

ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS LI-FI E WI-FI: COMPARATIVOS DE DESEMPENHO, SEGURANÇA E APLICAÇÕES EM AMBIENTES URBANOS

ANALYSIS OF LI-FI AND WI-FI TECHNOLOGIES: COMPARATIVE PERFORMANCE, SECURITY AND APPLICATIONS IN URBAN ENVIRONMENTS

473

Caio Pelizzer Bosso¹, Giovanni Luiz da Silva Wanderley¹, Joaquim M. F. Antunes Neto²

- 1- Formandos do CST em Gestão da Tecnologia da Informação, FATEC Itapira;
- 2- Doutor em Biologia Funcional e Molecular, IB, UNICAMP, Campinas, SP. MBA em Gestão de Estratégia Empresarial e Especialista em Tecnologias para a Indústria 4.0 (Faculdade São Luís, Jaboticabal, SP), graduado em Biologia. Docente e orientador na FATEC Itapira.

Contato: joaquim.antunes@fatec.sp.gov.br

RESUMO

Este artigo de revisão bibliográfica propõe uma análise comparativa entre Li-Fi (*Light Fidelity*) e Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), focando em aspectos de desempenho, segurança e adequação a diferentes aplicações em ambientes urbanos. A tecnologia Li-Fi, que utiliza luz visível para a transmissão de dados, é frequentemente citada como uma alternativa superior ao Wi-Fi em termos de velocidade e segurança. O estudo examina essas comparações em detalhe, considerando como cada tecnologia se comporta em ambientes urbanos densamente povoados, e identifica os contextos em que uma tecnologia pode ser preferível à outra. Uma das principais vantagens do Li-Fi é sua capacidade de oferecer velocidades de transmissão de dados significativamente maiores do que o Wi-Fi. Da mesma forma, a segurança é um fator crítico nas redes de comunicação, e o Li-Fi oferece vantagens notáveis devido à sua natureza baseada em luz, que não atravessa paredes e é menos suscetível a interceptações externas. A questão de estudo reside em como Li-Fi e Wi-Fi se comportam em diferentes aplicações urbanas, o que inclui a análise de como cada tecnologia pode ser utilizada para suportar redes de sensores urbanos, sistemas de transporte inteligente e soluções de conectividade em espaços públicos e comerciais. Sendo assim, é preciso refletir com dados técnicos como e quando cada tecnologia deve ser aplicada para maximizar seu potencial em contextos urbanos, para que se possa sugerir direções para futuras pesquisas e desenvolvimento na área.

Palavras-chave: Li-Fi. Wi-Fi. Comparação Tecnológica. Desempenho de Rede. Segurança em Comunicação. Aplicações Urbanas.

ABSTRACT

This study proposes a comparative analysis between Li-Fi (Light Fidelity) and Wi-Fi (Wireless Fidelity), focusing on aspects of performance, security and suitability for different applications in urban environments. Li-Fi technology, which uses visible light for data transmission, is often cited as a superior alternative to Wi-Fi in terms of speed and security. The study examines these comparisons in detail, considering how each technology behaves in densely populated urban environments, and identifies the contexts in which one technology may be preferable to another. One of the main advantages of Li-Fi is its ability to offer significantly higher data transmission speeds than Wi-Fi. Similarly, security is a critical factor in communication networks, and Li-Fi offers notable advantages due to its light-based nature, which does not pass through walls and is less susceptible to external interceptions. The question of study lies in how Li-Fi and Wi-Fi behave in different urban applications, which includes the analysis of how each technology can be used to support urban sensor networks, intelligent transport systems and connectivity solutions in public and commercial spaces. Therefore, it is necessary to reflect with technical data how and when each technology should be applied to maximize its potential in urban contexts, so that directions for future research and development in the area can be suggested.

Keywords: Li-Fi. Wi-Fi. Technological Comparison. Network Performance. Communication Security. Urban Applications.

1 INTRODUÇÃO

A evolução das tecnologias de comunicação sem fio tem desempenhado um papel fundamental na transformação das sociedades modernas, com o Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), e, mais recentemente, o Li-Fi (*Light Fidelity*) emergindo como duas soluções proeminentes para a transmissão de dados sem fio. O Wi-Fi, estabelecido há mais de duas décadas, utiliza ondas de rádio para transmitir dados entre dispositivos. Desde sua introdução, o Wi-Fi tornou-se a tecnologia padrão para conectividade sem fio em uma variedade de ambientes, desde residências e escritórios até locais públicos como cafés e aeroportos. Sua popularidade é impulsionada por sua capacidade de fornecer uma conexão de alta velocidade e sua relativa facilidade de implementação, o que a tornou uma tecnologia amplamente adotada e essencial para a vida cotidiana (ADRO, 2019).

A tecnologia Li-Fi representa uma inovação mais recente no campo das comunicações sem fio, que utiliza luz visível para transmitir dados. Desenvolvida como uma alternativa ao Wi-Fi, o Li-Fi se baseia no uso de LEDs (diodos

emissores de luz) para enviar informações através de pulsos de luz que são captados por sensores fotográficos (MARÉ et al., 2021). Essa abordagem oferece uma série de vantagens teóricas sobre o Wi-Fi, incluindo velocidades de transmissão de dados muito superiores e uma segurança aprimorada, uma vez que a luz não atravessa paredes e é restrita a áreas visíveis. Essas características tornam o Li-Fi uma opção atraente para aplicações que requerem alta largura de banda e segurança, como ambientes industriais e aplicações em que a proteção contra interceptação é fundamental (KEVORKIAN, 2017).

O Li-Fi ainda está em estágio de desenvolvimento e sua adoção em larga escala está limitada por desafios técnicos e logísticos. A necessidade de uma linha de visão direta entre o transmissor e o receptor, juntamente com a limitada cobertura em comparação com o Wi-Fi, são algumas das barreiras que a tecnologia enfrenta. No entanto, a sua capacidade de operar em ambientes onde o Wi-Fi pode ser inadequado ou inseguro, como em áreas altamente congestionadas com sinais de rádio, continua a atrair a atenção de pesquisadores e desenvolvedores. A comparação entre Li-Fi e Wi-Fi, portanto, destaca as forças e limitações de cada tecnologia, oferecendo reflexões sobre como essas soluções podem ser integradas ou utilizadas de forma complementar para atender às diversas necessidades de conectividade em ambientes urbanos modernos (KEVORKIAN, 2017; MITEKU, 2015).

A comparação entre Li-Fi e Wi-Fi é de suma importância, especialmente em um contexto onde a demanda por conectividade sem fio continua a crescer exponencialmente (MITEKU, 2015). Com o avanço das tecnologias e a diversificação das aplicações que dependem de redes sem fio, é necessário avaliar as vantagens e limitações de cada tecnologia para determinar qual é mais adequada para diferentes cenários. O Wi-Fi, sendo uma tecnologia amplamente estabelecida, tornou-se a espinha dorsal da comunicação sem fio em muitas áreas, proporcionando uma conectividade essencial para uma vasta gama de dispositivos e serviços. Sua ubiquidade e confiabilidade são inegáveis, mas à medida que as demandas por maior largura de banda e segurança aumentam, surgem questões sobre suas limitações (LAU et al., 2023).

O Li-Fi utiliza luz visível para a transmissão de dados, oferecendo características diferenciadas que podem superar algumas das limitações do Wi-Fi. Com velocidades de transmissão significativamente mais altas e uma segurança reforçada devido à incapacidade da luz de atravessar paredes, o Li-Fi promete avanços substanciais na forma como se é gerenciada e utilizada as redes sem fio. A importância de comparar essas duas tecnologias reside na necessidade de compreender em que contextos o Li-Fi pode oferecer melhorias reais e quando o Wi-Fi ainda é a melhor opção (ALBRAHEEM et al., 2018). A comparação ajuda a identificar as situações em que o Li-Fi pode resolver problemas específicos enfrentados pelo Wi-Fi, como congestionamento de rede e questões de segurança, enquanto também destaca as áreas onde o Wi-Fi continua a ser mais prático e acessível.

A questão norteadora deste estudo é: como as tecnologias Li-Fi e Wi-Fi se comparam em termos de desempenho, segurança e adequação para aplicações em ambientes urbanos, e quais são os cenários em que cada uma oferece vantagens significativas?" Esta questão visa guiar a análise comparativa do artigo, explorando de forma detalhada como cada tecnologia se comporta em diferentes aspectos essenciais para ambientes urbanos. A investigação se concentrará em identificar as principais vantagens e limitações de Li-Fi e Wi-Fi, ajudando a esclarecer quando e onde cada tecnologia pode ser mais eficaz para atender às necessidades específicas das redes urbanas modernas.

A justificativa para este estudo reside na crescente demanda por soluções de conectividade sem fio eficientes e seguras em ambientes urbanos complexos. À medida que as cidades se tornam mais densamente povoadas e tecnologicamente avançadas, a necessidade de redes de comunicação que suportem um grande volume de dados e garantam a segurança das informações torna-se cada vez mais crítica. O Wi-Fi, sendo a tecnologia predominante atualmente, enfrenta desafios relacionados a congestionamentos de rede, limitações de cobertura e questões de segurança, que podem comprometer a eficiência e a confiabilidade das comunicações urbanas (MALACCO; GUIMARÃES, 2019). Por outro lado, o Li-Fi oferece características que

prometem superar algumas dessas limitações do Wi-Fi, como velocidades de transmissão mais rápidas e uma maior segurança intrínseca. No entanto, a tecnologia Li-Fi ainda está em estágios de desenvolvimento e sua implementação em larga escala apresenta desafios significativos que precisam ser avaliados (MALACCO; GUIMARÃES, 2019).

Ao avaliar as forças e fraquezas de ambas as tecnologias, o estudo contribuirá para a formulação de estratégias mais eficazes para a implementação de redes de comunicação urbanas, promovendo a inovação e a eficiência. A pesquisa ajudará a orientar decisões sobre investimentos em infraestrutura tecnológica, políticas de conectividade e soluções de segurança, atendendo assim às crescentes demandas das cidades inteligentes e melhorando a qualidade das redes urbanas para todos os usuários (HEISKANEN; ACHARYA, 2017).

A análise comparativa também permite uma melhor alocação de recursos e planejamento estratégico para a implementação de tecnologias de comunicação, sendo este o objetivo principal do artigo. Entender as forças e fraquezas de Li-Fi e Wi-Fi é fundamental para empresas, governos e instituições que buscam otimizar suas infraestruturas de rede e melhorar a experiência do usuário. Essa compreensão também é essencial para fomentar a inovação, guiando o desenvolvimento de novas soluções que possam integrar as vantagens de ambas as tecnologias. Em um cenário urbano cada vez mais complexo e conectado, essa comparação pode esclarecer as opções disponíveis, contribuindo para a criação de redes mais eficientes e seguras, que são capazes de atender às crescentes exigências tecnológicas e às expectativas dos usuários (HEISKANEN; ACHARYA, 2017).

O objetivo deste artigo é realizar uma análise comparativa abrangente entre as tecnologias Li-Fi e Wi-Fi, focando em três aspectos principais: desempenho, segurança e adequação para aplicações em ambientes urbanos. Através desta comparação, o artigo visa proporcionar uma visão detalhada das vantagens e limitações de cada tecnologia, ajudando a identificar quais são mais apropriadas para diferentes cenários urbanos e necessidades específicas,

contribuindo para um melhor esclarecimento destes aspectos: 1) Qual o desempenho de ambas as tecnologias em termos de velocidade de transmissão, latência e cobertura? Ao comparar as taxas de transferência de dados e a eficiência em ambientes densamente povoados, o estudo pretende revelar como cada tecnologia se comporta sob condições urbanas típicas e quais são suas capacidades reais em comparação com as especificações teóricas; 2) Como se configura a segurança de Li-Fi e Wi-Fi, identificando como cada tecnologia lida com a proteção de dados e a privacidade do usuário? Este aspecto é ponto focal, especialmente considerando o aumento das ameaças cibernéticas e a necessidade de redes seguras. A análise aborda como as características intrínsecas de cada tecnologia influenciam sua resistência a interceptações e acessos não autorizados; 3) Qual a adequação de Li-Fi e Wi-Fi para diversas aplicações urbanas, incluindo ambientes residenciais, comerciais e públicos? Por meio de exemplos práticos, avalia-se como cada tecnologia pode ser implementada de forma eficaz em diferentes contextos e quais são suas contribuições potenciais para a melhoria da conectividade e da experiência do usuário nas cidades.

Assim, o artigo pretende fornecer uma compreensão clara das implicações práticas e teóricas de Li-Fi e Wi-Fi, contribuindo para a tomada de decisões informadas sobre a escolha e a implementação dessas tecnologias em ambientes urbanos modernos.

2 METODOLOGIA

Trata-se de um estudo de revisão bibliográfica narrativa, que visa explorar processos metodológicos que possibilitem a análise das tecnologias Li-Fi e Wi-Fi quanto ao desempenho, segurança e aplicações em ambientes urbanos. Esta abordagem permite uma compreensão ampla e detalhada das principais descobertas, teorias e aplicações práticas relacionadas ao tema, utilizando uma variedade de fontes acadêmicas e científicas para sustentar os argumentos apresentados. A estratégia de busca de literatura envolveu a utilização das

bases de dados acadêmicas disponibilizadas no Portal de Periódicos da CAPES, utilizando palavras-chave relevantes e suas diferentes combinações: “Li-fi”; “Wi-fi”; “comparação tecnológica”; “desempenho de rede”; “segurança em comunicação”; “aplicações urbanas”. A seleção de estudos incluiu a análise de artigos que explorassem diretamente a aplicação das duas tecnologias na perspectiva de ambientes urbanos, para que no final houvesse a proposição de implementação destas considerando os aspectos de desempenho, segurança e aplicações. Cada fonte selecionada foi submetida a uma leitura detalhada, permitindo a extração de informações essenciais, como conceitos-chave, metodologias utilizadas e principais descobertas. Essa abordagem facilitou a síntese dos resultados, identificando padrões emergentes na literatura e lacunas de conhecimento que merecem atenção adicional.

3 RESULTADOS

No cenário urbano contemporâneo, a crescente demanda por conectividade eficiente e segura tem impulsionado a comparação entre tecnologias de comunicação sem fio, especialmente Li-Fi e Wi-Fi. Os resultados exploram a análise comparativa entre essas duas tecnologias, focando em três aspectos fundamentais: desempenho, segurança e aplicações específicas em ambientes urbanos. O Li-Fi, que utiliza luz visível para transmissão de dados, apresenta características promissoras em termos de velocidade e segurança, enquanto o Wi-Fi, baseado em ondas de rádio, continua a ser amplamente utilizado e desenvolvido. A investigação aqui apresentada oferece uma visão detalhada das vantagens e limitações de cada tecnologia, revelando aspectos sobre como elas podem se complementar ou substituir uma à outra em contextos urbanos variados.

3.1 Funcionalidades do Li-Fi (*Light Fidelity*)

O Li-Fi é uma tecnologia de comunicação sem fio que utiliza luz visível, luz infravermelha ou luz ultravioleta para transmitir dados, ao invés das tradicionais ondas de rádio usadas pelo Wi-Fi. O princípio básico do Li-Fi baseia-se na modulação de luz em alta velocidade para transmitir informações de forma eficiente e segura. Esta tecnologia representa uma evolução significativa no campo das comunicações sem fio, aproveitando as propriedades únicas da luz para melhorar a capacidade e a segurança das redes de comunicação (MARE, 2021).

O funcionamento do Li-Fi envolve a modulação da intensidade da luz emitida por diodos emissores de luz (LEDs). A luz LED é ligada e desligada em frequências extremamente rápidas, que são então moduladas para codificar informações digitais. Este processo de modulação é realizado de forma a garantir que as mudanças na intensidade da luz sejam suficientemente rápidas para serem detectadas e interpretadas por um fotodetector localizado no receptor. A luz visível, que é a principal forma de transmissão no Li-Fi, tem a vantagem de oferecer uma maior largura de banda disponível em comparação com as ondas de rádio, permitindo taxas de transferência de dados muito mais altas (MARE, 2021).

Além da modulação, o funcionamento do Li-Fi depende de um receptor fotossensível que detecta a luz modulada e a converte de volta em sinais elétricos. O receptor pode ser um dispositivo fotodiodo ou um sensor de imagem, capaz de capturar variações na intensidade da luz e decodificar os dados transmitidos. A tecnologia Li-Fi é altamente eficiente em ambientes onde a luz pode ser controlada, como em ambientes internos, e é imune à interferência de radiofrequências, o que a torna ideal para aplicações em locais sensíveis como hospitais e ambientes industriais (ADRO, 2019).

O Li-Fi também possui vantagens significativas em termos de segurança, uma vez que a luz não atravessa paredes, limitando a possibilidade de interceptação de sinais fora da área de cobertura. No entanto, sua eficácia pode

ser reduzida em ambientes externos ou em condições de alta luminosidade, onde a presença de luz ambiente pode interferir na qualidade do sinal. Em termos de aplicação prática, o Li-Fi tem o potencial de complementar as redes Wi-Fi existentes, oferecendo uma alternativa de alta velocidade e alta segurança para a comunicação de dados em ambientes controlados (ADRO, 2019).

Portanto, deve considerar que o Li-Fi representa uma inovação promissora na tecnologia de comunicação sem fio, aproveitando as propriedades da luz para transmitir dados com alta velocidade e segurança. Seu funcionamento baseia-se na modulação rápida da luz e na detecção precisa por fotodetectores, o que possibilita uma comunicação eficiente em ambientes onde a luz pode ser gerida e controlada.

481

3.1.1 Tecnologia de transmissão por luz visível

A tecnologia Li-Fi para transmissão de dados utiliza luz visível para a comunicação sem fio, oferecendo uma alternativa inovadora às tradicionais tecnologias baseadas em ondas de rádio, como o Wi-Fi. A transmissão por luz visível do Li-Fi baseia-se na modulação da intensidade da luz emitida por diodos emissores de luz (LEDs) para codificar e enviar informações digitais. Esse método explora a alta frequência de modulação da luz, que permite taxas de transmissão de dados significativamente superiores às obtidas com tecnologias baseadas em rádio (KEVORKIAN, 2017).

O princípio fundamental do Li-Fi é a utilização de LEDs de alta eficiência como fontes de luz para transmissão de dados. Esses LEDs são modulados em frequências muito altas, muitas vezes na ordem de *megahertz* a *gigahertz*, para codificar os dados. A modulação é realizada de forma a variar a intensidade da luz de maneira rápida e precisa, sem causar alterações perceptíveis na iluminação ambiente. Essa modulação rápida é essencial para permitir a transmissão de grandes quantidades de dados em alta velocidade (KEVORKIAN, 2017).

Para a recepção dos dados, o Li-Fi utiliza fotodetectores, como fotodiodos ou sensores de imagem, que capturam a luz modulada e a convertem de volta em sinais elétricos. Esses fotodetectores são sensíveis a variações rápidas na intensidade da luz e são capazes de decodificar os sinais modulados para recuperar as informações transmitidas. A precisão na detecção é fundamental para manter a integridade dos dados e garantir a eficácia da comunicação (MEDEIROS; SORRENTINO, 2018).

A luz visível usada no Li-Fi é restrita ao seu ambiente de transmissão devido à sua incapacidade de atravessar paredes e outros obstáculos opacos. Isso confere à tecnologia uma vantagem em termos de segurança e controle, pois os sinais são confinados ao espaço iluminado pela fonte de luz. Também [é importante notar que a luz visível oferece uma largura de banda significativamente maior em comparação com as ondas de rádio, o que possibilita uma capacidade de transmissão de dados muito superior (RODRIGUES, 2022).

Apesar de suas vantagens, o Li-Fi enfrenta desafios relacionados à sua aplicabilidade em ambientes externos e à interferência da luz ambiente. A eficiência da comunicação pode ser comprometida em condições de alta luminosidade ou quando a linha de visão entre o emissor e o receptor é obstruída. No entanto, em ambientes internos controlados, como escritórios, hospitais e escolas, o Li-Fi pode fornecer uma solução de alta velocidade e alta segurança para a transmissão de dados (COLVERO, 2023).

Desta forma, a tecnologia Li-Fi utiliza a modulação de luz visível para a transmissão de dados, oferecendo uma alternativa eficiente e segura às tecnologias de comunicação sem fio baseadas em rádio. Sua capacidade de alta velocidade e sua segurança inerente a tornam uma solução promissora para ambientes controlados, embora desafios relacionados à interferência e à cobertura devam ser considerados para sua implementação prática.

3.1.2 Vantagens teóricas sobre outras tecnologias de comunicação sem fio

O Li-Fi oferece várias vantagens teóricas em comparação com outras tecnologias de comunicação sem fio, como o Wi-Fi e o Bluetooth, principalmente devido às características intrínsecas da luz visível e à maneira como a tecnologia é implementada. Uma das principais vantagens do Li-Fi é a sua capacidade de fornecer uma largura de banda muito maior. A luz visível, que é a base do Li-Fi, pode suportar frequências muito mais altas do que as ondas de rádio, permitindo a transmissão de dados em taxas significativamente superiores. Este aumento na largura de banda potencialmente permite taxas de transferência de dados que podem exceder os 10 gigabits por segundo, muito além das capacidades dos sistemas Wi-Fi e Bluetooth convencionais (MALACCO; GUIMARÃES, 2019).

Além disso, o Li-Fi oferece um nível superior de segurança em comparação com outras tecnologias sem fio. A luz visível não penetra paredes e outros obstáculos sólidos, o que limita a propagação do sinal a áreas específicas e confina a comunicação dentro do espaço iluminado pela fonte de luz. Esse confinamento reduz a possibilidade de interceptação de dados por terceiros não autorizados, um problema comum nas tecnologias de comunicação baseadas em rádio, que têm uma área de cobertura mais ampla e podem ser mais suscetíveis a ataques de *eavesdropping* (COLVERO, 2023).

Outra vantagem teórica do Li-Fi é a sua imunidade a interferências eletromagnéticas. Diferentemente das tecnologias que operam em frequências de rádio, que podem ser afetadas por interferências de outros dispositivos eletrônicos e sinais de rádio, o Li-Fi utiliza luz visível e, ocasionalmente, luz infravermelha, que não sofre as mesmas interferências. Isso proporciona uma comunicação mais estável e confiável em ambientes onde o espectro de rádio está congestionado, como em áreas urbanas densamente povoadas ou em instalações industriais (MALACCO; GUIMARÃES, 2019).

Além de suas capacidades superiores de largura de banda e segurança, o Li-Fi também pode contribuir para a eficiência energética. LEDs, que são

usados para transmitir sinais Li-Fi, são conhecidos por sua alta eficiência energética em comparação com outras fontes de luz e dispositivos de comunicação. A integração de Li-Fi em sistemas de iluminação LED existentes pode reduzir a necessidade de hardware adicional, resultando em uma solução de comunicação que é tanto econômica quanto ecologicamente sustentável.

No entanto, é importante considerar as limitações práticas do Li-Fi, como a necessidade de uma linha de visão direta entre o emissor e o receptor e a eficácia reduzida em ambientes externos ou em condições de alta luminosidade. Apesar desses desafios, as vantagens teóricas do Li-Fi, incluindo alta largura de banda, segurança aprimorada e imunidade a interferências eletromagnéticas, o posicionam como uma tecnologia promissora que pode complementar e até mesmo superar as capacidades das tecnologias de comunicação sem fio baseadas em rádio em cenários específicos.

3.2 Funcionalidades do Wi-Fi (*Wireless Fidelity*)

O Wi-Fi é uma tecnologia de comunicação sem fio que permite a dispositivos eletrônicos se conectarem a redes de dados e à internet sem a necessidade de cabos. Os princípios básicos e o funcionamento do Wi-Fi são (ATAÍDES, 2023):

- **Rádio Frequência (RF):** O Wi-Fi utiliza ondas de rádio para transmitir e receber dados. As ondas de rádio são transmitidas em frequências específicas, geralmente na faixa de 2,4 GHz e 5 GHz.
- **Padrões e Protocolos:** O Wi-Fi segue padrões definidos pela IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos). Os padrões mais comuns são o IEEE 802.11a, b, g, n, ac e ax. Cada um desses padrões tem diferentes características em termos de velocidade, alcance e eficiência.
- **SSID:** Cada rede Wi-Fi tem um identificador chamado SSID (*Service Set Identifier*). O SSID é o nome da rede que os dispositivos usam para encontrar e se conectar à rede Wi-Fi.
- **Segurança:** Para proteger as redes Wi-Fi, são utilizados protocolos de segurança como WEP (*Wired Equivalent Privacy*), WPA (*Wi-Fi Protected Access*) e WPA2/WPA3 (versões mais avançadas de WPA). Estes protocolos

ajudam a criptografar os dados transmitidos e a proteger a rede contra acessos não autorizados.

Do ponto de vista do funcionamento, tem-se os seguintes aspectos, apresentados no **Quadro 1**:

Quadro 1. Aspectos de funcionamento do Wi-fi.

485

Transmissão e Recepção de Dados:

Roteador Wi-Fi: Um roteador Wi-Fi é um dispositivo que transmite sinais de rádio para criar uma rede sem fio. Ele conecta a rede local (LAN) à internet e permite a comunicação entre dispositivos na rede.

Dispositivos Wi-Fi: Dispositivos como computadores, smartphones e tablets possuem adaptadores Wi-Fi que recebem e transmitem sinais de rádio para se conectar à rede sem fio.

Processo de Conexão:

Descoberta: Quando um dispositivo com Wi-Fi é ligado, ele busca por redes disponíveis na área. O dispositivo identifica redes através dos SSIDs transmitidos pelos roteadores.

Autenticação e Associação: Após escolher uma rede, o dispositivo solicita conexão e, se a rede estiver protegida, será necessário fornecer uma senha ou outra forma de autenticação. Uma vez autenticado, o dispositivo se associa à rede e pode começar a enviar e receber dados.

Comunicação:

Pacotes de Dados: Os dados são enviados em pacotes. O roteador divide os dados em pacotes, que são transmitidos por ondas de rádio e recebidos pelos dispositivos. Cada pacote contém informações sobre o destino e a origem.

Controle de Acesso ao Meio (MAC): O Wi-Fi usa um método de controle de acesso ao meio chamado CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para evitar que vários dispositivos transmitam ao mesmo tempo e causem colisões.

Gerenciamento de Frequências:

Bandas de Frequência: O Wi-Fi opera em diferentes bandas de frequência. A faixa de 2,4 GHz é mais congestionada e pode sofrer interferência de outros dispositivos (como telefones sem fio e micro-ondas), enquanto a faixa de 5 GHz é menos congestionada e oferece maior velocidade e menor interferência.

Canal: Dentro dessas bandas, o Wi-Fi usa canais específicos para transmitir sinais. Dispositivos e roteadores devem ser configurados para operar em canais que não se sobreponham para minimizar a interferência.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O alcance do Wi-Fi é limitado pela distância e obstáculos. Paredes e outros obstáculos podem atenuar o sinal e reduzir a qualidade da conexão. A velocidade de conexão pode variar dependendo do padrão Wi-Fi, da quantidade

de dispositivos conectados e das condições ambientais. O Wi-Fi é uma tecnologia importante para a conectividade moderna, oferecendo flexibilidade e mobilidade ao acessar a internet e redes locais sem a necessidade de cabos físicos.

486

3.2.1 Tecnologia de transmissão por ondas de rádio

A tecnologia de transmissão por ondas de rádio, utilizada no Wi-Fi, é uma forma sofisticada de comunicação sem fio que permite a conexão de dispositivos a redes e à internet sem a necessidade de cabos físicos. Esse método aproveita ondas eletromagnéticas na faixa de rádio para transmitir dados, utilizando principalmente as bandas de frequência de 2,4 GHz e 5 GHz. As ondas de rádio viajam pelo ar e são captadas por dispositivos que possuem adaptadores Wi-Fi, como roteadores, laptops, smartphones e tablets. A tecnologia é regulamentada por padrões definidos pelo IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), com os mais comuns sendo o IEEE 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac e 802.11ax, cada um oferecendo diferentes velocidades e capacidades de transmissão (FERREIRA, 2017).

O funcionamento do Wi-Fi baseia-se na transmissão de dados através de pacotes de rádio. Um roteador Wi-Fi atua como o centro da rede sem fio, enviando e recebendo sinais de rádio que são captados por dispositivos com adaptadores Wi-Fi. Esses sinais são modulados para codificar informações e são transmitidos em frequências específicas, permitindo a comunicação entre o roteador e os dispositivos conectados. Quando um dispositivo deseja se conectar a uma rede, ele busca redes disponíveis transmitindo sinais de rádio e, uma vez encontrado o SSID (nome da rede), solicita a conexão. A autenticação é realizada através de credenciais, como senhas, e após a autenticação, o dispositivo se associa à rede e começa a trocar dados (SPIGOLON, 2021).

O gerenciamento das frequências de rádio é fator chave para garantir uma conexão estável e eficiente. O Wi-Fi opera em diferentes bandas e canais dentro dessas bandas para evitar a interferência de outros dispositivos e redes. A banda

de 2,4 GHz é mais suscetível a interferências, pois é compartilhada com muitos outros dispositivos, enquanto a banda de 5 GHz oferece menos interferência e maiores velocidades, embora com um alcance geralmente menor. O Wi-Fi utiliza o método CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para gerenciar o acesso ao meio, evitando que vários dispositivos transmitam ao mesmo tempo e causem colisões de dados (HAESER; MILETTO, 2017).

Apesar de suas muitas vantagens, como a mobilidade e a facilidade de instalação, o Wi-Fi também apresenta algumas desvantagens. A qualidade do sinal pode ser afetada por obstáculos físicos, como paredes e móveis, que podem reduzir a intensidade do sinal e a velocidade da conexão. Além disso, a segurança das redes Wi-Fi é uma preocupação constante, já que redes mal configuradas podem ser vulneráveis a ataques e acessos não autorizados. No entanto, com o uso de protocolos de segurança adequados e a evolução contínua dos padrões, o Wi-Fi continua a ser uma tecnologia vital para a conectividade sem fio em diversos contextos, oferecendo flexibilidade e conveniência para usuários em todo o mundo.

3.2.2 Evolução e padrões

A evolução da tecnologia Wi-Fi tem sido marcada por uma série de melhorias significativas nos padrões, cada uma trazendo avanços em velocidade, capacidade, e eficiência. Desde o surgimento do Wi-Fi, os padrões IEEE 802.11 têm evoluído para atender às crescentes demandas por conectividade sem fio mais rápida e confiável. Cada nova geração tem introduzido melhorias que refletem o avanço tecnológico e as necessidades dos usuários (SANTOS; MANIÇOBA; SANTOS, 2024).

O **Wi-Fi 5**, oficialmente conhecido como IEEE 802.11ac, foi um marco importante na evolução das redes sem fio. Lançado em 2014, o Wi-Fi 5 trouxe uma série de melhorias em relação ao Wi-Fi 4 (802.11n), incluindo suporte para a banda de 5 GHz, que oferece maior largura de banda e menor interferência do que a banda de 2,4 GHz. O Wi-Fi 5 introduziu a tecnologia MU-MIMO (*Multi-*

User, Multiple Input, Multiple Output), que permite que o roteador se comunique com vários dispositivos simultaneamente, melhorando a eficiência e a velocidade da rede. Com velocidades teóricas de até 3,5 Gbps, o Wi-Fi 5 ofereceu uma experiência significativamente mais rápida e capaz, especialmente em ambientes com muitos dispositivos conectados (LIMA, 2021).

Seguindo o Wi-Fi 5, o **Wi-Fi 6** (IEEE 802.11ax) foi introduzido em 2019 e trouxe avanços ainda mais substanciais. O Wi-Fi 6 não só melhorou as velocidades teóricas, atingindo até 9,6 Gbps, mas também aprimorou a eficiência e a capacidade da rede. Uma das principais inovações do Wi-Fi 6 é a tecnologia OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), que permite que o roteador divida canais em subcanais menores, melhorando a gestão do espectro e reduzindo a latência. Além disso, o Wi-Fi 6 incorporou uma nova versão do MU-MIMO, que agora suporta comunicação simultânea com mais dispositivos. Isso é especialmente útil em ambientes densos, como apartamentos e escritórios, onde muitos dispositivos competem pela largura de banda (LIMA, 2021).

O **Wi-Fi 7**, a mais recente adição à família de padrões Wi-Fi, está começando a emergir com promessas de ainda mais avanços em desempenho e capacidade. Espera-se que o Wi-Fi 7, baseado no padrão IEEE 802.11be, ofereça velocidades teóricas superiores a 30 Gbps, o que representa um salto significativo em relação ao Wi-Fi 6. O Wi-Fi 7 introduzirá novas tecnologias, como o uso de canais de 320 MHz e suporte para 4K-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), o que permitirá uma maior eficiência espectral e velocidades de transmissão mais rápidas. Além disso, o Wi-Fi 7 deve melhorar ainda mais a capacidade de gerenciar múltiplos dispositivos simultaneamente e reduzir a latência, oferecendo uma experiência mais fluida para aplicações de alta demanda, como realidade virtual e aumentada (SANTOS; MANIÇOBA; SANTOS, 2024).

A evolução dos padrões Wi-Fi reflete um contínuo esforço para atender às crescentes exigências de conectividade sem fio. Cada nova geração tem trazido melhorias significativas em velocidade, capacidade e eficiência, desde o

Wi-Fi 5 até o emergente Wi-Fi 7. Com cada avanço, as redes Wi-Fi se tornam mais rápidas e adaptáveis, suportando uma gama cada vez maior de dispositivos e aplicações, e oferecendo uma experiência de conectividade sem fio que continua a evoluir e melhorar.

3.3 Comparativo de Desempenho

489

3.3.1 Velocidade de transmissão: comparação de velocidades teóricas e reais

A comparação entre as velocidades teóricas e reais do Li-Fi e do Wi-Fi revela as diferenças fundamentais entre essas tecnologias de transmissão sem fio e ilustra suas respectivas capacidades e limitações (COLVERO, 2023).

Li-Fi tem o potencial de alcançar velocidades teóricas muito superiores às do Wi-Fi, devido à natureza da luz visível como meio de transmissão. Em experimentos e condições ideais, o Li-Fi pode atingir velocidades teóricas de até 10 Gbps ou mais. Isso ocorre porque a luz visível pode ser modulada a uma frequência muito mais alta do que as ondas de rádio usadas pelo Wi-Fi, permitindo a transmissão de grandes volumes de dados em alta velocidade. No entanto, as velocidades reais de Li-Fi podem variar dependendo de vários fatores, incluindo a intensidade da luz, a distância entre o transmissor e o receptor, e a presença de obstruções. Além disso, como o Li-Fi depende de uma linha de visão direta e não pode atravessar paredes, sua aplicação é mais adequada para ambientes controlados, como salas de conferências ou áreas específicas dentro de edifícios (MALACCO; GUIMARÃES, 2019).

Wi-Fi, por outro lado, oferece velocidades teóricas mais modestas em comparação com o Li-Fi, mas ainda assim muito significativas. O padrão Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) pode alcançar velocidades teóricas de até 3,5 Gbps, enquanto o Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) oferece velocidades teóricas de até 9,6 Gbps. O Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be), a próxima geração, promete velocidades superiores a 30 Gbps. Essas velocidades são alcançadas através da combinação de tecnologias avançadas, como MU-MIMO e OFDMA, e o uso de bandas de frequência como

5 GHz e 6 GHz. No entanto, as velocidades reais do Wi-Fi tendem a ser inferiores às teóricas devido a fatores como interferência de outros dispositivos, obstáculos físicos, e congestionamento de rede. Em ambientes domésticos ou de escritório, as velocidades reais frequentemente são menores, variando entre 1 e 2 Gbps em condições ideais (MALACCO; GUIMARÃES, 2019).

Em termos práticos, enquanto o Li-Fi oferece um potencial teórico muito maior de velocidade, sua aplicabilidade é limitada por sua necessidade de linha de visão e por sua incapacidade de atravessar paredes, o que pode restringir seu uso em ambientes amplos e variados. O Wi-Fi, por outro lado, oferece uma maior flexibilidade de uso, com uma cobertura mais ampla e a capacidade de suportar múltiplos dispositivos simultaneamente em diferentes ambientes, apesar de ter velocidades reais frequentemente menores do que as teóricas (FRASSON, 2023). Assim, a escolha entre Li-Fi e Wi-Fi pode depender das necessidades específicas de velocidade, cobertura e ambiente de aplicação, com o Li-Fi sendo mais adequado para cenários que requerem alta velocidade de dados em espaços controlados, e o Wi-Fi sendo mais versátil para conectividade em uma variedade de contextos.

3.3.2 Impacto da largura de banda em aplicações urbanas

A largura de banda é um fator importante que influencia o desempenho das redes sem fio, impactando diretamente a eficácia das aplicações urbanas quando comparadas entre Wi-Fi e Li-Fi. Em ambientes urbanos, a demanda por largura de banda é crescente devido ao aumento de dispositivos conectados e à necessidade de serviços de alta velocidade, como streaming de vídeo em alta definição, jogos online e aplicações de realidade aumentada e virtual (MIRANDA, 2022).

Wi-Fi tem se mostrado eficaz em ambientes urbanos devido à sua flexibilidade e cobertura ampla. Com padrões como o Wi-Fi 6 e o futuro Wi-Fi 7, que oferecem larguras de banda teóricas de até 30 Gbps, o Wi-Fi é capaz de suportar uma grande quantidade de dispositivos simultaneamente. Isso é

essencial em áreas urbanas densamente povoadas, onde múltiplos dispositivos competem pela mesma rede (SANTOS; MANIÇÓBA; SANTOS, 2024). A largura de banda disponível no Wi-Fi permite a transmissão eficiente de dados, mesmo em ambientes congestionados, e a tecnologia MU-MIMO e OFDMA ajuda a otimizar a gestão da rede, permitindo que vários dispositivos se conectem e transmitam dados simultaneamente. No entanto, a largura de banda real experimentada pelos usuários pode ser afetada por interferências, congestionamento e obstáculos físicos, o que pode limitar a velocidade efetiva da conexão.

Por outro lado, **Li-Fi** oferece um potencial de largura de banda muito maior, com velocidades teóricas que podem exceder 10 Gbps e até 100 Gbps em condições ideais. Isso se deve à capacidade da luz visível de suportar uma modulação de dados muito mais rápida do que as ondas de rádio usadas pelo Wi-Fi. Em ambientes urbanos, isso pode significar uma capacidade significativamente maior para aplicações de alta demanda, como transmissão de vídeo em 8K, grandes transferências de dados e experiências imersivas em realidade aumentada. No entanto, o Li-Fi tem limitações significativas na sua aplicação prática em ambientes urbanos. A necessidade de linha de visão direta entre o transmissor de luz e o receptor e a incapacidade de atravessar paredes limitam a cobertura e a flexibilidade do Li-Fi em comparação com o Wi-Fi. Isso faz com que o Li-Fi seja mais adequado para aplicações específicas em áreas controladas, como em edifícios de escritórios, salas de conferência ou áreas de exposição, onde a infraestrutura de iluminação pode ser otimizada para suportar a tecnologia (FRASSON, 2023).

Portanto, a largura de banda impacta diretamente a experiência de uso das aplicações urbanas, com o Wi-Fi oferecendo uma solução mais abrangente e flexível para conectividade em ambientes complexos e variados. Enquanto isso, o Li-Fi, com sua largura de banda potencialmente maior, é promissor para cenários onde a alta velocidade de dados é necessária em ambientes específicos e controlados. A escolha entre Wi-Fi e Li-Fi em ambientes urbanos depende das necessidades específicas de cobertura, flexibilidade e capacidade

de largura de banda, com cada tecnologia trazendo vantagens e desafios distintos.

3.4 Latência

A latência é um fator crítico na performance das redes sem fio, referindo-se ao tempo necessário para que um pacote de dados viaje de um ponto a outro na rede. Essa métrica é decisiva para aplicações que requerem respostas rápidas, como jogos online, videoconferências e serviços em tempo real. A análise da latência do Wi-Fi e do Li-Fi revela diferenças significativas entre essas tecnologias e seus impactos na experiência do usuário.

Wi-Fi, particularmente nas versões mais recentes como o Wi-Fi 6 e o futuro Wi-Fi 7, apresenta uma latência relativamente baixa em comparação com suas versões anteriores (SANTOS; MANIÇOBA; SANTOS, 2024). A latência média do Wi-Fi é influenciada por fatores como o congestionamento da rede, a distância do roteador e a interferência de outros sinais. O Wi-Fi 6 introduziu tecnologias como a *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e o *Multi-User Multiple Input Multiple Output* (MU-MIMO), que melhoram a eficiência da rede e reduzem a latência ao permitir que múltiplos dispositivos transmitam dados simultaneamente de maneira mais eficiente. Em condições ideais, a latência do Wi-Fi pode ser de aproximadamente 1 a 5 milissegundos, mas pode aumentar em ambientes congestionados ou com alta interferência, impactando negativamente a performance em aplicações sensíveis ao tempo.

Por outro lado, **Li-Fi** oferece uma latência potencialmente mais baixa devido à sua capacidade de transmitir dados a velocidades muito altas (MARÉ et al., 2021). A latência no Li-Fi pode ser extremamente baixa, geralmente na faixa de 1 milissegundo ou menos, porque a luz visível pode ser modulada e detectada muito rapidamente, permitindo uma comunicação quase em tempo real. Essa baixa latência é particularmente benéfica para aplicações que exigem uma resposta imediata e uma transmissão de dados sem atrasos perceptíveis. No entanto, a latência do Li-Fi é altamente dependente da qualidade da conexão

óptica, o que pode ser afetado por obstruções físicas e a necessidade de uma linha de visão direta. Embora a latência seja baixa, a limitação de cobertura e a necessidade de alinhamento preciso podem impactar a experiência do usuário em ambientes urbanos complexo (MARÉ et al., 2021).

Enquanto o Li-Fi oferece uma latência potencialmente mais baixa devido à sua capacidade de modulação rápida da luz, o Wi-Fi também pode oferecer uma latência competitiva, especialmente com os avanços nos padrões mais recentes (RAAD, 2024). A escolha entre as duas tecnologias deve considerar não apenas a latência, mas também fatores como cobertura, flexibilidade e interferência. O Li-Fi é ideal para cenários onde a alta velocidade e baixa latência são fundamentais e o ambiente pode ser controlado para garantir uma linha de visão direta, enquanto o Wi-Fi é mais adequado para ambientes variados e amplos, onde a flexibilidade e a cobertura são mais importantes.

3.5 Efeitos na Performance de Aplicações Críticas

Em ambientes urbanos, onde a densidade de dispositivos e a complexidade das estruturas afetam a conectividade, o Li-Fi e o Wi-Fi têm efeitos distintos na performance de aplicações críticas. O **Quadro 2** apresenta uma análise resumida dos impactos de cada tecnologia:

Quadro 2. Impactos das tecnologias no ambiente urbano.**Latência**

Li-Fi: Oferece latência extremamente baixa, geralmente em torno de 1 milissegundo, o que é ideal para aplicações críticas que requerem respostas rápidas, como jogos online e videoconferências em alta definição. No entanto, a necessidade de linha de visão direta pode limitar a eficiência em ambientes urbanos movimentados e dinâmicos.

Wi-Fi: A latência é geralmente um pouco mais alta, variando de 1 a 5 milissegundos com os padrões mais recentes, como Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7. Embora esta latência seja suficientemente baixa para a maioria das aplicações críticas, pode aumentar devido a fatores como congestionamento da rede e interferência, que são comuns em ambientes urbanos densamente povoados.

Velocidade de Transmissão

Li-Fi: Potencialmente oferece velocidades teóricas muito altas, superiores a 10 Gbps, o que pode ser extremamente benéfico para aplicações que exigem alta largura de banda, como transmissão de vídeos em 8K e transferências de grandes arquivos. No entanto, em ambientes urbanos, as condições práticas podem limitar essas velocidades devido à necessidade de uma linha de visão clara e à presença de obstruções.

Wi-Fi: Com Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7, as velocidades teóricas podem atingir até 30 Gbps. Essas velocidades são adequadas para a maioria das aplicações críticas, embora as velocidades reais possam ser reduzidas por interferências e obstáculos físicos. Em ambientes urbanos, a capacidade do Wi-Fi de se adaptar a diferentes condições e penetrar obstáculos é uma vantagem significativa.

Cobertura e Flexibilidade

Li-Fi: A cobertura é limitada pela necessidade de linha de visão direta e pela incapacidade da luz de atravessar paredes e obstáculos. Em um ambiente urbano, isso pode restringir a aplicação do Li-Fi a áreas específicas, como escritórios ou salas de conferência, onde a instalação e a manutenção de linhas de visão claras são viáveis. Isso reduz a flexibilidade em ambientes dinâmicos e amplos.

Wi-Fi: Oferece maior flexibilidade e cobertura em ambientes urbanos, podendo penetrar paredes e obstáculos, e suportar múltiplos dispositivos conectados simultaneamente. A capacidade de operar em bandas diferentes (2,4 GHz e 5 GHz) e a utilização de tecnologias avançadas como MU-MIMO e OFDMA ajudam a gerenciar a cobertura e a capacidade em áreas congestionadas, tornando o Wi-Fi mais adaptável a ambientes urbanos complexos.

Interferência

Li-Fi: Menos suscetível a interferências de rádio e outros dispositivos eletrônicos, proporcionando uma conexão mais estável em ambientes com alta densidade de dispositivos. No entanto, pode ser afetado por fontes de luz ambiente e outras condições que influenciam a qualidade do sinal, o que pode ser um desafio em ambientes urbanos iluminados.

Wi-Fi: Pode enfrentar interferências de outras redes e dispositivos eletrônicos, especialmente na banda de 2,4 GHz, que é frequentemente congestionada em áreas urbanas. As versões mais recentes, como Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7, incluem melhorias para mitigar interferências e melhorar a eficiência, mas ainda podem sofrer com problemas de congestionamento e qualidade do sinal em áreas densamente povoadas.

Segurança

Li-Fi: Oferece uma segurança intrínseca adicional, pois a luz não pode atravessar paredes, limitando o acesso não autorizado à rede. Isso pode ser uma vantagem significativa em ambientes urbanos, onde a segurança é uma preocupação importante.

Wi-Fi: A segurança depende dos protocolos usados, como WPA3, e da configuração da rede. Embora o Wi-Fi possa ser configurado para ser seguro, a vulnerabilidade a ataques e interceptações é uma preocupação constante, especialmente em áreas urbanas com alta densidade de dispositivos.

Fonte: elaborado pelos autores.

O **Quadro 2** mostra que em ambientes urbanos, o Li-Fi oferece vantagens em termos de baixa latência e alta velocidade teórica, mas suas limitações em cobertura e necessidade de linha de visão direta podem restringir sua aplicação. O Wi-Fi, por sua vez, é mais flexível e adaptável, oferecendo cobertura ampla e capacidade para gerenciar interferências, embora a latência e a velocidade real possam ser impactadas por congestionamento e obstáculos. A escolha entre Li-Fi e Wi-Fi dependerá das necessidades específicas de cobertura, flexibilidade e performance de cada aplicação crítica.

495

3.6 Segurança

A proteção de dados é uma preocupação essencial para qualquer tecnologia de transmissão de dados, e as diferenças entre os mecanismos de segurança do Li-Fi e do Wi-Fi têm implicações significativas para a proteção de informações sensíveis. Cada tecnologia oferece abordagens distintas para garantir a segurança das comunicações (ARINZE; ONOH; ABONYI, 2020).

Li-Fi apresenta vantagens naturais em termos de segurança devido à sua dependência da luz visível para transmissão de dados. A principal característica de segurança do Li-Fi é que a luz não pode atravessar paredes e outros obstáculos, o que limita a área de alcance do sinal a um espaço físico específico. Isso significa que, em um ambiente controlado, a transmissão de dados é restrita à área onde a luz pode atingir, tornando mais difícil para um invasor interceptar a comunicação sem estar dentro da linha de visão direta. No entanto, isso também significa que o Li-Fi pode ser suscetível a riscos de segurança se o ambiente físico não for adequadamente protegido contra o acesso não autorizado. Além disso, como o Li-Fi é uma tecnologia relativamente nova, ainda está em desenvolvimento a padronização e a implementação de protocolos de segurança específicos para garantir a proteção contra possíveis vulnerabilidades (SHURIJI, 2014).

Wi-Fi, por outro lado, utiliza ondas de rádio para transmitir dados, o que permite a comunicação através de paredes e obstáculos, mas também expõe a

rede a riscos de interceptação e acesso não autorizado. Os mecanismos de segurança do Wi-Fi são baseados em protocolos e padrões estabelecidos, como WPA2 (*Wi-Fi Protected Access 2*) e o mais recente WPA3. O WPA2 é amplamente utilizado e oferece criptografia robusta através do AES (*Advanced Encryption Standard*), garantindo a proteção dos dados transmitidos. O WPA3 melhora ainda mais a segurança com criptografia adicional e proteção contra ataques de força bruta. No entanto, a segurança do Wi-Fi também depende da configuração adequada da rede, incluindo a definição de senhas fortes e a atualização regular do firmware do roteador para proteger contra vulnerabilidades conhecidas.

A comparação entre as duas tecnologias mostra que, enquanto o Li-Fi oferece uma camada adicional de segurança devido à sua limitação física, o Wi-Fi depende de protocolos de segurança estabelecidos para proteger os dados durante a transmissão. O Li-Fi pode ser mais seguro em ambientes onde o controle físico da área é possível, mas sua implementação prática e padronização de segurança ainda estão em desenvolvimento. O Wi-Fi, sendo mais amplamente utilizado e regulamentado, oferece uma gama de ferramentas e protocolos para proteger a comunicação sem fio, mas sua segurança pode ser comprometida por fatores como configuração inadequada e vulnerabilidades de *softwares*. Em ambos os casos, a segurança dos dados é fortemente influenciada pela forma como a tecnologia é implementada e gerida, com a necessidade de práticas de segurança robustas e atualizadas para proteger contra ameaças e ataques.

3.6.1 Vulnerabilidades específicas de cada tecnologia

O Wi-Fi, amplamente adotado em redes sem fio, enfrenta diversas vulnerabilidades que podem comprometer a segurança dos dados transmitidos. Uma das principais vulnerabilidades é a exposição aos ataques de interceptação e espionagem. Como o Wi-Fi utiliza ondas de rádio, os sinais podem ser captados por qualquer dispositivo dentro do alcance da rede, o que pode permitir

que invasores interceptem dados se a rede não estiver adequadamente protegida. Isso é especialmente preocupante em redes Wi-Fi públicas, onde o risco de ataques é maior (ANDRADE; SILVA. 2023).

Além disso, conforme os autores acima, o Wi-Fi é vulnerável a ataques de força bruta e dicionário, especialmente se as senhas usadas para proteger a rede forem fracas ou previsíveis. O WPA2, um dos protocolos de segurança mais utilizados, é relativamente robusto, mas foi alvo de vulnerabilidades conhecidas como KRACK (*Key Reinstallation Attack*), que permitem que um atacante intercepte e manipule o tráfego de rede. Embora o WPA3 tenha sido introduzido para oferecer uma proteção melhor, a adoção desse protocolo ainda está em andamento, e muitas redes continuam a utilizar WPA2 (ANDRADE; SILVA. 2023).

Outra vulnerabilidade importante é a possibilidade de ataques de desautenticação, onde um invasor pode forçar um dispositivo a desconectar-se da rede, interrompendo a conexão e, em alguns casos, redirecionando o tráfego para uma rede maliciosa. Além disso, redes Wi-Fi podem sofrer com a interferência de outros dispositivos e redes, o que pode degradar o desempenho e a segurança da comunicação, especialmente em ambientes densamente povoados (JARAMILLO; ROMERO, 2020).

O Li-Fi, embora ofereça vantagens em termos de segurança devido à sua natureza baseada em luz visível, também possui vulnerabilidades específicas que podem impactar sua eficácia. Uma das principais limitações é a necessidade de linha de visão direta entre o transmissor e o receptor. Isso significa que qualquer obstrução, como móveis ou paredes, pode interromper a comunicação e potencialmente criar áreas de "sombra" onde a comunicação não é possível. Essa característica limita a flexibilidade do Li-Fi em ambientes complexos e pode dificultar a cobertura em grandes áreas ou locais com muitos obstáculos (RAAD, 2024).

Além disso, o Li-Fi pode ser suscetível a ataques baseados em luz. Por exemplo, a utilização de fontes de luz maliciosas ou dispositivos de interferência óptica pode impactar a integridade da comunicação. Embora a tecnologia Li-Fi

seja menos vulnerável a interferências eletromagnéticas, ela pode enfrentar problemas com variações na intensidade da luz ambiente, como aquelas causadas por mudanças na iluminação externa ou por fontes de luz artificiais não controladas (COLVERO, 2023)..

A implementação e a padronização do Li-Fi ainda estão em desenvolvimento, o que significa que as medidas de segurança específicas e as melhores práticas para proteger redes Li-Fi ainda estão em evolução. A falta de uma infraestrutura consolidada e de protocolos de segurança bem estabelecidos pode resultar em vulnerabilidades adicionais enquanto a tecnologia se adapta e amadurece. O Wi-Fi enfrenta vulnerabilidades relacionadas à interceptação de sinais, ataques a protocolos de segurança e interferência, enquanto o Li-Fi tem desafios relacionados à necessidade de linha de visão direta e vulnerabilidades associadas à manipulação da luz. Cada tecnologia apresenta vantagens e desvantagens em termos de segurança, e a escolha entre elas deve considerar não apenas suas capacidades intrínsecas, mas também as necessidades específicas do ambiente e as medidas de segurança adicionais que podem ser implementadas para reduzir riscos (SANTOS et al., 2022).

3.6.2 Interferência e Privacidade

A proteção contra interferências externas e interceptações é fundamental para garantir a integridade e a confidencialidade das comunicações em redes sem fio. Tanto o Wi-Fi quanto o Li-Fi enfrentam desafios distintos nesse aspecto devido às suas diferentes tecnologias de transmissão (BARAZANCH et al., 2020).

Wi-Fi opera em frequências de rádio, tipicamente nas bandas de 2,4 GHz e 5 GHz, com o Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7 adicionando suporte para a banda de 6 GHz. Essas bandas são compartilhadas com outros dispositivos e redes, o que pode resultar em interferência significativa. A interferência pode vir de uma variedade de fontes, como micro-ondas, dispositivos Bluetooth e até mesmo outras redes Wi-Fi. Essa interferência pode degradar o desempenho da rede, reduzindo a

velocidade de transmissão e aumentando a latência. Para mitigar esses problemas, os padrões Wi-Fi mais recentes, como o Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7, introduziram tecnologias avançadas como OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e MU-MIMO (*Multi-User Multiple Input Multiple Output*). Essas tecnologias ajudam a gerenciar a largura de banda de maneira mais eficiente e a reduzir o impacto da interferência ao permitir a comunicação simultânea com múltiplos dispositivos e a divisão de canais de frequência em subcanais menores (SANTOS; MANIÇOBA; SANTOS, 2024).

Li-Fi, por outro lado, utiliza luz visível, infravermelha ou ultravioleta para transmitir dados, o que minimiza a exposição a interferências eletromagnéticas comuns que afetam as redes Wi-Fi. A luz visível não é suscetível a interferências de rádio e outras ondas eletromagnéticas, o que pode proporcionar uma conexão mais estável em ambientes com alta densidade de dispositivos eletrônicos. No entanto, o Li-Fi pode enfrentar interferências de fontes de luz ambiental e variações na intensidade da luz. Para proteger contra essas interferências, é importante manter um controle rigoroso do ambiente de iluminação e garantir que o sistema Li-Fi esteja alinhado corretamente para minimizar o impacto de fontes de luz externas.

3.6.4 Proteção contra Interceptações

Wi-Fi é vulnerável a interceptações devido ao seu uso de ondas de rádio, que podem ser captadas por qualquer dispositivo dentro do alcance da rede. Isso torna as redes Wi-Fi suscetíveis a ataques de *sniffing*, onde um atacante pode capturar pacotes de dados transmitidos sem fio. Para proteger contra essas ameaças, os protocolos de segurança, como WPA2 e WPA3, implementam criptografia robusta e autenticação para garantir que apenas usuários autorizados possam acessar e interpretar os dados. O WPA3, em particular, oferece melhorias significativas em relação ao WPA2, incluindo proteção adicional contra ataques de força bruta e criptografia de dados mais avançada (COLVERO, 2023).

Li-Fi, devido à sua natureza baseada em luz visível, oferece uma proteção natural contra interceptações, já que a luz não pode atravessar paredes e obstáculos. Isso limita o alcance do sinal a um espaço físico específico e torna mais difícil para um atacante interceptar a comunicação sem estar dentro da linha de visão direta do transmissor. No entanto, a proteção contra interceptações no Li-Fi ainda requer atenção à segurança física do ambiente. Caso alguém consiga acessar o espaço onde a luz é transmitida, pode potencialmente interceptar os dados se a comunicação não estiver adequadamente criptografada. Assim, garantir que a área física seja segura e aplicar criptografia eficaz é essencial para maximizar a segurança das redes Li-Fi (COLVERO, 2023).

A proteção contra interferências externas e interceptações varia significativamente entre Wi-Fi e Li-Fi. Enquanto o Wi-Fi enfrenta desafios relacionados à interferência eletromagnética e à vulnerabilidade à interceptação de sinais, o Li-Fi oferece uma proteção natural contra interferências eletromagnéticas e interceptações físicas devido à sua necessidade de linha de visão direta. Cada tecnologia tem suas próprias abordagens e desafios para garantir a integridade e a confidencialidade das comunicações, e a escolha da tecnologia deve considerar as necessidades específicas de proteção e o ambiente operacional.

3.6.5 Análise da privacidade oferecida por Li-Fi versus Wi-Fi

A análise da privacidade oferecida por Li-Fi versus Wi-Fi revela diferenças significativas na maneira como cada tecnologia aborda a proteção dos dados transmitidos e a segurança do ambiente (MACHADO, 2021; SHURIJI, 2014). Os estudos trazidos serão base deste tópico.

Li-Fi oferece uma vantagem notável em termos de privacidade devido à sua dependência da luz visível para transmissão de dados. A luz não consegue atravessar paredes e obstáculos, o que limita o alcance do sinal a um espaço físico específico. Isso significa que, em um ambiente controlado, como uma sala

ou escritório onde a luz pode ser gerida, a interceptação de dados por pessoas fora do campo de visão do transmissor é extremamente difícil. Essa característica cria uma camada adicional de segurança física, reduzindo significativamente o risco de interceptação externa. No entanto, a privacidade é mantida somente enquanto o ambiente físico está protegido e a linha de visão direta é garantida. A criptografia continua sendo decisiva para proteger os dados contra possíveis interceptações dentro do espaço onde a luz é transmitida.

Wi-Fi, por outro lado, utiliza ondas de rádio que podem atravessar paredes e outros obstáculos, o que expõe a rede a um risco maior de interceptação. Os sinais de Wi-Fi podem ser captados por qualquer dispositivo dentro do alcance da rede, tornando a privacidade um desafio mais complexo. Para mitigar esses riscos, o Wi-Fi depende de protocolos de segurança, como WPA2 e WPA3, que fornecem criptografia e autenticação para proteger os dados transmitidos. Embora esses protocolos ajudem a garantir a privacidade dos dados, a necessidade de configuração e manutenção adequadas é essencial para evitar vulnerabilidades. Redes Wi-Fi públicas, em particular, podem ser menos seguras e mais suscetíveis a ataques e espionagem, destacando a importância de medidas adicionais, como o uso de VPNs (Redes Virtuais Privadas) para proteger a privacidade dos usuários.

Em resumo, o Li-Fi oferece uma abordagem natural para a privacidade devido à sua limitação física de transmissão de luz, enquanto o Wi-Fi depende de protocolos de segurança para proteger a privacidade dos dados em um ambiente mais suscetível a interceptações. Cada tecnologia tem suas próprias vantagens e limitações em termos de privacidade, e a escolha entre elas deve considerar o ambiente operacional e a necessidade de proteção adicional para garantir a segurança das comunicações (MALACCO; GUIMARÃES, 2019).

3.7 Aplicações em Ambientes Urbanos

3.7.1 Ambientes residenciais

Em ambientes residenciais urbanos, a escolha entre Li-Fi e Wi-Fi para aplicações de conectividade pode influenciar a eficiência e a qualidade da rede doméstica. Ambas as tecnologias oferecem benefícios distintos e enfrentam desafios específicos em contextos residenciais.

Wi-Fi é amplamente utilizado em ambientes residenciais devido à sua capacidade de fornecer conectividade em toda a casa, penetrando paredes e obstáculos. Em um ambiente urbano, onde os apartamentos e residências podem ter estruturas complexas e múltiplos andares, o Wi-Fi oferece flexibilidade e cobertura abrangente. Tecnologias como Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7 melhoram a capacidade da rede ao lidar com múltiplos dispositivos simultaneamente e ao reduzir a interferência, o que é fundamental em áreas residenciais densamente povoadas. O Wi-Fi também facilita a integração de uma variedade de dispositivos domésticos inteligentes, como termostatos, câmeras de segurança e sistemas de entretenimento, que podem se beneficiar da conectividade contínua e da alta largura de banda oferecida pelos padrões mais recentes.

No entanto, o Wi-Fi pode enfrentar problemas de interferência devido ao congestionamento de canais e à presença de múltiplas redes e dispositivos próximos. Em ambientes urbanos, onde muitos apartamentos compartilham o mesmo espectro de rádio, isso pode resultar em sinal instável ou lento. As melhorias tecnológicas como a utilização de bandas de 5 GHz e 6 GHz, bem como o uso de roteadores e extensor de sinal modernos, ajudam a mitigar esses problemas, mas a gestão da rede ainda é necessária para otimizar o desempenho.

Li-Fi, com sua capacidade de oferecer velocidades extremamente altas e baixa latência, tem um potencial considerável para aplicações específicas em ambientes residenciais. Em teoria, o Li-Fi poderia oferecer uma conexão ultrarrápida para atividades de alta demanda, como streaming de vídeo em 8K

ou jogos online, sem interferência de rádio. No entanto, sua aplicação em ambientes residenciais é limitada pela necessidade de linha de visão direta e pela incapacidade de atravessar paredes. Isso significa que o Li-Fi seria mais adequado para ambientes onde a comunicação é necessária em áreas controladas, como uma sala de entretenimento ou escritório dentro da casa, onde pontos de acesso de Li-Fi podem ser estrategicamente colocados (KUTTAN et al., 2021).

Além disso, a instalação de Li-Fi em uma residência urbana pode ser complexa e exigir a modificação da infraestrutura de iluminação para suportar a tecnologia. A necessidade de gerenciar e otimizar a iluminação e a posição dos pontos de acesso pode representar um desafio, especialmente em residências onde a configuração física não é facilmente alterada.

Em ambientes residenciais urbanos, o Wi-Fi se destaca por sua flexibilidade e cobertura abrangente, sendo ideal para fornecer conectividade em toda a casa e suportar uma ampla gama de dispositivos. A tecnologia é mais prática para ambientes complexos e variados devido à sua capacidade de penetrar paredes e obstáculos. O Li-Fi, com suas altas velocidades e baixa latência, oferece uma solução potencialmente revolucionária para áreas específicas dentro da residência onde a linha de visão direta pode ser mantida, embora sua aplicação prática em ambientes residenciais ainda enfrente desafios relacionados à infraestrutura e cobertura. A escolha entre Li-Fi e Wi-Fi dependerá das necessidades específicas de conectividade e do layout do ambiente residencial.

3.7.2 Ambientes comerciais e públicos

3.7.2.1 Ambientes comerciais

Em ambientes comerciais, como escritórios, lojas e espaços de *coworking*, tanto o Wi-Fi quanto o Li-Fi têm aplicações significativas, cada um com suas vantagens e desafios específicos.

Wi-Fi é amplamente utilizado em ambientes comerciais devido à sua flexibilidade, capacidade de cobertura e compatibilidade com uma vasta gama de dispositivos. Em escritórios e espaços de coworking, o Wi-Fi permite a conectividade para computadores, dispositivos móveis, impressoras e outros equipamentos essenciais, facilitando a colaboração e a comunicação. Com o avanço dos padrões Wi-Fi, como Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7, as redes comerciais podem suportar um maior número de dispositivos simultaneamente, oferecendo maior largura de banda e menor latência, o que é fundamental para ambientes onde a eficiência e a produtividade são essenciais. As melhorias em tecnologias como MU-MIMO e OFDMA ajudam a gerenciar o tráfego de dados e reduzir a interferência, otimizando a performance da rede em espaços comerciais densamente povoados (SANTOS; MANIÇOBA; SANTOS, 2024).

Li-Fi, embora menos comum, pode ser particularmente útil em certos cenários comerciais. Em ambientes onde a segurança é uma prioridade elevada, como em salas de conferências ou áreas de dados sensíveis, o Li-Fi pode oferecer uma camada adicional de segurança, uma vez que a luz visível não pode atravessar paredes e, portanto, não pode ser captada fora do espaço controlado. Além disso, o Li-Fi pode proporcionar velocidades de transmissão muito altas e baixa latência, o que é benéfico para aplicações que demandam grande largura de banda, como a transmissão de dados em grandes arquivos ou serviços de streaming em alta definição. Contudo, a necessidade de linha de visão direta e a limitação de cobertura fazem com que o Li-Fi seja mais adequado para áreas específicas dentro do ambiente comercial.

3.7.2.2 Ambientes públicos

Em ambientes públicos, como aeroportos, shopping centers, estações de transporte e eventos, a escolha entre Wi-Fi e Li-Fi também é significativa e impacta a experiência do usuário e a eficiência operacional.

Wi-Fi é a tecnologia dominante em ambientes públicos devido à sua capacidade de fornecer conectividade em grandes áreas e seu suporte para um

grande número de usuários simultâneos. Em locais como aeroportos e shopping centers, o Wi-Fi oferece acesso à internet para os visitantes, ajudando a manter a conectividade e a comunicação durante a espera ou as compras. Os padrões mais recentes, como o Wi-Fi 6 e o Wi-Fi 7, são projetados para lidar com o alto tráfego de dispositivos e melhorar a performance em ambientes densamente povoados. A implementação de redes Wi-Fi em áreas públicas também pode incluir estratégias para gerenciar o congestionamento, como a criação de redes de múltiplos pontos de acesso e a utilização de tecnologias para otimizar o desempenho e a segurança (SANTOS; MANIÇOBA; SANTOS, 2024).

Li-Fi, embora promissor, ainda não é amplamente adotado em ambientes públicos devido à sua limitação de cobertura e a necessidade de linha de visão direta. No entanto, o Li-Fi pode ser explorado para aplicações específicas em ambientes públicos, como em exposições ou eventos onde a transmissão de dados rápida e segura é necessária. Por exemplo, o Li-Fi pode ser usado em áreas de exibição para fornecer uma conexão de alta velocidade a dispositivos dos visitantes sem a necessidade de fios. Outra aplicação potencial é em áreas onde a segurança é uma preocupação crítica, como em zonas restritas de eventos onde é necessário garantir que os dados não possam ser interceptados fora do espaço autorizado.

Em ambientes comerciais e públicos, o Wi-Fi é amplamente utilizado devido à sua flexibilidade, capacidade de cobertura ampla e suporte para um grande número de dispositivos. É ideal para locais com alta densidade de usuários e onde a conectividade contínua é essencial. O Li-Fi, embora ofereça altas velocidades e segurança adicional, é mais adequado para aplicações específicas em ambientes comerciais e públicos onde a linha de visão pode ser mantida e a cobertura não é uma limitação crítica. A escolha entre as tecnologias dependerá das necessidades específicas de conectividade, segurança e cobertura do ambiente.

3.8 Infraestruturas Críticas

O **Quadro 3** apresenta principais aspectos críticos de infraestrutura das duas tecnologias:

Quadro 3. Aspectos críticos de infraestrutura das tecnologias Wi-fi e Li-fi.

506

Infraestruturas Críticas para Wi-Fi

- **Roteadores e Pontos de Acesso:**
 - Equipamentos fundamentais para a criação e gestão de redes Wi-Fi. São responsáveis pela transmissão e recepção de sinais de rádio, conectando dispositivos e garantindo a cobertura da rede.
- **Infraestrutura de Rede:**
 - Inclui switches, roteadores e cabos que conectam os pontos de acesso Wi-Fi à internet e a outras redes locais. A integridade e a capacidade dessa infraestrutura são essenciais para o desempenho e a confiabilidade da rede.
- **Serviços de Back-End:**
 - Servidores e sistemas de gerenciamento de rede que monitoram e controlam o tráfego de dados, a segurança e o desempenho da rede Wi-Fi.
- **Segurança Cibernética:**
 - Sistemas e protocolos de segurança para proteger a rede Wi-Fi contra ataques e acessos não autorizados, incluindo criptografia (WPA2/WPA3), firewalls e sistemas de detecção de intrusões.
- **Manutenção e Suporte:**
 - Equipes e ferramentas responsáveis pela manutenção dos equipamentos Wi-Fi, atualizações de firmware e resolução de problemas para garantir a operação contínua da rede.

Infraestruturas Críticas para Li-Fi

- **Emissores de Luz (LEDs):**
 - Dispositivos que transmitem dados usando luz visível, infravermelha ou ultravioleta. A qualidade e a intensidade da luz emitida são cruciais para a eficácia da comunicação Li-Fi.
- **Receptores de Luz:**
 - Equipamentos que captam a luz modulada e convertem os sinais ópticos em dados digitais. A precisão e a sensibilidade dos receptores influenciam a velocidade e a confiabilidade da comunicação.
- **Sistema de Controle de Iluminação:**
 - Infraestrutura que integra os emissores Li-Fi com o sistema de iluminação existente, permitindo a sincronização e a gestão eficaz da comunicação e da iluminação.
- **Infraestrutura de Rede de Dados:**
 - Conecta os receptores Li-Fi aos sistemas de processamento de dados e à internet. Inclui cabos e equipamentos que fazem a interligação entre a comunicação óptica e a rede de dados.
- **Segurança Física e Criptografia:**
 - Medidas para garantir que a comunicação Li-Fi esteja protegida contra acessos não autorizados. Embora a luz não atravesse paredes, a criptografia é necessária para proteger os dados transmitidos dentro do alcance da luz.
- **Manutenção e Instalação:**
 - Serviços responsáveis pela instalação e manutenção dos sistemas Li-Fi, incluindo o ajuste e a calibração dos emissores e receptores para garantir a eficiência da comunicação.

Fonte: elaborado pelos autores.

Do ponto de vista prático, o Wi-Fi foca na infraestrutura de roteadores, pontos de acesso, redes de dados, segurança cibernética e suporte para garantir a conectividade e a proteção da rede sem fio. O Li-Fi envolve emissores e receptores de luz, sistemas de controle de iluminação, integração com redes de dados, segurança física e criptografia para fornecer uma comunicação eficiente e segura baseada em luz.

507

3.9 Desafios e Limitações Tecnológicas

O **Wi-Fi**, apesar de sua ampla adoção e versatilidade, enfrenta vários desafios e limitações que podem impactar sua eficácia e eficiência. Um dos principais desafios é a **interferência eletromagnética**. O Wi-Fi opera nas bandas de 2,4 GHz e 5 GHz, que são compartilhadas com muitos outros dispositivos, como telefones celulares, micro-ondas e outros roteadores Wi-Fi. Em ambientes urbanos densamente povoados, essa interferência pode causar congestionamento de canais e degradação do desempenho, resultando em velocidades de conexão mais lentas e maior latência (SHURIJI, 2014).

Outro desafio significativo é a **cobertura e penetração de sinal**. Embora o Wi-Fi possa atravessar paredes e obstáculos, a intensidade do sinal diminui à medida que ele passa por materiais de construção, o que pode resultar em áreas de sinal fraco ou morto dentro de uma residência ou escritório. Além disso, em grandes edifícios ou em ambientes com muitos andares, pode ser necessário utilizar vários pontos de acesso para garantir uma cobertura adequada, o que pode complicar a gestão e aumentar os custos.

A **segurança** também é uma preocupação constante. Embora os protocolos de segurança como WPA2 e WPA3 ofereçam proteção robusta, as redes Wi-Fi ainda são vulneráveis a ataques cibernéticos, como interceptação de tráfego e ataques de força bruta, especialmente se não forem configuradas corretamente. A proteção da rede requer uma gestão ativa, atualizações

regulares e a implementação de práticas de segurança, como o uso de senhas fortes e criptografia de dados.

O **Li-Fi** oferece uma série de vantagens, como velocidades de transmissão muito altas e uma redução natural na interferência eletromagnética, mas também enfrenta desafios e limitações significativas que podem impactar sua adoção e aplicação prática. A principal limitação do Li-Fi é a **necessidade de linha de visão direta**. Os sinais de Li-Fi são transmitidos através de luz visível, infravermelha ou ultravioleta, que não consegue atravessar paredes e outros obstáculos. Isso significa que a comunicação é restrita a áreas onde a luz pode alcançar diretamente o receptor, limitando a cobertura e a flexibilidade em ambientes complexos (JAGATHEESAPERUMAL et al., 2024).

Outro desafio importante é a **instalação e integração**. Para implementar o Li-Fi, é necessário modificar a infraestrutura de iluminação existente para incluir emissores de luz que também funcionam como transmissores de dados. Isso pode envolver custos adicionais e a necessidade de planejamento cuidadoso para garantir que a iluminação e a comunicação estejam bem integradas. Além disso, a intensidade e a qualidade da luz emitida devem ser geridas para evitar interferências e garantir uma comunicação estável.

A **variação na intensidade da luz ambiente** também pode afetar o desempenho do Li-Fi. Fontes de luz externas, como a luz solar direta ou a iluminação artificial instável, podem interferir na qualidade do sinal e impactar a confiabilidade da comunicação. Para mitigar esses problemas, é necessário um controle rigoroso das condições de iluminação e a calibração dos emissores e receptores.

A **adaptação e a padronização** do Li-Fi ainda estão em desenvolvimento. A falta de um padrão universalmente aceito e a necessidade de desenvolvimento contínuo podem resultar em desafios para a integração com outras tecnologias e na adoção generalizada da tecnologia.

O Wi-Fi enfrenta desafios relacionados à interferência eletromagnética, cobertura e penetração de sinal, e questões de segurança. O Li-Fi, por sua vez, enfrenta limitações significativas devido à necessidade de linha de visão direta,

custos de instalação e integração, variação na intensidade da luz ambiente e a falta de padronização universal. Cada tecnologia oferece vantagens e enfrenta desafios únicos que devem ser considerados ao escolher a solução mais adequada para uma aplicação específica (SHURIJI, 2014)..

3.10 Tendências Futuras: Evolução das Tecnologias

3.10.1 Avanços esperados para Li-Fi

Os **avanços esperados para a tecnologia Li-Fi** prometem transformar a maneira como a comunicação sem fio é realizada, oferecendo melhorias significativas em termos de velocidade, segurança e eficiência. Um dos principais avanços esperados é a **expansão da cobertura e flexibilidade** do Li-Fi. Atualmente, a necessidade de linha de visão direta limita a aplicação da tecnologia, mas pesquisas estão em andamento para desenvolver técnicas que permitam a comunicação através de reflexões e difusões da luz, expandindo a cobertura e a flexibilidade em ambientes mais complexos e variados. Isso poderia tornar o Li-Fi uma solução viável para uma gama mais ampla de aplicações urbanas e interiores.

Além disso, espera-se que haja **avançadas melhorias na integração com a infraestrutura de iluminação existente**. Com o desenvolvimento de novas tecnologias e sistemas de controle, o Li-Fi poderá ser integrado de maneira mais eficiente com a iluminação pública e privada, reduzindo os custos e complexidade da instalação. A capacidade de combinar iluminação com transmissão de dados pode levar a um uso mais amplo da tecnologia em cidades inteligentes e edifícios comerciais (HEISKANEN; ACHARYA, 2017).

Outro avanço importante é a **evolução dos padrões e protocolos de Li-Fi**, o que ajudará a promover a interoperabilidade e a compatibilidade com outros sistemas e dispositivos. O estabelecimento de padrões mais robustos e amplamente aceitos permitirá uma maior adoção da tecnologia e facilitará a

integração com redes existentes, oferecendo uma solução mais coesa e eficiente para comunicação sem fio.

Finalmente, o desenvolvimento de **técnicas de modulação e controle de luz** vai permitir uma comunicação mais eficiente e menos suscetível a interferências. Isso não só melhorará a velocidade e a confiabilidade do Li-Fi, mas também possibilitará o uso em ambientes com diferentes condições de iluminação, tornando a tecnologia mais adaptável e prática para diversas aplicações.

510

3.10.2 Avanços esperados para Wi-Fi

Os **avanços esperados para a tecnologia Wi-Fi** visam superar suas limitações atuais e atender às crescentes demandas por maior velocidade e conectividade. O **Wi-Fi 7**, a próxima geração de Wi-Fi, promete oferecer melhorias significativas em termos de velocidade e eficiência. Com velocidades teóricas que podem exceder 30 Gbps e uma melhor gestão do espectro de frequência, o Wi-Fi 7 permitirá uma conectividade mais rápida e confiável para um número maior de dispositivos simultaneamente, respondendo à demanda crescente por largura de banda em ambientes urbanos e residenciais .

Além disso, espera-se que haja avanços em **tecnologias de gestão de espectro e redução de interferências**. O Wi-Fi 7 incorporará técnicas avançadas como **OFDMA** (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e **MU-MIMO** (*Multi-User Multiple Input Multiple Output*), que melhorarão a eficiência do uso do espectro e permitirão uma melhor gestão do tráfego em redes congestionadas. Essas melhorias ajudarão a reduzir a interferência e a latência, proporcionando uma experiência de usuário mais fluida e consistente.

Outra área de avanço é o **fortalecimento das capacidades de segurança e privacidade**. Com o aumento das ameaças cibernéticas, as futuras versões do Wi-Fi continuarão a melhorar os protocolos de segurança, como o WPA3, para oferecer proteção mais robusta contra ataques e garantir a integridade e a privacidade dos dados transmitidos. Novos métodos de

autenticação e criptografia serão desenvolvidos para enfrentar desafios emergentes e proteger redes contra vulnerabilidades.

Finalmente, a **integração com tecnologias emergentes**, como a Internet das Coisas (IoT) e redes de dispositivos inteligentes, será um foco importante. O Wi-Fi deverá evoluir para suportar uma maior densidade de dispositivos e aplicações conectadas, oferecendo uma infraestrutura de comunicação que possa atender às necessidades de uma cidade inteligente e a crescente demanda por conectividade em ambientes altamente interconectados.

Para o Li-Fi, os avanços esperados incluem a expansão da cobertura através de novas técnicas de modulação, melhor integração com a infraestrutura de iluminação, e o desenvolvimento de padrões universais. Para o Wi-Fi, os avanços prometem velocidades superiores com o Wi-Fi 7, melhorias na gestão de espectro e redução de interferências, maior segurança e privacidade, e melhor integração com tecnologias emergentes. Esses desenvolvimentos têm o potencial de transformar significativamente a maneira como a conectividade sem fio é proporcionada e gerida em ambientes urbanos e residenciais.

3.11 Integração e Convergência

A **integração e convergência** entre Li-Fi e Wi-Fi representam uma abordagem promissora para otimizar a conectividade sem fio e explorar os pontos fortes de cada tecnologia. Esta combinação visa oferecer uma experiência de usuário mais robusta e eficiente, aproveitando as vantagens específicas de cada tecnologia para superar suas limitações individuais (RAZZAQ; MUBEEN; QAMAR, 2020).

Li-Fi e Wi-Fi podem ser integrados para aproveitar a complementaridade em termos de cobertura e velocidade. Enquanto o **Wi-Fi** é ideal para fornecer conectividade em grandes áreas e através de obstáculos, o **Li-Fi** oferece velocidades de transmissão de dados muito mais altas e uma segurança aprimorada em ambientes onde há linha de visão direta. Integrar essas duas tecnologias pode permitir que redes aproveitem a alta velocidade do Li-Fi em

áreas específicas, como salas de reuniões ou áreas de trabalho, e usem Wi-Fi para garantir cobertura em áreas mais amplas e em locais onde a luz não pode alcançar (ALNAJJAR; MAHMOUD, 2023).

A integração pode envolver o desenvolvimento de **sistemas de controle e gerenciamento unificado** que coordenem o uso de Li-Fi e Wi-Fi. Esses sistemas podem gerenciar quais dispositivos se conectam a cada tipo de rede com base na localização, tipo de aplicação e necessidades de largura de banda. Por exemplo, dispositivos móveis e laptops podem alternar automaticamente entre Wi-Fi e Li-Fi dependendo da proximidade com os emissores de luz e das condições do ambiente. Isso ajuda a otimizar a conectividade e a eficiência da rede, garantindo uma experiência de usuário mais fluida (SALMAN; HAMZA, 2021).

Infraestrutura híbrida é uma abordagem para a integração de Li-Fi e Wi-Fi que envolve a instalação simultânea de emissores de luz e pontos de acesso Wi-Fi em um único ambiente. Essa infraestrutura pode ser projetada para suportar tanto a iluminação quanto a comunicação de dados, reduzindo os custos e a complexidade associados à instalação de dois sistemas separados. Em edifícios comerciais ou em ambientes urbanos, isso pode significar a combinação de iluminação pública com pontos de acesso Li-Fi, proporcionando cobertura de internet em alta velocidade sem a necessidade de instalação adicional.

Em **cidades inteligentes**, a convergência de Li-Fi e Wi-Fi pode desempenhar um papel fundamental na criação de um ambiente urbano mais conectado e eficiente. Li-Fi pode ser utilizado para fornecer alta velocidade de dados em áreas de alta densidade, como praças e eventos, enquanto o Wi-Fi pode garantir conectividade em áreas mais amplas e variadas. A integração pode facilitar a comunicação entre diferentes dispositivos e sistemas urbanos, como iluminação pública inteligente, câmeras de segurança e sistemas de transporte, criando uma infraestrutura urbana mais integrada e responsiva (HEISKANEN; ACHARYA, 2017).

Em ambientes comerciais e públicos, a convergência entre Li-Fi e Wi-Fi pode oferecer uma **experiência de usuário aprimorada**. Em grandes centros de convenções, aeroportos ou centros de compras, onde há uma necessidade de alta velocidade de dados e ampla cobertura, a combinação de Li-Fi e Wi-Fi pode garantir que todos os requisitos de conectividade sejam atendidos. Li-Fi pode fornecer velocidades ultrarrápidas em áreas de alta demanda, como áreas de exibição ou zonas de trabalho, enquanto o Wi-Fi cobre a conectividade em áreas comuns e corredores.

Para **edifícios comerciais e institucionais**, a integração de Li-Fi e Wi-Fi pode otimizar a conectividade em diferentes ambientes. Em salas de conferências, onde a alta velocidade de transmissão de dados é essencial para apresentações e transmissões ao vivo, o Li-Fi pode fornecer uma solução rápida e segura. Ao mesmo tempo, o Wi-Fi pode garantir a conectividade em áreas de suporte e em escritórios, proporcionando uma solução completa para as necessidades de comunicação da organização.

A integração e convergência de Li-Fi e Wi-Fi oferecem uma abordagem avançada para otimizar a conectividade sem fio, combinando a alta velocidade e segurança do Li-Fi com a ampla cobertura e flexibilidade do Wi-Fi. A implementação de sistemas híbridos e a gestão unificada dessas tecnologias podem proporcionar uma experiência de usuário mais eficiente e abrangente, especialmente em ambientes urbanos e comerciais complexos. A convergência das duas tecnologias é uma tendência promissora para enfrentar os desafios atuais e futuros na conectividade sem fio, ajudando a criar ambientes mais conectados e responsivos (SINGH et al., 2022).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de Li-Fi e Wi-Fi representa uma evolução significativa na forma como a conectividade sem fio é fornecida e gerida em ambientes urbanos e comerciais. O Li-Fi, com suas velocidades de transmissão extremamente rápidas e níveis elevados de segurança, se destaca em cenários onde a alta

performance e a proteção de dados são cruciais, como em salas de conferências e ambientes de trabalho. No entanto, suas limitações relacionadas à necessidade de linha de visão direta e à sensibilidade a condições de iluminação impõem restrições que podem ser mitigadas pela complementaridade com o Wi-Fi. Este último, com sua capacidade de oferecer ampla cobertura e conectividade em áreas mais extensas e complexas, preenche as lacunas deixadas pelas limitações do Li-Fi, garantindo que todos os dispositivos e usuários permaneçam conectados em uma variedade de ambientes.

A convergência dessas duas tecnologias, através de sistemas híbridos e soluções integradas, promete criar redes mais robustas e eficientes, capazes de atender às crescentes demandas de largura de banda e segurança em um mundo cada vez mais digital. Projetos em grandes cidades e ambientes comerciais têm mostrado o potencial desta abordagem combinada, demonstrando como Li-Fi e Wi-Fi podem trabalhar juntos para oferecer uma experiência de conectividade mais completa e flexível. A implementação eficaz dessas tecnologias exige um planejamento cuidadoso e a adaptação das infraestruturas existentes, mas os benefícios potenciais em termos de desempenho e alcance justificam o esforço.

À medida que avançamos para um futuro de maior conectividade e digitalização, a combinação de Li-Fi e Wi-Fi pode se tornar uma solução essencial para enfrentar os desafios das redes sem fio modernas. O contínuo desenvolvimento e aprimoramento dessas tecnologias não só impulsionarão a capacidade de transmissão e a segurança das redes, mas também apoiarão a criação de ambientes urbanos inteligentes e interconectados. A colaboração entre pesquisadores, empresas e autoridades urbanas será fundamental para superar as barreiras atuais e explorar todo o potencial dessas inovações tecnológicas, garantindo uma conectividade mais eficiente e acessível para todos.

REFERÊNCIAS

ADRO, A. F. F. **Desenvolvimento de uma aplicação móvel para traçado de percurso em ambiente indoor**. 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e Aplicações) - Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Lisboa, Portugal, 2019.

ALBRAHEEN, L. I. Toward Designing a Li-Fi-Based Hierarchical IoT Architecture. **IEEE Access**, v. 6, p. 40811-40825, 2018.

ALNAJJAR, S. H.; MAHMOUD, H. M. Internet of Things Utilizing Light Fidelity Technology: A Review. Al-Iraqia. **Journal for Scientific Engineering Research**, v. 2, n. 4, p. 1-8, 2023.

ANDRADE, J. P., SILVA, T. F. **Segurança em redes WI-FI: vulnerabilidades nos protocolos de criptografia WEP e WPA/WPA2**, 2023. Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Segurança da Informação) - Faculdade de Tecnologia de Americana "Ministro Ralph Biasi", Americana, 2023

ARINZE, N. S.; ONOH, G. N.; ABONYI, D. Network performance comparison of light fidelity and wireless fidelity. **International Journal of Advanced Scientific and Technical Research**, v. 1, n. 10, p. 14-24, 2020.

ATAÍDES, K. B. **Estudo de desempenho de antenas para cobertura de WI-FI em ambientes fechados**. 2023. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) - Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2023.

COLVERO, G. D. **Ensaio de avaliação de compatibilidade de driver de LED de dupla função para operação VLC com especificação IEEE 802.15.7**. 2023. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2023.

FERREIRA, L. A. **Interferência de sinal wi-fi em função de tipos de barreira**, 2017. Artigo científico (Curso Superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) - Faculdade de Tecnologia de Botucatu, 2017.

FRASSON, D. R. **Simulação de rede li-fi com Handover Skipping para ambientes internos**. 2023. 78 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Elétrica Projeto de Graduação. Vitória, ES, 2023.

HAESER, E. F.; MILETTO, E. M. Desenvolvimento do protótipo Gambiarrádio Educacional: dispositivo para transmissão de áudio via ondas de rádio FM

baseado em Raspberry Pi. **Atas do XIX Simpósio Internacional de Informática Educativa e VIII Encontro do CIED–III Encontro Internacional**, p. 97-102, 2017.

HEISKANEN, O.; KARTHIKEYA A. Envisioning the future of public lighting with citizens for upcoming technologies. **The Design Journal**, v. 20, sup1, p. S1782-S1793, 2017.

KEVORKIAN, Y. B. **Planejamento estratégico para pequenos provedores de internet**. 2017. 81 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ, 2017.

KUTTAN, D. B. et al. Light fidelity: a future of wireless communication. In: **2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)**. IEEE, 2021. p. 308-312.

JAGATHEESAPERUMAL, S. K. et al. Artificial intelligence of things for smart cities: advanced solutions for enhancing transportation safety. **Computational Urban Science**, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2024.

JARAMILLO, S. C. H.; ROMERO, J. A. B. **Estudio de las vulnerabilidades en las redes de tecnología li-fi**. 2020. 77 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Cooperativa de Colombia. Bogotá, Colombi, 2020.

LAU, I. et al. Hybrid mmWave-Li-Fi 5G architecture for reconfigurable variable latency and data rate communications. **IEEE Access**, v. 11, p. 42850-42861, 2023.

LIMA, D. L. **Análise de desempenho da coexistência do wi-fi com o LTE**. 2021. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

MACHADO, V. C. R. Tecnologias relacionadas à iluminação: pesquisa de tendências, tecnologias e conectividade. **Arte** 21, v. 16, n. 1, p. 85-129, 2021.

MALACCO, M. H. L.; GUIMARÃES, D. A. Contribuições ao estudo da camada física de sistemas light-fidelity, Li-Fi. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 9, n. 1, p. 14-25, 2020.

MARÈ, R. M. et al. Feasibility of a testing methodology for visible light communication systems applied to intelligent transport systems. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 3, p. 515-523, 2021.

MEDEIRO, A. N. M.; SORRENTINO, T. A. **Comunicação wireless por luz**. 2018. 9 f. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Universidade

Federal Rural do Semiárido – UFRSA; Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, 2018.

MIRANDA, R. F. **Desenvolvimento de um sistema de comunicação por luz utilizando dispositivo de rádio definido por software**. 2022. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2022.

MITEKU, N. Li-Fi over Wi-Fi in Internet Data communication. **International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering**, v. 13, n. 12, p. 153-159, 2015.

RAAD, R. **À luz do trabalho: estudo comparativo de uma intervenção de iluminação voltada à saúde do trabalhador noturno**. 2024. 299 f. Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade de São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. São Paulo, SP, 2024.

RAZZAQ, S.; MUBEEN, N.; QAMAR, F. Design and analysis of light fidelity network for indoor wireless connectivity. **IEEE Access**, v. 9, p. 145699-145709, 2021.

RODRIGUES, João Pedro Pessegueiro. **Li-fi: Navegação Assistida por LEDs**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2022. Dissertação de Mestrado.

SALMAN, K. D.; HAMZA, E. K. Visible light fidelity technology: survey. Iraqi J. Comput. Commun. **Control Syst. Eng**, v. 21, n. 2, p. 1-15, 2021.

SANTOS, B. L. G. et al. Comunicação de dados por luz visível através de LEDs usados na iluminação de ambientes. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 59, n. 3, p. 990-1008, 2022.

SANTOS, A. A.; MANIÇOBA, R. H. C.; SANTOS, A. F. Wi-Fi 6 e Wi-Fi 6E: Uma análise comparativa dentro do novo padrão 802.11 ax. **Revista Científica Foz**, v. 7, n. 1, 2024.

SHURIJI, M. A. An extensive comparison of the next generation of wireless communication technology: Light-fidelity (Li-Fi) versus wireless-fidelity (Wi-Fi). **GSTF Journal on Media & Communications (JMC)**, v. 2, p. 1-5, 2014.

SINGH, L. et al. Data Transfer Using Light Fidelity (Li-Fi) Technology—A Methodological Comparative Study. In: Biologically Inspired Techniques in Many Criteria Decision Making: **Proceedings of BITMDM 2021**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 315-321.

SPIGOLON, R. A. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e irrigação automatizada para cultivo protegido.** 2021. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Agrícola, Alegrete, 2021.

Os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.