

Contribuições ao Estudo da Camada Física de Sistemas *Light-Fidelity*, Li-Fi

Matheus Henrique de Lima Malacco e Dayan Adionel Guimarães

Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel. Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil.

e-mails: matheusmalacco@get.inatel.br, dayan@inatel.br

Resumo—Este artigo tutorial descreve a tecnologia *Light Fidelity* (Li-Fi), com foco nas características de sua camada física. O Li-Fi é uma recente tecnologia para transmissão de dados sem fio por luz, com algumas vantagens em relação às transmissões realizadas por radiofrequência. O artigo apresenta as origens da tecnologia, suas potencialidades, desvantagens, possíveis cenários de aplicação e as principais características da sua camada física, visando disseminar a tecnologia Li-Fi por meio de uma linguagem compreensível para todos aqueles envolvidos com engenharia de telecomunicações

Palavras-chave—Camada física, comunicação sem fio, *light-fidelity*, modulação digital.

I. INTRODUÇÃO

O avanço das telecomunicações é notório nas últimas décadas. Evoluiu de conexões a cabo, limitadas a 56 kbit/s na década de 1960, para conexões sem fio que, já em 2010, tinham capacidade superior a 100 Mbit/s [1]. Como reflexo disso, houve um aumento exponencial no número de dispositivos móveis e, conseqüentemente, uma crescente demanda por altas taxas de dados. Neste contexto, faz-se necessário maior investimento em infraestrutura, principalmente em redes internas, nas quais os usuários demandam taxas de transmissão mais altas ao utilizarem serviços de *streaming* de alta definição e o acesso a grandes arquivos armazenados em nuvem [2].

A demanda por novas conexões tende a se tornar ainda maior com a chegada da quinta geração (5G) de redes de comunicações móveis e suas aplicações envolvendo a Internet das Coisas (Internet of Things, IoT), além do aumento da velocidade em mais de 180 vezes em comparação com a geração anterior [3].

O efeito de crescimento exponencial da demanda por maiores taxas de dados incentivou uma busca constante por novas tecnologias de comunicação. Por outro lado, as técnicas de transmissão sem fio conhecidas encontram-se significativamente saturadas em termos de disponibilidade de espectro de radiofrequência (*radiofrequency*, RF) e de limitações técnicas e físicas que impossibilitam transmissões acima de 1 Gbit/s

Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No. 01250.075413/2018-04, projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Brasil.

Uma versão anterior deste artigo foi apresentada como trabalho de conclusão do curso de graduação do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações, aprovado em 13/06/2019 pela comissão julgadora composta pelos professores: Dr. Dayan Adionel Guimarães, Dr. Guilherme Pedro Aquino e Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza.

com garantia de qualidade de serviço (*quality of service*, QoS) [4] [5]. Somam-se a tais problemas a burocracia proveniente da regulamentação pelo Estado, com o objetivo de assegurar a minimização da poluição eletromagnética e interferências entre os diferentes sistemas [6], e o fato de que a segurança das informações transmitidas é constantemente colocada em questionamento devido à possibilidade de o sistema ser suscetível à interceptação ou outro uso indesejado [6].

Por outro lado, o uso de fios é um enorme empecilho à implementação de redes de comunicação, sendo necessária uma infraestrutura robusta, planejamento antecipado no ato de cabeamento e possíveis mudanças de rotas, em caso de atualizações, expansões e modernização das tecnologias utilizadas [7].

Assim, devido aos vários problemas encontrados nas tecnologias de comunicação atuais e às suas limitações de crescimento, novas propostas são constantemente colocadas em pauta. Recentemente, a tecnologia denominada de *Light Fidelity* (Li-Fi) [8] tem recebido atenção da academia e da indústria, pelo potencial de fornecimento de altas taxas de transmissão, além da fácil implementação e versatilidade no uso de infraestruturas existentes [9].

Neste artigo tutorial, a tecnologia Li-Fi é abordada, com foco nas principais características de sua camada física. As origens da tecnologia, suas vantagens, desvantagens e possíveis cenários de aplicação são também discutidos, visando disseminar a tecnologia por meio de uma linguagem compreensível para os leitores na área de engenharia de telecomunicações.

O restante do artigo está assim organizado: a Seção II discorre sobre a origem do sistema Li-Fi e sobre seus aspectos mais gerais, objetivando permitir uma compreensão inicial sobre a tecnologia. Na Seção III é abordado o tema principal do artigo, a camada física do sistema Li-Fi e suas principais características, tais como o princípio de funcionamento, diagramas de transmissores e receptores, técnicas de modulação, vantagens, desvantagens e uma comparação com o sistema *Wireless Fidelity* (Wi-Fi). Na Seção IV são apresentadas as diretrizes do padrão IEEE 802.15.7 em relação ao Li-Fi. Na Seção V são apresentados estudos de casos nos quais o sistema Li-Fi foi aplicado. A Seção VI apresenta as principais conclusões do trabalho.

II. BREVE HISTÓRICO E CONCEITOS INICIAIS SOBRE A TECNOLOGIA LI-FI

A primeira exibição de um embrião da tecnologia Li-Fi foi realizada por Harald Haas, professor de comunicações

móveis da Universidade de Edimburgo [10] e cofundador da companhia Purelifi [11]. Em 12 de Julho de 2011, Haas proferiu uma palestra no evento TED (*Technology Entertainment Design*) [12], ocasião em que realizou a transmissão de um sinal de vídeo de alta definição, em tempo real, para um smartphone, utilizando uma luminária como elemento de transmissão. Durante a palestra, por alguns momentos Harald bloqueou a passagem de luz e, como resultado, o vídeo parou. Após a remoção do bloqueio, o vídeo voltou a ser transmitido em tempo real [13]. Essa demonstração é considerada por muitos como a propulsora da tecnologia Li-Fi [4].

O funcionamento básico da tecnologia Li-Fi, por hora em termos simples, consiste em acender uma lâmpada apropriada ou um diodo emissor de luz (*light emitting diode*, LED) para representar o nível lógico 1 e apagá-la para representar o nível lógico 0, permitindo que sinais digitais sejam transmitidos como em qualquer outro sistema de comunicação digital [14]. A frequência com que o dispositivo é aceso e apagado é superior à capacidade de captação do olho humano, possibilitando que informações sejam transmitidas sem serem percebidas pela visão, não afetando assim a eventual função de iluminação ambiente do dispositivo. O receptor possui um componente denominado de fotodetector, que é capaz de captar a informação transportada pelo sinal luminoso, convertendo-o em sinal elétrico para o posterior processamento em função do tipo de modulação adotado [15].

A tecnologia Li-Fi tem potencial para fornecer inúmeras possibilidades de operação tanto em ambientes internos (principalmente) quanto externos. A sua utilização requereria uma banda de frequência de mais de 300 THz, devido ao fato de o espectro de frequência da luz visível encontrar-se, aproximadamente, na faixa de 400 THz a 700 THz [16]. Essa faixa de frequências permitirá que os sistemas Li-Fi operem com taxas de transmissão superiores a 1 Gbit/s, com baixa interferência e sem a necessidade de grandes modificações em redes existentes. Além destes benefícios, será possível obter baixo consumo de energia devido à utilização de lâmpadas especiais com LEDs, bem como maior segurança nas comunicações pelo fato de a luz não atravessar paredes e, portanto, dificultar que o sinal seja facilmente interceptado por intrusos que pretendam acessar indevidamente os dados [4].

A tecnologia Li-Fi permitirá diversas possibilidades de acesso à Internet e *streaming* de vídeo de alta definição, permitindo aplicações nas áreas de medicina, aviação, trânsito, cidades inteligentes, indústrias, educação, comunicações subaquáticas, gerenciamento de desastres, conexões móveis, dentre outras [4].

O Li-Fi pode se sobressair ao uso do Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) em ambientes hospitalares, pois o uso do Wi-Fi nesses locais pode interferir em equipamentos de monitoramento [4]. Além disso, com a chegada das redes móveis de quinta geração, será possível o surgimento de diversas tecnologias na área da saúde para procedimentos à distância em tempo real, tais como cirurgias teleguiadas [17].

O fato de utilizar a luz como meio de transmissão pode permitir a redução do uso de ondas do espectro de radiofrequências em ambientes nos quais o sinal entre em contato frequente com o corpo humano, algo que potencialmente

pode trazer riscos à saúde [18]. A Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization*, WHO) [19] concluiu, com base na literatura especializada, que não é possível confirmar a existência de qualquer consequência da exposição humana a sinais de radiofrequência, mas admitiu a existência de possibilidades que precisam ser mais bem investigadas [20]. Por esse motivo, a instituição coordena uma pesquisa internacional com o objetivo de compreender, de forma mais profunda, os riscos das radiofrequências à saúde. Por outro lado, a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (*International Agency for Research on Cancer*, IARC) [21] classificou o contato com as ondas eletromagnéticas como possível agente cancerígeno [22].

Como quase sempre se nota em qualquer tecnologia, o Li-Fi também apresenta pontos negativos que precisam ser superados antes de sua maciça proliferação. Por exemplo, a comunicação necessita que haja constante luminosidade e certo alinhamento do receptor com o transmissor para que exista troca de informações [4], ou ao menos reflexões de sinal que beneficiem tal comunicação. Além disso, o sistema pode sofrer interferências de outras fontes de luz artificial e natural, algo que pode afetar a velocidade de transmissão e aumentar o ruído de fundo de forma a levar o receptor à saturação [23].

O mercado correspondeu de forma positiva após a exibição realizada pelo professor Harald Haas e, com isso, muitas empresas e universidades realizaram grande investimento em pesquisas sobre a tecnologia. Como exemplo, os pesquisadores da Universidade de Oxford utilizaram a tecnologia Li-Fi bidirecional e atingiram a velocidade de 224 Gbit/s a 3 metros de distância entre transmissor e receptor. Essa taxa de transmissão permite a transferência de um arquivo de 27 GBytes em menos de um segundo. É importante ressaltar que o sistema atingiu 112 Gbit/s para os campos de visão de 60° e 36° [24].

Algumas empresas já entraram no mercado com produtos capazes de implementar sistemas de comunicação com a tecnologia Li-Fi, como a Purelifi [11], a Lucibel [25] e a Luciom [26]. Grandes organizações também estão desenvolvendo sistemas com a nova tecnologia. São exemplos a Intel, a Siemens, a Casio, a Philips, a Samsung [7] e, mais recentemente, a Agência Nacional de Administração Aeronáutica e Espacial (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA) dos Estados Unidos da América, anunciando planos de estudar o potencial da tecnologia em viagens espaciais [27]. De acordo com pesquisas recentes, o mercado dessa tecnologia deverá movimentar cerca de 8,5 milhões de dólares até o final de 2020 [28].

III. POSSIBILIDADES TECNOLÓGICAS PARA A CAMADA FÍSICA DE SISTEMAS LI-FI

Nesta seção, que constitui a principal contribuição do artigo, abordam-se os mais relevantes aspectos e possibilidades tecnológicas da camada física de sistemas Li-Fi, sempre que possível associando-os com sistemas similares de comunicação via radiofrequência.

A. Capacidade e eficiência

A taxa máxima de transmissão de informação por um canal de comunicação com ruído, isto é, a capacidade máxima do

canal, pode ser calculada utilizando o teorema da capacidade de canal (ou teorema da capacidade de informação) de Shannon. Segundo esse teorema, a máxima taxa de informação, em bits por segundo, que pode ser atingida em um canal com ruído aditivo Gaussiano branco (*additive white Gaussian noise*, AWGN), de forma que se possa ter a probabilidade de erro de bit controlável e arbitrariamente pequena, é dada por $C = B \log_2(1 + S/N)$ em que B é a largura de banda do canal, em hertz (Hz), S a potência do sinal na entrada do canal e N a potência do ruído AWGN, ambos em watts [29].

Esta equação evidencia a superioridade dos sistemas Li-Fi em relação aos sistemas de comunicação por ondas de rádio, dado que a capacidade é diretamente proporcional à largura de banda do canal. Enquanto a largura de banda dos sistemas Li-Fi está na casa dos terahertz [16], os sistemas de radiocomunicação possuem largura máxima na casa de alguns gigahertz [5]. Portanto, a capacidade do canal em sistemas Li-Fi pode ser mil vezes maior que a dos sistemas de radiocomunicação.

A eficiência dos sistemas de comunicação não depende apenas da capacidade do canal. A tecnologia empregada deve ser capaz de operar com taxas de transmissão de informação próximas à capacidade do canal para que a eficiência se aproxime do máximo [29]. Tal eficiência pode ser então medida como a razão entre a taxa efetiva de comunicação, R , e a capacidade do canal, C , ou seja, $\eta = R/C$. Tal equação permite o entendimento de que a elevada taxa de transmissão do sistema Li-Fi poderá, com o amadurecimento da tecnologia, permitir altos níveis de eficiência.

B. Vantagens e desvantagens do sistema Li-Fi

A tecnologia Li-Fi foi idealizada com o objetivo de proporcionar uma expansão da disponibilidade espectral para comunicações sem fio, visto que grande parte do espectro de ondas de radiofrequência encontra-se ocupada.

A implementação dos sistemas de comunicação por luz permitirá o acesso à Internet em locais que possuem alta sensibilidade a interferências eletromagnéticas, como ambientes hospitalares, aviões, laboratórios e usinas de energia. Essa possibilidade é real devido ao fato de que os sistemas Li-Fi não geram interferência eletromagnética na faixa das radiofrequências [9].

Para a realização de comunicações via radiofrequência é necessária a utilização de estações de transmissão. Ao redor do mundo, há mais de 1,4 milhão de estações de rádio com alto consumo de energia, grande parte devido à necessidade de resfriamento dos equipamentos que constituem tais estações [9]. Por outro lado, o consumo de energia de sistemas Li-Fi pode ser extremamente baixo devido ao fato de LEDs serem utilizados como forma de transmissão dos dados através do meio [4]. Dessa forma, pode-se transmitir os dados através da infraestrutura da rede elétrica existente e realizar a conexão com os dispositivos receptores ao longo dessa rede, utilizando os pontos luminosos conectados, sejam eles lâmpadas de postes, residências, lojas, indústrias ou qualquer outra fonte de luz [4].

Vale ressaltar que a necessidade de luz constante, bem como interferências por obstáculos e outras fontes de luz, além da

limitação de alcance e linha de visada [4] são fatores que precisam ser superados para que a comunicação por sistemas Li-Fi se torne aplicável a qualquer cenário, principalmente para ambientes externos.

O fato de a luz não atravessar superfícies sólidas não transparentes permite reuso de frequência, ou seja, pode-se utilizar a mesma frequência dentro de cômodos que constituem o mesmo prédio ou residência [7].

A segurança proporcionada pela utilização dos sistemas Li-Fi também está relacionada com o fato da luz não atravessar superfícies sólidas não transparentes. Afinal, se não é possível captar os dados fora do ambiente no qual o sistema está inserido, o mesmo torna-se mais robusto contra o acesso não autorizado às informações [4].

A evolução das redes de comunicações sem fio tende a atender a uma exigência crescente por maiores taxas de dados. A cada nova geração de redes móveis, a taxa de transmissão de dados cresce significativamente, ao mesmo tempo em que os sistemas passam a exigir latências ínfimas de, no máximo, microssegundos [3]. A tecnologia Li-Fi se desenvolve como excelente possibilidade de implementação para as redes futuras devido ao fato de potencialmente permitir taxas de dados superiores a centenas de Gbit/s [4].

C. Comparação entre sistemas Li-Fi e Wi-Fi

A Tabela I, que é autoexplicativa, sumariza algumas das principais características dos sistemas Li-Fi e Wi-Fi, permitindo uma rápida comparação entre elas. Nesta tabela, a sigla EMI significa interferência eletromagnética (*electromagnetic interference*) de ou em sistemas de radiofrequência.

Tabela I
COMPARAÇÃO ENTRE LI-FI E WI-FI [4] [7] [9]. O ESTÁGIO DE EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA WI-FI NESTA COMPARAÇÃO CORRESPONDE À DATA DA PUBLICAÇÃO DE REFERÊNCIA, 2017.

Parâmetros	Li-Fi	Wi-Fi
Espectro	Luz visível	Radiofrequência
Padronização	IEEE 802.15.7	IEEE 802.11
Largura de faixa	\cong 400 THz	\cong 40 MHz
Taxa de transmissão	> 1 Gbps	100 Mbps - 1 Gbps
Latência	microssegundos	milissegundos
Alcance	< 10 m	< 300 m
Segurança	Alta	Média
EMI	Não	Sim
Cobertura	Limitada	Ampla
Multipercurso	Não	Sim
Complexidade	Baixa	Alta
Conectividade	Alta	Alta
Infraestrutura	Iluminação	Pontos de acesso
Consumo de energia	Baixo	Médio
Interferência por obstáculo	Alta	Baixa
Maturidade do mercado	Baixa	Alta

D. Similaridades e diferenças entre VLC e Li-Fi

O funcionamento do Li-Fi é baseado na comunicação VLC (*visible light communication*), técnica para transmissão de dados ponto-a-ponto utilizando luz visível [30]. Em outras

palavras, embora seja tratada como uma nova tecnologia, o Li-Fi tem fundamentos na tecnologia VLC [31]. A Fig. 1 ilustra o diagrama de blocos de um sistema básico utilizado em transmissões com a tecnologia VLC [8]. O entendimento deste diagrama é relevante à demonstração das similaridades e diferenças entre VLC e Li-Fi.

As informações binárias inseridas no transmissor são convertidas para a forma analógica pelo conversor digital-analógico (*digital-to-analog converter*, DAC). Na sequência, o sinal é entregue ao amplificador de transcondutância (*trans-conductance amplifier*, TCA), dispositivo responsável por converter em corrente elétrica amplificada a tensão do sinal aplicado à sua entrada. Ao TCA está acoplado um filtro passa-baixas (*low-pass filter*, LPF) cuja função é atenuar as componentes de frequência fora da banda desejada. O bloco de nível de luz desejado (*desired light level*) é responsável por definir o nível da luminosidade que representará cada nível analógico de corrente de entrada. Por último, o LED converte os níveis de luz de um sinal elétrico para sinal óptico de alta potência, o qual será transmitido através do canal de comunicação [31]. A comunicação ponto-a-ponto nos sistemas VLC pode ser realizada pelo ar ou por cabo de fibra óptica.

Os sinais ópticos são captados no receptor por um componente denominado fotodetector. Esse componente converte o sinal óptico em sinal elétrico, o qual, por sua vez, é aplicado ao amplificador de transimpedância (*transimpedance amplifier*, TIA), também conhecido como amplificador de fotodiodo, já que o TIA tem a função principal de converter a corrente fornecida pelo fotodiodo em tensão amplificada para os blocos seguintes. Assim como no TCA do transmissor, o TIA está acoplado a um LPF com propósito análogo. O sinal analógico filtrado de saída do TIA é convertido para a forma digital pelo conversor analógico-digital (*analog-to-digital converter*, ADC), sendo fornecidas informações digitais ao destino [31].

Dois características marcantes do sistema VLC podem ser destacadas, servindo como base para distinção em relação ao Li-Fi: i) o VLC é projetado para uma comunicação ponto-a-ponto, ou seja, não há comunicação multiusuário, e ii) a comunicação realizada não prevê mobilidade relativa entre transmissor e receptor.

O padrão IEEE 802.15.7 define as características da comunicação VLC e vem sendo constantemente revisado para a inclusão do Li-Fi. Essa inclusão é necessária, pois, apesar de utilizar a comunicação por luz, o sistema Li-Fi possui características que contrastam com o sistema VLC. Pode-se destacar o fato de o Li-Fi ser, por concepção, um sistema de comunicação multiusuários, bidirecional e multiponto [8]. O Li-Fi envolve múltiplos pontos de acesso, formando uma rede sem fio com grande largura de faixa de operação [32]. Isso ocorre devido à operação entre os comprimentos de onda de 400 nm até 700 nm, o que, em termos de frequência, corresponde, como já mencionado, a uma banda de 400 THz a 700 THz [16].

Assim como o sistema VLC, o Li-Fi é constituído essencialmente de três blocos: o transmissor, que consiste em uma fonte de luz modulada para a transmissão de informações, o meio de propagação e um detector de luz, com ângulo de visão que o permita 'enxergar' o transmissor, de forma a receber as

informações enviadas. A presença desse ângulo de visão entre transmissor e receptor é conhecida como linha de visada (*line-of-sight*, LOS) [33].

As informações são inseridas no sistema de transmissão na forma de sinais analógicos ou digitais e são transmitidas como luz modulada. Se o sinal de entrada inserido estiver na forma analógica, o mesmo pode passar por um conversor de analógico para digital [34]. Na sequência, o sinal é codificado e modulado de acordo com as características da aplicação e, por último, o sinal já modulado é entregue ao dispositivo emissor de luz, que pode ser uma lâmpada apropriada ou LED. É também possível que a informação seja transmitida na forma analógica, seja ela originalmente digital ou analógica, como é o caso ilustrado na Fig. 1.

Em grande parte das aplicações em interiores (*indoor*) utilizam-se LEDs como fonte de luz devido à segurança, baixo custo e baixo consumo [32] [35]. Como o brilho dos LEDs pode ser modulado em alta frequência, torna-se possível combinar a iluminação com a comunicação sem fio. Pode-se também transmitir informação por meio de LEDs com diferentes comprimentos de onda [36].

Vale também destacar a técnica de modulação da intensidade, em que o sinal transmitido altera a potência óptica do LED. Isso permite ao demodulador converter a intensidade de energia do sinal óptico incidente em uma corrente proporcional [7]. As taxas de modulação são mantidas em alta frequência, de forma que as oscilações na luz emitida sejam imperceptíveis ao olho humano [37].

E. Características gerais dos LEDs

Algumas características dos LEDs estão diretamente relacionadas com o desempenho do sistema, como exemplo a luminosidade, o brilho e o ângulo de radiação.

O comprimento de onda da luz emitida depende do nível de energia aplicado ao LED e do material utilizado na construção do semicondutor. A construção desse componente permite que o mesmo suporte vibrações, comutação frequente e situações bastante adversas do ambiente, sem que sua vida útil seja comprometida. Geralmente, sua vida útil está em torno de 100.000 horas [9].

Os diferentes tamanhos de lâmpadas de LED influenciam diretamente as taxas de transmissão alcançadas pelo sistema Li-Fi. Uma lâmpada de micro LED pode transmitir dados na faixa de 3,5 Gbit/s até cerca de 10 Gbit/s. Além disso, as lâmpadas construídas com micro LEDs em paralelo permitem a transmissão de maior quantidade de dados simultaneamente, atingindo taxas de transmissão na faixa de centenas de Gbit/s [9].

Uma das características de maior relevância do LED para o funcionamento adequado dos sistemas Li-Fi é o ângulo de abertura de radiação de luz. Por se tratar de um sistema de comunicação sem fio, a localização do receptor pode ser desconhecida devido ao fato de que o usuário portador do dispositivo receptor pode mover-se dentro do ambiente em que o sistema Li-Fi está inserido [33]. É necessário, por conseguinte, conhecer informações relacionadas ao diagrama de radiação do feixe de luz do LED. Alguns exemplos de possíveis diagramas são apresentados em seguida.

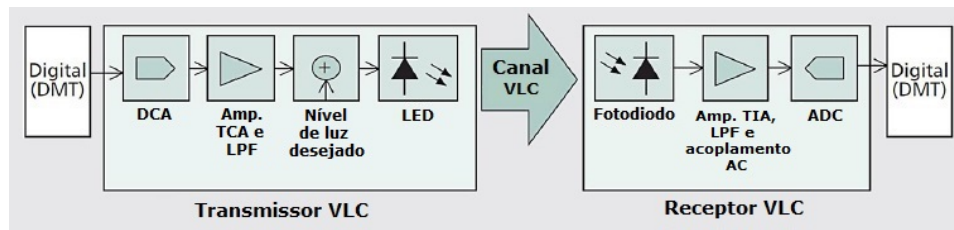


Figura 1. Diagrama de blocos de um sistema VLC. Adaptada de [8].

Na Fig. 2 ilustra-se o diagrama de radiação característico do LED sem refletores ou lentes. Este modelo deve ser utilizado em aplicações nas quais se deseja propagação com maior ângulo de abertura, ou seja, quando objetiva-se estabelecer uma comunicação na qual o local do dispositivo receptor é desconhecido e bastante variável. Por consequência, a potência no ponto de máxima radiação é menor se comparada a outros modelos mais diretos, devido ao fato de possuir um maior espalhamento luminoso e menor concentração de energia em um ponto específico.

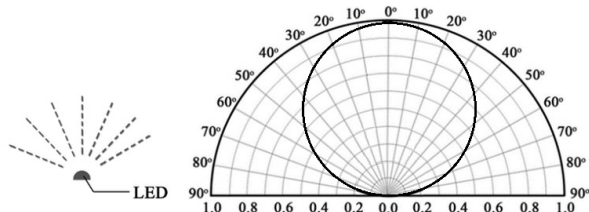


Figura 2. Diagrama de radiação do LED sem lente e sem refletor. Adaptada de [38].

Na Fig. 3 apresenta-se o diagrama de radiação característico do LED com refletor cilíndrico. Este LED tem como objetivo propagar o sinal de luz em 3 direções, com ângulo de abertura semelhante nas direções 0° , 45° e -45° . As intensidades de radiação nas direções 45° e -45° são consideravelmente menores que na direção frontal (0°).

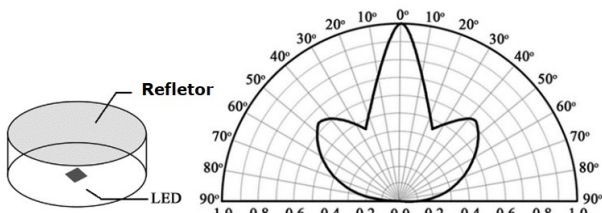


Figura 3. Diagrama de radiação com refletor cilíndrico. Adaptada de [38].

Na Fig. 4 tem-se o diagrama de radiação característico do LED com refletor cônico. Neste caso beneficiam-se aplicações que requerem alta intensidade luminosa no ponto máximo (direção frontal), devido à alta diretividade. Consequentemente, o LED possui um ângulo de abertura estreito em relação aos demais modelos apresentados.

Por último, na Fig. 5 é ilustrado o diagrama de radiação característico do LED com refletor parabólico, o qual fornece maior intensidade de luz no ponto de máximo em comparação com o modelo sem refletor, mas tem um ângulo de abertura

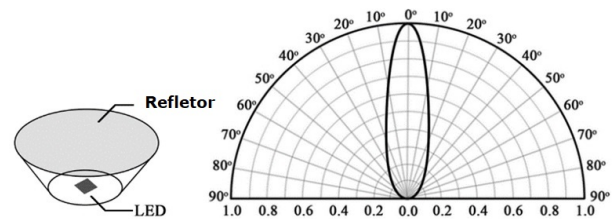


Figura 4. Diagrama de radiação com refletor cônico. Adaptada de [38].

maior que os LEDs com refletor cilíndrico e cônico. O LED com refletor parabólico deve ser empregado em aplicações nas quais objetiva-se propagar sinais com maior ângulo de abertura para atender os usuários próximos ao transmissor e, ao mesmo tempo, atender a usuários localizados na direção frontal com uma abertura maior que os modelos com refletor cilíndrico e cônico.

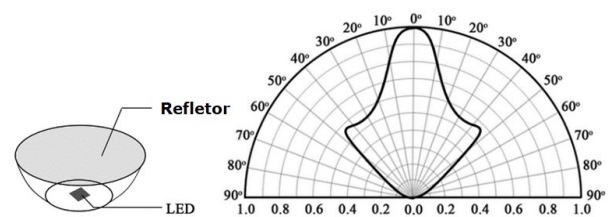


Figura 5. Diagrama de radiação com refletor parabólico. Adaptada de [38].

Pelo exposto conclui-se que a escolha do LED deve ser realizada com base no estudo dos cenários de aplicação, principalmente com relação às distâncias previstas entre transceptores e suas possíveis posições angulares relativas.

F. Interferências

O sistema Li-Fi é imune a interferências de ondas de rádio [7], mas pode sofrer interferência de outras fontes de luz artificial ou natural [39]. A Fig. 6 ilustra um cenário em que ocorre interferência luminosa no sistema. Nela, a interferência é devida à contaminação das transmissões luminosas de dispositivos vizinhos. No entanto, uma fonte de luz natural, como a luz do sol, e a iluminação artificial dos ambientes também podem ser consideradas fontes de interferência [39].

Felizmente, a interferência em sistemas Li-Fi pode ser reduzida por meio de duas principais técnicas. Na primeira, que se aplica a interferências naturais e artificiais, a solução consiste na utilização de filtros ópticos capazes de atenuar os raios de luz indesejados em comprimentos de onda específicos. A segunda solução se aplica somente à redução

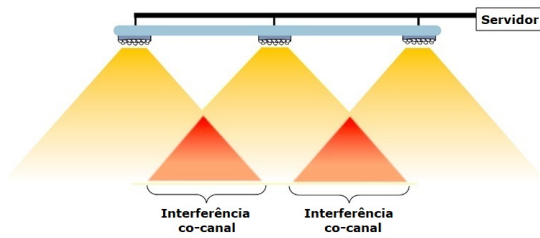


Figura 6. Interferência luminosa entre transmissões. Adaptada de [39].

da interferência entre vizinhos e consiste na aplicação de modulações (ou sinalizações) que sejam inerentemente robustas a tais distúrbios. Citam-se, como exemplo, as modulações com multiplexação OFDM [39], assunto abordado com mais detalhes na próxima subsecção.

G. Técnicas de modulação

1) *On-off keying (OOK)*: Como o nome sugere, nesta modulação o emissor de luz é chaveado entre os estados *on* (ligado) e *off* (desligado) para representar a informação digital, tipicamente utilizando codificação Manchester. Neste caso, o bit 1 é representado por uma transição *on-off* do sinal luminoso, enquanto o bit 0 é representado por uma transição *off-on*, como ilustrado na Fig. 7.

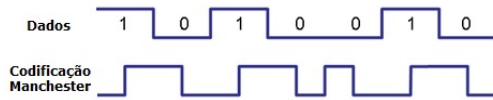


Figura 7. Exemplo de modulação OOK com codificação Manchester. Adaptada de [40].

A simplicidade da sinalização OOK com codificação Manchester permite fácil geração e decodificação, mas duplica a largura de faixa necessária para transmissão da informação [41] em relação à sinalização OOK convencional, na qual os bits 1 e 0 são diretamente representados pelos estados *on* e *off*, respectivamente. Embora tenha simples implementação, a principal desvantagem da sinalização OOK com codificação Manchester é a sensibilidade em relação ao ruído AWGN [42].

2) *Variable pulse position modulation (VPPM)*: Esta técnica de modulação codifica os dados de entrada de acordo com a posição e com a duração do pulso luminoso em uma determinada duração de símbolo T . Por exemplo, o bit 0 é representado por um pulso no início do intervalo T , com a inexistência de pulso no restante do mesmo intervalo. Um bit 1 é representado pela inexistência de pulso no início do intervalo T , seguida de um pulso ao final deste intervalo. Adicionalmente, nessa modulação permite-se que a largura do pulso seja configurada de acordo com o brilho do LED [43], conforme ilustra a Fig. 8. De forma a respeitar os limites de potência média do LED, pulsos mais estreitos podem ser transmitidos com potências ópticas mais altas, enquanto pulsos mais longos demandam potências ópticas menores.

É interessante notar na Fig. 8 que as diferentes larguras e posições de pulso podem ser interpretadas como múltiplos símbolos. No exemplo, a cada intervalo de símbolo T há 4

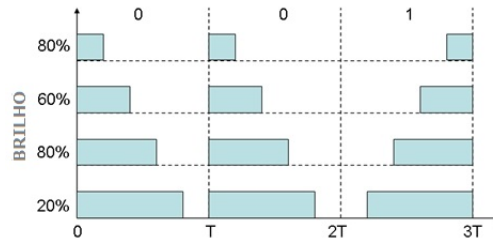


Figura 8. Exemplo de modulação VPPM. Adaptada de [44].

possíveis durações com pulsos à esquerda, mais 4 durações com pulsos à direita, totalizando 8 símbolos que poderiam, cada um, representar 3 bits de informação.

3) *Color shift keying (CSK)*: A técnica de chaveamento de cores é utilizada em sistemas com iluminação do tipo vermelho-verde-azul (*red-green-blue*, RGB). Na modulação CSK os dados são representados pelas diferentes cores primárias RGB e combinações destas. No entanto, sistemas com modulação CSK apresentam alta complexidade, principalmente o receptor [43].

A Fig. 9 apresenta o diagrama de cromaticidade nos eixos x e y , sendo mostradas as cores e os comprimentos de ondas associados a cada uma delas. O diagrama de cromaticidade possibilita, inicialmente, a definição de uma posição para cada agrupamento de bits. Por exemplo, para uma constelação quaternária cada agrupamento de dois bits é associado a um ponto (símbolo) que é posicionado no diagrama, formando a constelação desejada para a transmissão. Em seguida, os correspondentes comprimentos de onda referentes às posições dos símbolos são determinados.

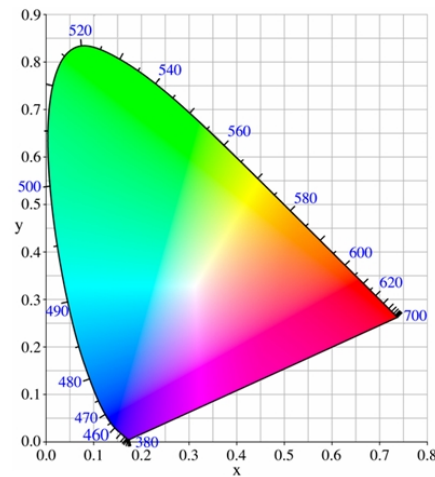


Figura 9. Diagrama de cromaticidade [45].

4) *Pulse width modulation (PWM)*: Na modulação PWM varia-se continuamente a largura do pulso de acordo com a amplitude do sinal de entrada (para a representação de sinais analógicos), ou discretamente de acordo com os bits de entrada (para a representação de sinais digitais). Para os sistemas Li-Fi varia-se a intensidade luminosa média do LED em função da duração dos pulsos, conforme ilustra a Fig. 10. O sinal modulado possui amplitude e frequência constantes, variando-

se apenas a largura dos pulsos. Isso permite que a modulação por largura de pulso seja mais robusta ao ruído AWGN, devido ao fato do ruído aditivo alterar, principalmente, a amplitude do sinal. Outra vantagem é a não necessidade de sincronização entre transmissor e receptor [1].

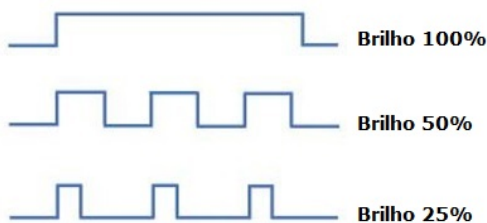


Figura 10. Exemplo de modulação PWM. Adaptada de [46].

5) *Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)*: Na multiplexação por divisão em frequências de transmissão ortogonais, um feixe de dados de alta taxa é transmitido em feixes paralelizados de taxas inferiores, por meio de múltiplas portadoras ortogonais. Grupos de bits desses feixes formam as palavras binárias que serão mapeadas nos símbolos da(s) modulação(ões) utilizada(s). Um mesmo tipo de modulação pode ser utilizado em todos os subgrupos de feixes; modulações diferentes também podem ser adotadas.

Os símbolos OFDM possuem maior duração que os símbolos da correspondente modulação em portadora única e, portanto, são menos sensíveis à dispersão temporal causada pelo canal. Como consequência, a interferência intersimbólica é drasticamente reduzida. Além disso, a largura de faixa de cada subportadora modulada pode ser menor que a banda de coerência do canal, facilitando o processo de equalização no receptor [47]. Devido a esses e outros benefícios, a multiplexação OFDM é uma das mais utilizadas em comunicações sem fio [1].

Na Fig. 11 tem-se um diagrama de blocos de um sistema de comunicação por luz que utiliza a multiplexação OFDM [48]. Os dados discretos no tempo inseridos no sistema são inicialmente paralelizados e associados ao domínio da frequência por meio de mapeamento nas várias frequências das subportadoras. Na sequência, a transformada discreta inversa de Fourier (*inverse discrete Fourier transform*, IDFT) converte os símbolos do domínio da frequência para o domínio do tempo, e o resultado da transformada é aplicado no bloco de ceifamento e polarização (*clipping and biasing*), responsável por ceifar o sinal quando seu nível atinge um valor predefinido pelo circuito, além de realizar o ajuste de nível médio de acordo com a faixa dinâmica do DAC. O sinal de saída destes blocos passa pelo processo de pré-distorção digital (*digital pre-distortion*, DPD), responsável por reduzir a distorção do sinal após o mesmo sofrer efeitos de não-linearidade ao longo do sistema. Em seguida, o sinal é convertido de digital para analógico pelo DAC. Por último, o LED converte os níveis elétricos do sinal de saída do DAC em sinal óptico para transmissão no canal óptico.

É interessante notar a transmissão analógica da informação digital de entrada do transmissor ilustrado na Fig. 11, de forma equivalente ao que acontece com um sistema OFDM con-

vencional para comunicação via radiofrequência. No sistema convencional, o sinal de saída do DAC modula a portadora que corresponde à frequência central do espectro OFDM. No sistema óptico, imita-se uma portadora modulada variando-se a corrente aplicada ao LED de forma análoga àquela em que a amplitude da portadora de RF varia ao longo do tempo. Naturalmente, no sistema Li-Fi tais variações estão restritas a valores somente maiores ou iguais a zero, como uma onda portadora com nível médio tal que os picos antes negativos passem a ter valor nulo.

Os sinais ópticos propagados através do canal são recebidos pelo fotodiodo que, por sua vez, os converte em corrente elétrica proporcional à intensidade luminosa recebida. O sinal elétrico fornecido pelo fotodiodo é, então, convertido de analógico para digital pelo ADC. Na sequência, realiza-se a transformada discreta de Fourier (*discrete Fourier transform*, DFT), ou seja, o sinal é transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência. Por fim, realiza-se a extração dos símbolos associados a cada frequência de portadora de forma a reverter o mapeamento realizado no transmissor [48].

6) *Frequency shift keying (FSK)*: A modulação FSK é caracterizada pelo uso de portadoras com amplitude de pico constante e frequências diferentes para cada símbolo. Por exemplo, na modulação FSK binária o bit 0 é representado por uma portadora de frequência f_1 e o bit 1 é representado por uma portadora de frequência f_2 [49]. A separação entre as frequências é tal que os símbolos da modulação sejam ortogonais entre si.

No contexto da comunicação por luz, a modulação FSK opera de forma similar ao OFDM no tocante à forma como o sinal de luz é gerado. Em outras palavras, nesta modulação não se altera a frequência da luz emitida pelo LED para se representar os símbolos, embora isto possa ser realizado em termos de chaveamento do comprimento de onda em LEDs que assim o permita. O que tipicamente se faz na modulação FSK é alterar a frequência na qual a intensidade de luz é emitida pelo LED (frequência de cintilação), imitando a variação de frequência de uma portadora de RF.

IV. ATIVIDADES DE PADRONIZAÇÃO

Como citado, a tecnologia Li-Fi está prevista no padrão 802.15.7 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE), que define as características das comunicações VLC [7] com taxas de transmissão superiores a 1 Gbit/s. O padrão IEEE 802.15.7 para comunicações por luz visível foi aprovado em 2011 por um grupo de estudo certificado pelo instituto [4]. O padrão propõe, inicialmente, aplicações VLC para redes pessoais de comunicação sem fio (*wireless personal area network*, WPAN) [43]. A padronização do VLC especifica comunicações de dispositivo móvel para móvel (*mobile-to-mobile*, M2M), de dispositivo fixo para móvel (*fixed-to-mobile*, F2M) e de infraestrutura (rede) para móvel (*infrastructure-to-mobile*, I2M). O principal foco das definições está voltado a sistemas de comunicação para sistemas de transporte inteligente (*intelligent transportation system*, ITS) de médio alcance, sistemas M2M de baixo alcance e F2M de alta velocidade [4].

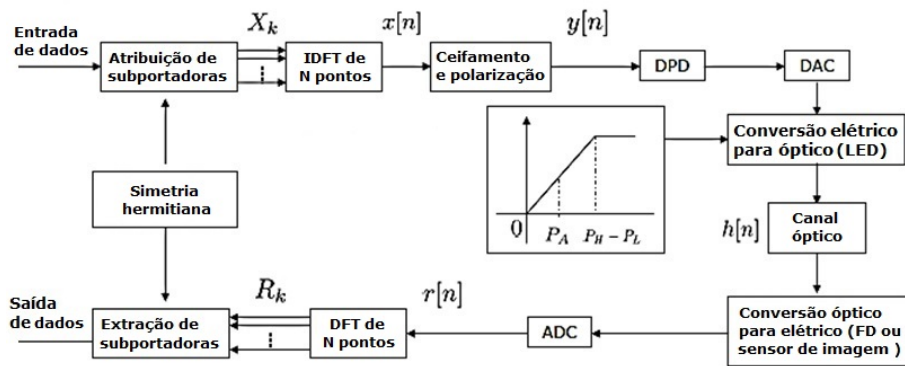


Figura 11. Diagrama de blocos de um sistema OFDM por luz. Adaptada de [48].

O padrão IEEE 802.15.7 define a camada física (*physical layer*, PHY) e o controle de acesso ao meio (*media access control*, MAC) do VLC e, conseqüentemente, do Li-Fi. A camada MAC suporta três topologias: ponto-a-ponto (*peer-to-peer*), estrela (*star*) e o modo transmissão em difusão (*broadcast mode*) [4]. Na Fig. 12 ilustram-se tais topologias. A configuração estrela permite que múltiplos usuários troquem dados simultaneamente com a rede. A técnica ponto-a-ponto realiza a conexão com apenas um cliente. No modo difusão os clientes apenas recebem o conteúdo, não sendo possível o envio de informações para a rede.

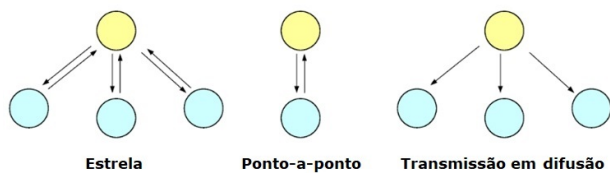


Figura 12. Possíveis topologias para comunicações Li-Fi. Adaptada de [50].

A camada MAC define outros pontos fundamentais para evitar problemas de gerência da camada física, como endereçamento, colisão de pacotes e reconhecimento de protocolos de dados.

A camada física do sistema Li-Fi é dividida em três subcamadas denominadas PHY I, PHY II e PHY III [4]. A subcamada PHY I está definida para aplicações externas que trabalhem com taxas de transmissão de 11,67 kbit/s até 267,6 kbit/s. As modulações especificadas para esta subcamada física são a OOK e a VPPM. Os dados inseridos no sistema são empacotados em uma unidade de dados de camada física (*physical layer data unit*, PPDU) antes da transmissão. A PPDU é constituída por três campos principais: o cabeçalho de camada física (*physical layer header*, PHR), o cabeçalho de sincronismo (*synchronization header*, SHR) e a carga útil (*payload*). O PHR é constituído por um cabeçalho PHY, um cabeçalho de sequência de checagens (*header checks sequence*, HCS) e alguns campos opcionais. O PHR e o PPDU devem ser codificados no transmissor e decodificados no receptor [51]. A PHY utiliza, para correção de erros, as codificações de Reed Solomon (RS) e o código convolucional (*convolutional code*, CC) [52] [53] [54].

A subcamada PHY II é definida para aplicações com taxas médias, que podem variar de 1,25 Mbit/s até 96 Mbit/s. Assim como a PHY I, podem ser utilizadas as modulações OOK e VPPM, e, para correção de erros, os códigos RS e CC [4].

A subcamada PHY III é destinada a aplicações em que fontes e sensores RGB são utilizados. Assim como as camadas PHY I e PHY II, utilizam-se os códigos de correção de erros RS e CC. Em adição às modulações OOK e VPPM, também há a possibilidade de utilização da modulação CSK com constelações de 4, 8 ou 16 de cores. As taxas médias podem variar de 12 Mbit/s até 96 Mbit/s [43].

O padrão IEEE 802.15.7 permite o desenvolvimento de produtos compatíveis internacionalmente. Os grupos de estudo do IEEE realizam atualizações periódicas nas normas existentes, ou seja, a cada pacote de correções necessárias, novas propostas, aplicações e qualquer outra informação importante cria-se uma versão atualizada, denominada *release* [43].

As primeiras atualizações do padrão IEEE 802.15.7 receberam a inserção de características voltadas à comunicação por câmera, identificação (LED *identification*, LED-ID) e o próprio Li-Fi. A comunicação por câmera permite a utilização do *flash*, do *display* e de sensores de imagens como dispositivos de transmissão e recepção. O LED-ID possibilita o desenvolvimento de sistemas de identificação, utilizando vários LEDs.

A primeira edição do padrão IEEE 802.15.7 iniciou-se no final de 2016 e oficializou-se no final de 2017 [55]. A atualização foi denominada como IEEE 802.15.7r1 (*release 1*), tendo sido desenvolvida pelos membros do grupo Europeu COST 1101 OPTICWISE [56]. A contribuição ativa desse grupo inseriu algumas propostas de cenários nos quais o Li-Fi poderia ser aplicado, além de quais seriam as principais características desses ambientes. A proposta de cenário se aplica a salas de conferência, aviões, depósitos, laboratórios de pesquisa, veículos inteligentes e ambientes com alto nível de segurança da informação [57].

No final de 2016 o IEEE formou um grupo de interesse no tópico (*topic interest group*, TIG) com o objetivo de definir padrões do Li-Fi para o padrão de rede sem fio LAN P802.11. Essa padronização é direcionada a redes sem fio com taxas de 1 Mbit/s a 2 Mbit/s na faixa de operação de 2,4 GHz com espalhamento espectral por saltos em frequência (*frequency*

hopping spread spectrum, FHSS) e com espalhamento espectral por sequência direta (*direct sequence spread spectrum*, DSSS) [58]. O grupo é liderado pela empresa Purelifi e recebe o suporte de grandes empresas como Cisco, Lucibel, Schneider, Nokia, Boeing, Hewlett Packard e Fraunhofer [7].

Assim como o IEEE, outros organismos internacionais iniciaram estudos de padronização para a tecnologia Li-Fi. A União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunications Union*, ITU) é um exemplo, tendo iniciado o estudo sobre sistemas de comunicação de alta velocidade por luz, para taxas de 100 Mbit/s até 1 Gbit/s e voltados a ambientes internos. O estudo inclui características como o comprimento da onda associada à banda, arquitetura do sistema, protocolos e interface. O grupo ITU SG1 WP1A está atualmente trabalhando em um relatório de gerenciamento do espectro voltado à comunicação através de luz visível [7]. Vale ainda mencionar as iniciativas Japonesas de padronização relacionadas ao Li-Fi, nas quais incluem-se os padrões JEITA CP-1221 e CP-1222 para redes de comunicação VLC [4].

V. ESTUDO DE CASOS

A. Instalação piloto em sala de conferência

Um teste piloto de um sistema Li-Fi ocorreu durante uma conferência em Mainau, ilha alemã localizada no lago Constance [59]. O teste objetivou a transmissão de dados por luz com taxas acima de 800 Mbit/s em um espaço fechado, no qual a rede local da sala de conferência foi integrada com dispositivos Li-Fi conectados via interface Ethernet. Isso foi feito a fim de explorar oportunidades e buscar soluções para os desafios porventura encontrados. Procurou-se atender à demanda de dados durante todos os dias da conferência e, ao mesmo tempo, monitorar a experiência do usuário. Para atender ao propósito foi instalado um enlace óptico bidirecional, com os modos direto (*downlink*) e reverso (*uplink*). As lâmpadas fluorescentes existentes na sala de conferência foram substituídas por lâmpadas Li-Fi brancas para o enlace direto e LEDs infravermelho (*infrared light emitting diode*, IRLED) para o enlace reverso. Na Fig. 13 apresenta-se o diagrama de blocos do sistema instalado em Mainau [59].

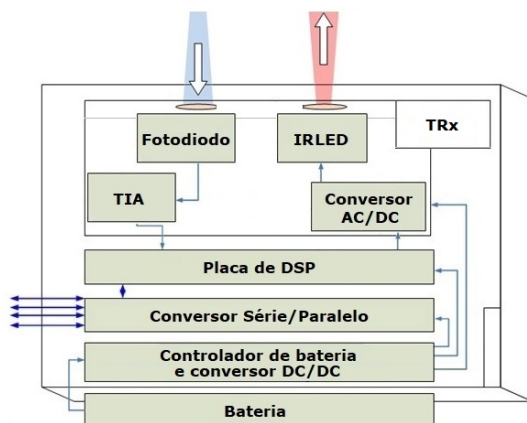


Figura 13. Estrutura do sistema Li-Fi instalado em Mainau. Adaptada de [59].

Considerando o enlace direto, as informações são recebidas pelo fotodiodo, que converte os pulsos luminosos em corrente elétrica. Esta, por sua vez, é aplicada ao TIA, responsável por amplificar o sinal e entregá-lo à placa de processamento digital de sinal (*digital signal processor*, DSP), a qual realiza a demodulação do sinal OFDM em tempo real. O *switch* realiza a demultiplexação dos dados, a bateria alimenta o bloco conversor DC/DC e o controlador de bateria é responsável por controlar e manter a estabilidade do nível de tensão que alimenta os blocos superiores [59].

No enlace reverso o *switch* realiza a multiplexação dos dados, a placa de DSP implementa a modulação OFDM, sendo o sinal modulado entregue a um *driver* de tensão contínua para tensão alternada com o objetivo de fornecer ao LED infravermelho um sinal com variações de corrente, estas convertidas em pulsos de infravermelho. Os blocos de alimentação possuem a mesma função do enlace direto [59].

A análise da taxa de transmissão do sistema foi realizada em uma área de 100×100 cm, para a qual os testes raramente registraram velocidades superiores a 100 Mbit/s, pois não ocorreu demanda superior por parte dos participantes da conferência. A maior velocidade atingida pelo sistema foi de 200 Mbit/s. A cobertura do sistema de comunicação foi de 80%, ou seja, dado o espaço determinado para teste, apenas a área de 80×80 cm recebeu cobertura do sinal luminoso. Quando analisou-se uma área de 200×200 cm, as taxas obtidas foram consideravelmente inferiores. O sistema obteve uma taxa no enlace direto duas vezes menor que a taxa no enlace reverso devido ao fato do primeiro ter utilizado uma lâmpada branca, enquanto o último utilizou um IRLED. A utilização do IRLED proporciona maiores taxas devido à alta eficiência de conversão do sinal elétrico para óptico de LEDs de cor única, como é o caso do IRLED, e à maior sensibilidade do fotodiodo para cores próximas ao espectro infravermelho [59].

Um dos maiores problemas encontrados durante os testes foi a dificuldade de integração com diversos dispositivos. As lâmpadas e luminárias presentes no ambiente integraram-se facilmente com a interface Ethernet, porém essa facilidade não se aplica aos dispositivos móveis. Por outro lado, existem vários adaptadores de barramento serial universal (*universal serial bus*, USB) para Ethernet no mercado, fato favorável à implementação. No caso de telefones com sistema operacional Android, é possível utilizar o protocolo USB *on-the-go*. No entanto, durante os testes alguns telefones não responderam ao protocolo e, conseqüentemente, não houve êxito no funcionamento [59].

No decorrer dos testes a luz do sol entrou com forte intensidade na sala de conferência, mas a estreita abertura de irradiação do fotodiodo foi suficiente para mitigar a interferência [59].

A potência consumida pelo dispositivo conectado às lâmpadas foi considerada aceitável devido ao fato dele ter sido diretamente alimentado pela rede elétrica. Já o consumo do dispositivo conectado ao notebook foi considerado excessivo, pois, durante os testes, o sistema apresentou um consumo de 12 watts, valor considerado alto para um dispositivo USB. Entretanto, o sistema implementado era apenas um protótipo que carecia de melhorias com componentes industriais de alta

precisão e baixo consumo [59].

O teste piloto durou mais de um ano, fato que possibilitou a construção de um amplo banco de dados, com diferentes variações de enlaces Li-Fi. Observou-se como resultado uma dependência direta da linha de visada. O sistema possui gerenciamento automático de enlace e, neste caso, se a visada fosse obstruída, a transmissão de dados seria reiniciada automaticamente. Com isso, ficou imperceptível aos usuários qualquer tipo de perda relacionada à obstrução da linha de visada e, por consequência, o sistema Li-Fi foi classificado pelos participantes da conferência como de usabilidade amigável e fácil instalação, e ainda classificado como ‘conecte e use’ (*plug and play*) [59].

O teste também possibilitou a obtenção de alguns aprendizados que devem ser levados em conta para o sucesso de futuras aplicações. O baixo desempenho de lâmpadas brancas, comparado com sistemas que utilizam IRLED, deve ser levado em consideração para a análise e desenvolvimento de novos dispositivos. A escolha entre o ponto óptico de recepção e a taxa de dados disponível para o ponto selecionado é também um desafio. Para uma alta taxa de dados em banda limitada, com elevada relação sinal-ruído no receptor, é possível aumentar a ordem da modulação. Entretanto, deve-se salientar que o aumento dessa ordem pode acarretar em decréscimo de desempenho devido a não linearidade da resposta do LED [59].

Como resultado do teste aqui analisado, conclui-se que a intensidade luminosa do LED e a ordem de modulação requerem uma solução de compromisso que respeite os limites impostos pela resposta característica dos sistemas digitais. Também é notável a necessidade do desenvolvimento de um novo sistema composto por componentes de maior precisão aliada a um menor consumo e que seja, principalmente, compacto, além de ser integrável a qualquer dispositivo móvel [59].

B. Rede híbrida Wi-Fi/Li-Fi

Como apresentado na Seção III, os sistemas Li-Fi podem dar vazão a altas taxas de dados, mas cada unidade transmissora possui área de cobertura de poucos metros quadrados [4]. Esse fato motiva a agregação de redes Li-Fi a redes Wi-Fi, formando uma rede híbrida Wi-Fi/Li-Fi na qual as vantagens das duas redes seriam complementares, resultando em uma rede de alta velocidade com grande cobertura [60].

No presente estudo de caso, documentado em [61], vários usuários foram inicialmente conectados à rede Li-Fi e, em seguida, os usuários com menor taxa de recebimento de dados foram conectados à rede Wi-Fi (a identificação desses usuários não levou em conta a variação da demanda de cada usuário [61]). Durante os testes, os usuários tiveram liberdade total para se movimentar dentro do ambiente e usufruir dos dados da rede. Inicialmente, os pesquisadores monitoraram a operação dos pontos de acesso com a presença e movimentação de 2 usuários. Em seguida, a operação foi monitorada para 6, 7 e, por fim, 8 usuários.

Os testes realizados em ambas as redes possibilitaram a análise dos canais, o que, por sua vez, permitiu a identificação de que o método de seleção de pontos de acesso (*access*

point selection, APS) é mais complicado em redes híbridas, se comparado com redes tradicionais homogêneas. As redes tradicionais utilizam estratégias baseadas na intensidade de sinal (*signal strength strategy*, SSS), nas quais é selecionado o ponto de acesso do qual o usuário consegue receber o sinal mais forte, ainda levando em conta mecanismos de redução de interferência entre células (*inter-cell interference*, ICI), ou seja, buscando poucas sobreposições de coberturas [61].

No caso das redes híbridas Wi-Fi/Li-Fi, as coberturas das redes diferentes se sobrepõem e o tráfego da rede Wi-Fi ainda se mantém superior ao Li-Fi devido à maior área de cobertura, mesmo se a exigência de dados for igual em toda a área. Isto ocorre devido ao fato de que as redes possuem cargas desbalanceadas e, com isso, o método SSS não atua conforme o ideal, pois se realiza a medição de intensidade com base em cargas diferentes, ou seja, com cargas desbalanceadas. Portanto, as técnicas de SSS não podem ser aplicadas às redes híbridas e a necessidade de balanceamento de cargas (*load balancing*, LB) torna-se fundamental para o método de APS.

Há publicações nas quais são apresentados estudos sobre balanceamento de cargas em redes homogêneas, mas são raros os casos associados a redes heterogêneas em geral e, particularmente, a redes híbridas Wi-Fi/Li-Fi. Tipicamente, os estudos que apresentam balanceamento de cargas em redes heterogêneas propõem que sejam tratadas como redes homogêneas, como tratado em [61] e em referências lá citadas.

Em [62] realiza-se o balanceamento de cargas distribuídas utilizando teoria de jogos, na qual se utiliza certa quantidade de iterações do algoritmo para atingir o estado estacionário dessas cargas. Acredita-se que esta possibilidade possa ser aplicada às redes híbridas Wi-Fi/Li-Fi, mesmo que não se leve em conta as características distintas das redes componentes.

As soluções desenvolvidas para a seleção de pontos de acesso em redes heterogêneas com base em soluções homogêneas são desafiadoras em alguns aspectos quando objetiva-se a aplicação para redes híbridas Wi-Fi/Li-Fi. Ao permitir que os usuários se conectem aos seus pontos de acesso, um rede Wi-Fi acarretar em ineficiência dos pontos de acesso Li-Fi, pois apesar de cobrir uma área muito superior a um ponto de acesso Li-Fi, os pontos Wi-Fi são inferiores aos pontos Li-Fi em termos da taxa de dados. Com base neste fato, pesquisadores propuseram um método de APS baseado em lógica *fuzzy* (*fuzzy logic*, FL) para uma rede híbrida Wi-Fi/Li-Fi [61]. A proposta traz a análise de ‘graus de verdade’ ao invés da utilização da lógica Booleana de verdadeiro ou falso no que diz respeito à qualidade do sinal. Com isso, a lógica *fuzzy* é capaz de criar uma lista com regras de verificação, ou seja, testes lógicos são incluídos nas regras de verificação permitindo observar se o sinal de menor intensidade é capaz de proporcionar uma taxa de dados superior ao sinal mais forte e, portanto, a lógica é capaz de realizar escolhas mais inteligentes, ao invés de uma simples verificação do sinal mais forte ou mais fraco. A proposta para as redes híbridas atua em duas etapas, na primeira aplicando-se a FL e na segunda aplicando-se SSS e LB, dando origem às siglas FL-SSS e FL-LB [61].

O método proposto em [61] foi simulado para que se validasse seu desempenho em comparação com os métodos

convencionais. Para a análise de desempenho utilizou-se um cenário com quatro quartos, cada quarto com área de 10 metros quadrados. No teto foram instalados 16 pontos de acesso em formato matricial, com cada ponto Li-Fi espaçado de 2,5 metros em relação aos dois mais próximos e a um ponto Wi-Fi central. Após a construção do cenário de teste os usuários foram distribuídos aleatória e uniformemente na área em questão [61].

Os resultados obtidos forneceram gráficos que mostraram com clareza a satisfação dos usuários e a isonomia entre os diferentes métodos para a taxa de dados de 10 Mbit/s. Os gráficos deixaram evidente que o método proposto é capaz de aumentar significativamente a satisfação dos usuários em comparação com o SSS e o LB, principalmente em cenários com grande número de usuários. Para o cenário com a presença de aproximadamente 30 usuários, o método SSS foi capaz de satisfazer o requerimento de dados de apenas 74,6% dos usuários, contra 87,4% com o método LB. Quando aplicados os métodos FL-SSS e FL-LB os resultados foram superiores aos obtidos anteriormente: a proporção de usuários satisfeitos durante a demanda de dados foi de 96,1% e 91,9%, respectivamente. Os resultados obtidos para uma taxa inicial de 1 Mbit/s demonstraram que todos os métodos são capazes de satisfazer as demandas dos usuários. Entretanto, quando se aumenta o número de usuários e a taxa de dados, o método proposto em [61] superou significativamente os métodos concorrentes.

Os autores de [61] observaram ainda que o rendimento, em relação a taxa de dados, está diretamente relacionado com o número de canais Wi-Fi, sendo o método SSS o mais afetado com a redução do número de canais devido ao fato de que tende a conectar o usuário à rede Wi-Fi independente da capacidade e disponibilidade do acesso Li-Fi. Com isso, quando se diminui o número de pontos Wi-Fi, o desempenho em relação à taxa de dados e à satisfação dos usuários se torna seriamente comprometido. Por outro lado, os métodos concorrentes demonstraram capacidade de equilíbrio entre as redes Li-Fi e Wi-Fi. Como consequência, tais métodos são menos afetados caso ocorra uma redução no número de acessos Wi-Fi. Também se observou que o desempenho do FL-SSS se aproxima do FL-LB quando o número de canais aumenta [61].

VI. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

O presente artigo destaca o aumento de demanda por maiores taxas de dados, uma tendência observada desde a década de 1960 [1]. Com isso evidencia-se a importância da busca por novas tecnologia para comunicação sem fio que permitam altas taxas de transmissão e que, preferencialmente, não atuem no espectro de radiofrequências em decorrência da grande quantidade de serviços de telecomunicação hoje operado nesta faixa do espectro [4] [5].

A proposta de comunicação sem fio por meio da luz exposta pelo professor Haas em [13] é uma solução para suprir as necessidades das futuras redes de comunicações sem fio de alta velocidade. Pôde-se observar que a tecnologia Li-Fi é capaz de atuar em altas taxas de transmissão com pequena latência, além de possuir compatibilidade com grande parte das atuais

redes de comunicação sem fio, como visto na subseção que comparou os sistemas Wi-Fi e Li-Fi.

Os blocos principais que constituem o sistema Li-Fi são semelhantes àqueles referentes a outros sistemas de comunicação sem fio e, por consequência, pode-se considerar que os sistemas Li-Fi não possuem alta complexidade de entendimento. No entanto, a tecnologia envolvida tem maior complexidade, mas em contrapartida pode resultar em sistemas de baixo consumo de energia.

O principal tema do presente artigo, a camada física, é apresentado com o objetivo de possibilitar ao leitor a compreensão das suas características mais básicas e, conseqüentemente, obter domínio sobre os requisitos necessários para entender como se realiza uma transmissão de dados sem fio utilizando a tecnologia Li-Fi.

Os estudos e testes pilotos apresentados deixam evidente que os sistemas Li-Fi possuem capacidade de atingir altas taxas de transmissão e, principalmente, proporcionar aos usuários conexões mais rápidas e, conseqüentemente, obter um alto índice de satisfação.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Vasuja, A. K. Mishra, U. S. Chauhan, D. Chandola, and S. Kapoor, "Image transmission using Li-Fi," in *2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, Coimbatore, India, Apr. 2018, pp. 287–292.
- [2] M. Ayyash, H. Elgala, A. Khreishah, V. Jungnickel, T. Little, S. Shao, M. Rahaim, D. Schulz, J. Hilt, and R. Freund, "Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64–71, Feb. 2016.
- [3] F. Capa, J. Dias, J. Queirós, N. Alves, R. Cordeiro, and T. Padrão, "A revolução das comunicações móveis," *Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia*, Oct. 2012.
- [4] TEC. (2019, Mar.) Study paper on Li-Fi (light fidelity) and its applications. [Online]. Available: <http://tec.gov.in/pdf/StudyPaper/liFi%20study%20paper%20%20approved.pdf>
- [5] R. T. Hitchcock, *Radio-Frequency and Microwave Radiation*, 3rd ed., ser. Nonionizing Radiation Guide Series. American Industrial Hygiene Association, 2004.
- [6] J. M. Martins, L. B. Cancela, L. D. Souza, and M. R. Silva, "Wi-Fi público - riscos e soluções," in *Anais do Encontro Virtual de Documentação em Software Livre e Congresso Internacional de Linguagem e Tecnologia Online*, Belo Horizonte, MG, Jun. 2017, pp. 1–5.
- [7] I. Stevanovic, "Light fidelity (Li-Fi)," *Federal Office of Communications OFCOM*, Apr. 2017.
- [8] P. Goswami and M. K. Shukla, "Design of a Li-Fi transceiver," *Wireless Engineering and Technology*, pp. 71–86, Oct. 2017.
- [9] S. A. A. Sarkar and A. Nath, "Li-Fi technology: Data transmission through visible light," *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, pp. 1–10, Jul. 2015.
- [10] T. U. of Edinburgh. (2019, Mar.) Prof. Harald Haas official homepage. [Online]. Available: <https://www.eng.ed.ac.uk/about/people/prof-harald-haas>
- [11] PureLifi. (2019, Mar.) Purelifi company profile. [Online]. Available: <https://purelifi.com/company/>
- [12] TED. (2019, Apr.) TED ideas worth spreading. [Online]. Available: <https://www.ted.com/#/>
- [13] ——. (2019, Apr.) Wireless data from every light bulb. [Online]. Available: https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb#t-678189
- [14] S. A. P. S. Sharma, R.R., "Implementation of a simple Li-Fi based system," *International Journal of Computing and Technology (IJCAT)*, vol. 1, no. 9, Oct. 2014.
- [15] G. K. R. S. S. Arnon, J. Barry and M. Uysal, "Advanced optical wireless communication systems," *Cambridge University Press*, Jun. 2012.
- [16] R. A. Freedman and H. Young, *Física III - Eletromagnetismo*, 6th ed. São Paulo: Pearson, 2009.

- [17] R. Hernandez. (2019, Feb.) Médico coordena primeira cirurgia remota por meio de 5G. [Online]. Available: <https://www1.folha.uol.com.br/equlibrioesaude/2019/02/medico-coordena-primeira-cirurgia-remota-por-meio-de-5g.shtml>
- [18] S. M. C. do Nascimento, "Ondas eletromagnéticas e o impacto na saúde humana," *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, pp. 203–227, 2017.
- [19] World Health Organization, "Electromagnetic fields and public health," *Electromagnetic hypersensitivity*, Dec. 2005. [Online]. Available: <https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322/en/>
- [20] T. Guardian. (2012, Sep.) Wi-Fi: are there any health risks? [Online]. Available: <https://www.theguardian.com/technology/askjack/2012/sep/27/wi-fi-health-risks>
- [21] Instituto Nacional do Câncer. (2019, Mar.) Agência internacional de pesquisa em câncer (IARC). [Online]. Available: <https://www.inca.gov.br/atuacao-internacional/agencia-internacional-pesquisa-em-cancer-iarc>
- [22] S. Picciarelli. (2019, Apr.) OMS: celulares podem causar câncer. [Online]. Available: <https://meiobit.com/86146/oms-celulares-podem-causar-cancer/>
- [23] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, "LED based indoor visible light communications: State of the art," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, 2015.
- [24] A. Gomez, K. Shi, C. Quintana, M. Sato, G. Faulkner, B. C. Thomsen, and D. O'Brien, "Beyond 100-Gb/s indoor wide field-of-view optical wireless communications," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 4, pp. 367–370, Feb. 2015.
- [25] Lucibel. (2019, Apr.) La solution LiFi by lucibel. [Online]. Available: <http://www.lucibel.io/web/guest/accueil>
- [26] Luciom. (2016, Apr.) Luciom company profile. [Online]. Available: <http://luciom.com/>
- [27] S. Sicheloff. (2015, Jul.) Partnership may lead to advanced communication technology. [Online]. Available: <https://blogs.nasa.gov/kennedy/2015/07/30/partnership-may-lead-to-advanced-communication-technology/>
- [28] Markets and Markets. (2018, Sep.) Free space optics (FSO) and visible light communication (VLC) light fidelity (Li-Fi) market by component (LED, photodetector, microcontroller, and software), transmission type, application, and geography - global forecast to 2023. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/visible-light-communication-market-946.html>
- [29] S. Haykin, *Sistemas de comunicação analógicos e digitais*, 4th ed. São Paulo: Bookman, 2001.
- [30] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. J. D. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A. E. Kelly, G. Faulkner, M. D. Dawson, H. Haas, and D. O'Brien, "A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a Gallium Nitride μ led," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 7, pp. 637–640, Apr. 2014.
- [31] A. Jovicic, J. Li, and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26–32, Dec. 2013.
- [32] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is LiFi?" *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, Mar. 2016.
- [33] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 9, pp. 56–62, Sep. 2011.
- [34] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, Feb. 1997.
- [35] L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, D. Schulz, F. Lassak, F. Hartlieb, C. Kottke, V. Jungnickel, and K. Langer, "High-speed visible light communication systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 60–66, Dec. 2013.
- [36] N. C. Braga. (2019, Apr.) A cor dos leds (art142). [Online]. Available: <https://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funcional/1000-a-cor-dos-leds-art142>
- [37] J. Patel, P. Trivedi, and D. Patel, "A performance analysis of Light Fidelity and Internet of Things and its application," in *2017 International Conference on Transforming Engineering Education (ICTEE)*, Dec. 2017, pp. 1–4.
- [38] S. L. J. Chen and J.-H. K. H. Kim. (2017, Jan.) Publishing. [Online]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ew/c6ew00241b#divAbstract>
- [39] H. Haas, C. Chen, and D. O'Brien, "A guide to wireless networking by light," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 55, pp. 88–111, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079672717300198>
- [40] G. Povey. (2011, Jul.) On-off keying using Manchester coding. [Online]. Available: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/manchestercoding/>
- [41] A. Choubey and D. Sharma, "Comparative study of error performance in modulation schemes for VLC systems," *International Journal of Engineering and Computer Science*, vol. 4, Feb. 2015.
- [42] S. Sharma, *Digital Communications*. SK Kataria and Sons, 2009.
- [43] V. L. Communications. (2011, Apr.) An IEEE standard for visible light communications. [Online]. Available: <https://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>
- [44] G. Povey. (2011, Jul.) Variable pulse position modulation (VPPM). [Online]. Available: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/vppm/>
- [45] ———. (2011, Jul.) xy chromaticity diagram. [Online]. Available: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/xy-chromaticity/>
- [46] R. Mertens. (2018, Jan.) Pulse-width modulation (PWM) in OLED displays. [Online]. Available: <https://www.oled-info.com/pulse-width-modulation-pwm-oled-displays>
- [47] D. A. Guimarães and R. A. A. de Souza, *Transmissão Digital - Princípios e Aplicações*, 2nd ed. São Paulo: Érica, 2014, ch. Noções sobre Multiplexação OFDM.
- [48] Z. Yu, R. J. Baxley, and T. Zhou, "EVM and achievable data rate analysis of clipped OFDM signals in visible light communication," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Jun. 2012.
- [49] D. A. Guimarães and R. A. A. de Souza, *Transmissão Digital - Princípios e Aplicações*, 2nd ed. São Paulo: Érica, 2014, ch. Modulações M-FSK com detecção coerente.
- [50] C. Ley-Bosch, I. Alonso-González, D. Sanchez-Rodriguez, and C. Ramirez-Casañas, "Evaluation of the effects of hidden node problems in IEEE 802.15.7 uplink performance," *Sensors*, vol. 16, p. 216, Feb. 2016.
- [51] P. Namonta and P. Cherntanomwong, "Real time vital sign transmission using IEEE 802.15.7 VLC PHY-I transceiver," in *2017 International Electrical Engineering Congress (I2ECON)*, Mar. 2017, pp. 1–4.
- [52] The IEEE, "IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-range wireless optical communication using visible light," *IEEE Std 802.15.7-2011*, pp. 1–309, Sep. 2011.
- [53] Wikipedia. (2019, Jun.) Código Reed-Solomon. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%B3digo_Reed%E2%80%93Solomon
- [54] ———. (2019, Jun.) Código convolucional. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%B3digo_convolucional
- [55] I. 802.15. (2019, May) IEEE 802.15 working group for wireless specialty networks (WSN). [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/>
- [56] C. E. C. in Science & Technology. (2019, May) C1101 - optical wireless communications - an emerging technology. [Online]. Available: <https://www.cost.eu/actions/IC1101/#tabs|Name:overview>
- [57] V. Jungnickel, M. Uysal, N. Serafimovski, T. Baykas, D. O'Brien, E. Ciaramella, Z. Ghassemlooy, R. Green, H. Haas, P. A. Haigh, V. P. G. Jimenez, F. Miramirkhani, M. Wolf, and S. Zvanovec, "A european view on the next generation optical wireless communication standard," in *2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. Tokyo, Japan., Oct. 2015, pp. 106–111.
- [58] R. Johri, "Li-Fi, complementary to Wi-Fi," in *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICPEIC)*, Apr. 2016, pp. 015–019.
- [59] A. Paraskevopoulos, D. Schulz, J. Hilt, P. Hellwig, and V. Jungnickel, "Pilot Li-Fi installation in a conference room in Mainau - Lake Constance: Realization and outlook," in *2018 Global Li-Fi Congress (GLC)*. Paris, France., Feb. 2018, pp. 1–4.
- [60] M. B. Rahaim, A. M. Vegni, and T. D. C. Little, "A hybrid radio frequency and broadcast visible light communication system," in *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, Dec. 2011, pp. 792–796.
- [61] X. Wu, M. Safari, and H. Haas, "Access point selection for hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 12, pp. 5375–5385, Dec. 2017.
- [62] Y. Wang, X. Wu, and H. Haas, "Distributed load balancing for internet of things by using Li-Fi and RF hybrid network," in *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Aug. 2015, pp. 1289–1294.