_rand_sq2r = x_rand*sq2r;
y_rand_sq2r = y_rand*sq2r;

% Gera vetor de r/2

r_half    = (r/2)*ones(1,length(x_rand));
sq2r_half = (sq2r/2)*ones(1,length(x_rand));

% Calcula a distancia dos pontos aleatórios ao
% AP localizado no centro da célula

lx_rand = x_rand_r - r_half;
ly_rand = y_rand_r - r_half;

lx_rand_sq2r = x_rand_sq2r - sq2r_half;
ly_rand_sq2r = y_rand_sq2r - sq2r_half;

% Gera vetor com as distâncias dos pontos aleatórios ao AP

l_rand = sqrt((lx_rand.^2)+(ly_rand.^2));

l_rand_sq2r = sqrt((lx_rand_sq2r.^2)+(ly_rand_sq2r.^2));

% Gera vetor com os ângulos de incidência para cada ponto

psi_rand = atan(l_rand/h);

psi_rand_sq2r = atan(l_rand_sq2r/h);

% Declara vetor do ganho do concentrador ótico para depois
% calculá-lo com um for

```

```

g_c_rand = zeros(1,length(psi_rand));

g_c_rand_sq2r = zeros(1,length(psi_rand));

for i = 1:length(psi_rand)

    if (psi_rand(i) >= 0 || psi_rand(i) <= psi_max)

        g_c_rand(i) = (n^2)/( sin(psi_max) )^2;

    elseif (psi_rand > psi_max)

        g_c_rand(i) = 0;

    end

end

for i = 1:length(psi_rand_sq2r)

    if (psi_rand_sq2r(i) >= 0 || psi_rand_sq2r(i) <= psi_max)

        g_c_rand_sq2r(i) = (n^2)/( sin(psi_max) )^2;

    elseif (psi_rand_sq2r > psi_max)

        g_c_rand_sq2r(i) = 0;

    end

end

% Calculo do RSRP para cada ponto aleatório

P_rand = ( (m+1) * A_pd * g_f * g_c_rand * R_pd * P_tx * (1 / (zeta * 2
* pi) )^2) * ( h^((2*m)+2) ) .* ( ( (l_rand.^2) + (h^2) ) .^(-m-3));

```

```
P_rand_sq2r = ( (m+1) * A_pd * g_f * g_c_rand_sq2r * R_pd * P_tx * (1 /
(zeta * 2 * pi) )^2) * ( h^((2*m)+2) ) .* ( ( (l_rand_sq2r.^2) +
(h^2) ).^(-m-3));
```

```
% Vetor com o SNR de cada ponto
```

```
SNR = P_rand/(N_lifi*B_lifi);
```

```
SNR_sq2r = P_rand_sq2r/(N_lifi*B_lifi);
```

```
% Vetor com os valores do SNR em dB
```

```
SNR_dB = 10*(log10(SNR));
```

```
SNR_dB_sq2r = 10*(log10(SNR_sq2r));
```

```
% Vetor com o valor de cada SNR limite sendo testado
```

```
SNR_T_dB = (1:0.5:50);
```

```
% Contador dos casos ode houve cobertura
```

```
count_cob = zeros(1,length(SNR_T_dB));
```

```
count_cob_sq2r = zeros(1,length(SNR_T_dB));
```

```
% Vetor que armazena o valor da probabilidade de cobertura
```

```
% para cada valor diferente de SNR limite
```

```
P_cob = zeros(1,length(SNR_T_dB));
```

```
for i = 1:length(SNR_T_dB)
```

```
    for j = 1:length(SNR_dB)
```

```
        if (SNR_dB(j) > SNR_T_dB(i))
```

```
            count_cob(i) = count_cob(i) + 1;
```

```

        end

    end

    P_cob(i) = count_cob(i)/length(SNR);

end

P_cob_sq2r = zeros(1,length(SNR_T_dB));

for i = 1:length(SNR_T_dB)

    for j = 1:length(SNR_dB_sq2r)

        if (SNR_dB_sq2r(j) > SNR_T_dB(i))

            count_cob_sq2r(i) = count_cob_sq2r(i) + 1;

        end

    end

end

P_cob_sq2r(i) = count_cob_sq2r(i)/length(SNR_sq2r);

end

P_cob_HS = (P_notX(11) * P_cob) + (P_X(11) * P_cob_sq2r);
P_cob_LTE = (P_notX_LTE(11) * P_cob) + (P_X_LTE(11) * P_cob_sq2r);

%% ===== Taxa de Transferência =====

% SNR médio a partir dos SNR dos pontos aleatórios

SNR_med = (sum(SNR_dB))/(numel(SNR_dB));

% Capacidade média do canal de acordo com o

```

```
% Teorema de Shannon-Hartley
```

```
C = B_lifi * log2(1 + SNR_med);
```

```
% As taxas de transferência são divididas por 10^6
```

```
% Para resultado em Mbps
```

```
throughput = C .* (1 - ho).^eta * (1e-6);
```

```
throughput_LTE = C .* (1 - ho).^eta_LTE * (1e-6);
```

```
throughput_HS = C .* (1 - ho).^eta_HS * (1e-6);
```

ANEXO B

```

figure(1)
hold on
plot(v, eta_HS2360, 'red', 'LineWidth', 2)
plot(v, eta_HS3360, 'green', 'LineWidth', 2)
plot(v, eta_HS2260, 'magenta', 'LineWidth', 2)
plot(v, eta_HS2330, 'blue', 'LineWidth', 2)
lgd = legend('r=2, h=3, \Phi_{1/2}=60^\circ', 'r=3, h=3, \Phi_{1/2}=60^\circ', 'r=2, h=2, \Phi_{1/2}=60^\circ', 'r=2, h=3, \Phi_{1/2}=30^\circ');
lgd.Location = 'northwest';
axis([0 5 0 2.5])
xlabel('Velocidade do usuário [m/s]')
ylabel('Taxa de Handover [Hz]')
grid on
saveas(gcf, 'plot1.png');
hold off;

```

```

figure(2)
hold on
plot(SNR_T_dB, P_cob_HS2360, 'red', 'LineWidth', 2)
plot(SNR_T_dB, P_cob_HS3360, 'green', 'LineWidth', 2)
plot(SNR_T_dB, P_cob_HS2260, 'magenta', 'LineWidth', 2)
plot(SNR_T_dB, P_cob_HS2330, 'blue', 'LineWidth', 2)
lgd = legend('r=2, h=3, \Phi_{1/2}=60^\circ', 'r=3, h=3, \Phi_{1/2}=60^\circ', 'r=2, h=2, \Phi_{1/2}=60^\circ', 'r=2, h=3, \Phi_{1/2}=30^\circ');
lgd.Location = 'southwest';
axis([30 50 0 1])
xlabel('SNR Limite \gamma_T [dB]', 'FontName', 'Roboto')
ylabel('Probabilidade de Cobertura', 'FontName', 'Roboto')
grid on
saveas(gcf, 'plot2.png');
hold off;

```

```

figure(3)
hold on

```

```

plot(v, eta_HS, 'red', 'LineWidth', 2)
plot(v, eta_LTE, 'green', 'LineWidth', 2)
plot(v, eta, 'blue', 'LineWidth', 2)
lgd = legend('Proposto','LTE','SSS');
lgd.Location = 'northwest';
xlabel('Velocidade do usuário [m/s]')
ylabel('Taxa de Handover [Hz]')
grid on
saveas(gcf, 'plot3.png');
hold off;

figure(4)
hold on
plot(SNR_T_dB,P_cob_HS, 'red', 'LineWidth', 2)
plot(SNR_T_dB,P_cob_LTE, 'green', 'LineWidth', 2)
plot(SNR_T_dB,P_cob, 'blue', 'LineWidth', 2)
legend('Proposto','LTE','SSS')
axis([35 45 0 1])
xlabel('SNR Limite \gamma_T [dB]', 'FontName', 'Roboto')
ylabel('Probabilidade de Cobertura', 'FontName', 'Roboto')
grid on
saveas(gcf, 'plot4.png');
hold off;

figure(5)
hold on
plot(v,T_HS, 'red', 'LineWidth', 2)
plot(v,T_LTE, 'green', 'LineWidth', 2)
plot(v,T, 'blue', 'LineWidth', 2)
legend('Proposto','LTE','SSS')
xlabel('Velocidade do usuário [m/s]', 'FontName', 'Roboto')
ylabel('Taxa de Transferência [Mbps]', 'FontName', 'Roboto')
grid on
saveas(gcf, 'plot5.png');
hold off;

TEMP_V = [v(2) v(4) v(11) v(21)];

```

```

TEMP_D = [dif_eta_LTE(2) dif_eta_LTE(4) dif_eta_LTE(11)
dif_eta_LTE(21); dif_eta_SSS(2) dif_eta_SSS(4) dif_eta_SSS(11)
dif_eta_SSS(21)]];

figure(6)
hBar = bar(TEMP_D,1);
for k1 = 1:size(TEMP_D,2)
    ctr(k1,:) = bsxfun(@plus, hBar(1).XData, hBar(k1).XOffset');
    ydt(k1,:) = hBar(k1).YData;
    TEMP_A = num2str(ydt(k1,:))*100, '%6.2f');
    TEMP_C = strcat(TEMP_A(1,:), ' %');
    for i = 2:length(ydt(k1,:))
        TEMP_C = [TEMP_C(:,:); strcat(TEMP_A(i,:), ' %')];
    end

    text(ctr(k1,:), ydt(k1,:), TEMP_C, 'HorizontalAlignment','center',
'VerticalAlignment','bottom')
end
ylim([0,round(max(max (TEMP_D)) +0.1, 1)])
set(gca,'XTickLabel', TEMP_V)
lgd = legend('Em comparação ao LTE','Em comparação ao SSS');
lgd.Location = 'northwest';
xlabel('Velocidade do usuário [m/s]', 'FontName', 'Roboto')
ylabel('Queda na taxa de handover [%]', 'FontName', 'Roboto')
grid on
saveas(gcf, 'plot6.png');
clear TEMP_A TEMP_C TEMP_D TEMP_V i k1 ctr ydt hBar lgd

```