



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Adriane dos Santos Duarte

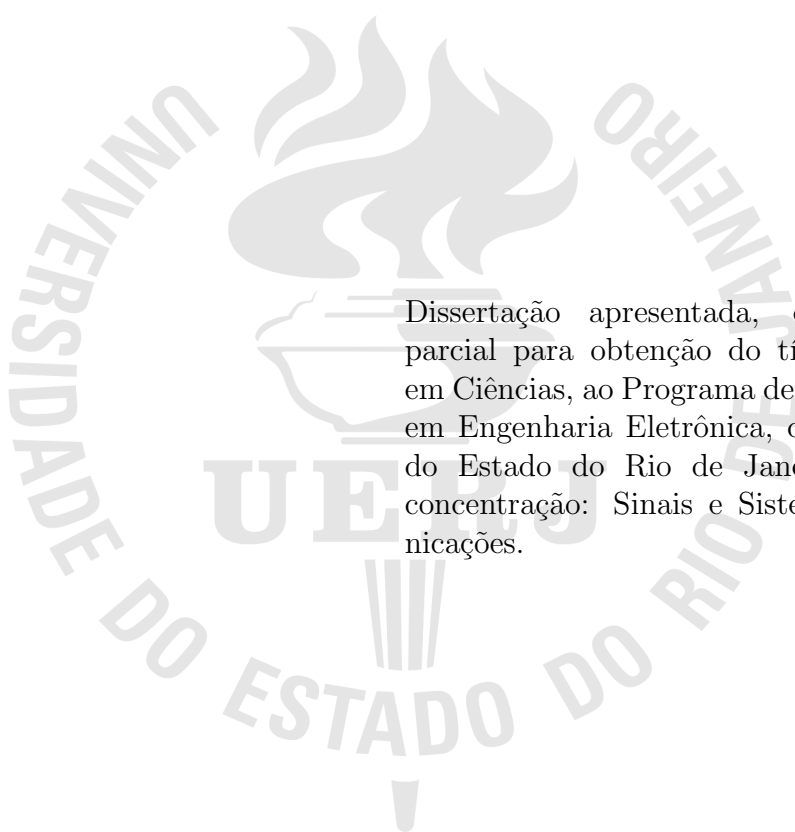
**Marca d'água em sistemas de comunicação por luz visível
baseados em modulação ACO-OFDM**

Rio de Janeiro

2021

Adriane dos Santos Duarte

Marca d'água em sistemas de comunicação por luz visível baseados em modulação ACO-OFDM.



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Orientadores: Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

D812	<p>Duarte, Adriane dos Santos. Marca d'água em sistemas de comunicação por luz visível baseados em modulação ACO-OFDM / Adriane dos Santos Duarte. – 2021. 91 f.</p> <p>Orientadores: Michel Pompeu Tcheou, Lisandro Lovisolo; Dissertação(Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.</p> <p>1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Telecomunicações - Teses. 3. Radiofrequência - Teses. 4. Processamento de sinais - Teses. 5. Modulação (Eletrônica) - Teses. I. Tcheou, Michel Pompeu. II. Lovisolo, Lisandro. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621:396:44</p>
------	---

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Adriane dos Santos Duarte

Marca d'água em sistemas de comunicação por luz visível baseados em modulação ACO-OFDM.

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações. Linha de pesquisa: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Aprovado em 09 de novembro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Alexandre de Resende Camara
Instituto de Física - UERJ

Prof. Dr. Felipe da Rocha Henriques
CEFET-RJ, Campus Petrópolis

Rio de Janeiro

2021

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTO

À Deus, pela dádiva da vida, e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer, por Sua eterna compreensão e tolerância, por seu infinito amor, pela Sua voz “invisível” que não me permitiu desistir.

Aos meus orientadores, Professores Michel Tcheou e Lisandro Lovisolo, pela oportunidade de realizar este trabalho. Obrigada pela confiança e por me atenderem com paciência todas as vezes que bati em sua porta. Agradeço por todos os ensinamentos compartilhados. Muito obrigada por acreditarem que seria capaz!

A minha mãe, Leonilda Duarte, por estar comigo nos piores dias onde tive vontade de desistir. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir.

A minha irmã e cunhado, Adriene Duarte e Renato Lopes, por terem tirado algum tempo do dia para me darem orientação na minha dissertação de mestrado, mesmo não sendo da área.

A minha grande amiga, Amanda Sabino, que sempre esteve me apoiando durante toda a minha vida acadêmica. Obrigada por todas as palavras de conforto e pelos momentos de descontração durante esses tempos difíceis que passamos, inclusive com o distanciamento devido à pandemia, porque só assim que conseguimos nos ajudar.

Ao meu companheiro e grande amigo, Filipi Rodrigues, pelo amor, partilha, companheirismo e apoio incondicional, agradeço a enorme compreensão, generosidade e alegria com que me brindou constantemente, contribuindo para chegar ao fim deste percurso. Obrigada pelo carinho, pela paciência, por permanecer ao meu lado, pelo seu sorriso e por saber me fazer feliz.

Por fim, o meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

*Se, a princípio, a ideia não é absurda,
então não há esperança para ela.*

Albert Einstein

RESUMO

DUARTE, Adriane dos Santos. *Marca d'água em sistemas de comunicação por luz visível baseados em modulação ACO-OFDM*. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.

A marca d'água de radiofrequência (RF) é uma tecnologia que visa incorporar informações ocultas em sinais de comunicação convencionais sem o emprego de largura de banda extra. Essa informação pode ser usada para fins de autenticação ou para a transmissão de outras informações confidenciais/secretas. Assim, a marca d'água fornece uma maneira de autenticar usuários de forma sigilosa e protocolos sem fio podem ter autenticação adicionada na camada física sem que ocorra a quebra dos protocolos do cliente. Na primeira parte deste trabalho, analisa-se o desempenho do uso de marca d'água em esquemas de modulação BPSK e QPSK, através de curvas simuladas de taxas de erro de bit (BER—*Bit Error Rate*), referentes à marca d'água e à mensagem, em função da razão sinal ruído (SNR—*Signal to Noise Ratio*). Na segunda parte, como contribuição inédita da aplicação das técnicas CR, CS e ICS; propõe-se o emprego das técnicas de marca d'água, analisadas na primeira parte, em sistemas de comunicação por luz visível (VLC—*Visible Light Communications*) baseados em modulação multiportadora OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Neste contexto, para fins de comparação de desempenho, curvas simuladas de BER, novamente, referentes à marca d'água e à mensagem, em função da razão sinal ruído (SNR), são obtidas. Dessa maneira, foi possível concluir que o modelo apresentado para a simulação da marca d'água no sistema VLC tem seu desempenho associado ao efeito não linear, que é uma característica inerente às lâmpadas LED.

Palavras-chave: Marca d'água. VLC. LED. BPSK-OFDM. QPSK-OFDM.

ABSTRACT

Duarte, Adriane dos Santos. *Watermarking in visible light communication systems based on ACO-OFDM modulation*. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.

The radiofrequency (RF) watermark is a technology that incorporates hidden information into conventional communication signals without the use of extra bandwidth. The confidential information may be used for authentication purposes or to transmit confidential data. Therefore, the watermark provides a way to authenticate users in a secrecy/confidential manner, and one may add authentication in the physical layer to wireless protocols without breaking client protocols. In the first part of this dissertation, one analyzes the performance of using watermark in BPSK and QPSK modulation schemes through theoretical and simulated bit error rate (BER) curves for the watermark and the message depending on the signal-to-noise ratio (SNR). In the second part, as an unprecedented contribution, one proposes using the watermark techniques analyzed in the first part in visible light communication (VLC) systems based on OFDM multipoint modulation (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). In this context, for performance comparison, the simulated BER curves for the watermark and the message, depending on the signal-to-noise ratio (SNR), are obtained. Thus, it was possible to conclude that the model presented for the simulation of the watermark in the VLC system has its performance associated with the non-linear effect, which is an inherent characteristic of LED lamps.

Keywords: Watermarking. VLC. LED. BPSK-OFDM. QPSK-OFDM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático de sistema de autenticação usando marca d'água na camada física	19
Figura 2 - Exemplo de alteração de região de decisão DBPSK devido ao ruído (a) efeito do primeiro símbolo recebido (b) símbolo recebido com uma certa fase	28
Figura 3 - Constelação QPSK hierárquica	29
Figura 4 - Exemplo de modulação hierárquica sobre o QPSK, com ambos os fluxos comportando dois bits por símbolo	30
Figura 5 - Receptor BPSK coerente	31
Figura 6 - Diagrama de constelação BPSK	31
Figura 7 - Diagrama de constelação de BPSK com marca d'água	33
Figura 8 - Defasagem provocada pela inserção da marca d'água em sinais BPSK	34
Figura 9 - Receptor em quadratura onde é capaz de fornecer informações sobre o bit e a marca d'água	35
Figura 10- Diagrama de constelação QPSK	37
Figura 11- Constelação QPSK com marca d'água. Cada símbolo com marca d'água está rotacionado de ϕ do símbolo sem marca d'água	38
Figura 12- Exemplo do esquema Rotação de Constelação	40
Figura 13- Defasagem da marca d'água usando o esquema CR para diversos valores de α em sinais QPSK	42
Figura 14- Exemplo da constelação do esquema CS	43
Figura 15- Defasagem da marca d'água para diversos ângulos na modulação QPSK no esquema CS	46
Figura 16- Exemplo da constelação do esquema ICS	47
Figura 17- Defasagem da marca d'água empregando o ICS para diversos ângulos na modulação QPSK	48
Figura 18- Espectro eletromagnético	51
Figura 19- Luz visível como meio de comunicação entre diferentes dispositivos sem fio.....	52

Figura 20- Arquitetura em camadas do VLC	53
Figura 21- Característica de entrada-saída não linear do LED	56
Figura 22- Comparação do esquema de modulação OFDM com o FDM	60
Figura 23- Subportadora OFDM e espectro OFDM.....	60
Figura 24- Modelo de transmissão BPSK/QPSK-OFDM com marca d'água no sistema VLC.....	63
Figura 25 Gráfico das curvas características I x V de LEDs.	66
Figura 26 Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, no canal VLC, para desvio de fase de marca d'água $\theta = 45^\circ$, aplicados a modelos de LED distintos.....	67
Figura 27 Gráfico da curva não linear aplicado a caracterisca do LED3.	68
Figura 28 Constelações após recepção para SNR diferentes empregando-se a modulação (a) BPSK com marca d'água (b) e no sistema VLC.....	69
Figura 29 Constelação de sinais após recepção usando o esquema CR para SNR diferentes na modulação (a) QPSK no canal AWGN (b) aplicado ao sistema VLC	69
Figura 30 Constelação de sinais após recepção usando o esquema CS para SNR diferentes empregando-se a modulação (a) QPSK no canal AWGN (b) aplicado ao sistema VLC.....	70
Figura 31 Constelação de sinais após recepção usando o esquema ICS para SNR diferentes na modulação (a) QPSK no canal AWGN (b) aplicado ao sistema VLC	70
Figura 32 Curvas de BER de informação e de marca d'água em função de SNR o esquema de (a) modulação BPSK com marca d'água aplicado ao canal AWGN e (b) aplicado ao sistema VLC para diversos ângulos	72
Figura 33 Curvas de BER _{inf} e BER _w para intensidade de marca d'água diversos empregando-se a técnica CR na modulação (a) QPSK no canal AWGN e (b) QPSK-ACO-OFDM-LED3 aplicado no sistema VLC	73
Figura 34 Curvas de BER _{inf} e BER _w para intensidade de marca d'água diversos empregando-se a técnica CS na modulação (a) QPSK aplicado no canal AWGN e (b) QPSK-ACO-OFDM aplicado no sistema VLC.....	73

Figura 35	Curvas de BER _{inf} e BER _w para intensidade de marca d'água diversos empregando-se a técnica ICS na modulação (a) QPSK aplicado ao canal AWGN e (b) QPSK-ACO-OFDM aplicado ao sistema VLC	74
Figura 36	Curvas de BER agregada entre a informação e a marca d'água para o esquema de modulação (a) BPSK aplicado no canal AWGN e (b) BPSK-ACO-OFDM aplicado ao canal VLC.....	75
Figura 37	Curvas de BER agregada entre a informação e a marca d'água para o esquema de modulação (a) QPSK com a técnica CR aplicado ao canal AWGN e (b) QPKS-CR-ACO-OFM aplicado ao sistema VLC	75
Figura 38	Curvas de BER agregada entre a informação e a marca d'água para o esquema de modulação (a) QPSK com marca d'água aplicado a técnica CS no canal AWGN e (b) QPSK-CS-ACO-OFDM aplicado ao sistema VLC	76
Figura 39	Curvas de BER agregada entre a informação e a marca d'água para o esquema de modulação (a) QPSK com marca d'água aplicado a técnica ICS no canal AWGN e (b) QPSK-ICS-ACO-OFDM aplicado ao sistema VLC	76
Figura 40	Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, empregando-se a modulação BPSK e BPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC, para diversos ângulos de marca d'água.....	77
Figura 41	Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, empregando-se o esquema CR na modulação QPSK e QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC, para diversas intensidades de marca d'água..	79
Figura 42	Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, empregando-se o esquema CS na modulação QPSK e QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC.....	80
Figura 43	Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, empregando-se o esquema ICS na modulação QPSK e QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC.....	81
Figura 44	Curvas de desempenho para a modulação BPSK e a modulação QPSK utilizando os esquemas CR, CS e ICS sem/com o canal VLC	83

LISTA DE SIGLAS

ACO-OFDM	<i>Asymmetrically Clipped Optical OFDM</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BD	<i>Baud Dithering</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CD	<i>Constellation Dithering</i>
CLT	<i>Teorema do limite central</i>
CR	<i>Constellation Rotation</i>
CS	<i>Constellation Shifting</i>
DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DCO-OFDM	<i>Direct Current Biased Optical OFDM</i>
DD	<i>Direct Detection</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSO	<i>Free Space Optics Communication</i>
ICS	<i>Improved CS</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IM	<i>Intensity Modulated</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IR	<i>Infrared</i>
ISI	<i>Interference Intersymbol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>

LISTA DE SIGLAS

OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
O-OFDM	<i>Optical-OFDM</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
OWC	<i>Optical Wireless Communications</i>
PD	<i>Photodiode</i>
PIN	<i>Personal identification Number</i>
PN	<i>Pseudo Noise</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature phase shift keying</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RGB	<i>Red, Green, and Blue</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TOV	<i>Turn on Voltage</i>
THz	<i>Terahertz</i>
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
WDSSS	<i>Watermarked DSSS</i>

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	MARCA D'ÁGUA DE RADIOFREQUÊNCIA (RF)	26
1.1	Técnicas de marcas d'água de RF	26
1.2	BPSK com marca d'água	30
1.2.1	Inserção da marca d'água	32
1.2.2	Detecção do símbolo com marca d'água	34
1.2.3	Detecção com receptor em fase e quadratura	35
1.3	QPSK com marca d'água	36
1.3.1	Rotação de Constelação (<i>CR-Constellation Rotation</i>)	39
1.3.2	Deslocamento de Constelação (<i>CS-Constellation Shifting</i>)	43
1.3.3	Deslocamento de Constelação Aprimorado (<i>ICS-Improved Constellation Shifting</i>)	46
2	MARCA D'ÁGUA EM SISTEMAS VLC MULTIPORTADORAS	50
2.1	Sistemas de Comunicação por Luz Visível (VLC)	50
2.1.1	Sobre o meio físico	54
2.1.2	Sobre transmissores	55
2.1.3	Sobre o receptor	57
2.1.4	Modelo do canal VLC	57
2.2	OFDM	58
2.3	Inserção de marcas d'água em sistemas VLC	62
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
3.1	Parametrização da curva do LED	65
3.2	Constelação do sinal após a recepção	68
3.3	Resultados das curvas de BER para diversos ângulos aplicados ao canal AWGN e ao sistema VLC para a modulação BPSK e QPSK (CS, CR e ICS)	71
3.4	Resultados das curvas de BER agregada entre os bits de informação e bits de marca d'água no sistema VLC	74

3.5	Comparação das curvas de BER para determinados ângulos no canal AWGN e para o sistema VLC nas modulações BPSK e QPSK.....	76
3.6	Comparações no sistema VLC	81
	CONCLUSÃO	84
	REFERÊNCIAS	86

INTRODUÇÃO

Em um mundo dinâmico, no qual novas formas de interação avançam com maior intensidade, a confiabilidade da segurança de um sistema torna-se essencial. Com o uso das tecnologias de segurança da informação e comunicação (TICs), a confiabilidade nos sistemas pode ser maximizada com a garantia de fluidez dos negócios, sem interrupções, sem perda de privacidade e sem incidentes de segurança [1].

A segurança de sistemas digitais não está restrita apenas aos sistemas computacionais, mas está também relacionada à necessária proteção dos dados, informações ou documentos que possuem valor significativo. A segurança é obtida através de padrões e medidas de proteção dos dados, capazes de neutralizar ameaças aos usuários da rede [1]. Os atributos básicos de segurança são: o tempo de disponibilidade e a acessibilidade aos dados e sistemas; a integridade correspondente à preservação da precisão, da consistência e da confiabilidade das informações e sistemas; a confidencialidade dos dados da organização; e a autenticidade da fonte da informação [2].

Sistemas computacionais contemporâneos, em geral, não trabalham isoladamente, comunicando-se entre si. Assim, a segurança da camada física em sistemas de comunicação sem fio é um tema que tem motivado inúmeras pesquisas nos últimos anos [3–5]. Diferentemente de métodos baseados em criptografia aplicados em camadas superiores e que são geralmente aplicados diretamente sobre os dados, os métodos de segurança na camada física são aplicados diretamente nos sinais gerados para transmissão pelo meio físico visando fornecer segurança à informação [3].

Várias técnicas de transmissão sem fio eficientes foram propostas para atender às demandas por alto rendimento e confiabilidade no enlace de comunicação. Porém, a segurança também se tornou uma questão crítica devido à necessidade de se transmitir informações confidenciais em redes sem fio [3, 6]. A natureza aberta (broadcasting do sinal transmitido) de enlaces sem-fio resulta em vulnerabilidades, de forma que ataques de espionagem possam ser facilmente realizados. Dessa forma, sugeriu-se a aplicação da marca d'água na camada física de modo a proteger os dados a serem transmitidos [7, 8].

A marca d'água é um método de segurança que oculta dados adicionais por meio da multiplexação por divisão de frequência e/ou incorporação de um sinal de mensagem. Interpreta-se a marca d'água como uma “assinatura” sendo incluída durante o processo de

modulação e distinguível somente pelo receptor alvo. Muitos atributos da camada física, como a codificação de canal, os esquemas de modulação e a potência de transmissão fornecem redundância e aleatoriedade, adequadas para embutir marcas d'água [1, 9, 10].

Originalmente, a técnica conhecida como marca d'água digital (*watermark*) foi extensamente utilizada em sistemas de comunicações diversos para agregar informações de direitos autorais, rastrear a distribuição de mídias e autenticação de dados [8, 11]. Propuseram-se formas para inserir informação em dados de forma oculta usando marcas d'água digitais [11]. A informação inserida poderia indicar a origem dos dados ou sua autenticidade. Outra aplicação refere-se à detecção de alterações (*tampering*) dos dados, situação em que a marca d'água é alterada se o dado também o é, permitindo detectar alterações dos dados [11]. É importante avaliar os tipos de dados a serem transmitidos para determinar o melhor método de marca d'água a ser empregado [11, 12].

Existem grandes preocupações em relação à segurança das redes sem fio à proteção de redes WLAN (*Wireless Local Area Network*) [1]. Há, portanto, uma necessidade de se investigar métodos potenciais que forneçam um meio de controle, identificação e/ou autenticação de nós de rede de comunicação na camada física [1].

Autenticação usando Marca d'água de Radiofrequência

Existem duas preocupações principais de segurança em redes de comunicação sem fio: a confidencialidade e a autenticação. A confidencialidade se refere a que dados secretos não sejam obtidos por curiosos, enquanto que a autenticação concerne às identidades de usuários, visando garantir que usuários falsos não se passem por usuários legítimos. A segurança em sistemas de comunicações é geralmente alcançada na camada superior da pilha de protocolos de comunicação usando métodos baseados em criptografia, como métodos criptográficos simétricos e assimétricos, códigos de autenticação de mensagem ou assinaturas digitais [3].

A definição mais geral de autenticação em sistemas de computação engloba a verificação da identidade, a autenticação da origem e do conteúdo da mensagem. O conceito de verificação de identidade aplica-se à usuários humanos, à sistemas de computação e à processos executados nesses sistemas. A autenticação faz-se através de uma informação secreta ou um dispositivo de autenticação único. Mecanismos de autenticação confiáveis são fundamentais para a segurança de qualquer sistema de informação. Quando um usuário é verificado, são aplicadas técnicas de controle de acesso para permitir seu acesso aos recur-

sos do sistema. Se a identidade dos usuários puder ser verificada com um grau aceitável de certeza, as tentativas de acesso ao sistema sem a devida autorização provavelmente serão negadas [4, 13].

Existe uma diversidade de métodos para executar autenticação de usuários, os quais formam a base dos sistemas de controle de acesso. As três categorias de métodos para verificação da identidade de um usuário são baseadas em: conhecimento, algo que ele sabe, tal qual uma senha; em propriedade, algo que ele possui, tal qual um *token* de autenticação; característica física do usuário, tal qual a impressão digital ou padrão de voz.

De modo a usar características para verificar a identidade de um indivíduo, os sistemas de computadores usam *software*, *hardware* ou a combinação dos dois [14].

A autenticação baseada no conhecimento é a forma mais utilizada para fornecer uma identidade a um computador, no qual se destaca o uso de segredos, como senhas, chaves de criptografia, número de identificação pessoal (PIN - *Personal identification Number*) e tudo mais que uma pessoa pode saber. As soluções de autenticação baseadas na propriedade caracterizam-se por um objeto físico que o usuário possui; este objeto pode ser um cartão inteligente (*smartcard*), uma chave ou um *token*. Já a autenticação baseada em características tem evoluído tecnologicamente e simplificado seu uso por pessoas, como, por exemplo, através de biometria. Sistemas biométricos são métodos automatizados para a verificação ou o reconhecimento de uma pessoa com base em alguma característica física, tal como a impressão digital, a palma da mão, a íris, entre outros ou, até mesmo de algum aspecto comportamental [14].

A maioria dos mecanismos de autenticação, como, por exemplo, as assinaturas digitais, são aplicadas por protocolos que operam em camadas superiores à camada física e acarretam um custo adicional de largura de banda, já que as informações de autenticação adicionadas devem ser encaminhadas em conjunto com os dados. A utilização desse mecanismo ajuda a provar se uma mensagem recebida pelo destinatário foi realmente originada pelo emissor indicado [15]. Conseqüentemente, a autenticação de dispositivos de comunicação é um fator importante para a segurança de um sistema de comunicação.

A autenticação em camada física visa aumentar a segurança do sistema de comunicação com a implementação de serviço de segurança nessa camada [13]. Algumas propostas de autenticação na camada física adotam o envio de uma forma de onda como *tag*,

obtida a partir da aplicação de uma função à mensagem transmitida e uma chave secreta compartilhada entre os usuários legítimos, assim aumentando a largura de banda [13]. A confidencialidade da camada física visa evitar a interceptação das informações secretas, recebidas pelo usuário legítimo. Em poucas palavras, a confidencialidade assegura a proteção da informação contra o acesso não autorizado. Ao promover privacidade para os dados, esse princípio visa blindá-los de possíveis situações de ataques. Esse é um princípio inerente à proteção de dados [3].

Uma técnica promissora para autenticação na camada física é a marca d'água de RF [1]. A marca d'água de RF comporta a informação de autenticação adicional embutindo-a no sinal transmitido. Em sistemas de comunicações digitais, o transmissor e o receptor compartilham entre si um esquema de mapeamento/codificação de símbolos em formas de onda de canal. Nas tecnologias de marca d'água de RF (na camada física), em função do bit (ou conjunto de bits) da informação comportada pela marca, aplica-se uma mudança ao mapeamento — por exemplo, pode-se mudar a fase do símbolo transmitido relativamente à fase da constelação original. Assim, o sinal de marca d'água/autenticação está embutido no sinal transmitido. Essa estratégia evita o uso de largura de banda adicional, pois o sinal mensagem (em RF) transmitido será a portadora da marca d'água de RF usada para autenticação [15, 16].

A Figura 1 apresenta um diagrama ilustrativo do acima exposto. O transmissor gera um código de autenticação e o embute no sinal transmitido. O receptor recebe esse sinal e extrai o código sobreposto. Assim o receptor consegue, por exemplo, validar a identidade do transmissor. A marca d'água de RF é inserida no sinal RF analógico. Assim, dependendo do tipo da modulação aplicado ao sinal, como, por exemplo BPSK ou QPSK, é necessário aplicar uma técnica de embutir diferente o sinal [1, 12, 15–17].

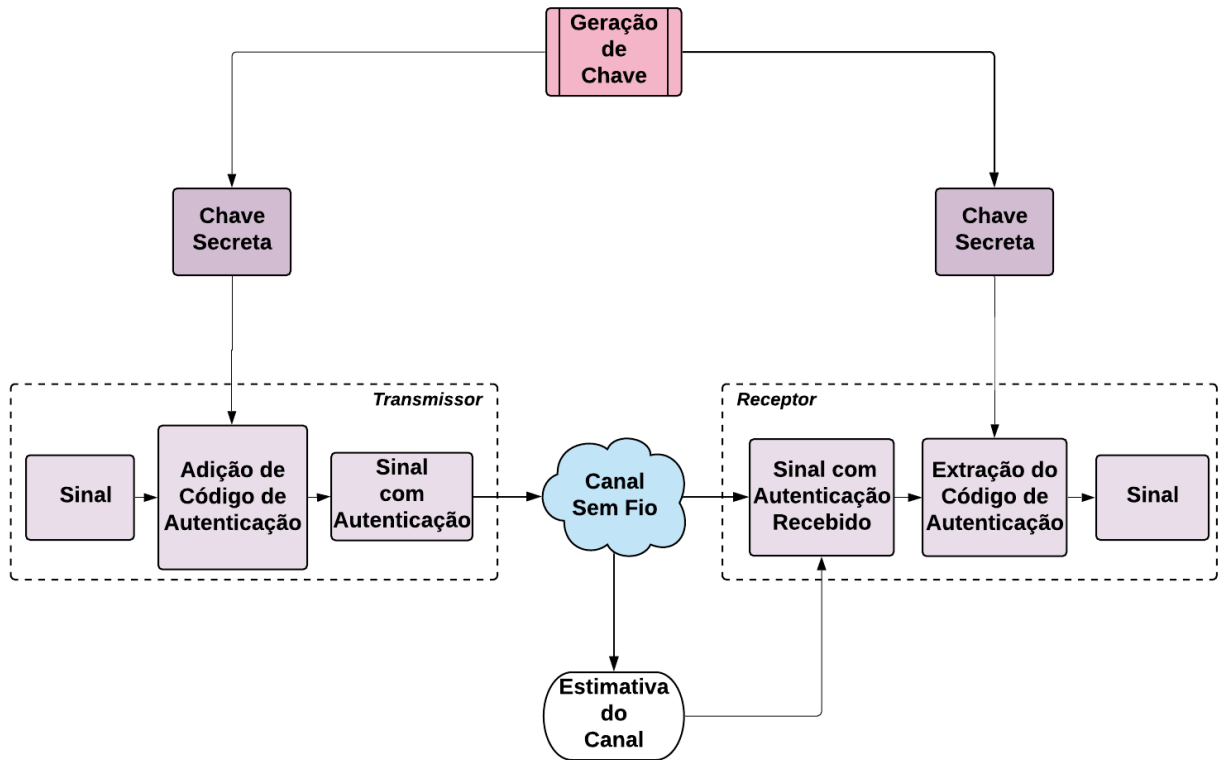


Figura 1: Diagrama esquemático de sistema de autenticação usando marca d'água na camada física.

O desenvolvimento da tecnologia de rádio programável ou rádio definido por *software* (SDR - *Software Defined Radio*) permite substituir em alguns cenários, a tradicional implementação em *hardware* dos dispositivos de comunicação por uma implementação mais flexível, que usa dispositivos programáveis controlados por *software* [12].

Sistema de comunicação visível (VLC - *Visible Light Communication*) é uma tecnologia nova e promissora no campo da comunicação óptica sem fio (OWC - *Optical Wireless Communication*) que explora o espectro visível para transmissão de dados, que surgiu como uma solução para sistemas de comunicação de radiofrequência (RF) devido a uma maior disponibilidade largura de banda, espectro visível e interferência eletromagnética inexistente. A seguir será abordado uma pequena abordagem sobre o sistema VLC.

Sistemas de Comunicação por Luz Visível

O Sistemas de Comunicação por Luz Visível é uma modalidade de comunicação sem fio onde os dados são modulados na porção de luz visível do espectro eletromagnético, que compreende a faixa de comprimento de onda de aproximadamente 380nm até 780nm. Com o VLC os problemas da tecnologia por radiofrequência são minimizados. Comparando o

espectro de ondas de rádio com o tamanho do espectro visível, percebemos que o VLC fornece uma faixa de frequências maior. Além disso podemos fazer uso da infraestrutura existente, pois utilizamos lâmpadas nas residências e instalações industriais, restando trocar as lâmpadas convencionais por lâmpadas LED [18].

Sistemas de comunicação por luz visível (VLC – *Visible Light Communication*) têm surgido como uma forma de prover enlaces de alta capacidade e curto alcance [19,20]. Há sistemas VLC usando diferentes esquemas de modulação, como, por exemplo, OOK (*On-off keying*) e OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

O uso de luz visível em comunicações pode melhorar aplicações que utilizam atualmente a tecnologia de radiofrequência e cria novas soluções onde o uso de RF não é suficiente, não desejado ou não possível [18].

Podemos usar VLC onde há luz e não haverá interferência com sistemas baseados em radiofrequência. Há também o fator segurança, já que ondas de rádio atravessam paredes e podem ser detectadas e usadas por usuários maliciosos. Com a VLC, transmitimos dados apenas para onde a luz está direcionada, não havendo chance para alguém escutar a comunicação estando em outra sala [18].

A modulação OOK é uma técnica que utiliza dois símbolos para representar os bits 0 e 1. Os dois símbolos consistem em duas amplitudes de uma grandeza física tal como a corrente ou a tensão de um sinal elétrico [21].

A técnica OFDM emprega múltiplas portadoras simultaneamente, cada uma delas comportando símbolos que podem ser modulados em fase e amplitude, isto é, permitindo usar constelações PSK (*Phase Shift Keying*), e outras variantes, tais como QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). A tecnologia OFDM permite compartilhar a banda usando suas múltiplas subportadoras ortogonais. As subportadoras são ortogonais por não possuírem sobreposição de frequência, e dessa forma não interferem umas nas outras [22]. A técnica de OFDM é um método robusto de transmissão de dados de alta velocidade, pois reduz a influência dos efeitos do canal [21, 23, 24].

O sistema de comunicação óptica tradicional é baseado na modulação de intensidade (IM–*Intensity Modulation*) da portadora óptica através do sinal elétrico que representa os dados e na detecção direta da luz recebida (DD–*Direct Detection*) [25]. Resumidamente, a tensão do sinal modulante é convertida em variação de intensidade óptica na transmissão, e essa variação de intensidade é convertida em corrente elétrica na recepção,

formando o sistema IM/DD [26]. O IM/DD é um esquema com boa relação custo-benefício em comparação com outras alternativas para enlaces VLC, sendo comumente empregados em sistemas VLC [25, 26].

No canal, existem alguns fatores não ideais que podem deteriorar a qualidade da comunicação. Um fator-chave é o efeito de múltiplos caminhos. O múltiplo caminho ocorre quando há mais de um caminho disponível para a propagação do sinal de rádio. O fenômeno da reflexão, difração e espalhamento dão origem a caminhos adicionais de propagação entre transmissor e receptor [26]. Este efeito é causado por vários mecanismos [26]. Nas comunicações sem fio, a luz pode ser refletida em várias superfícies e muitas vezes nos arredores antes de atingir o receptor [19, 25].

Objetivo

Neste trabalho, objetiva-se investigar e avaliar técnicas de autenticação na camada física. Para isso, empregam-se marcas d'água de RF: pequenas distorções em amplitude e fase são aplicadas ao sinal transmitido para autenticar dispositivos na camada física. Testa-se essa estratégia em diferentes esquemas de modulação/constelações: BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*) e QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). Emprega-se o uso do Software MATLAB para realizar etapas para análise do comportamento das distorções aplicadas ao sinal.

Na primeira parte deste trabalho, analisa-se o desempenho do uso de marca d'água em esquemas de modulação BPSK e QPSK, através de curvas simuladas de taxas de erro de bit (BER–*Bit Error Rate*), referentes à marca d'água e à mensagem, em função da razão sinal ruído (SNR–*signal-to-noise ratio*). Na segunda parte deste trabalho, como contribuição inédita, propõe-se o emprego das técnicas de marca d'água, analisadas na primeira parte, em sistemas de comunicação por luz visível baseados em modulação multiplexada OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Neste contexto, para fins de comparação de desempenho, curvas simuladas de BER, novamente, referentes à marca d'água e à mensagem, em função da razão sinal ruído (SNR), são obtidas. Resultados de simulação são apresentados com o objetivo de avaliar o desempenho desses algoritmos nas condições mencionadas.

Trabalhos Relacionados

Anteriormente, a maior parte da proteção de segurança cibernética focava em camadas de protocolo superiores, as camadas são: aplicação, apresentação, sessão, trans-

porte, rede e dados. Muitas variações de autenticação provaram ser bem-sucedidas na adição de uma nova camada de segurança. Historicamente, métodos de marca d'água foram utilizados para proteção contra violação de direitos autorais. O trabalho [27] contribuiu para o aumento do interesse da marca d'água na camada física e adicionou aplicações às técnicas tradicionais de marca d'água em novos tipos de dados digitais.

Em [28], foi aplicada marca d'água digital na camada física de modulação de banda básica sem fio, com a motivação de melhorar a flexibilidade e a eficiência dos processos de autenticação em uma rede sem fio segura. Foram utilizados dois métodos: *Constellation Dithering* (CD) e *Baud Dithering* (BD), aplicados em OFDM, propondo a detecção de marca d'água e desempenho de capacidade em um canal de ruído gaussiano branco aditivo (AWGN—*Additive white Gaussian noise*). Ambas as técnicas incorporam um fluxo de bits sobre o sinal de radiofrequência identificando de forma única o transmissor. Isso pode ser feito utilizando algoritmos que compartilhem uma chave entre os dois dispositivos para poderem se identificar. Os resultados mostraram que o método BD apresentou uma abordagem de marca d'água mais robusta e com melhor desempenho de capacidade de detecção no canal, enquanto o método CD demonstrou mais flexibilidade, sendo facilmente alterável para diferentes configurações.

Entretanto, de acordo com [16], os esquemas mais utilizados para inserção de marcas d'água em enlaces de comunicações empregam o método CD, no qual os bits de marca d'água estão incorporados na constelação do sinal transmitido. Essa técnica é projetada para os sinais de modulação, como, por exemplo, deslocamento de fase (PSK—*Phase Shift Keying*) e modulação por amplitude em quadratura (QAM—*Quadrature Amplitude Modulation*) que são amplamente utilizadas em sistemas de comunicação prática [16, 29].

Por exemplo, a marca d'água na camada física pode ser aplicada em esquemas de espalhamento espectral por sequência direta (DSSS—*Direct Sequence Spread Spectrum*) [16]. A técnica DSSS espalha o espectro de um sinal de informação, através de sequências de *Pseudo-Noise* (PN). Essa técnica consegue oferecer resistência à interferência e privacidade de mensagens. Apesar da sua segurança, todavia, não é a tecnologia mais otimizada, levando-se em conta que utiliza uma banda grande, que não é totalmente ocupada durante toda a transmissão. Uma proposta para sistemas OFDM, é modificar o prefixo cíclico inerente para embutir uma assinatura (a marca d'água) ciclo estacionária [16].

Em [15], os sinais aplicados a sequência direta de espalhamento do espectro (DSSS),

na implementação da marca d'água na camada física é utilizado o método de alteração de sequência pseudo-aleatória (conhecido como *chip sequence* ou pseudo-ruído), onde o sinal de informação é multiplicado por um sinal codificado em uma frequência muito maior do que a taxa do sinal de bits de informação. Ele é utilizado para modular a portadora de modo a expandir a largura da banda do sinal de rádio frequência transmitido. No receptor, o sinal de informação é recuperado através de um processo complementar usando um gerador de código local similar e sincronizado com o código gerado na transmissão.

Em [30], propôs-se uma técnica que inclui informações de marca d'água nas sequências PN (*pseudo-noise*) de um sistema DSSS, denominada técnica WDSSS (*Watermarked DSSS*). Nessa técnica, é utilizado o procedimento de correlação no receptor DSSS, que aplica o método de decodificação de probabilidade máxima para recuperar bits de dados do sinal de propagação. Isso é feito correlacionando-se o sinal de propagação com uma cópia sincronizada da sequência PN e compara o resultado da correlação para decidir o valor do bit de dados. Os erros de bit na propagação do sinal não afetam a decisão de decodificação.

Em [16], nos sinais OFDM, o prefixo cíclico (informação que se repete periodicamente), é modificado para incorporar a assinatura ciclo-estacionária (quando qualquer conjunto de amostras é invariante com o deslocamento temporal das amostras) nos sinais de RF. Os dois esquemas para a marca d'água digital de CD foram analisados por um modelo teórico proposto. A análise apresenta uma maior capacidade de canal no esquema proposto. O uso da camada física para autenticar usuários é geralmente chamado de assinatura de radiofrequência. A utilização de impressão digital permite que um receptor reconheça um transmissor, detectando uma etiqueta de autenticação de baixa potência sobreposta à forma de onda da mensagem.

O avanço da tecnologia SDR (*Software Defined Radio*) proporcionou uma abordagem econômica e prática para implementar marcas d'água na camada física como uma técnica viável para a segurança cibernética [12].

Em [5], foram realizados experimentos utilizando SDR de uma única antena e portadora única com um enlace de comunicação sem fio onde se transmitem e recebem a mensagem com a impressão digital aplicada. O trabalho considera embutir a *tag* nos dados, marcando-os com uma impressão digital única. Propôs-se um método para autenticação da camada física via incorporação de impressão digital com demonstração da

sua aplicação usando SDRs. Esse método foi desenvolvido para sistemas de entrada e saída únicas (SISO - *Single-Input Single-Output*) e entradas e saídas múltiplas (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*). A análise mostrou que este método pode atingir simultaneamente baixa taxa de falso alarme e alta probabilidade de detecção da etiqueta de autenticação; forte segurança contra ataques de personificação e substituição; e aumento mínimo da taxa de erro de bit de dados (BER - *Bit Error Rate*) nos sistemas SDR. Este artigo demonstra que o método de impressões digitais sobrepostas pode oferecer alta probabilidade de autenticação sem largura de banda adicional e com impacto mínimo na taxa de erro de bit em sistemas SDR.

Com o crescimento do número de aplicativos e serviços sem fio, a demanda por uma conexão de transferência de dados segura e rápida tem exigido novas soluções de tecnologia capazes de garantir a melhor contramedida aos ataques à segurança de sistemas de comunicação. Em [31], considera-se o aprimoramento da confidencialidade da próxima geração de comunicações sem fio usando segurança de camada física cega baseada em marca d'água (WBPLSec - *Watermark Based Blind Physical Layer Security*) que utiliza um receptor de interferência em conjunto com a técnica de marca d'água de espalhamento espectral em Comunicações de luz visível (VLCs). Propôs-se um esquema inovador no qual diodos emissores de luz (LEDs) vermelho, verde, azul (RGB), e três fotodiodos (PDs) ajustados por cor são usados para proteger um sistema de VLC usando um receptor de interferência em conjunto com o *Spread Spectrum*, técnica de marca d'água de espectro. Este foi o primeiro trabalho que tratou da segurança da camada física em VLC usando LEDs RGB. O estudo mostrou que o VLC baseado em marca d'água com um receptor de interferência, ou seja, WBPLSec, pode melhorar a segurança cibernética do dispositivo implementando uma solução de segurança autônoma de camada física em redes VLC.

Em [21], propôs-se uma estrutura de transmissão de dados aplicando marca d'água de RF para o sistema VLC baseado em QPSK-OFDM.

Apesar da natureza disruptiva e atraente da VLC, a comercialização em grande escala de dispositivos com capacidade VLC dependerá do desenvolvimento de soluções de engenharia robustas e eficientes, aplicativos e a execução de estratégias de comercialização incrementais [19]. Sem o objetivo de esgotar o assunto, podemos citar algumas propostas e aplicações criativas e interessantes que podem ser classificadas dentro do VLC. Por exemplo, os autores de [32] promovem lâmpadas modernas baseadas em diodos emissores

de luz (LEDs) que podem ser usadas para criar ambientes internos inteligentes. Com *Visible Light Communication* (VLC), as lâmpadas de LED instaladas em uma sala podem se comunicar umas com as outras e com outros dispositivos VLC (por exemplo, brinquedos, vestíveis, roupas). A visão da Internet das Coisas exige que as lâmpadas e os dispositivos VLC se comuniquem por meio do Protocolo da Internet (*IP-Internet Protocol*). Este documento explora como a pilha IP e outros protocolos de rede podem ser hospedados em dispositivos VLC baseados em Linux.

Com contribuições inéditas, este trabalho pode auxiliar no estudo do uso das técnicas CR, CS e ICS aplicadas a sistemas de comunicação por luz visível (VLC) baseados em modulação multiportadora OFDM, baseadas em BPSK e QPSK, para observar o comportamento de curvas de taxas de erro de bit (BER).

Estrutura da Dissertação

Este trabalho consiste em mais três capítulos além desta introdução e o capítulo de conclusões. Os três capítulos enfocam características, modelos e aplicações relacionadas à tecnologia de marca d'água de radiofrequência e a sistemas VLC.

O Capítulo 1 apresenta dois métodos de marca d'água de radiofrequência para a autenticidade do dado, descrevendo algumas propriedades básicas de segurança e o funcionamento da inserção e detecção de marca d'água na camada física para as modulações BPSK e QPSK. Para inserção de marca d'água na modulação QPSK, três técnicas são estudadas.

O Capítulo 2 estuda a aplicação da tecnologia de marca d'água em sistemas VLC usando múltiplas portadoras (OFDM). Esse capítulo discorre sobre as características, o comportamento da camada física, os tipos de transmissores (e modelos de LEDs), receptores de luz, e os tipos de canais VLC. Os modelos de transmissão/recepção de modulação BPSK e QPSK também são introduzidos. Finalmente, é discutido o modelo de transmissão implementado neste trabalho, que realiza a incorporação da marca d'água em esquema de modulação BPSK/QPSK sobre ACO-OFDM.

O Capítulo 3 apresenta os resultados obtidos neste trabalho. Este capítulo está dividido em dois tópicos. O uso da marca d'água de radiofrequência em canal AWGN e o uso da marca d'água aplicada em canal VLC.

O capítulo de conclusão discorre sobre a função da técnica proposta neste trabalho e seu desempenho e perspectivas futuras.

1 MARCA D'ÁGUA DE RADIOFREQUÊNCIA (RF)

A técnica de marca d'água é geralmente usada para determinar a autenticidade do portador do dado, sendo introduzida originalmente para fornecer proteção de direitos autorais a conteúdos digitais na década de 1990 [11, 33]. Nos sistemas de comunicações, a camada física fornece a conexão entre as partes comunicantes através da qual se realiza a transmissão de dados. Em redes sem fio, a camada física consiste, geralmente, em esquemas de modulação, técnicas de compartilhamento e acesso ao meio de transmissão e em algoritmos de codificação, semelhantemente ao descrito no modelo de camadas OSI (*Open System Interconnection*) [34]. Em geral, dispositivos de *hardware* específicos implementam os diferentes aspectos da camada física. Podem existir ainda requisitos de segurança, como autenticação e autorização na camada física [34, 35]. A autenticação verifica a identidade digital do usuário de um sistema e a autorização garante que um usuário autenticado somente tenha acesso aos recursos autorizados, como os que se aplicam nas camadas superiores (mais próximas do usuário), como por exemplo a camada 5 - camada de sessão, do modelo OSI [34].

Com o desenvolvimento de tecnologias para SDR, ficou facilitada a implementação de funções na camada física, e a pesquisa para imposição de segurança na mesma foi ampliada. Diversas propriedades da camada física condicionam as técnicas para segurança na mesma [34]. A informação embutida (a marca d'água) irá modificar um ou mais atributos dos sinais na camada física, de modo a fornecer capacidade de autenticação adicional [30]. Genericamente, iremos nos referir às técnicas para inserção de marcas d'água nos sinais que trafegam na camada física de sistemas de comunicações por “marcas d'água de RF”. Nesses, podem usar-se diferentes esquemas de modulação digital que requerem técnicas apropriadas para inserção de marcas d'água no sinal transmitido (de RF).

1.1 Técnicas de marcas d'água de RF

Na literatura, encontram-se três técnicas de marcas d'água em sinais de RF: *Constellation Dithering* (CD), *Baud Dithering* (BD) e Modulação Hierárquica [16, 28]. Entretanto, a técnica mais utilizada é a CD, projetada para o esquema de modulação por deslocamento de fase (PSK–*Phase Shift Keying*) e a modulação de amplitude em quadra-

tura (QAM—*Quadrature Amplitude Modulation*), comumente empregadas em sistemas de comunicações [16].

As técnicas de marca d'água *Baud Dithering* e *Constellation Dithering* [17] incorporam, a um fluxo de bits comportado no sinal de RF, a marca d'água. A marca poderá ser usada para identifica de maneira exclusiva o transmissor [30]. A marca d'água é chamada de *tag*, e é em geral gerada em função da mensagem transmitida e de uma chave secreta [4]. Quando o receptor detecta a forma de onda recebida e estima a sequência de símbolos recebida, a *tag* é recuperada decodificando a sequência com a chave secreta.

Com a técnica de *Baud Dithering*, altera-se a temporização do símbolo no transmissor, conforme a *tag* [28]. Isso irá criar um ruído chamado *Jitter*, que ocorre naturalmente em comunicações digitais: a variação do atraso do símbolo ou conjunto de símbolos/quadro do meio físico.

A técnica de *Constellation Dithering* [12] altera a constelação de símbolos para criar regiões de decisão, que não são mutuamente exclusivas, em torno de cada ponto da constelação. Um conjunto de regiões de decisão define as hipóteses para detecção do símbolo de mensagem e o outro define as hipóteses para detecção do símbolo da *tag* em torno do símbolo de mensagem. Na modulação, uma pequena fase é adicionada ou subtraída do sinal de informação, com base na marca d'água, criando uma constelação menor em torno dos símbolos de mensagem, e a marca d'água é codificada/transmitida usando a constelação em torno das coordenadas euclidianas dos símbolos de mensagem [36].

Assim, a técnica CD altera a fase de um sinal para incorporar a marca d'água. Um deslocamento do símbolo paralelo ao eixo de quadratura não teria efeito na decisão do receptor BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), mas em um receptor DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) o movimento causa um erro adicional [17]. O DBPSK é a modulação binária de maior eficiência espectral [17].

Na modulação DBPSK, com a técnica CD, os bits são transmitidos com ângulo de fase alterado. Para detecção DBPSK, o receptor compara a fase do símbolo atual com a fase do símbolo recebido anteriormente. A referência de grau zero é definida no ângulo de fase do símbolo anterior. A linha de decisão para o símbolo atual é o eixo da quadratura (eixo da ordenada). À esquerda do eixo vertical decide-se por 1, e à direita decide-se por 0 [12]. Isso significa que uma mudança de fase de -90° a 90° será interpretada como

0 e uma mudança de fase de 90° a 270° será interpretada como 1. Esse sistema trata o símbolo recebido anteriormente, especificamente seu ângulo de fase, como a referência para o símbolo atual. Se o ângulo de fase do símbolo anterior for alterado em 20° devido aos efeitos do ruído, a linha de decisão para o símbolo atual será girada 20° . Esta rotação não será contabilizada na transmissão do símbolo atual. Isso tem o efeito de aumentar a probabilidade de um erro de bit, criando regiões de decisão de símbolo que são menos do que ideais, como visto na Figura 2. Tal esquema, é aplicável também para extrair os bits da marca d'água. Isso se assemelha a um esquema de modulação hierárquica.

A Figura 2-a mostra o efeito do primeiro símbolo recebido. Um símbolo é mostrado sendo recebido com uma fase de 20° devido ao ruído. O receptor usará esta fase como referência, girando a linha de decisão 20° . As regiões sombreadas na Figura 2-b agora seriam decodificadas por engano. Um vetor de sinal recebido na área sombreada superior seria decodificado como 0 quando, na verdade, é 1, enquanto um vetor na área sombreada inferior seria decodificado como 1 quando, na verdade, é 0. Se o primeiro símbolo não tivesse sido afetado por ruído, o segundo símbolo pode ter tido uma mudança de fase induzida por ruído de -90° a 90° sem um erro de bit. Com a linha de decisão alterada, o segundo símbolo pode ter uma mudança de fase induzida por ruído de -70° a 110° sem erro. Este intervalo é inferior ao ideal e resultará em uma probabilidade maior de erro de bit.

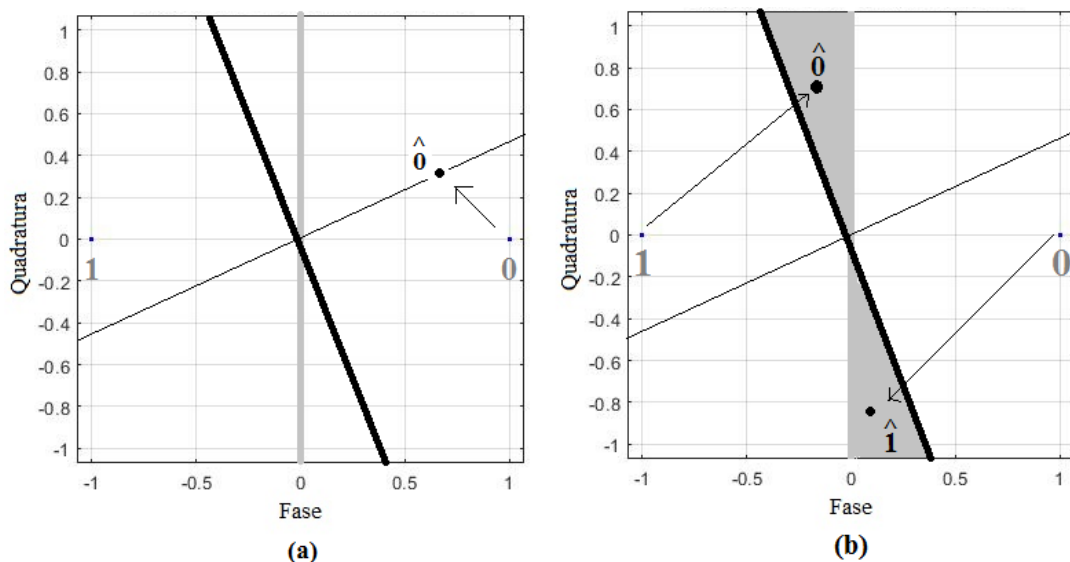


Figura 2: Exemplo de alteração de região de decisão DBPSK devido ao ruído (a) efeito do primeiro símbolo recebido (b) símbolo recebido com uma certa fase. Adaptado de [12].

Na modulação hierárquica [36], codifica-se um sinal sob outro, permitindo que dois sinais sejam transmitidos usando a mesma portadora sem aumento perceptível da largura de banda. A modulação hierárquica é também chamada modulação em camadas e pode multiplexar e modular vários fluxos de dados em um único fluxo de símbolos, com prioridades diferentes (em função das potências médias dos símbolos em cada camada). O fluxo de bits principal pode ser associado às comunicações críticas enquanto o fluxo de bits secundário pode ser de menor prioridade [17]. Vemos que a marca d'água de constelação é uma marca d'água hierárquica, na qual a mensagem é o fluxo de bits primário e a marca d'água é o fluxo de bits secundário.

A Figura 3 apresenta a constelação QPSK hierárquica com um bit por símbolo no fluxo secundário. Nesse cenário, deslocam-se as fases dos símbolos da constelação QPSK padrão. Os símbolos representados por círculos vermelhos são pontos de constelação com marca d'água e apresentam diferenças de fase iguais a $\pm\theta$ em relação aos símbolos da constelação QPSK padrão. A ilustração do caso em que há dois bits de marca d'água por símbolo na modulação QPSK, ou fluxo secundário, é apresentada na Figura 4.

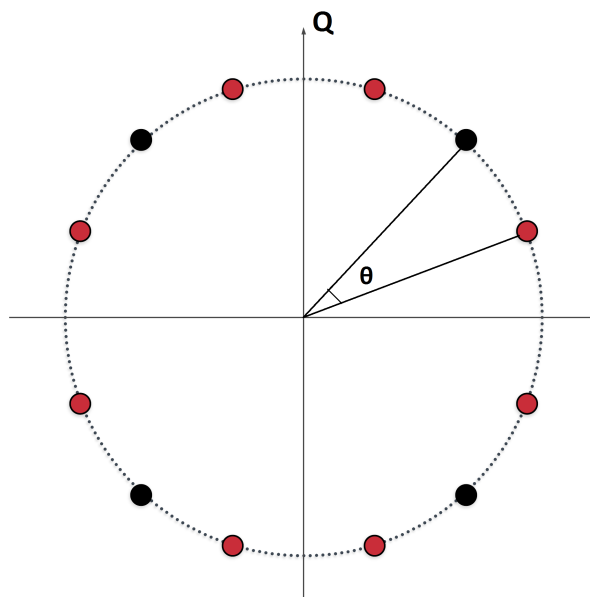


Figura 3: Constelação QPSK hierárquica. Adaptado de [16].

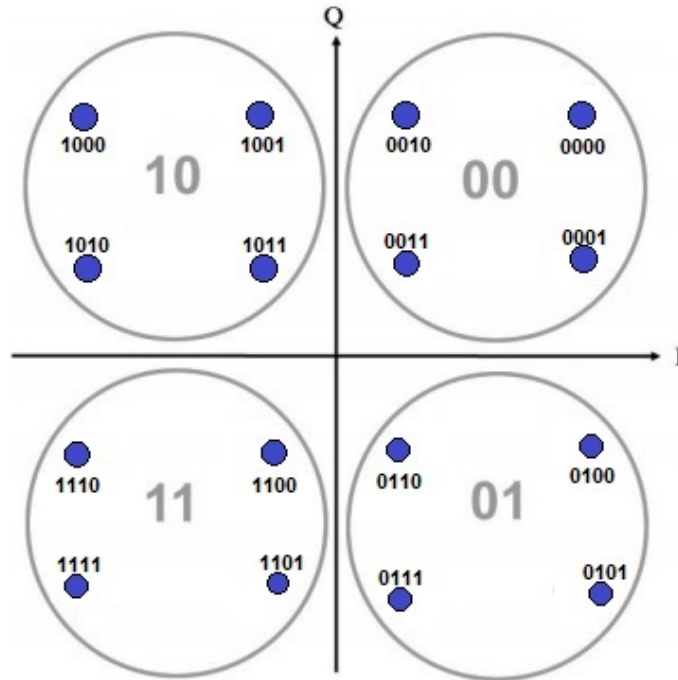


Figura 4: Exemplo de modulação hierárquica sobre o QPSK, com ambos os fluxos comportando dois bits por símbolo. Adaptado de [12].

Com base no conteúdo discutido acima, usaremos a aplicação de marca d'água RF para estudar mais a modulação BPSQ e QPSK.

1.2 BPSK com marca d'água

Nesta seção, apresenta-se o esquema de embutimento de marca d'água em constelação BPSK. O modelo de canal de ruído gaussiano branco aditivo (AWGN—*Additive White Gaussian Noise*) é usado para análise de desempenho.

A modulação BPSK usa dois símbolos com fases anti-podais. A detecção desses símbolos se realiza de forma coerente, isto é, conhecendo o tempo de símbolo e acompanhando-o no receptor. A Figura 5 mostra um receptor típico que emprega apenas uma única função base para detectar a fase do símbolo recebido [12, 37]. O sinal $x(t)$ é multiplexado com o ângulo ϕ e como resultado temos o sinal $y(t)$. Esse sinal resultante passa através do modulo integrador, onde de tal forma sua saída está dentro de certos limites pré-definidos. O sinal $r(t)$ toma a decisão de bit, podendo ser 0 ou 1, por chaveamento.

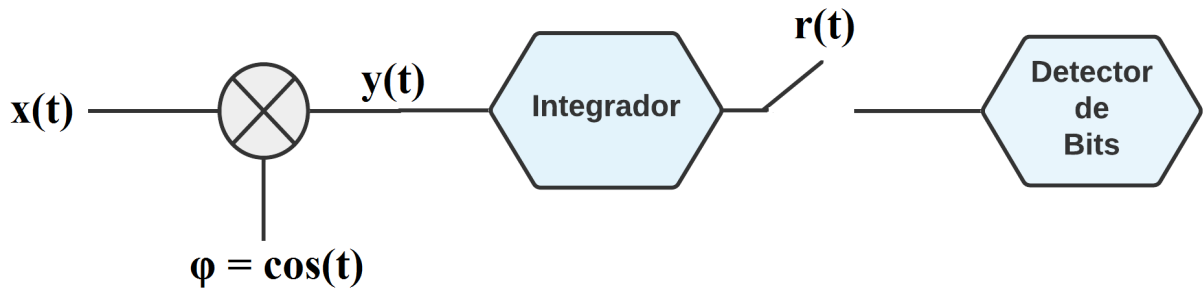


Figura 5: Receptor BPSK coerente. Adaptado de [17].

O sinal BPSK é modulado como

$$x(t) = A \cos(\omega t + \theta), \quad (1.1)$$

o ângulo θ é determinado pelo bit da mensagem e será 0 ou π , ω é a frequência e, A , a amplitude, do símbolo. A constelação deste esquema de modulação é mostrada na Figura 6.

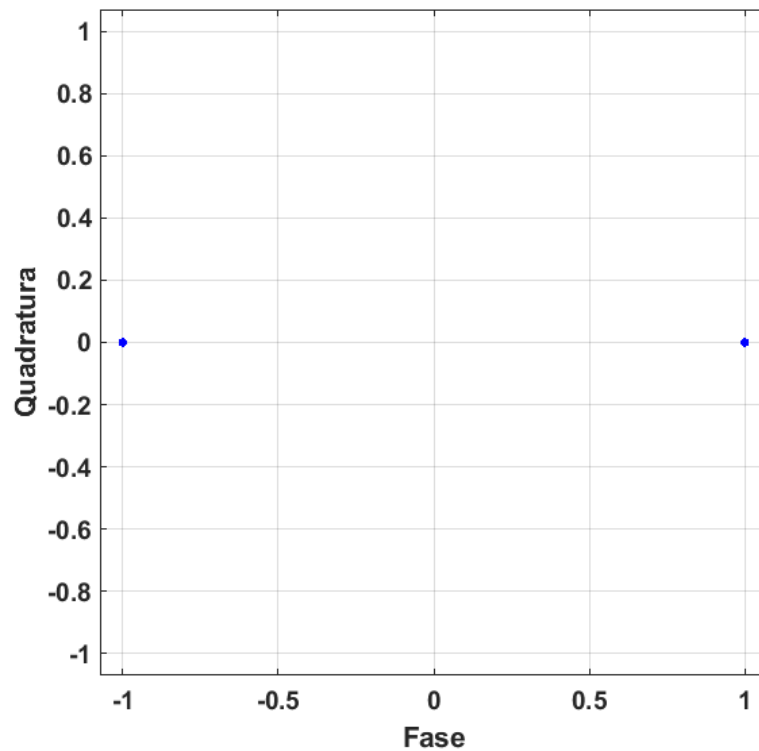


Figura 6: Diagrama de constelação BPSK.

A decisão de bit é feita a partir do sinal $r(t)$ da Figura 5. Se o bit 1 é recebido,

na saída do integrador da Figura 5, espera-se obter um valor maior que zero (cujo valor esperado depende da atenuação do sinal recebido), e quando o bit 0 é recebido, espera-se um valor menor que zero. Para encontrar a variação do valor esperado de $r(t)$ no tempo do símbolo, assumimos um sinal de entrada puramente de ruído, logo a saída será

$$r(t) = \int_0^T \cos(\omega_0 t) n(t) dt, \quad (1.2)$$

neste caso, a saída é caracterizada completamente pela média e variância do ruído. Se o canal é AWGN, $n(t)$ é um ruído gaussiano branco, então a saída do integrador no instante de amostragem é modelada por uma variável aleatória gaussiana bimodal com variância $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$, dependente da densidade espectral de potência de ruído, N_0 , e as médias das gaussianas dependem da atenuação do sinal.

A probabilidade de erro de bit (P_b), conhecido na literatura, com detecção coerente no receptor é então

$$P_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right), \quad (1.3)$$

E_b representa a energia por bit. A fração $\frac{E_b}{N_0}$ é igual a duas vezes a SNR (razão sinal-ruído). Quanto menor a SNR, maior a degradação, o que afetará a capacidade do receptor de determinar o bit correto e levará a uma taxa de erro de bits maior [12, 37]. A função $Q(\cdot)$ é a função de distribuição de cauda da distribuição normal padrão [38]. Em outras palavras, ela é a probabilidade de que uma variável aleatória gaussiana normalizada de média nula e variância unitária seja maior que x , quando o desvio padrão é unitário, isto é,

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda. \quad (1.4)$$

A presença do ruído dificulta a estimação da fase. Se o desvio gerado na fase estimada for maior que $\pi/2$, o detector irá decidir pelo símbolo errado. Essa probabilidade de erro aumenta quanto maior for o ruído, ou mais precisamente, a SNR [12, 37].

1.2.1 Inserção da marca d'água

A partir da Equação (1.1), um símbolo BPSK com marca d'água aparecerá na forma

$$x(t) = \cos(\omega t + \theta + \phi), \quad (1.5)$$

na qual, ϕ determina a fase do ângulo de inserção da marca d'água. Na modulação BPSK, tem-se a restrição de que o ângulo de modulação da mensagem, θ , será 0 ou π . A introdução de uma marca d'água binária dividirá cada símbolo de mensagem em dois símbolos de marca d'água. Com o BPSK, isso resulta em quatro símbolos, conforme visto na Figura 7. A Figura 7 ilustra a inserção de uma marca d'água binária em um esquema de modulação BPSK [12,37], onde os símbolos da marca d'água na parte superior serão zero enquanto os símbolos da marca d'água inferior serão um. Quanto maior for o ângulo ϕ maior é a probabilidade de detecção correta da marca d'água, porém diminuindo a probabilidade de detectar o bit de mensagem corretamente.

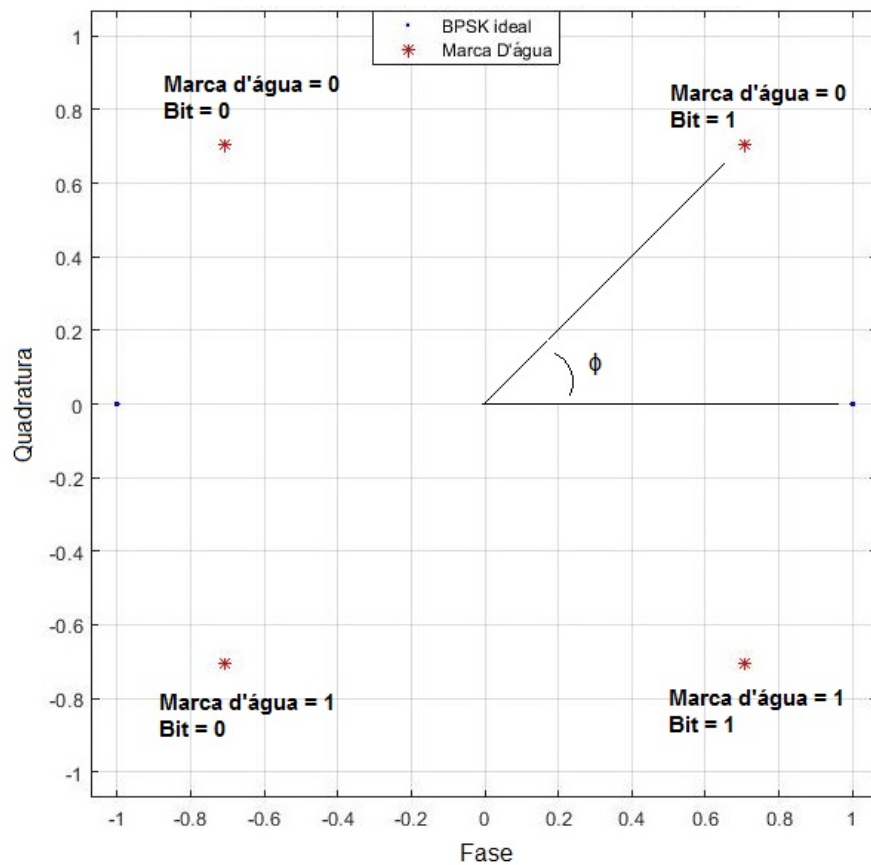


Figura 7: Diagrama de constelação de BPSK com marca d'água.

O sinal mensagem com marca d'água contém dois bits, um de informação e outro de marca d'água. A Figura 8 apresenta o impacto de marcas d'água de diferentes intensidades (desvios de fase) na constelação para um sinal BPSK com marca d'água. Os símbolos com marca d'água se distanciam dos símbolos originais do BPSK, conforme o desvio de fase empregado aumenta. O sinal com marca d'água a ser transmitido será semelhante a

um sinal transmitido apenas com ruído de fase.

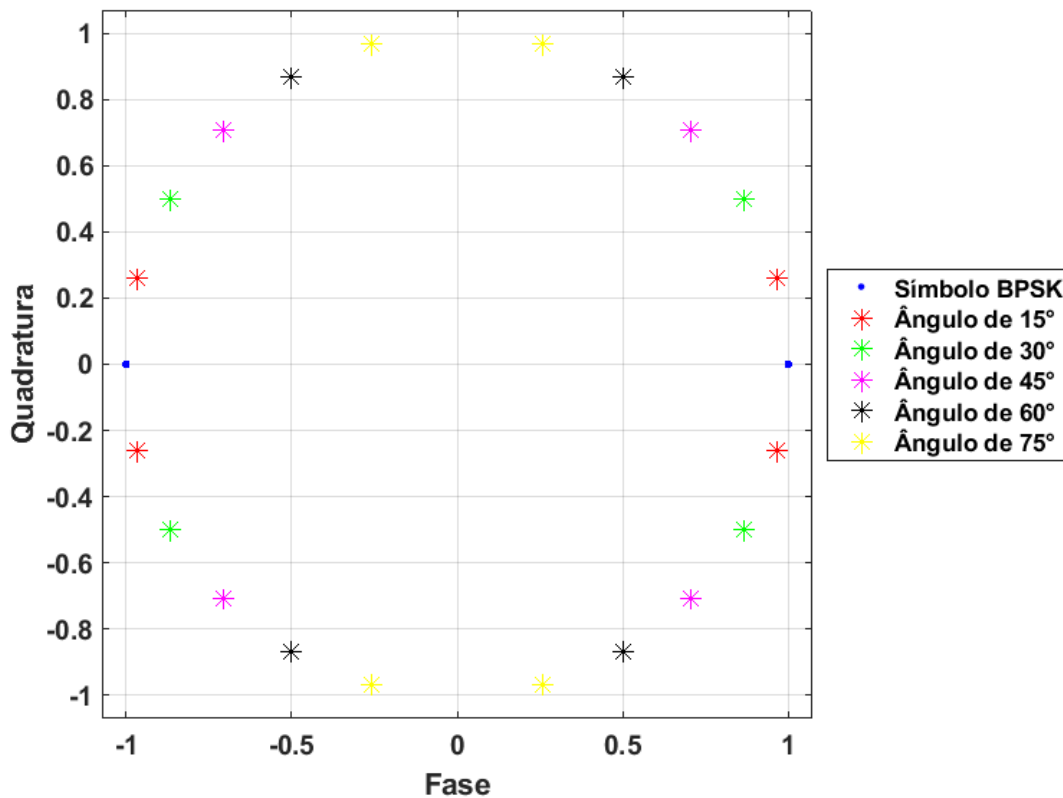


Figura 8: Defasagem provocada pela inserção da marca d'água em sinais BPSK.

1.2.2 Detecção do símbolo com marca d'água

O receptor BPSK padrão pode detectar corretamente o bit de informação, mas não pode identificar o bit da marca d'água sozinho, porque a marca d'água move o símbolo em torno dos símbolos originais e o demodulador não tem como reconhecer esse desvio. Para que o demodulador reconheça os bits da marca d'água, o receptor BPSK deve adicionar um caminho ortogonal ao primeiro para estimar o desvio do símbolo e detectar os bits de marca d'água [12, 37].

Usando o receptor BPSK padrão da Figura 5, a estatística de saída para determinar o bit de mensagem é

$$l = \frac{1}{2} \int_0^T (\cos(\phi) + \cos(2\omega + \phi)) dt. \quad (1.6)$$

Resolvendo a integral, obtém-se

$$l = \pm \frac{T}{2} \cos \phi. \quad (1.7)$$

Observa-se que \pm indica que o bit de mensagem pode ser positivo ou negativo dependendo da marca d'água, resultando nos quatro símbolos mostrados na constelação de sinais da Figura 7. A probabilidade de erro de bit com marca d'água (P_b) para o BPSK é então

$$P_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \cos \phi \right). \quad (1.8)$$

A aplicação da marca d'água introduz o fator $\cos(\phi)$ que, por ser menor que um, reduz o argumento de $Q(\cdot)$, aumentando a probabilidade de erro, com consequência ruim para a análise.

1.2.3 Detecção com receptor em fase e quadratura

Para detectar o símbolo e a marca, utiliza-se um receptor em quadratura, mostrado na Figura 9 [12, 37]. Ele produz duas estatísticas,

$$l1 = \int_0^T [\cos(\omega t + \phi) \cos(\omega t)] dt, \quad (1.9)$$

$$l2 = \int_0^T [\cos(\omega t + \phi) \sin(\omega t)] dt. \quad (1.10)$$

que são usadas para determinar a marca d'água e os bits de mensagem.

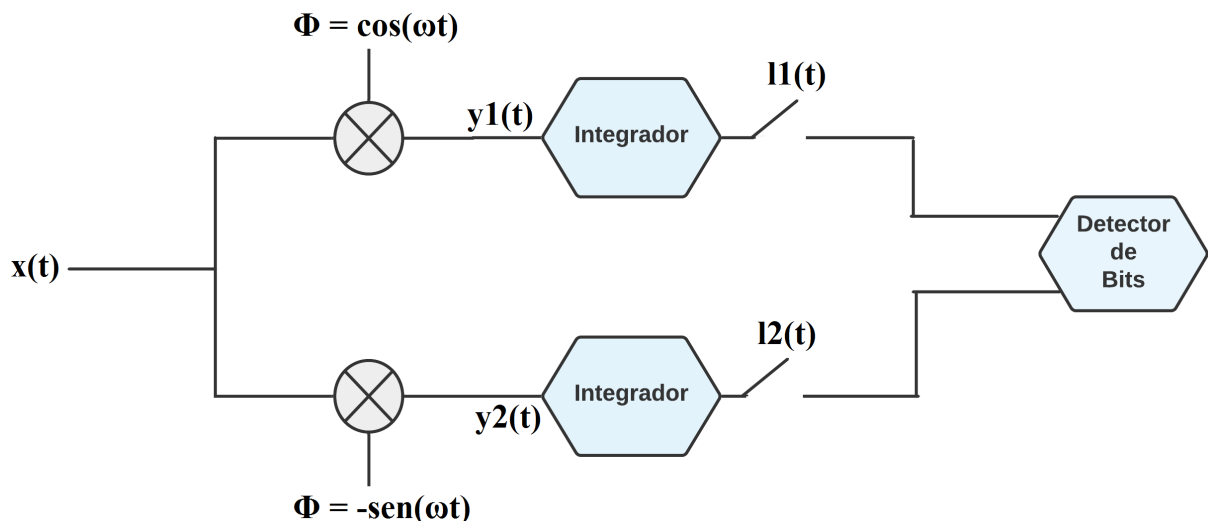


Figura 9: Receptor em quadratura onde é capaz de fornecer informações sobre o bit e a marca d'água. Adaptado de [17].

Usando as identidades trigonométricas e depois de integrar-se para determinar os

bits da mensagem e a marca d'água, obtemos

$$l1 = \frac{T}{2} \cos \phi, \quad (1.11)$$

$$l2 = \frac{T}{2} \sin \phi. \quad (1.12)$$

$l1$ varia apenas na direção de fase e $l2$ varia apenas na direção de quadratura. Assim, $l1$ contém informação sobre a presença da marca d'água no termo $\cos \phi$, mas como $\cos \phi = \cos -\phi$, o bit de marca d'água codificado no sinal de ϕ não pode ser determinado somente a partir de $l1$. Assim, enquanto $l1$ fornece efetivamente apenas informações sobre o bit de mensagem, $l2$ fornece informações sobre o bit de marca d'água.

A probabilidade de erro de marca d'água (P_W) é dada por

$$P_W \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \sin \phi \right). \quad (1.13)$$

Comparando a equação (1.8) e a equação (1.13), nota-se que a probabilidade de erro difere nos fatores “complementares” $\cos(\phi)$ e $\sin(\phi)$.

1.3 QPSK com marca d'água

Nesta seção, apresentam-se modelos para três esquemas de marca d'água, baseados em constelação, e os seus respectivos demoduladores para símbolos QPSK e os bits de marca d'água. Em seguida, investigam-se e apresentam-se as fórmulas de BER para o símbolo QPSK e os bits de marca d'água. O modelo do canal de ruído gaussiano branco aditivo (AWGN) é considerado na análise de desempenho.

A modulação QPSK é uma técnica de modulação que usa os parâmetros de fase e quadratura da portadora para modular o sinal de informação usando 4 possíveis símbolos. O QPSK padrão utiliza chaveamento de mudança de fase para codificar dois bits em um símbolo para transmissão. O QPSK é análogo ao BPSK, e o sinal transmitido pode ser modelado de maneira semelhante, porque ambos aplicam exclusivamente uma mudança de fase para codificar as informações, visto na Figura 9. Assim, a equação (1.1) modela também o QPSK. Mas, neste caso, ao ângulo de fase modulado, θ , podem ser atribuídos quatro valores possíveis, separados de $\frac{\pi}{2}$. O diagrama de constelação para QPSK é ilustrado na Figura 10.

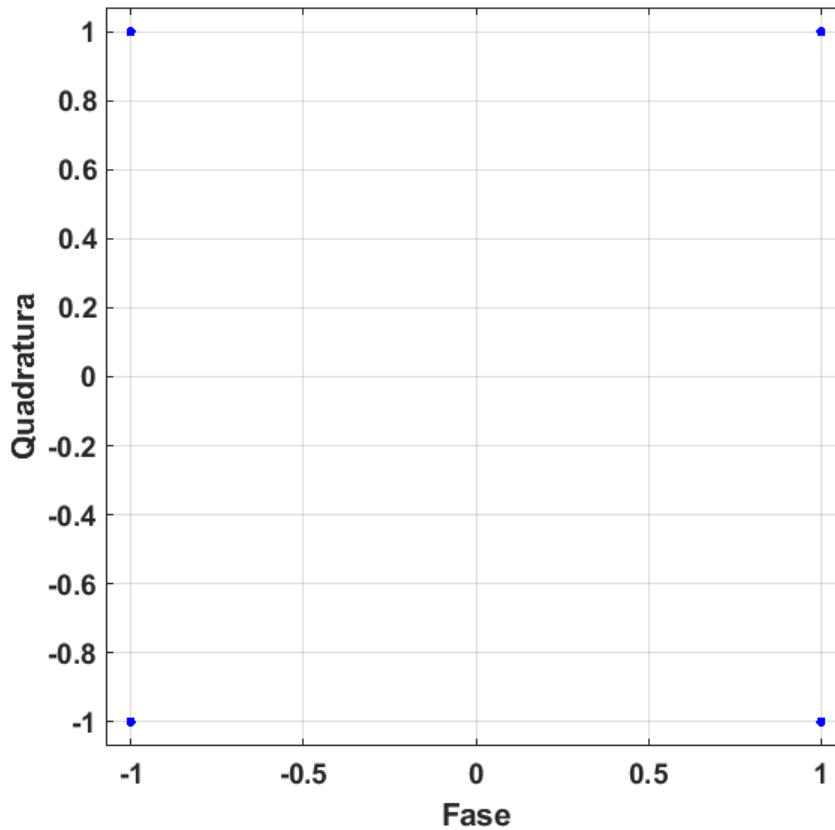


Figura 10: Diagrama de constelação QPSK.

Os demoduladores de fase e quadratura que realizam a demodulação coerente QPSK são semelhantes à Figura 9. Com relação à variação e densidade de potência de ruído para este receptor no instante de amostragem, tem-se uma variável aleatória gaussiana bimodal com variância $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$, dependente da densidade espectral de potência de ruído, N_0 . Como cada símbolo contém dois bits, o objetivo é encontrar a probabilidade de ocorrência de um erro de símbolo de mensagem (P_S) para QPSK, que será expresso em termos de $\frac{E_S}{N_0}$ [16, 17]. E_S é a energia do símbolo; uma vez que cada símbolo comporta dois bits, $E_S = 2E_b$. Porém, para o QPSK sem marca d'água a equação da probabilidade de erro bit (P_b) será igual a equação (1.3).

A probabilidade de ocorrência de um erro de símbolo de mensagem (P_S) é

$$P_S \left(\frac{E_S}{N_0} \right) = 2Q \left(\sqrt{\frac{E_S}{N_0}} \right) - \left[Q \left(\sqrt{\frac{E_S}{N_0}} \right) \right]^2. \quad (1.14)$$

A relação entre P_S e P_b para QPSK pode ser vista comparando-se as equações (1.3) e

(1.14).

Como vimos, o QPSK *Phase dithered* divide cada símbolo da mensagem em dois símbolos (fase e quadratura) que resultam num cosseno que pode assumir quatro fases distintas (θ), similar aos símbolos de mensagem BPSK com marca d'água *Phase dithered*. Para inserir uma marca d'água no QPSK, realiza-se também o deslocamento da fase, ϕ , que também é modelado pela equação (1.5). O ângulo ϕ da marca d'água pode ser adicionado ou subtraído, dependendo do bit da marca d'água. A constelação QPSK com um bit de marca d'água é mostrada na Figura 11. Observa-se que são dois bits de informação e um de marca d'água.

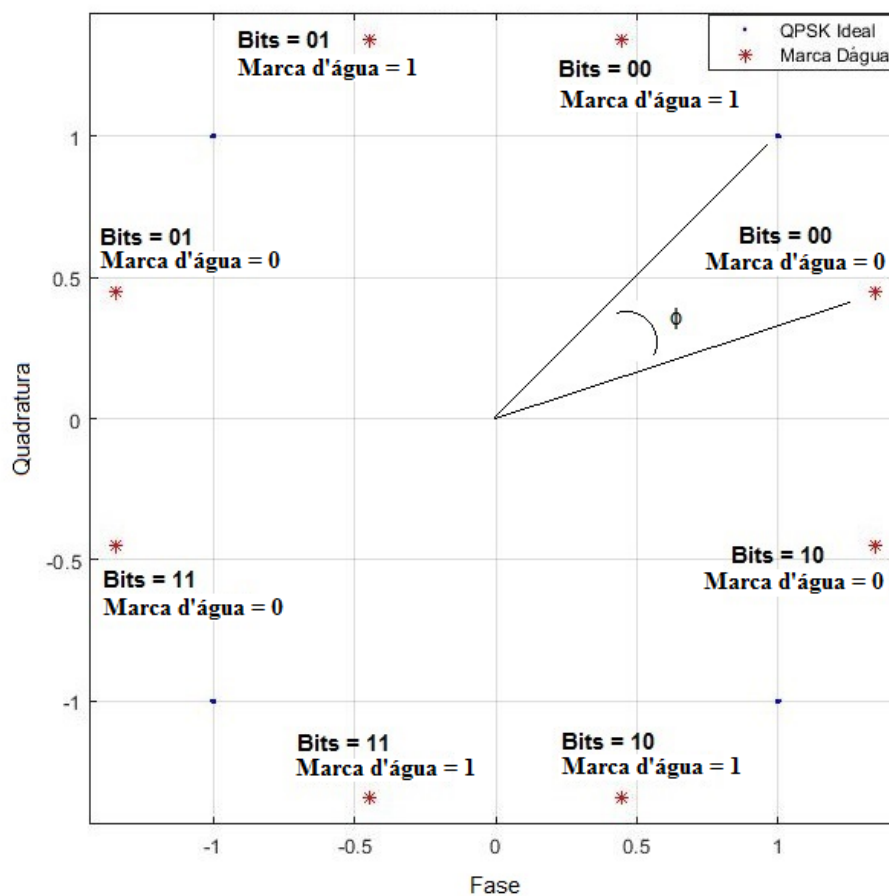


Figura 11: Constelação QPSK com marca d'água. Cada símbolo com marca d'água está rotacionado de ϕ do símbolo sem marca d'água.

O receptor em fase e quadratura usado para QPSK padrão permite detectar a marca d'água. Assumindo que os bits de marca d'água são equiprováveis, a P_S do QPSK com marca d'água é igual à do sem marca d'água [16, 17].

Na subseção a seguir, serão abordados os três modelos matemáticos de esquemas de

marca d'água baseados em constelações e, em seguida, apresentamos demoduladores para símbolos QPSK e bits de marca d'água. Finalmente, as fórmulas de BER dos símbolos QPSK e bits de marca d'água são estudadas.

1.3.1 Rotação de Constelação (*CR-Constellation Rotation*)

Nesta técnica, insere-se um bit de marca d'água por símbolo. O n -ésimo símbolo marcado por um bit de marca d'água é definido como

$$s_n^{CR} = s_n^I(\cos(\theta) + d\sin(\theta)) + js_n^Q(\cos(\theta) - d\sin(\theta)), \quad (1.15)$$

O símbolo QPSK é dado por $s_n = s_n^I + js_n^Q$, $s_n^I = \pm 1$ é a componente em fase (I) do símbolo, $s_n^Q = \pm 1$ é a componente em quadratura (Q), $d = \pm 1$ é o bit da marca d'água e θ é o ângulo de rotação. Normalmente, $\theta \ll \frac{\pi}{4}$ de forma que a incorporação do bit de marca d'água tenha pouco efeito na demodulação dos sinais.

Se definimos uma força de marca d'água (α), quanto maior o α , maior é o desvio de fase ϕ , e substituindo $\sin \theta = \sqrt{\alpha}$ e $\cos \theta = \sqrt{1 - \alpha}$, obtemos

$$s_n^{CR} = s_n^I(\sqrt{1 - \alpha} + d\sqrt{\alpha}) + js_n^Q(\sqrt{1 - \alpha} - \sqrt{\alpha}d) \quad (1.16)$$

A constelação resultante desse esquema pode ser vista na Figura 12. Cada ponto da constelação é deslocado dependendo do bit de marca d'água. Sempre os primeiros bits representam os bits da mensagem comportados pelo símbolo QPSK, e o último bit representa o bit de marca d'água. Os bits circulos com a cor vermelha representam os bits da marca d'água 0 e os círculos de cor azul representam os bits de marca d'água 1. A zona sombreada mostra a localização onde os bits de marca d'água estarão localizados quando forem iguais a zero.

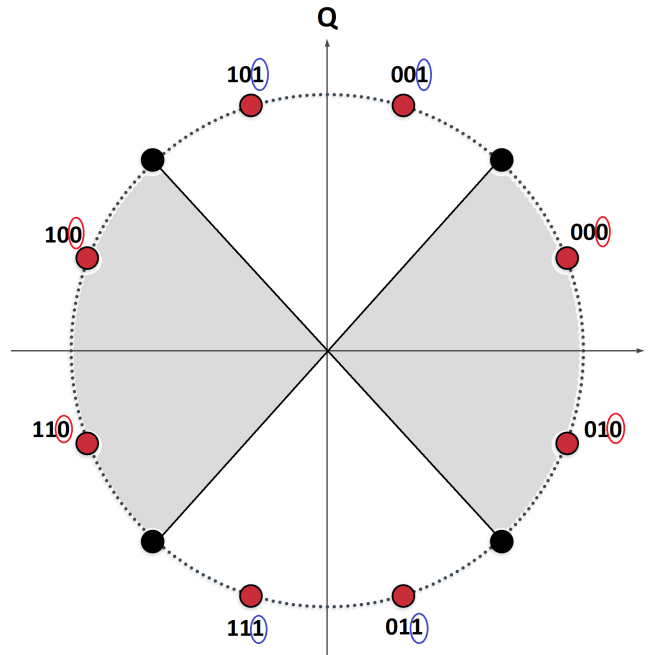


Figura 12: Exemplo do esquema Rotação de Constelação. Adaptado de [16].

Se o sinal passa pelo canal AWGN, o sinal recebido é

$$x_n^{CR} = s_n^{CR} + w_n, \quad (1.17)$$

onde $w_n = u_n + jv_n$, w_n é uma variável aleatória gaussiana branca complexa, onde u_n e v_n tem média zero e variância σ^2 . Para determinar os símbolos QPSK, o detector emprega

$$\hat{s}_n^I = \text{sign}(\text{Re}[x_n]), \quad (1.18)$$

$$\hat{s}_n^Q = \text{sign}(\text{Im}[x_n]). \quad (1.19)$$

A constelação de símbolos é invariante à troca de eixos. Assim podemos analisar a probabilidade de erro numa direção apenas. Façamos na parte real. Considerando que

$$\text{Re}[x_n^{CR}] = s_n^I(\cos \theta + \sin \theta) + u_n, \quad (1.20)$$

vemos que $\text{Re}[x_n^{CR}]$ é uma variável gaussiana com variância σ^2 cuja média depende de s_n^I e d . A probabilidade de erro neste caso é [16]

$$P(\text{Re}[x_n^{CR}] < 0) = Q\left(\frac{\cos \theta + \sin \theta}{\sigma}\right). \quad (1.21)$$

Assim, a BER do QPSK no esquema CR é (incluindo os dois eixos)

$$BER_{inf}^{CR} = \frac{1}{2}Q\left(\frac{\cos\theta + \sin\theta}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\cos\theta - \sin\theta}{\sigma}\right). \quad (1.22)$$

A marca d'água recebida pelo receptor é determinada por [16]

$$\hat{d} = \text{sign}((\text{Re}[x_n^{CR}])^2 - (\text{Im}[x_n^{CR}])^2). \quad (1.23)$$

Conforme [39], quando o bit da marca d'água for $d = 1$, espera-se que a localização do símbolo recebido de x_n^{CR} esteja na região sombreada da Figura 12. Caso contrário, quando $d = -1$, o símbolo recebido estarão posicionados fora da região sombreada. Para determinar a posição do símbolo recebido, quando $d = 1$, basta aplicar

$$z^{CR} = (\text{Re}[x_n^{CR}])^2 - (\text{Im}[x_n^{CR}])^2 = (2\cos\theta + w_n^+) + (2d\sin\theta + w_n^-), \quad (1.24)$$

onde $w_n^+ = a_n u_n + b_n v_n$ é uma variável aleatória gaussiana com média zero e variância $2\sigma^2$, $w_n^- = a_n u_n - b_n v_n$ é uma variável aleatória gaussiana com média zero e variância $2\sigma^2$. Portanto, temos que z^{CR} é uma variável aleatória controlada por d . Repara-se ainda que,

$$P(w_n^\pm < -2\sin\theta) = Q\left(\frac{2\sin\theta}{\sqrt{2}\sigma}\right), \quad (1.25)$$

$$P(w_n^\pm < -2\cos\theta) = Q\left(\frac{2\cos\theta}{\sqrt{2}\sigma}\right). \quad (1.26)$$

A probabilidade de erro quando $d = 1$ é

$$\begin{aligned} P(z^{CR} < 0) &= P(2\cos\theta + w_n^+ > 0)P(2\sin\theta + w_n^- < 0) \\ &\quad + P(2\cos\theta + w_n^+ < 0)P(2\sin\theta + w_n^- > 0). \end{aligned} \quad (1.27)$$

Logo, a probabilidade de erro do bit de marca d'água (assumindo as probabilidades de bits zero e um iguais) é

$$P(z^{CR} < 0) = Q\left(\frac{\sqrt{2}\sin\theta}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{2}\cos\theta}{\sigma}\right) - 2Q\left(\frac{\sqrt{2}\sin\theta}{\sigma}\right)Q\left(\frac{\sqrt{2}\cos\theta}{\sigma}\right). \quad (1.28)$$

As fórmulas de BER do QPSK para os três métodos podem ser unificados aplicando-se a intensidade da marca d'água da seguinte maneira

$$BER_{QPSK}^{UNI} = \frac{1}{2}Q(\sqrt{r}(\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{\alpha})) + \frac{1}{2}Q(\sqrt{r}(\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha})), \quad (1.29)$$

onde $r = \frac{1}{\sigma^2}$ é a razão sinal-ruído (SNR) para x_n^{CR} , $\sin \theta = \sqrt{\alpha}$ e $\cos \theta = \sqrt{1-\alpha}$. A imperceptibilidade da marca d'água de RF é indicada pelo desempenho de BER. Se o BER com a marca d'água for muito similar a sem marca, então a marca d'água é imperceptível [16,17], observado mais a frente no capítulo 3.

Já a BER do bit da marca d'água, no esquema CR é

$$BER_W^{CR} = Q(\sqrt{2r\alpha}) + Q(\sqrt{2r(1-\alpha)}) - 2Q(\sqrt{2r\alpha})Q(\sqrt{2r(1-\alpha)}). \quad (1.30)$$

Para compreender os efeitos do ângulo de marca d'água no esquema de Rotação de Constelação (CR), a Figura 13 ilustra as constelações resultantes; quanto maior for o ângulo mais dista o símbolo marcado do original.

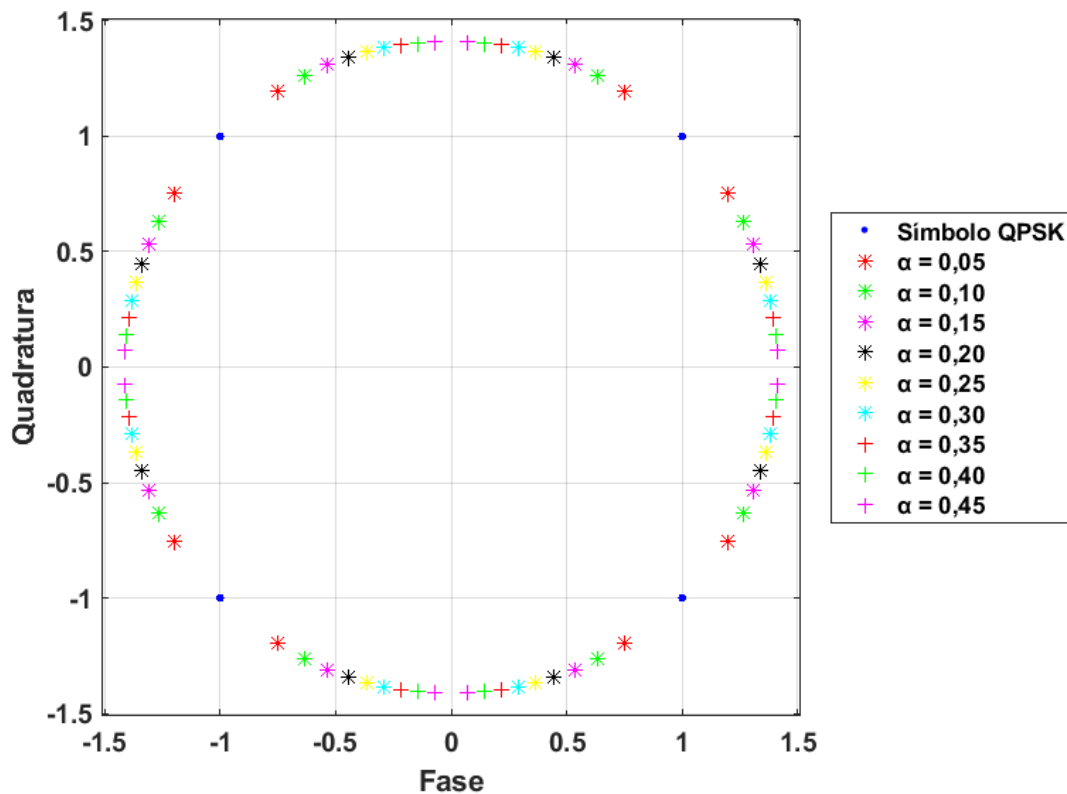


Figura 13: Defasagem da marca d'água usando o esquema CR para diversos valores de α em sinais QPSK.

1.3.2 Deslocamento de Constelação (CS–*Constellation Shifting*)

Neste caso, inserem-se dois bits de marca d'água por símbolo. O n -ésimo símbolo CS é determinado por

$$s_n^{CS} = \sqrt{1 - \alpha} s_n^I + d^I \sqrt{\alpha} + j(\sqrt{1 - \alpha} s_n^Q + \sqrt{\alpha} d^Q), \quad (1.31)$$

onde $d^I = \pm 1$ é o bit da marca d'água introduzido na fase, $d^Q = \pm 1$ é o bit da marca d'água introduzido na componente em quadratura do símbolo QPSK e α é a intensidade da marca d'água.

A Figura 14 apresenta a constelação do sinal do esquema resultante. Para esse modo de constelação os primeiros dois bits configuram os bits da modulação QPSK e os últimos dois bits são de marca d'água [16, 17]. Vemos que os bits de marca deslocam o símbolo em fase e quadratura. Observe que os símbolos de marca d'água são identificados com círculos de cores distintas, onde cada cor representa a mesma localização nos quadrantes. Se $\alpha \ll \frac{1}{2}$, a inserção da marca d'água tem pouco efeito na demodulação dos sinais.

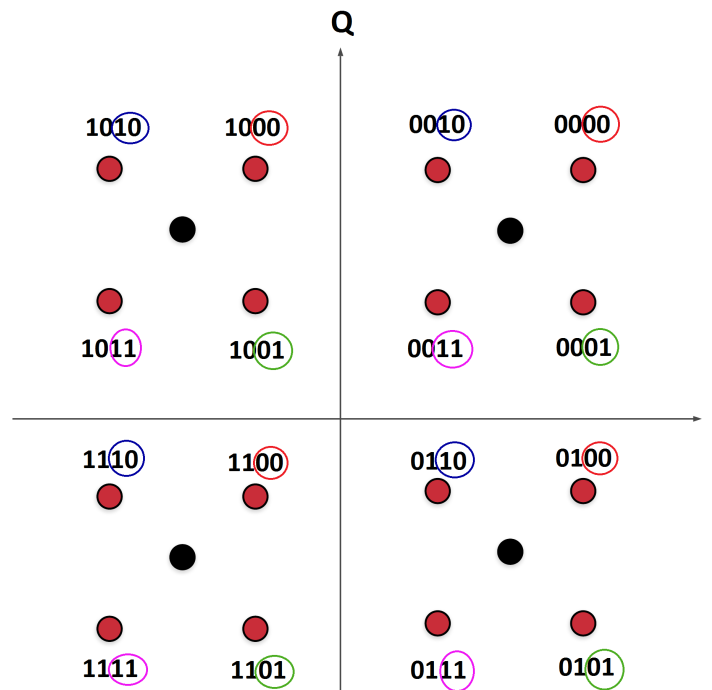


Figura 14: Exemplo da constelação do esquema CS. Adaptado de [16].

Neste esquema, também utilizam-se as equações (1.18) e (1.19) para determinar os

símbolos de QPSK. Como fizemos no caso do CR, para analisar a probabilidade de erro do símbolo QPSK basta analisar apenas a parte real. Temos que

$$\text{Re}[x_n^{CS}] = \sqrt{1-\alpha}s_n^I + d^I\sqrt{\alpha} + u_n, \quad (1.32)$$

onde a variável $\text{Re}[x_n^{CS}]$ é uma variável gaussiana com variância σ^2 e sua média depende de s_n^I e d^I . A probabilidade de erro é, então,

$$P(\text{Re}[x_n^{CS}] < 0) = Q\left(\frac{\sqrt{(1-\alpha)} + \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right) \quad (1.33)$$

Portanto, a fórmula de BER do símbolo QPSK no esquema CS é

$$\text{BER}_{inf}^{CS} = \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{(1-\alpha)} + \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right). \quad (1.34)$$

Conforme [16, 17], o detector dos bits de marca d'água deve empregar o símbolo estimado via

$$\hat{d}^I = \text{sign}(\text{Re}[x_n^{CS}] - \sqrt{1-\alpha}\hat{s}_n^I), \quad (1.35)$$

$$\hat{d}^Q = \text{sign}(\text{Im}[x_n^{CS}] - \sqrt{1-\alpha}\hat{s}_n^Q). \quad (1.36)$$

Como o demodulador de marca d'água depende do resultado de demodulação do símbolo QPSK, é difícil analisar a probabilidade de erro diretamente.

Analisemos a detecção do bit de marca d'água na parte real dos símbolos. A análise é realizada em cada zona de decisão, conforme:

$$\text{Se } \hat{s}_n^I = 1 \text{ e } \begin{cases} \text{Re}[x_n^{CS}] > \sqrt{1-\alpha} & \text{então } \hat{d}^I = 1, \\ \text{Re}[x_n^{CS}] < \sqrt{1-\alpha} & \text{então } \hat{d}^I = -1, \end{cases} \quad (1.37)$$

$$\text{Se } \hat{s}_n^I = -1 \text{ e } \begin{cases} -\sqrt{1-\alpha} < \text{Re}[x_n^{CS}] & \text{então } \hat{d}^I = 1, \\ \text{Re}[x_n^{CS}] < -\sqrt{1-\alpha} & \text{então } \hat{d}^I = -1. \end{cases} \quad (1.38)$$

Essa análise permite obter um detector equivalente

$$\hat{d}^I = \begin{cases} 1, & \text{se } \text{Re}[x_n^{CS}] \in (-\sqrt{1-\alpha}, 0) \cup (\sqrt{1-\alpha}, \infty). \\ -1, & \text{se } \text{Re}[x_n^{CS}] \in (0, \sqrt{1-\alpha}) \cup (-\infty, -\sqrt{1-\alpha}). \end{cases} \quad (1.39)$$

Desto forma o demodulador é independente de \hat{s}_n^I . A probabilidade de erro para $d^I = 1$ é então

$$P(\text{Re}[x_n^{CS}] \in (0, \sqrt{1-\alpha}) \cup (-\infty, -\sqrt{1-\alpha})) = \quad (1.40)$$

$$Q\left(\frac{\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right) - Q\left(\frac{2\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{\alpha}}{\sigma}\right),$$

e para $d^I = -1$ é

$$P(\text{Re}[x_n^{CS}] \in (-\sqrt{1-\alpha}, 0) \cup (\sqrt{1-\alpha}, \infty)) = \quad (1.41)$$

$$Q\left(\frac{2\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right) - Q\left(\frac{\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{\alpha}}{\sigma}\right).$$

Combinando os dois casos, podemos obter o BER do bit da marca d'água no esquema QPSK, denotado por

$$BER_W^{CS} = Q(\sqrt{r\alpha}) + \frac{1}{2}Q(\sqrt{r}(\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha})) - \frac{1}{2}Q(\sqrt{r}(\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{\alpha})) \quad (1.42)$$

$$+ \frac{1}{2}Q(\sqrt{r}(2\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{\alpha})) - \frac{1}{2}Q(\sqrt{r}(2\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha})).$$

A inserção de marca d'água por meio da técnica CS resulta nas constelações da Figura 15. Nessa figura, são apresentados exemplos para diferentes intensidades de marca d'água (α). Observa-se que quanto maior a intensidade da marca d'água, maior é a distância entre o símbolo com marca d'água e o símbolo QPSK original. Os símbolos contendo a marca d'água são simetricamente posicionados em torno do símbolo QPSK original.

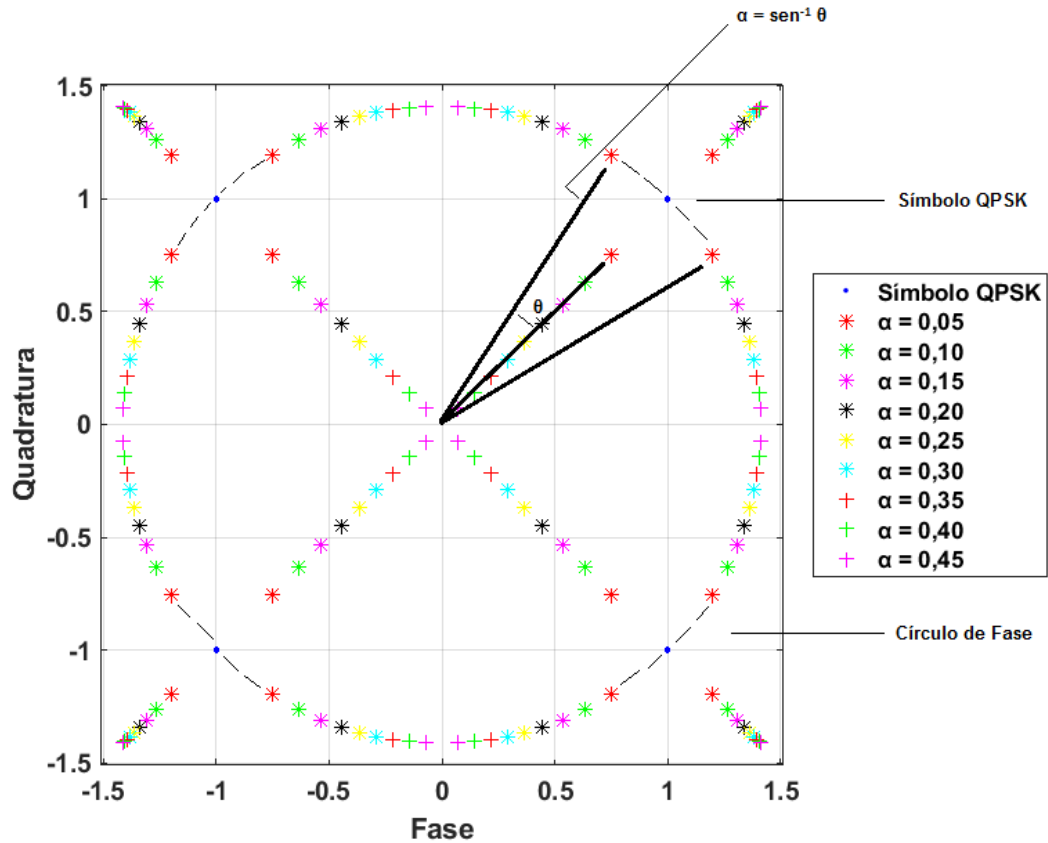


Figura 15: Defasagem da marca d'água para diversos ângulos na modulação QPSK no esquema CS.

1.3.3 Deslocamento de Constelação Aprimorado (ICS–*Improved Constellation Shifting*)

Neste caso, também inserem-se dois bits de marca d'água por símbolo. O ICS emprega o código Gray para os bits de marca d'água [16, 17]. O n -ésimo símbolo ICS é determinado por

$$s_n^{ICS} = s_n^I(\sqrt{1-\alpha} + d^I\sqrt{\alpha}) + js_n^Q(\sqrt{1-\alpha} + d^Q\sqrt{\alpha}). \quad (1.43)$$

O bit de marca d'água é incorporado pela operação multiplicativa e não pela operação aditiva. Observa-se que as equações (1.43) e (1.15) equivalem se $\sqrt{\alpha} = \sin \theta$, $\sqrt{1-\alpha} = \cos \theta$, $d^I = d$ e $d^Q = -d$. Portanto, podemos dizer que o esquema CR é um caso especial do esquema ICS. É possível notar que no ICS, símbolos adjacentes entre si comportam os mesmos bits de marca d'água, como ilustrado pelos retângulos na Figura 16. Nesse caso, ao se detectar equivocadamente um símbolo por outro de um mesmo retângulo, não há

erro na detecção dos bits de marca d'água. Isso torna o ICS mais robusto que o CS na detecção dos bits de marca d'água.

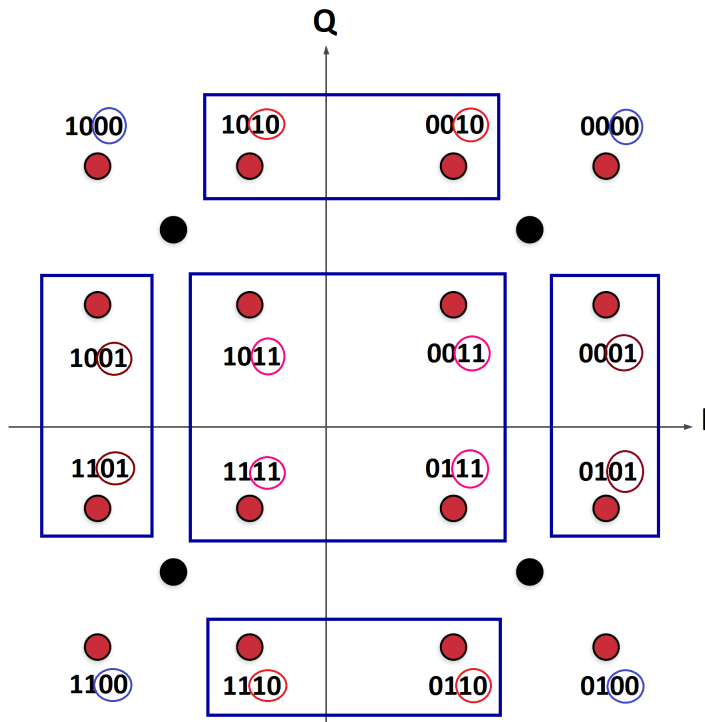


Figura 16: Exemplo da constelação do esquema ICS. Adaptado de [16].

Os símbolos QPSK são determinados também pela equações (1.18) e (1.19). Assim, a BER é a mesma da equação (1.34), logo

$$BER_{inf}^{ICS} = \frac{1}{2}Q \left(\frac{\sqrt{(1-\alpha)} + \sqrt{\alpha}}{\sigma} \right) + \frac{1}{2}Q \left(\frac{\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha}}{\sigma} \right). \quad (1.44)$$

Analogamente aos outros esquemas vistos, Os bits de marca d'água são determinados a partir de

$$\hat{d}^I = \text{sign}(\text{Re}[x_n^{ICS}] - \sqrt{1-\alpha}), \quad (1.45)$$

$$\hat{d}^Q = \text{sign}(\text{Im}[x_n^{ICS}] - \sqrt{1-\alpha}). \quad (1.46)$$

Assim, equivalentemente ao esquema CS, o demodulador ICS faz

$$\hat{d}^I = \begin{cases} 1, & \text{Re}[x_n^{ICS}] \in (-\infty, -\sqrt{1-\alpha}) \cup (\sqrt{1-\alpha}, \infty). \\ -1, & \text{Re}[x_n^{ICS}] \in (-\sqrt{1-\alpha}, \sqrt{1-\alpha}). \end{cases} \quad (1.47)$$

Temos então que a probabilidade de erro para $d^I = 1$ é

$$P(\text{Re}[x_n^{ICS}] \in (-\sqrt{1-\alpha}, \sqrt{1-\alpha})) = -Q\left(\frac{2\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{\alpha}}{\sigma}\right), \quad (1.48)$$

e para $d^I = -1$,

$$P(\text{Re}[x_n] \in (-\infty, -\sqrt{1-\alpha}) \cup (\sqrt{1-\alpha}, \infty)) = Q\left(\frac{\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha}}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{\alpha}}{\sigma}\right). \quad (1.49)$$

Combinando os dois casos, obtém-se a BER da marca d'água, através de

$$BER_w^{ICS} = Q(\sqrt{r\alpha}) + \frac{1}{2}Q(\sqrt{r}(2\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{\alpha})) - \frac{1}{2}Q(\sqrt{r}(2\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{\alpha})). \quad (1.50)$$

O esquema ICS apresenta a mesma constelação de símbolos (Figura 17) que o CS (Figura 15). Muda-se apenas a organização/mapeamento dos bits de marca d'água na constelação.

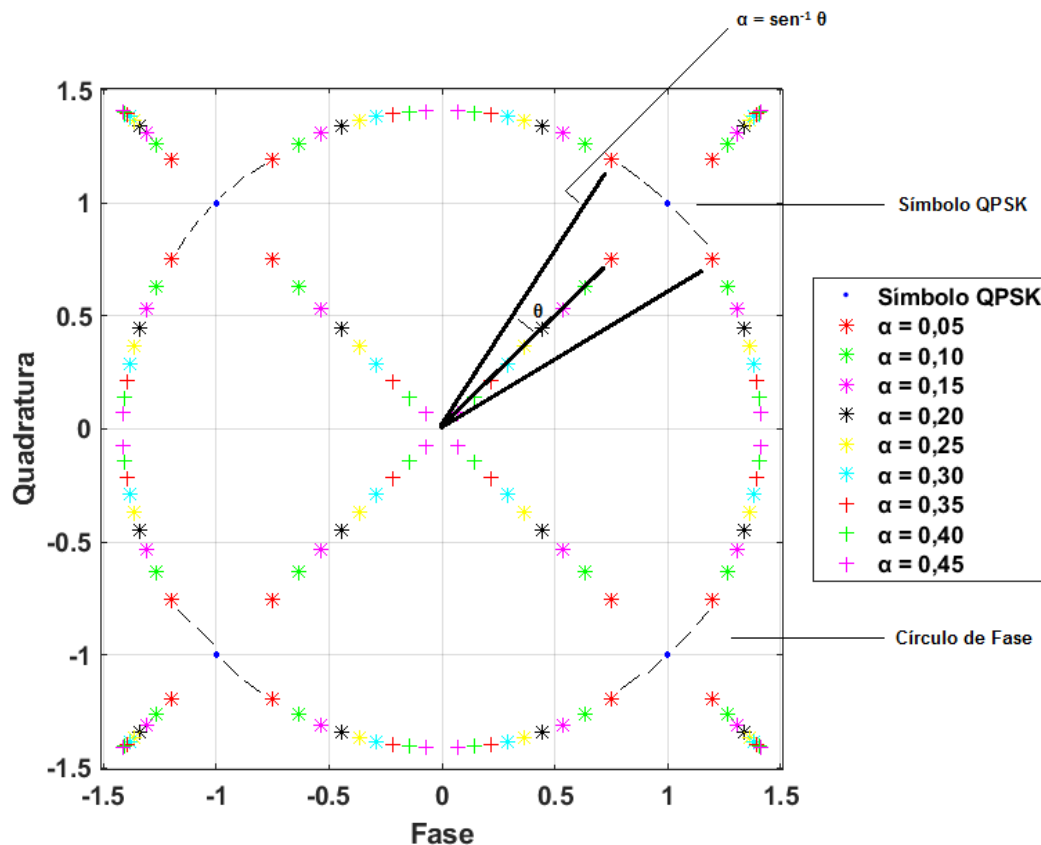


Figura 17: Defasagem da marca d'água empregando o ICS para diversos ângulos na modulação QPSK.

No capítulo seguinte, serão abordados alguns conceitos e aspectos sobre o sistema de portadoras múltiplas VLC. Além disso, o capítulo também trará uma abordagem sobre o comportamento da marca d'água aplicada no sistema ACO-OFDM.

2 MARCA D'ÁGUA EM SISTEMAS VLC MULTIPORTADORAS

Com o crescimento dos serviços e aplicativos sem fio, a necessidade de conexões de transmissão de dados rápidas e seguras deu origem a novas soluções técnicas. A tecnologia VLC (*Visible Light Communication*) é uma nova tecnologia de comunicação sem fio muito promissora [19, 40–44].

Neste trabalho, propomos utilizar o sistema de comunicação de LED baseado em BPSK-ACO-OFDM aplicado à técnica de marca d'água e as três técnicas de marca d'água para o sistema VLC baseado na modulação QPSK-ACO-OFDM. A sequência de marca d'água óptica contendo os dados de informações é transferida sobre os dados VLC originais, de forma que ambas as informações sejam enviadas simultaneamente, sendo mais eficiente em largura de banda. Neste capítulo, abordamos sistemas VLC e discutimos alguns aspectos relevantes desses sistemas como: arquiteturas de sistema, características, cenários de aplicação, características de transmissor e receptor, modelo do LED, modelo do canal, inserção de marcas d'águas em sistemas VLC.

2.1 Sistemas de Comunicação por Luz Visível (VLC)

Apesar do recente interesse em VLC, sistemas de comunicação baseados em luz já eram empregados há tempos, porém de forma rudimentar. Um exemplo de sistema funcional de Comunicação por Luz Visível foi registrado na Grécia Antiga. O historiador Políbio desenvolveu um sistema de comunicação em que sinais de fogo eram usadas para a troca de informações, estabelecendo-se um acordo entre o emissor e o receptor, e o alfabeto foi representado por um conjunto de dois dígitos e cinco níveis [42]. Outro exemplo de sistemas de comunicação visível é o uso de bandeiras de cores diferentes para sinalizar informações entre cidades ou tropas. Outra é a utilização de faróis que apontam a costa para navios. Embora o uso de bandeiras exija luz solar, os faróis podem ser vistos no escuro, pois emitem luz. Abordagem semelhante é usada por semáforos de tráfego. Esses são alguns exemplos de comunicações baseadas em (ou usando) luz visível [19, 40–42, 45].

Os exemplos acima podem ser categorizados de uma maneira sofisticada como *Optical Wireless Communications* (OWC), ou seja, comunicações sem fio através de tecnologia óptica. Atualmente, é comum referir-se por OWC principalmente aos sistemas de comunicações por ondas no espectro infravermelho (IR-*infrared*) tanto para comunicações

ópticas de curto alcance como para a comunicação através do espaço livre (FSO–*Free Space Optics Communication*) para enlaces de longo alcance.

A Comunicação por Luz Visível (VLC) visa enviar dados por meio da modulação de ondas de luz do espectro visível, com comprimento de onda entre 380 nm e 750 nm, correspondendo ao espectro de frequências entre 430 THz a 790 THz. A Figura 18 apresenta o intervalo do espectro eletromagnético, desde as baixas frequências, onde estão localizadas as ondas de rádio, até as frequências mais altas, onde se situa a radiação gama [24, 42].

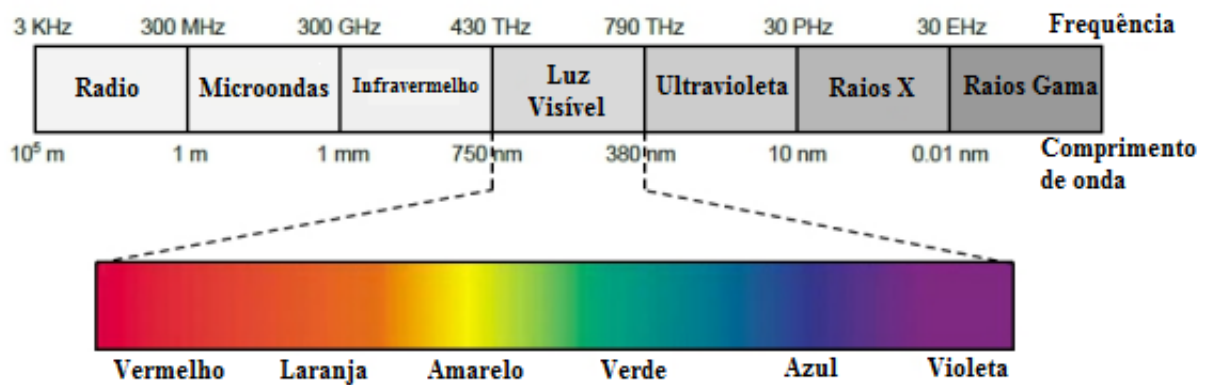


Figura 18: Espectro eletromagnético [42].

Em sistemas VLC, objetiva-se transferir dados de forma imperceptível à visão humana, ou seja, de forma que a iluminação pareça regular no ambiente não produzindo alteração perceptível por seres humanos. A Figura 19 mostra um exemplo desse ambiente.

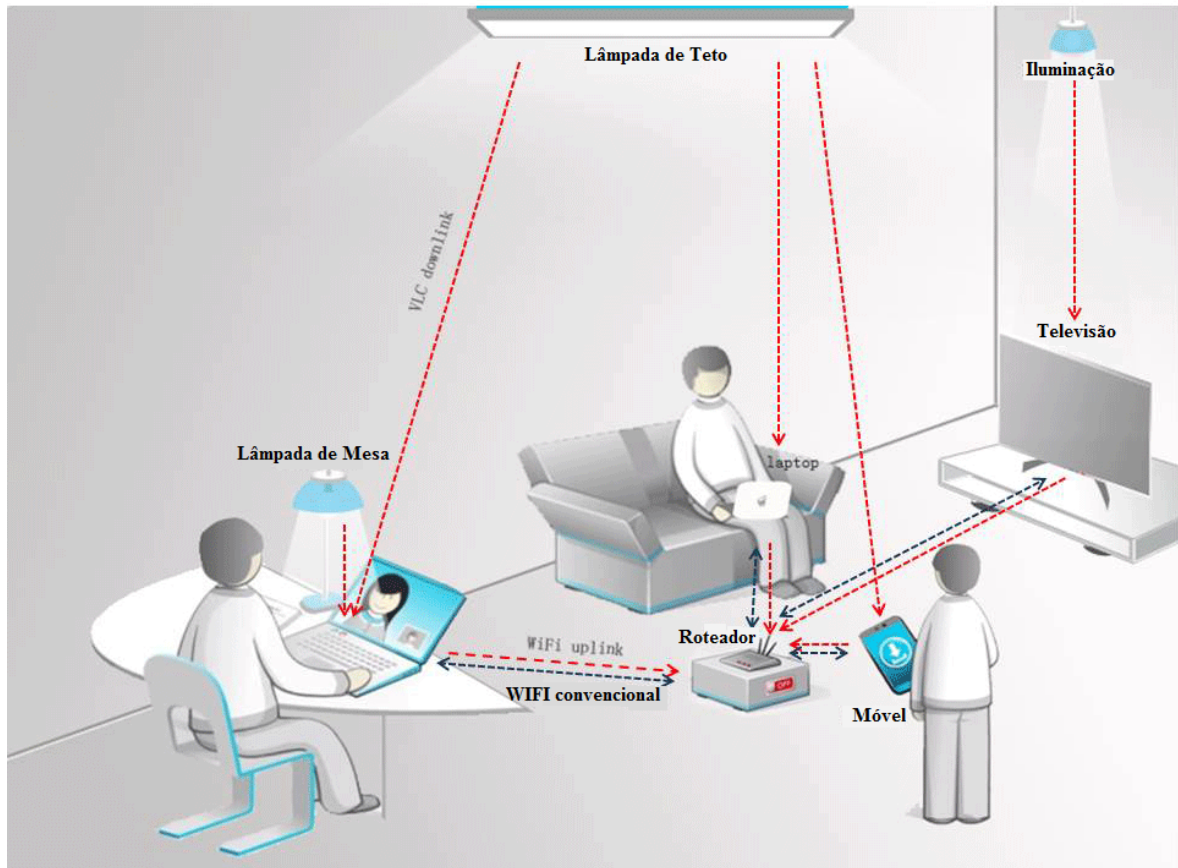


Figura 19: Luz visível como meio de comunicação entre diferentes dispositivos sem fio [40].

É importante destacar que a Comunicação por Luz Visível é uma tecnologia bastante promissora, visto que a implementação de sistemas VLC está ligada à rápida e crescente aceitação de LEDs para iluminação em todo o mundo e a iminente iluminação inteligente [43]. Atualmente, muitos pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento de sistemas de iluminação usando LEDs [19, 43, 44]. A iluminação por LED pode consumir menos energia com vida útil mais longa do que lâmpadas incandescentes e fluorescentes [44]. Um sistema VLC pode utilizar a infraestrutura de sistemas de iluminação artificial, oferecendo um recurso confiável e econômico para empregar esta tecnologia em aplicações internas.

O aumento da capacidade de conexão do VLC fio pode satisfazer a demanda por conexões sem fio, fornecendo métodos alternativos de comunicação e reduzindo a demanda pelo espectro de radiofrequência (RF) para aplicações sem fio. Sistemas VLC podem ser usados como alternativa em áreas onde os sinais de RF são percebidos como com potencial perigo de interceptação ou personificação, já que sistemas VLC fornecem uma cobertura

restrita a ambientes internos [46]. A luz é incapaz de atravessar paredes opacas, e com isso torna-se mais fácil confinar os sinais em uma única sala, aumentando o nível de segurança da rede [46]. Muitos enlaces VLC podem coexistir próximos uns dos outros sem interferência, ou seja, permitindo a reutilização do meio e do espectro em salas diferentes ou até mesmo em distâncias curtas, aumentando o volume potencial de informações transmitidas por unidade de área.

O transmissor e o receptor em sistemas VLC geralmente consistem em três camadas comuns. Eles são a camada física, a subcamada MAC (*Media Access Control*) e a camada de aplicação [42]. O modelo de referência do sistema de comunicação VLC é mostrado na Figura 20. A camada de aplicação lida com todas as funções relacionadas à interface do usuário da web. A subcamada MAC é responsável por oferecer suporte à mobilidade, suporte de dimerização, visibilidade, segurança e esquemas de mitigação de oscilação e outras funções. A camada física fornece uma forma de enlace físico ou especificação entre o dispositivo e o meio de espaço livre. A camada física é responsável por enviar e receber, ativar e desativar o módulo óptico, e detectar de acordo com o estado ocioso ou ocupado do canal de transmissão [47].

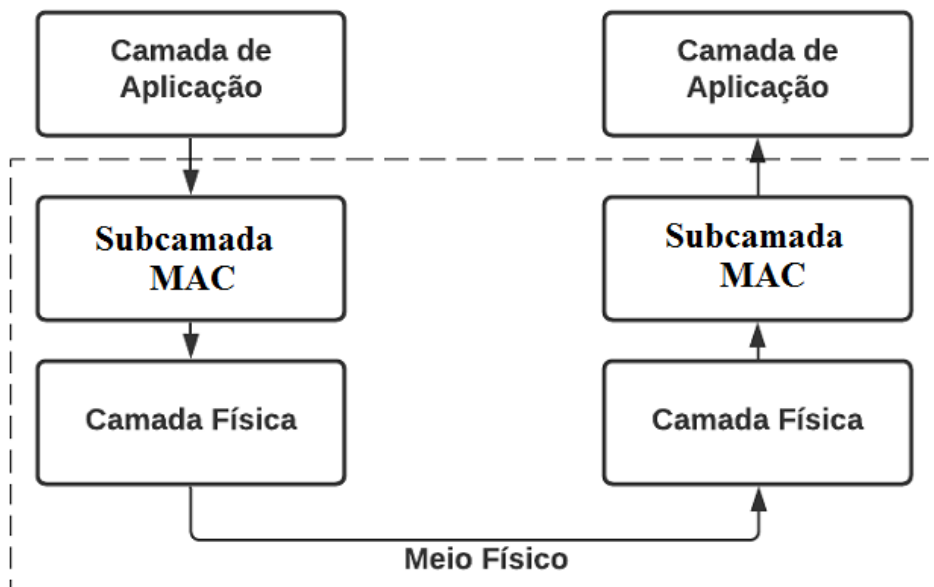


Figura 20: Arquitetura em camadas do VLC [42].

2.1.1 Sobre o meio físico

A camada física é responsável pelo transporte de dados por um meio físico. A camada física especifica e define aspectos dos sinais que trafegam pelo meio, seus envios, o estabelecimento da comunicação, envolvendo elementos da interface eletrônica e de sincronização. A camada física em sistemas VLC emprega a luz como meio de transporte de dados. Alguns desafios neste cenário são as condições atmosféricas que reduzem consideravelmente a intensidade da luz, especialmente, quando ela se propaga através de uma névoa densa. Além disso, sistemas VLC devem visar altas taxas de dados. Eles têm ainda requisitos em função de que a luz pode ser percebida por humanos e devem mitigar a cintilação e, em alguns casos, operar sob escurecimento [19].

Em modelos de referência padrão, como o OSI, a camada física é a responsável pela transmissão de dados através de um canal de comunicação. Na Comunicação por Luz Visível as camadas superiores enviam os dados para as camadas inferiores, até a camada física que envolve todos os processos associados a transmissão desses dados pelo meio físico, ou seja, a luz. Alguns aspectos que influenciam o projeto da camada física de sistemas VLC são:

- Fluxo luminoso - Um sistema VLC precisa considerar que as lâmpadas LED, quando usadas para VLC, apresentam duas funções principais: iluminação e comunicação. É necessário entender os requisitos em termos de brilho para que a comunicação ocorra de forma satisfatória. Os parâmetros fotométricos determinam características da luz, como brilho e cor. Por meio desses parâmetros, podemos calcular o fluxo luminoso, que representa a quantidade de energia da luz emitida.
- Ambiente de Propagação - Em ambientes internos, geralmente, existem vários transmissores, como lâmpadas de LED e superfícies que podem refletir a luz. Portanto, é importante compreender o impacto da luz refletida em sistemas VLC.
- Interferência - A interferência é um fator importante a ser considerado para o desempenho da comunicação. Em um ambiente externo, por exemplo, a luz do sol pode causar falha do sistema VLC ou degradar o sinal significativamente devido à interferência da luz, nesse caso, os filtros podem ser usados para evitar a saturação do fotossensor.

As técnicas de modulação convencionais adotadas em sistemas de RF não podem ser prontamente aplicadas em sistemas VLC, dado que, para a luz, não é possível codificar dados modificando a fase, frequência e a amplitude da onda [19]. Portanto, a informação deve ser transmitida através da variação da intensidade da onda de luz emitida. E, ela deve ser recuperada no receptor por detecção direta [19]. Esta estrutura de modulação VLC é geralmente referida como modulação de intensidade e detecção direta (IM/DD). A maioria dos sistemas VLC empregam IM/DD tanto para aplicações externas como internas [19].

A princípio, a comunicação não deve ser afetada quando alguém escolhe arbitrariamente o nível de iluminância local. Por exemplo, escritórios individuais e salas de conferência precisam de níveis mais altos de iluminância quando comparadas às áreas de circulação, como corredores e escadas [19]. Em segundo lugar, a comunicação não deve implicar flutuações perceptíveis no brilho da luz. A cintilação pode provocar alterações fisiológicas em humanos, levando a dores de cabeça e tonturas. Pessoas que sofrem de fotoepilepsia e enxaqueca são mais sensíveis a essas flutuações de brilho [19]. Todas essas restrições precisam ser consideradas ao escolher um esquema de modulação para sistemas VLC [19].

2.1.2 Sobre transmissores

Um transmissor VLC consiste basicamente de uma fonte da luz. Nos últimos anos houve o desenvolvimento de novas fontes de iluminação usando dispositivos de estado sólido que não utilizam filamentos elétricos. Com a crescente adoção da iluminação baseada em LEDs, a possibilidade de usar essas fontes de luz para fornecer o último salto da informação tem tido apelo. Espera-se que tais fontes de luz substituam as lâmpadas incandescentes e fluorescentes, pois duram mais, são livres de mercúrio, podem misturar diferentes cores com maior facilidade, alternar mais rapidamente, dentre outras características [19].

Lâmpadas LED são superiores às fontes de luz incandescente e fluorescente em termos de confiabilidade, consumo de energia e eficiência luminosa. Essa eficiência, bem como a possibilidade de ajustes e conversão de comprimentos de onda emitidos e modulação da luz emitida as tornam adequadas para um transmissor VLC [48].

O LED é o elemento que realiza a conversão de energia elétrica para óptica. Esse

conversão ocorre em duas etapas: conversão de tensão para corrente (V-I) e corrente para luz (óptica) (I-O).

A tensão no LED deve estar acima da sua tensão de ativação (TOV - *Turn-On Voltage*) para uma operação adequada. Para adequado funcionamento dos dispositivos e equipamentos, a corrente do LED deve ser ainda restrita a um valor máximo (i_{\max}) [20]. A Figura 21 mostra a característica geral de entrada-saída do LED, que enfatiza a tensão de entrada mínima permitida (TOV - *Turn-On Voltage*) e a corrente de saída máxima (i_{\max}) [40], onde o eixo de entrada (In) representa a tensão aplicada ao LED e o eixo de saída (out) representa o fluxo luminoso aplicado ao sistema.

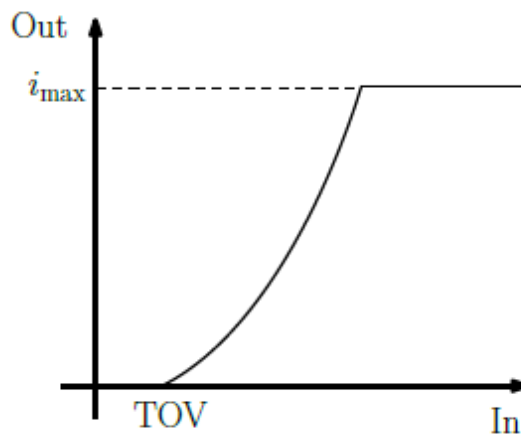


Figura 21: Característica de entrada-saída não linear do LED [19].

Um modelo para o comportamento não linear do LED com limitação de corrente para fluxo luminoso emitido foi proposto em [40]

$$f_{LED}(v) = \begin{cases} h(v), & \text{se } v \geq 0 \\ 0, & \text{se } v < 0 \end{cases}, \quad \text{com} \quad (2.1)$$

$$h(v) = \frac{i(v)}{\left(1 + \left(\frac{i(v)}{i_{\max}}\right)^{2k}\right)^{\frac{1}{2k}}}. \quad (2.2)$$

na qual f_{LED} é a corrente através do LED, v é a tensão no LED e $h(v)$ é descrito pela equação (2.2). Esse modelo descreve amplificadores de potência e baseia-se no modelo Rapps [40]. O parâmetro k é escolhido conforme a suavidade da curva seja, valores altos

de k tornam a curva menos suave [40]. Acima, $i(v)$ é a característica I-V do LED, em geral, disponível em manuais de dispositivos, e modelada via

$$i(v) = I_s(\exp^{\frac{s}{V_t}} - 1) \quad (2.3)$$

onde I_s é a corrente de obtida na informação do LED, s é a informação OFDM de entrada e V_t é a tensão de entrada mínima permitida (TOV).

2.1.3 Sobre o receptor

Os receptores para sistemas VLC geralmente consistem de um filtro óptico, concentradores ópticos e um circuito de amplificação [19]. A luz emitida pelo transmissor é geralmente fraca quando incide no receptor devido à divergência dos feixes emitidos. O concentrador óptico permite “amplificar” o sinal ótico coletando mais feixes. Esses incidem sobre um fotodiodo, que os capta e detecta, convertendo-os em corrente [48], a fotocorrente.

Sistemas VLC são vulneráveis a interferências como, por exemplo, a luz solar. Em vista disso, filtros ópticos são adicionados com o propósito de atenuar as interferências [48]. Sensores de imagem (com múltiplos fotosensores) podem ser usados para casos em que a mobilidade é necessária, contudo, têm resposta mais lenta e consomem mais energia [48].

2.1.4 Modelo do canal VLC

Ao se propagarem, as ondas de rádio estão sujeitas a reflexões no solo e na atmosfera que provocam alterações na sua amplitude e caminho percorrido ocasionando variações na potência do sinal recebido. Estas variações são chamadas de desvanecimento (*fading*). O desvanecimento pode ser causado também por obstáculos na linha de visada direta [49].

Devido ao desvanecimento do espaço livre, o sinal recebido tem uma potência menor do que o transmitido e com isso os efeitos não lineares do fotodetector podem ser desconsiderados [20]. Como vimos, o LED introduz uma distorção não linear entre a tensão a ele aplicada e a luz emitida. Além da distorção não linear do LED, o sinal recebido também apresenta ruído térmico eletrônico.

Em alguns sistemas de transmissão, a propagação dos sinais entre o emissor e o receptor faz-se por vários percursos simultâneos, tal como acontece na fibra óptica multi-

modo. Uma vez que as diferentes partes da energia do sinal emitido se propagam por caminhos com um comprimento total diferente uns dos outros, as diferentes partes do sinal atingem o receptor em instantes de tempo diferentes [50]. O sinal recebido é assim uma soma das diferentes componentes que percorreram percursos diferentes. O resultado é um “espalhamento” no tempo da energia do sinal. A este fenómeno chama-se dispersão. Os efeitos da dispersão são semelhantes aos produzidos pelas limitações de largura de banda do meio de transmissão, resultando em interferência-entre-símbolos [50].

O modelo utilizado nesse trabalho para o canal VLC é baseado em [20] e desconsidera a dispersão de multipercurso. Ele é representado por

$$y = f_{\text{LED}}(v) + w, \quad (2.4)$$

onde y é o sinal no receptor, v é o sinal transmitido e w é um ruído AWGN com média zero e variância σ_w^2 .

Cumprе observar que embora o canal interno (equação (2.4)) possa ser muito bem-comportado, a fumaça e a neblina podem prejudicar gravemente a VLC, pois obstruem e desviam a luz. Como qualquer outro sistema de comunicação, um sistema VLC também está sujeito a ruído e interferências. Em ambientes internos, as principais fontes de interferências são outros dispositivos de iluminação, como lâmpadas incandescentes e fluorescentes, ou mesmo sistemas VLC concomitantes. Essas fontes podem até impossibilitar o uso do enlace VLC, dependendo da razão entre as potências do sinal e o interferente. Em um cenário externo, a luz do sol aparece como um grande fonte de ruído [19].

2.2 OFDM

A modulação multiportadora, em particular o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), tem sido aplicada com sucesso a uma ampla variedade de sistemas de comunicação digital nos últimos anos. OFDM tornou-se um esquema popular para comunicação digital de banda larga, usado em aplicações como televisão digital e transmissão de áudio, acesso à Internet DSL, redes sem fio, redes de energia e comunicações móveis 4G / 5G [51]. A técnica OFDM é utilizada em sistemas de comunicação de banda larga com e sem fio porque é eficaz em reduzir a interferência intersimbólica (*ISI – Intersymbol Interference*) causada por um canal dispersivo. Assim, o OFDM é capaz de acomodar

altas taxas de transmissão com equalização simples [51].

Um princípio chave para o êxito do OFDM é a modulação a uma taxa de símbolos baixa (por exemplo quando os símbolos são relativamente longos comparados às características de tempo do canal) que é menos suscetível a interferência entre símbolos causada por multipercurso. Torna-se assim mais vantajoso transmitir simultaneamente mais de um fluxo de símbolos a baixas taxas em paralelo do que transmitir apenas um fluxo a alta velocidade. Desde que a duração de cada símbolo seja longa, é possível ainda inserir um intervalo de guarda entre os símbolos OFDM, eliminando a interferência entre símbolos. Esse intervalo de guarda também elimina a necessidade de um filtro de pulso, e reduz a sensibilidade a problemas de sincronização [51].

Em um sistema convencional de transmissão, os símbolos são enviados em sequência através de uma única portadora, cujo espectro ocupa toda a faixa de frequência disponível. A ideia básica do OFDM consiste em dividir os bits em diversos fluxos de taxa menor, que serão transmitidos por subcanais paralelos. Como consequência, o tempo de cada símbolo é maior, tornando o sinal menos sensível a ruídos, a efeitos de múltiplos caminhos e a ISI. Estes fluxos de bits devem ser transmitidos por subcanais em frequências ortogonais, para que não haja interferência mútua [52].

A técnica OFDM pode ser compreendida como uma variante/evolução da Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM – *Frequency Division Multiplexing*) usada em diferentes sistemas de comunicação. No sistema FDM, as portadoras estão espaçadas de modo a serem recebidas utilizando filtros convencionais. No entanto, bandas de guarda têm que ser introduzidas entre as portadoras, o que resulta em uma diminuição da eficiência espectral, que se refere à taxa de bits que pode ser transmitida através de uma determinada largura de banda em um sistema de comunicações. Por outro lado, o OFDM emprega portadoras ortogonais entre si permitindo eliminar o intervalo de guarda, como mostra a Figura 22 [51].

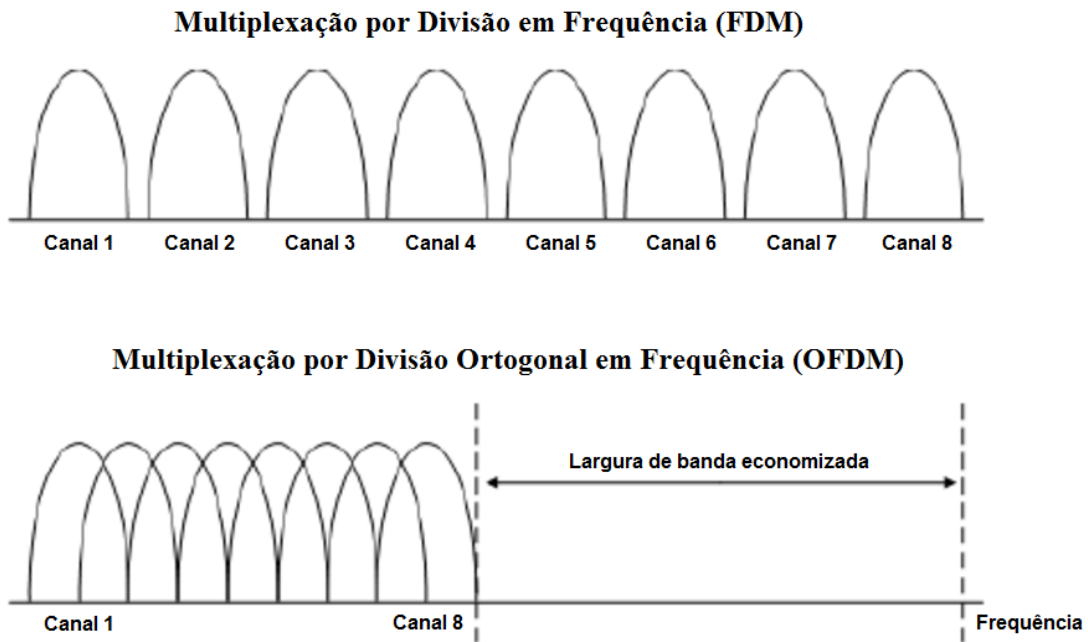


Figura 22: Comparação do esquema de modulação OFDM com o FDM. Adaptado de [22].

A Figura 23 ilustra o espectro de uma (esquerda) e de múltiplas subportadoras OFDM sobrepostas (direita). É possível notar que o máximo de cada subportadora coincide com zeros das demais. Isso garante a inexistência de interferência entre canais adjacentes [51–53].

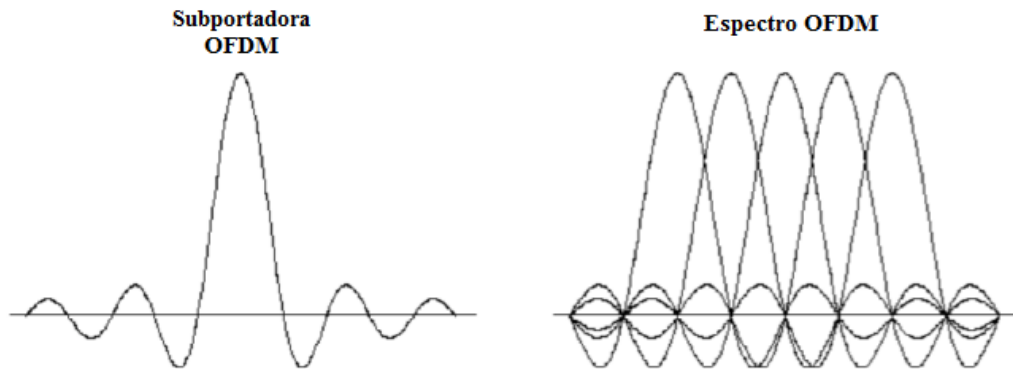


Figura 23: Subportadora OFDM e espectro OFDM. Adaptado de [22].

Para gerar o símbolo OFDM, os bits a serem transmitidos são codificados nas subportadoras correspondentes alterando suas fases e ou amplitudes (usando QPSK ou QAM), isto é, são codificados no domínio da frequência. Utiliza-se a Transformada de Fourier Discreta (DFT - *Discrete Fourier Transform*) para gerar o símbolo OFDM no tempo, combinando os diversos subcanais (subportadoras) paralelos [52]. Uma vantagem

dessa abordagem é a facilidade de implementação computacional eficientemente desse processo através da FFT - *Fast Fourier Transform*.

Após (ou antes de) cada símbolo OFDM, há um intervalo de tempo de guarda, permitindo que, se houver dispersão temporal no canal, o símbolo não interfira no seguinte, evitando a interferência inter-simbólica (ISI – *Inter-Symbol Interference*). Visando mitigar a ISI dentro do próprio símbolo, o intervalo de guarda é implementado temporalmente no início do símbolo com a adição de um prefixo cíclico (a repetição de um pedaço do final do símbolo OFDM no início do mesmo). Embora implique em gasto de potência e ocupação do canal no tempo, reduzindo assim a eficiência, esta abordagem reduz o problema da ISI dentro de um símbolo OFDM.

Devido a sua capacidade de realizar a equalização de canal por um receptor de baixíssima complexidade, o OFDM tornou-se uma técnica amplamente adotada por sistemas de comunicação sem fio; ela é empregada pelos padrões 4G, WiFi, WiMax e 5G. Assim, visando integração e compatibilização com esses diferentes padrões, surgiram as propostas de OFDM óptico.

No OFDM convencional (não óptico), os sinais transmitidos são bipolares e complexos, como observado no Capítulo 1. Mas, sinais bipolares não podem ser transmitidos em um sistema óptico IM/DD, porque a intensidade da luz não pode ser negativa. Isto é, os sinais OFDM projetados para sistemas IM devem ser reais e não negativos.

Assim, surgiram formas para acomodar o OFDM à IM para VLC; dentre esses temos o OFDM óptico assimetricamente cortado (ACO-OFDM – *Asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing*) e OFDM óptico polarizado DC (DCO-OFDM – *Direct-current biased orthogonal frequency division multiplexing*) [19, 20, 52].

As variantes *Optical-OFDM* (O-OFDM) tornam o símbolo do domínio do tempo real e não negativo, conforme exigido para sistemas VLC. Para isso, força-se a simetria Hermitiana ao símbolo OFDM no domínio da frequência tal que o símbolo no domínio do tempo é real. No OFDM óptico de polarização DC (DCO-OFDM), uma polarização DC é adicionada para forçar um nível de intensidade (positivo) suficiente ao sinal resultante [54]. Devido à sua alta eficiência espectral, ACO-OFDM tem sido explorado na área de comunicações por fibras ópticas e VLC [55]. O ACO-OFDM reduz a sensibilidade do receptor a distorções gerais, com eficiência espectral e robustez contra dispersão cromática e de polarização [53].

2.3 Inserção de marcas d'água em sistemas VLC

A Figura 24 ilustra o modelo de transmissão implementado neste trabalho que insere a marca d'água em esquemas de modulação BPSK/QPKS sobre o ACO-OFDM. Esta estrutura transmite dados adicionais de marca d'água, não tendo aumento de banda, em um sistema de comunicação de LED baseado em OFDM. A técnica de marca d'água para transmitir informações adicionais no sistema LED é obtida por meio do processo de inserção e restauração do sinal adicional gerado por meio de propagação do sinal óptico do sistema existente no sinal de LED existente. Uma consideração importante no processo de inserção em um sinal de LED é que o sinal de marca d'água deve ser definido dentro de uma faixa que não afete o desempenho do sinal óptico existente.

O ACO-OFDM é uma modulação particularmente atraente, pois tem melhor eficiência energética do que qualquer esquema de modulação IM/DD e é mais eficiente em termos de potência óptica média para constelações de tamanho pequeno [52].

Os bits (dados VLC) modulam as subportadoras usando mapeamento BPSK/QPSK. O transmissor, o LED, transmite as informações onde tenha um efeito muito pequeno no sinal OFDM. A sequência de N portadoras (o símbolo OFDM) é paralelizada (conversor serie-paralelo – S/P), a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) converte o sinal vetorial no domínio da frequência em um sinal vetorial no domínio do tempo e serializado (P/S) para aplicação no canal.

Para garantir que o sinal no domínio do tempo seja real e positivo, impõe-se às subportadoras ACO-OFDM simetria Hermitiana. Além disso, apenas as subportadoras ímpares contêm dados modulados. Isto é, o ACO-OFDM utiliza apenas as subportadoras ímpares para transportar os dados. As subportadoras pares serão zeradas. Assim o sinal após a IFFT tem polarização positiva, atendendo assim os requisitos da modulação IM/DD. Isso permite restringir o sinal de saída a valores positivos antes da aplicação à fonte luminosa valores negativos são ceifados em zero (*zero clipping*), mas tal corte afeta apenas as subportadoras pares. Como o ACO-OFDM só emprega as subportadoras ímpares para transportar símbolos, não há nenhum efeito sobre os recursos usados para transmissão [19].

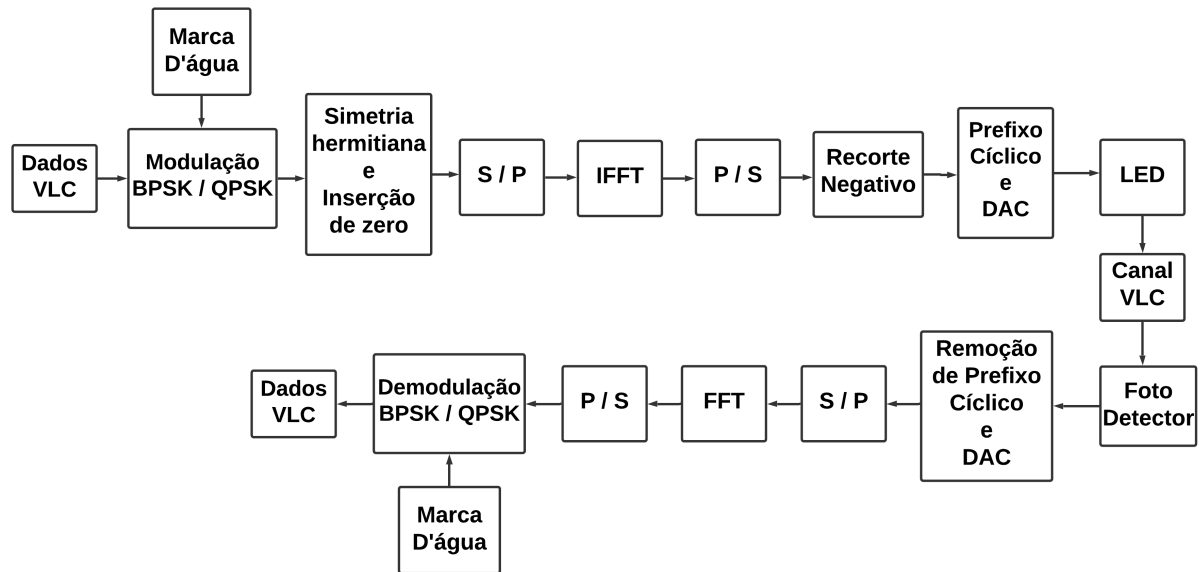


Figura 24: Modelo de transmissão BPSK/QPSK-OFDM com marca d'água no sistema VLC.

Seja o vetor/sinal na entrada da IFFT, designado por \mathbf{X} . Ele é não-nulo apenas nas posições ímpares e apresenta simetria Hermitiana, tendo a estrutura

$$\mathbf{X} = [0 \quad X_0 \quad 0 \quad \dots \quad X_{N-1} \quad 0 \quad X_{N-1}^* \quad 0 \quad \dots \quad X_0^* \quad 0]^T, \quad (2.5)$$

sendo X^* , o conjugado de X .

O sinal resultante é

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}^T \mathbf{X}, \quad (2.6)$$

onde \mathbf{W} é a matriz DFT que é então serializado e o CP é adicionado antes de aplicarmos a conversão do domínio digital para o analógico (D/A), obtendo $x(t)$.

O sinal $x(t)$ é aplicado ao LED e convertido em um sinal óptico de intensidade proporcional à corrente elétrica de entrada que depende de $x(t)$. Após a propagação do sinal óptico o receptor detecta os dados de posicionamento e são extraídos do sinal recebido. O receptor restaura os dados de informações de marca d'água por um meio de determinação e detecção da informação após o processamento usando um código de referência. As técnicas apresentadas de marca d'água têm a vantagem de ser possível construir um sistema de transmissão de informação adicional a um custo mínimo sem usar recursos adicionais no sistema existente, e é um método que maximiza a eficiência no ambiente de recursos existente. O sinal de marca d'água deve ter uma energia pequena

para que não afete o sinal OFDM-VLC original.

A seguir, serão apresentados a análise dos resultados obtidos a partir do método de inserção de marca d'água em esquemas de modulação BPSK e QPSK usando curvas de taxa de erro de bit (BER) teórica e simulada em função da relação sinal-ruído (SNR) e em sistemas de comunicação por luz visível (VLC) baseados em modulação multi-portadora OFDM.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, avaliamos o desempenho da inserção de marcas d'água nas modulações BPSK e QPSK. O desempenho é avaliado em termos da taxa de erro de bits de informação (BER_{inf}) e da taxa de erro de bits dos bits de marca d'água (BER_w) em função da razão sinal ruído (SNR) considerando um canal AWGN. No esquema BPSK, o desempenho da técnica CR é estudado. No esquema QPSK, o desempenho das técnicas CR, CS e ICS é estudado. Aplicam-se ainda esses métodos em sistemas de VLC. As marcas d'água inseridas usando os diferentes métodos analisados podem ser usadas para autenticação na camada física em um trabalho futuro. As análises de desempenho, através da curva de $BER \times SNR$, são simuladas usando o software Matlab[®].

3.1 Parametrização da curva do LED

Como vimos na Subseção 2.1.4, em sistemas ópticos, o LED é a principal fonte de não linearidade. A Figura 25 ilustra o comportamento da saída óptica em função da corrente que atravessa o LED, conforme o modelo na Subseção 2.1.4. No ACO-OFDM, o sinal OFDM é unipolar transmitindo 25 símbolos apenas nas subportadoras ímpares e cortando as amostras no ganho. Nota-se que as curvas distintas para cada tipo de LED apresentado possui níveis de saturação diferente.

Para a escolha do LED a ser utilizado, fez-se o uso daquele que apresentasse as seguintes condições: menor taxa de erro de bit e mais próximo da curva linear. Para a avaliação, três tipos diferentes de parâmetros são usados, a saber: para o LED1 usamos, $Vt = 0,5$; $Is = 0,12$; $k = 0,7$ e $i_{max} = 0,5$. Para o LED2 usamos, $Vt = 0,5$; $Is = 0,3$; $k = 0,5$ e $i_{max} = 0,5$. Para o LED3 foram utilizados $Vt = 0,5$; $Is = 0,4$; $k = 0,5$ e $i_{max} = 0,5$. Em todas as curvas, aplica-se o desvio de fase da marca d'água $\theta = 45^\circ$. Dentre as curvas apresentadas, foi escolhido para todas as simulações o LED3. Poderia escolher qualquer uma das curvas, mas para aprofundar a análise, foi escolhido o LED3 porque se espera o mesmo comportamento para os demais LEDs. A curva de LED3 é que mais se aproxima da reta para valores pequenos de amplitude.

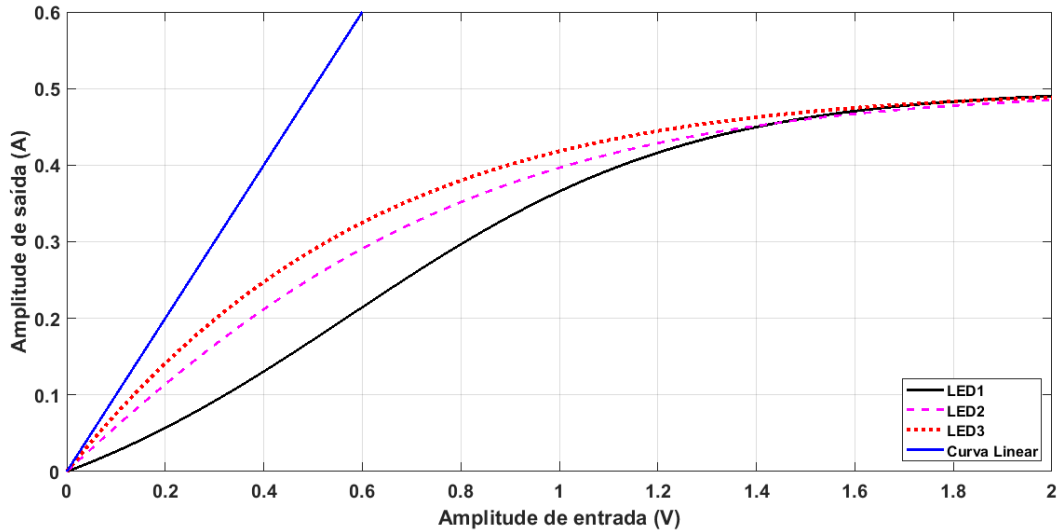


Figura 25: Gráfico das curvas características I x V de LEDs.

A Figura 26 apresenta as curvas de BER de informação e de marca d'água empregando-se os três modelos de LED e uma curva linear aplicados ao canal VLC com o objetivo de verificar o seu desempenho da curva de erro de bit.

O BERinf aumenta, ao passo que as configurações do LED são alteradas. A configuração do LED1 apresenta maior taxa de erro de bit em comparação aos demais LEDs simulados. Inicialmente os LEDs 1, 2 e 3 apresentam uma taxa de erro de bit de informação semelhante até -5 dB, visto na Figura 26-a. As curvas de BERw apresentam comportamento semelhante, visto na Figura 26-b. Observa-se que o modelo do LED1 precisa de mais energia para atingir uma mesma taxa de erro de bits quando comparado com demais modelos de LED. O LED3 alcança um erro menor em relação às especificações dos outros LEDs simulados. Para a obtenção das curvas de BER dos bits de informação (BERinf) e de marca d'água (BERw) na modulação BPSK-ACO-OFDM, aplicado ao sistema VLC, foi escolhido o modelo do LED3.

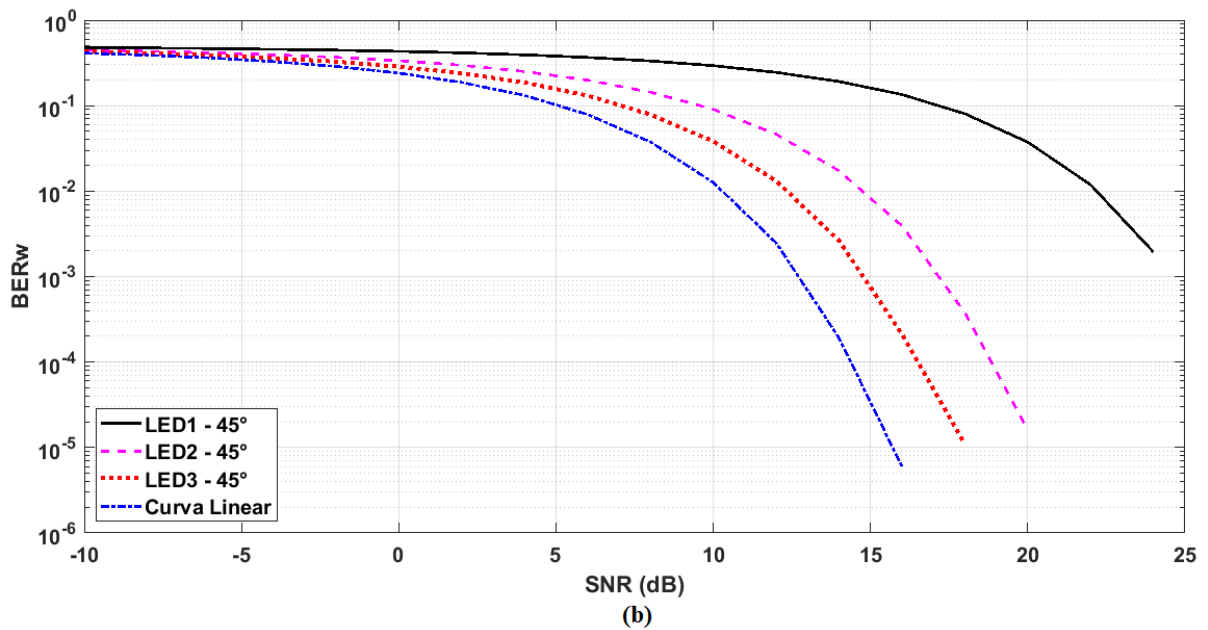
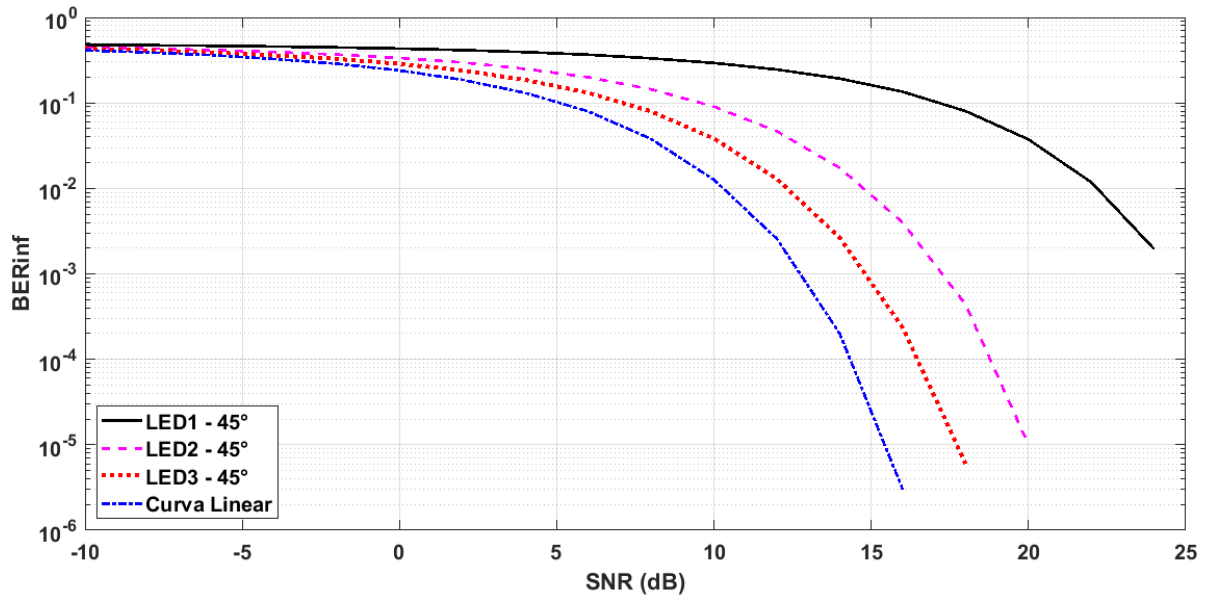


Figura 26: Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, no canal VLC, para desvio de fase de marca d'água $\theta = 45^\circ$, aplicados a modelos de LED distintos.

Na Figura 27, observa-se o comportamento da função LED não linear em relação às amostras do sinal OFDM, de modo a observar o nível de distorção do sinal na modulação ACO-OFDM. De acordo com o gráfico, verifica-se que conforme há o aumento das amplitudes das amostras do sinal OFDM, o efeito não linear da resposta do LED se torna mais evidente.

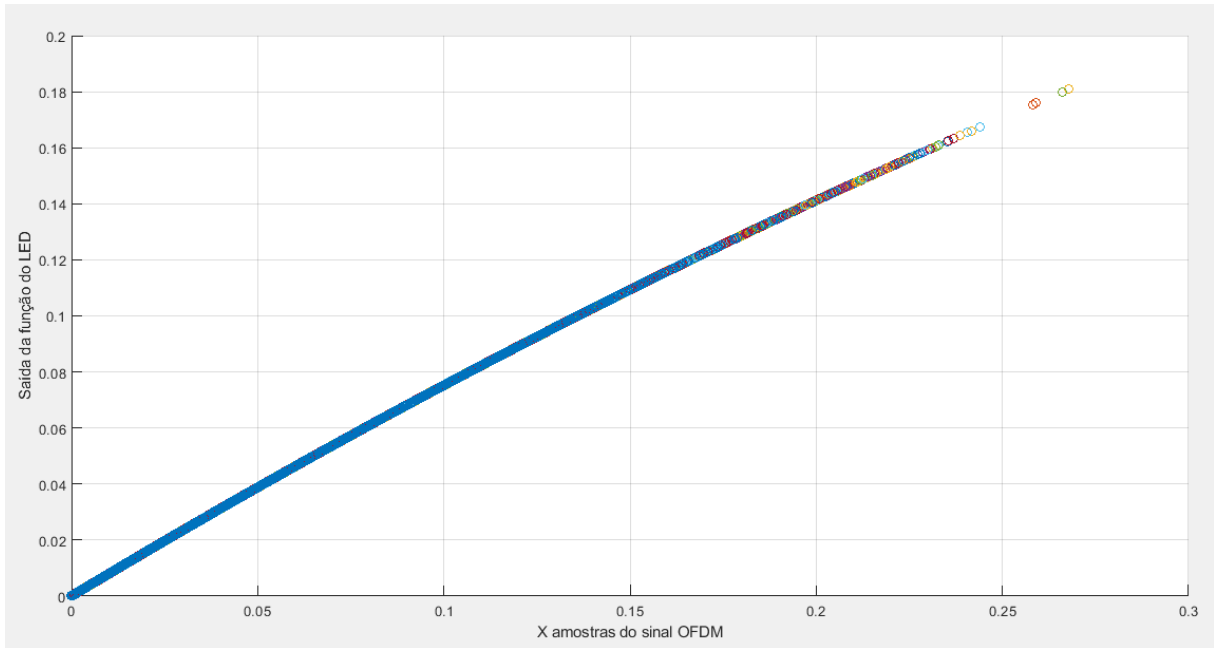


Figura 27: Gráfico da curva não linear para modulação BPSK aplicado a característica do LED3.

3.2 Constelação do sinal após a recepção

Nas simulações realizadas, foram utilizados 10000 bits aleatórios. Avaliamos o desempenho sob diferentes condições de razão sinal-ruído (SNR) entre -10 e 25 dB (aproximadamente), num canal AWGN e também aplicado ao sistema VLC. A SNR é a razão entre a potência do sinal e a potência do ruído expressa em decibéis, visto em

$$SNR = \frac{P_{\text{sinal}}}{P_{\text{ruído}}}. \quad (3.1)$$

Pode-se observar, na Figura 28, as constelações dos símbolos detectados sob diferentes SNRs. Nota-se que quanto menor for a SNR, mais dispersa é a nuvem de pontos ao redor do símbolo original, podendo extrapolar mais facilmente as regiões de decisão e ocasionando erros de detecção. Conforme a SNR aumenta, as nuvens de símbolos recebidos estão mais concentradas em torno do símbolo original – Figura 28-a. Na Figura 28-b, nota-se o comportamento da recepção dos símbolos quando são recebidos no sistema VLC. A nuvem de pontos ao redor dos símbolos, com o aumento do SNR, ainda são mais dispersos em comparação ao do canal AWGN. A mesma análise também pode ser aplicada na Figura 29, na Figura 30 e na Figura 31.

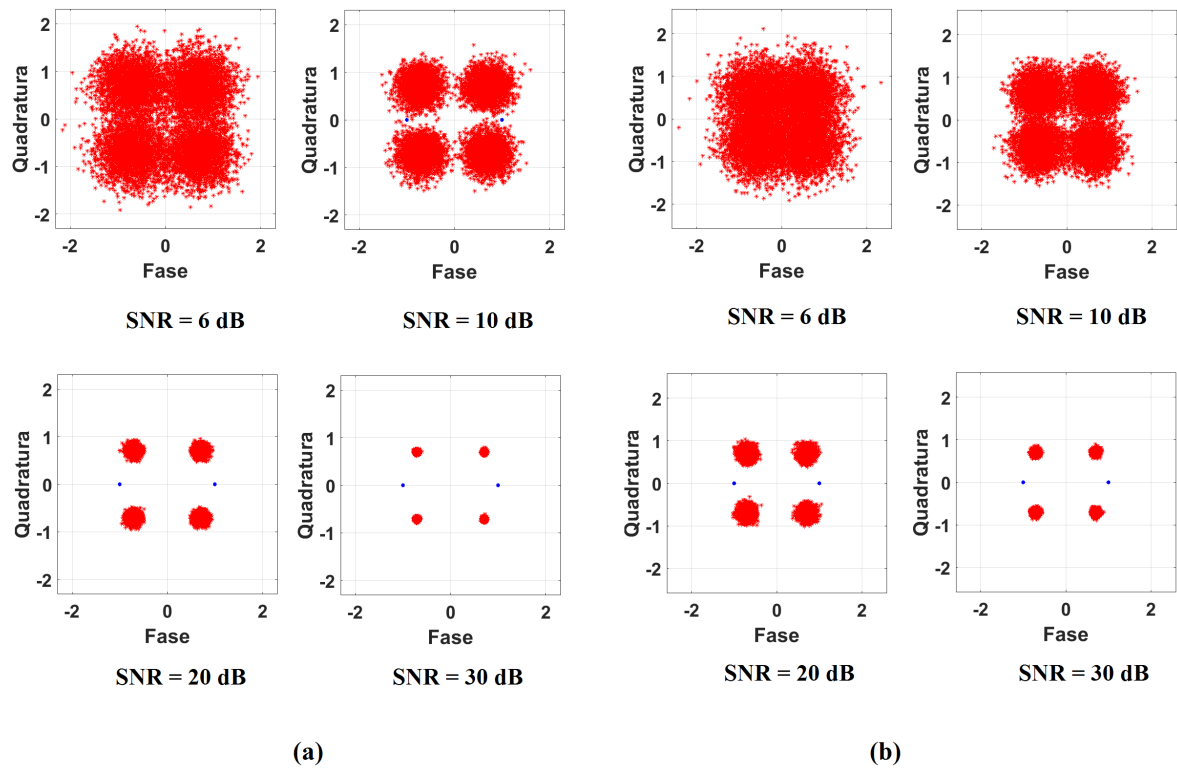


Figura 28: Constelações após recepção para SNR diferentes empregando-se a modulação (a) BPSK no canal AWGN (b) e no sistema VLC.

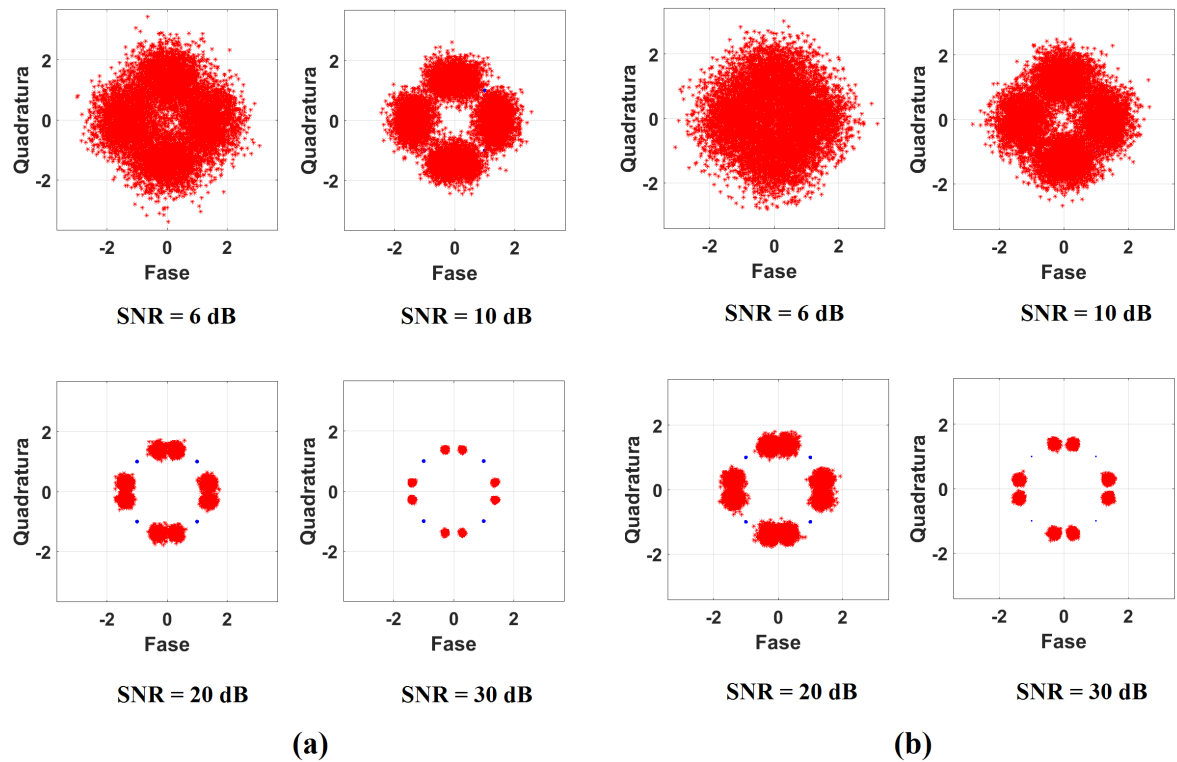


Figura 29: Constelação de sinais após recepção usando o esquema CR para SNR diferentes na modulação (a) QPSK no canal AWGN (b) aplicado ao sistema VLC.

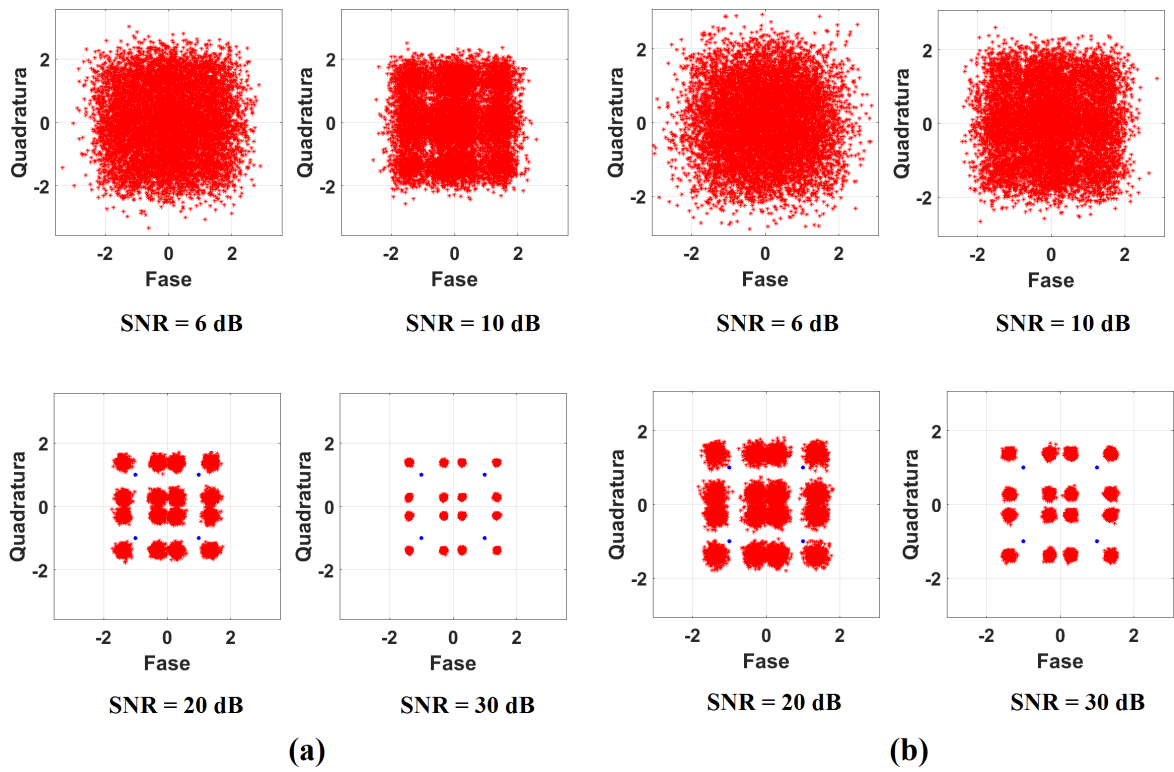


Figura 30: Constelação de sinais após recepção usando o esquema CS para SNR diferentes empregando-se a modulação (a) QPSK no canal AWGN (b) aplicado ao sistema VLC.

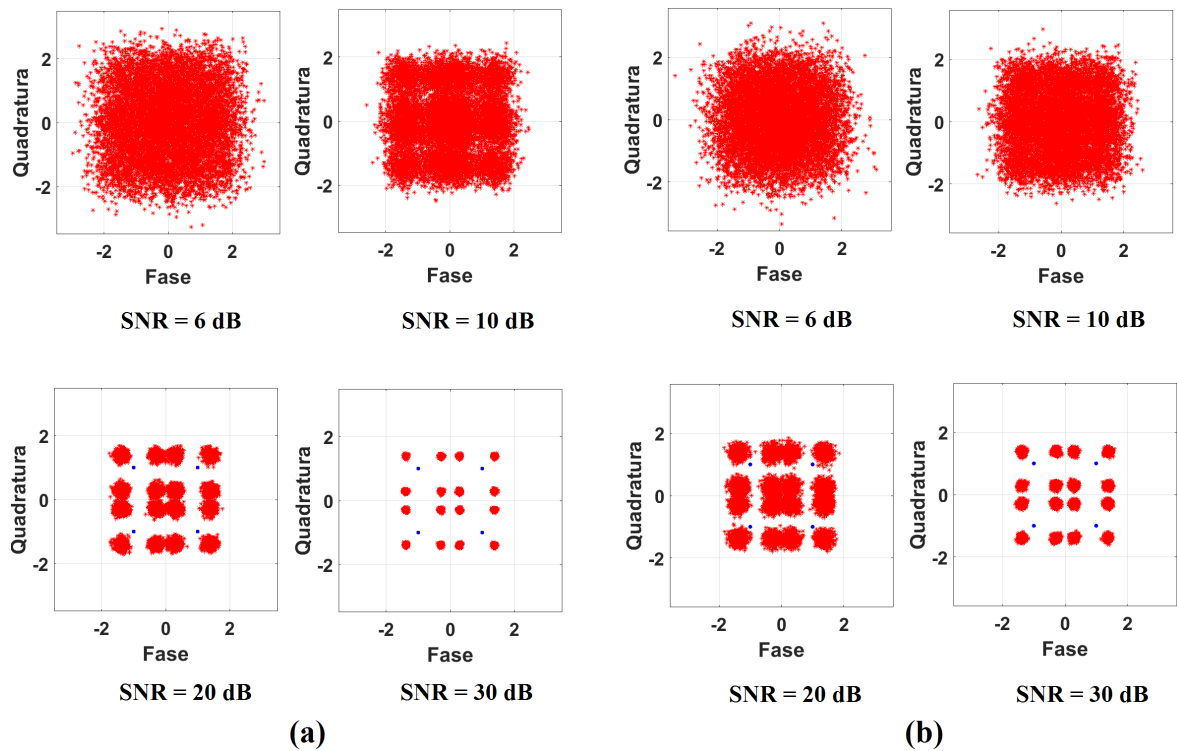


Figura 31: Constelação de sinais após recepção usando o esquema ICS para SNR diferentes na modulação (a) QPSK no canal AWGN (b) aplicado ao sistema VLC.

3.3 Resultados das curvas de BER para diversos ângulos aplicados ao canal AWGN e ao sistema VLC para a modulação BPSK e QPSK (CS, CR e ICS)

Quando inserem-se marcas d'água em sinais BPSK utilizando a técnica CR, há uma limitação do desvio produzido pelo ângulo de rotação para inserção dos bits de marca d'água. Ele não deve ultrapassar $\pi/2$ (90°) de forma a não inverter os símbolos BPSK correspondentes às mensagens 0 e 1. Conforme mencionado na subseção 1.2, equações (1.3) e (1.13), quanto maior for esse ângulo, maior é a probabilidade de detecção correta da marca d'água, mas menor é a probabilidade de detecção correta de bits de mensagem. Isto ocorre, pois quanto maior for o ângulo, menor é a componente em fase, e maior é a componente em quadratura, dificultando a detecção do bit de mensagem/informação.

Quando inserimos bits de marca d'água em símbolos QPSK, também há uma limitação de rotação de $\pi/2$, correspondente à força da marca d'água ($\alpha \ll \frac{1}{2}$). Como vimos na Seção 1.3, podemos utilizar três esquemas de rotação de constelação para inserir marcas d'água em moduladores QPSK: Rotação de Constelação (CR – *Constellation Rotation*), Deslocamento de Constelação (CS – *Constellation Shifting*) e ICS – Deslocamento de Constelação Aprimorado (*Improved Constellation Shifting*). Aqui, apresentamos gráficos de desempenho de BER sob diferentes ângulos de rotação/inserção de marca d'água entre 13° e 42° , correspondendo a forças, α , entre 0,05 e 0,45.

A Figura 32-a, para a modulação BPSK, apresenta as curvas de taxa de erro de bit de informação (BER_{inf}) e taxa de erro de bit de marca d'água (BER_w), para diferentes ângulos de rotação dos símbolos, em função da SNR. Com o ângulo de rotação da constalação de símbolos igual a 15° , obtém-se a menor BER_{inf}. Pois, nesse caso, o símbolo com a marca d'água está mais próximo do símbolo de informação BPSK. A BER_w segue a lógica inversa, com o ângulo igual a 75° , obtém-se a menor BER_w. A Figura 32-b apresenta as curvas de taxa de erro de bit de informação (BER_{inf}) e taxa de erro de bit de marca d'água (BER_w), para diferentes ângulos de rotação dos símbolos, em função da SNR aplicados ao sistema VLC. Analisando-se os dois sistemas, nota-se que o sistema VLC também apresenta o mesmo comportamento para os resultados.

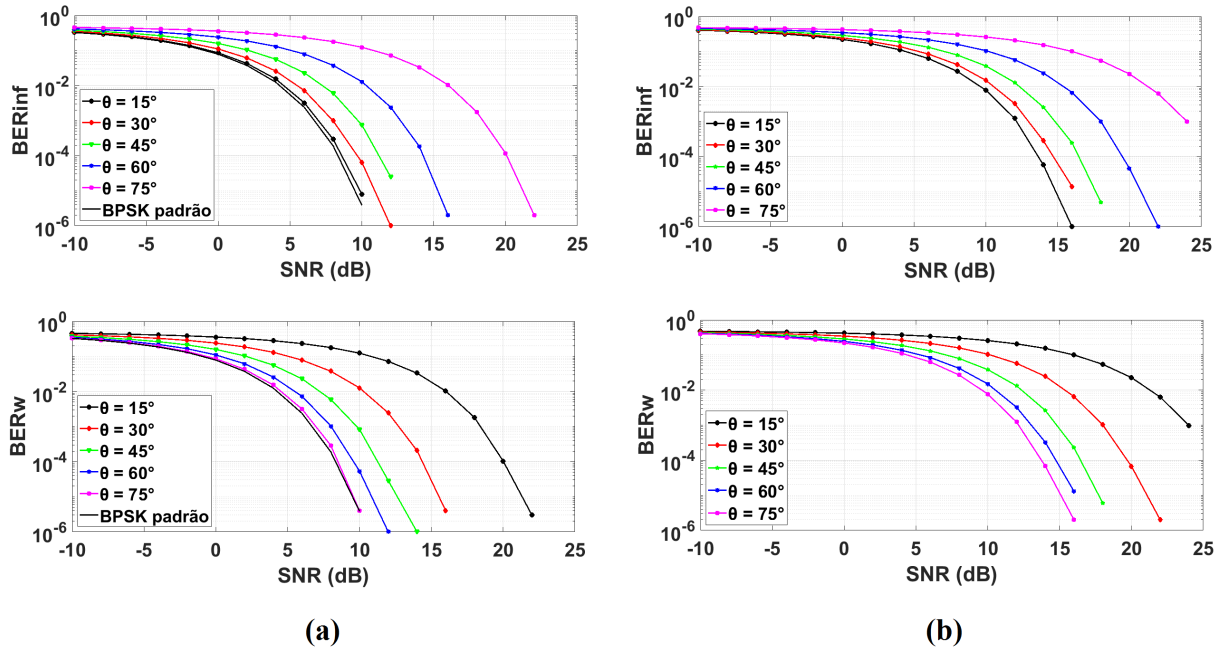


Figura 32: Curvas de BER de informação e de marca d'água em função de SNR o esquema de (a) modulação BPSK com marca d'água aplicado ao canal AWGN e (b) aplicado ao sistema VLC para diversos ângulos.

Já para a modulação QPSK, a Figura 33-a apresenta as curvas de taxa de erro de bit de informação (BERinf) e taxa de erro de bit de marca d'água (BERw), para diferentes ângulos de rotação dos símbolos, em função da SNR para a técnica CR. Com o ângulo de rotação da constelação de símbolos igual a 13° , correspondente a $\alpha = 0,05$, obtém-se a menor BERinf. Pois, nesse caso, o símbolo com a marca d'água está mais próximo do símbolo de informação QPSK. A BERw segue a lógica inversa, com o ângulo igual a 42° , correspondente a $\alpha = 0,45$, obtém-se a menor BERw. Para a Figura 33-b apresenta as curvas de taxa de erro de bit de informação (BERinf) e taxa de erro de bit de marca d'água (BERw), para diferentes ângulos de rotação dos símbolos, aplicados ao sistema VLC. Nesse sistema observa-se que terá um mesmo comportamento para as curvas de erro de bit. Essas observações ficam mais patentes para valores maiores de SNR. Quanto maior o SNR maior a potência empregada no LED, e mais sensível o sistema se torna a não linearidades. Verificam-se os mesmos comportamentos de BERinf e BERw, observados quando comparados aos resultados obtidos por meio das técnicas CS e ICS para a Figura 34 e a Figura 35.

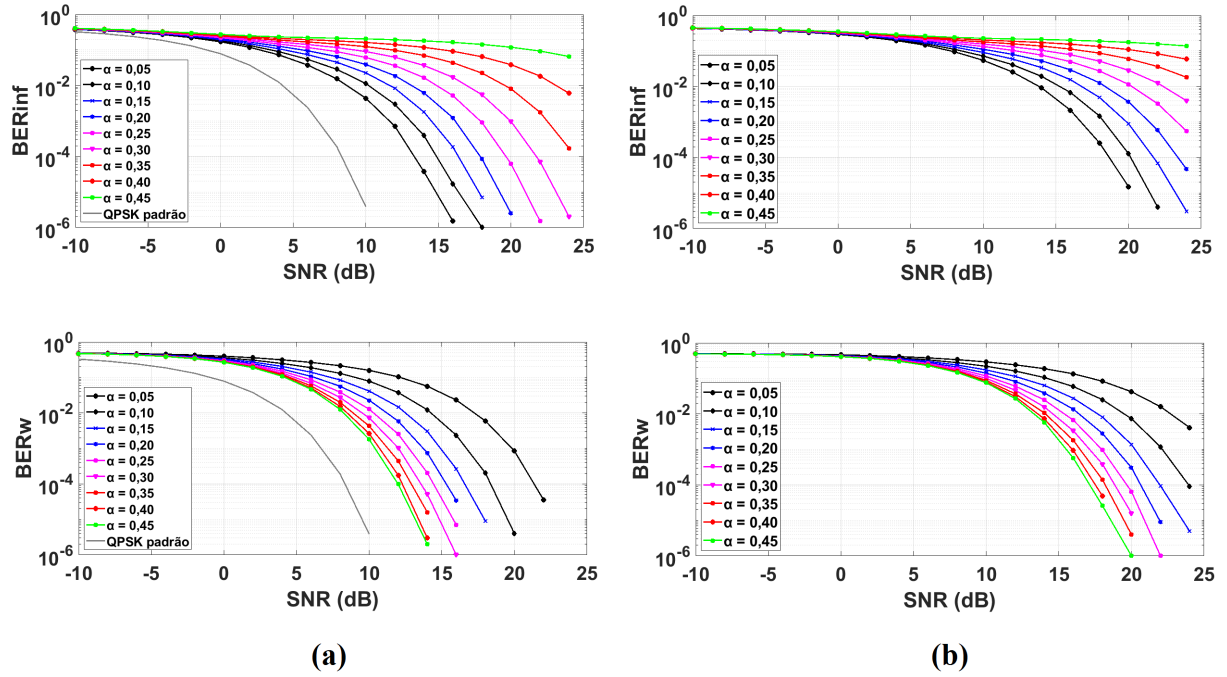


Figura 33: Curvas de BERinf e BERw para intensidade de marca d'água diversos empregando-se a técnica CR na modulação (a) QPSK no canal AWGN e (b) QPSK-ACO-OFDM-LED3 no sistema VLC.

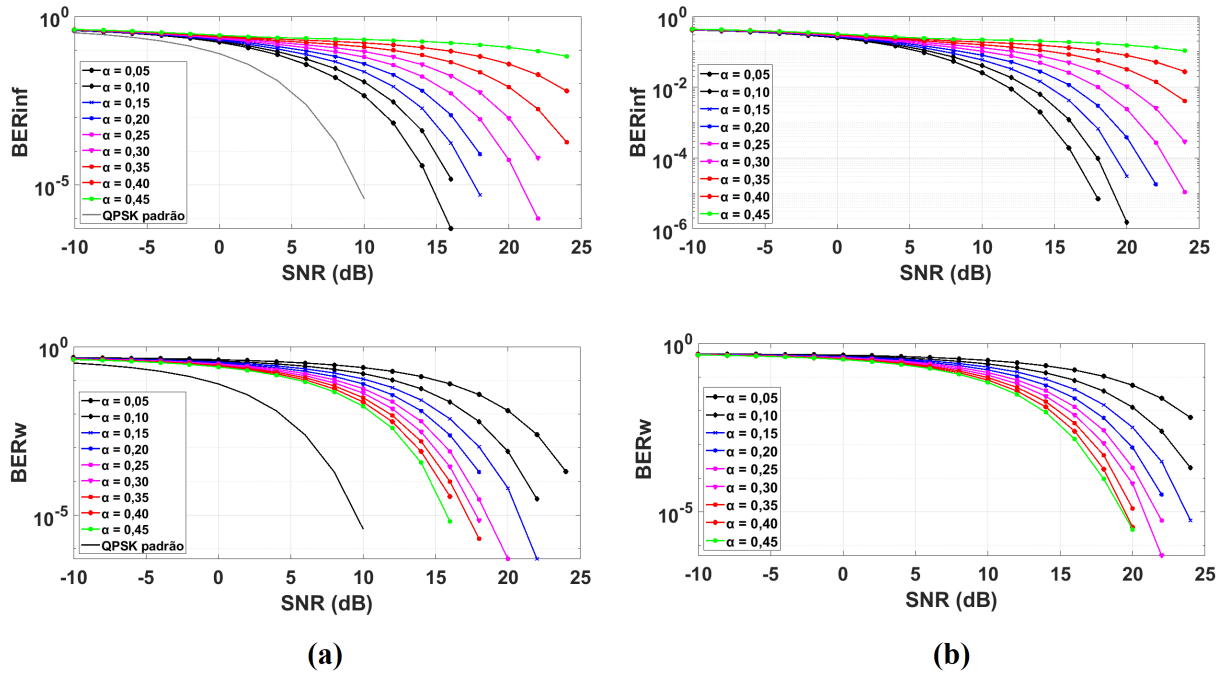


Figura 34: Curvas de BERinf e BERw para intensidade de marca d'água diversos empregando-se a técnica CS na modulação (a) QPSK aplicado no canal AWGN e (b) QPSK-ACO-OFDM aplicado no sistema VLC.

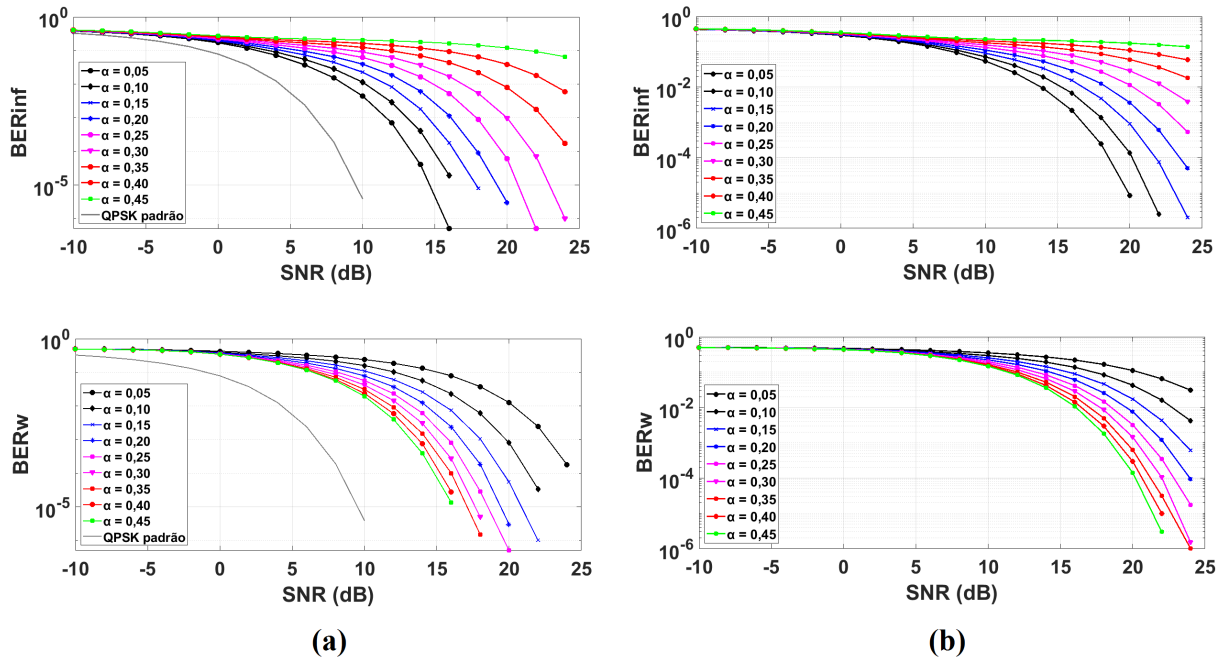


Figura 35: Curvas de BERinf e BERw para intensidade de marca d'água diversos empregando-se a técnica ICS na modulação (a) QPSK aplicado ao canal AWGN e (b) QPSK-ACO-OFDM aplicado ao sistema VLC.

Os resultados mostram que há um compromisso entre as taxas de erro de bit de marca d'água e de informação, em função do desvio angular usado para inserção da marca d'água. Se almeja-se inserir a marca d'água sem reduzir significativamente o desempenho da transmissão dos bits de informação, recomenda-se o uso de um pequeno desvio. No caso em que há necessidade de prover maior robustez na transmissão de bits de marca d'água, é preciso abrir mão do desempenho na transmissão dos bits de informação, e empregar um desvio de fase maior.

3.4 Resultados das curvas de BER agregada entre os bits de informação e bits de marca d'água no sistema VLC

Para a modulação BPSK, aplicando a técnica CR, a Figura 36-a apresenta o gráfico da razão entre a soma das quantidades de bits errados ($BER_{inf} + BER_w$) contra a quantidade de bits no fluxo total para o canal AWGN. Conforme o resultado apresentado, o ângulo de 15° apresentou um erro de bit maior chegando a 22 dB e o de 45° apresentou um erro de bit menor chegando a 14 dB. Os ângulos de 60° e 75° não estão apresentados no gráfico, pois são equivalentes aos ângulos 15° e 30° . Para o esquema QPSK aplicado

ao sistema VLC foi obtido os mesmos resultados com o ângulo que obteve o melhor resultado, visto na Figura 36-b. Já para a modulação QPSK aplicado ao canal AWGN, a Figura 37 apresenta o gráfico da razão entre a soma das quantidades de bits errados (BER_{inf}+BER_w) contra a quantidade de bits nos fluxos totais aplicando-se a técnica CR. Para os valores maiores de α as curvas de erro de bit são maiores, pois estão mais próximos do ângulo de 45° . A curva para $\alpha = 0,05$ se aproxima da curva para $\alpha = 0,30$, pois suas curvas de BER_{inf} e BER_w mudam. No caso de $\alpha = 0,05$ o erro de bit de marca d'água é maior, enquanto para $\alpha = 0,30$ o erro de bit de informação é maior. Nesse caso, $\alpha = 0,15$ apresenta menor erro de bit. Nas técnicas CS e ICS, a intensidade de marca d'água que apresentou menor erro de BER foi $\alpha = 0,30$ para o canal AWGN e para o sistema VLC, visto na Figura 38 e na Figura 39.

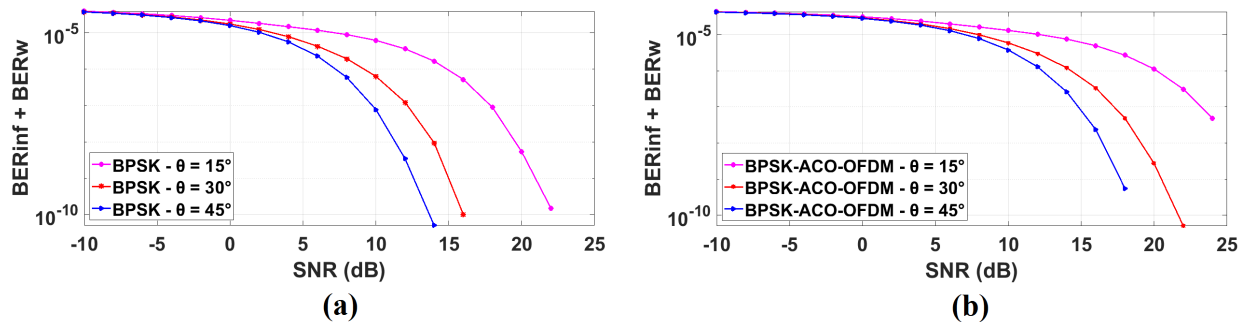


Figura 36: Curvas de BER agregada entre a informação e a marca d'água para o esquema de modulação (a) BPSK aplicado no canal AWGN e (b) BPSK-ACO-OFDM aplicado ao canal VLC.

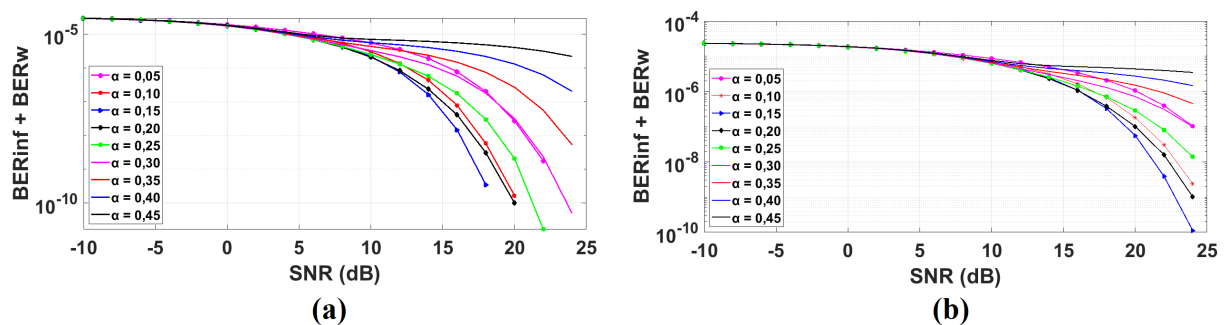


Figura 37: Curvas de BER agregada entre a informação e a marca d'água para o esquema de modulação (a) QPSK com a técnica CR aplicado ao canal AWGN e (b) QPSK-CR-ACO-OFDM aplicado ao sistema VLC.

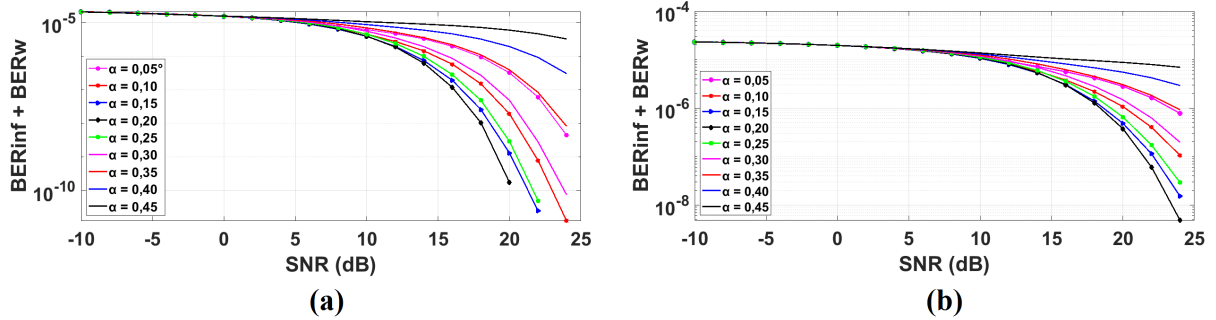


Figura 38: Curvas de BER agregada entre a informação e a marca d'água para o esquema de modulação (a) QPSK com marca d'água aplicado a técnica CS no canal AWGN e (b) QPSK-CS-ACO-OFDM aplicado ao sistema VLC.

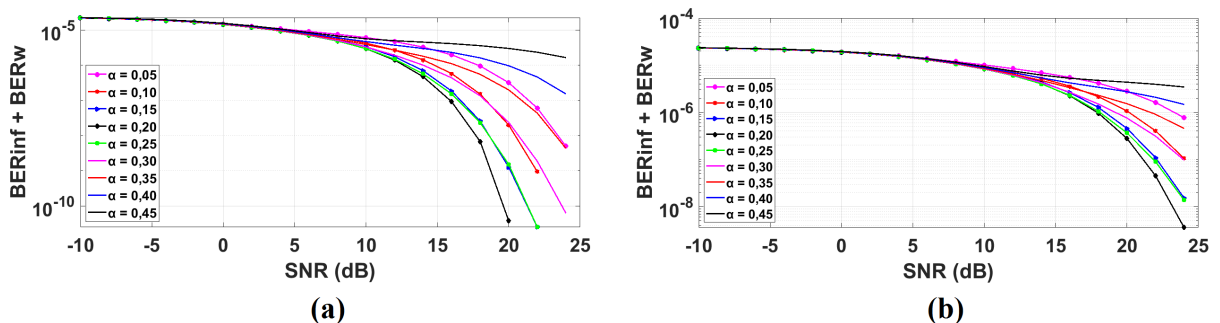


Figura 39: Curvas de BER agregada entre a informação e a marca d'água para o esquema de modulação (a) QPSK com marca d'água aplicado a técnica ICS no canal AWGN e (b) QPSK-ICS-ACO-OFDM aplicado ao sistema VLC.

3.5 Comparação das curvas de BER para determinados ângulos no canal AWGN e para o sistema VLC nas modulações BPSK e QPSK

Para a modulação BPSK, aplicando a técnica CR, a Figura 40 apresenta a aplicação da marca d'água a modulação BPSK e BPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC, a fim de analisar o comportamento das curvas de desempenho em termos de taxas de erro de bits de informação (BERinf) e de marca d'água (BERw). Analisando o BERinf, conforme mostrado na Figura 40-a, para cada α , observa-se que a modulação BPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC obtém taxas de erro maiores em comparação a modulação BPSK com aplicação da marca d'água, portanto, requer mais energia para alcançar uma mesma taxa de erro de bit. O BERinf aumenta, ao passo que o ângulo produzido pela marca d'água aumenta para BPSK e BPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC, com qualquer SNR. As curvas de BERw seguem uma lógica contrária. Na Figura 40-b, a curva BPSK

com $\theta = 15^\circ$ se aproxima com a curva de $\theta = 30^\circ$. Nota-se que, em geral, a probabilidade de erros bit de marca d'água aumenta à medida que se diminui o ângulo pela inserção de marca d'água.

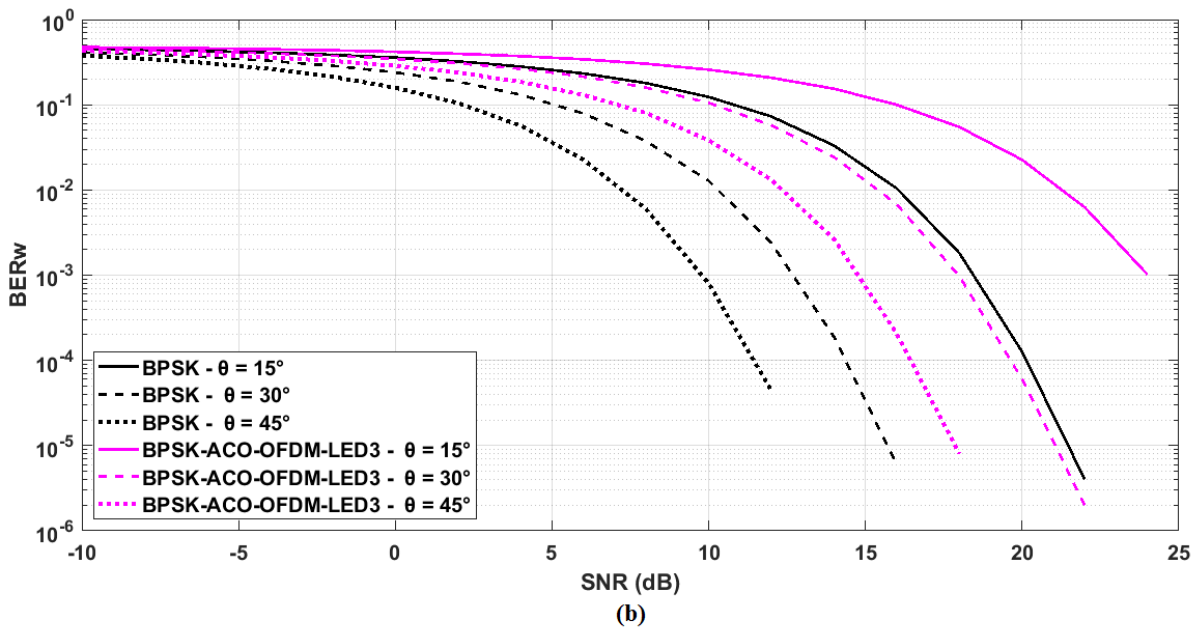
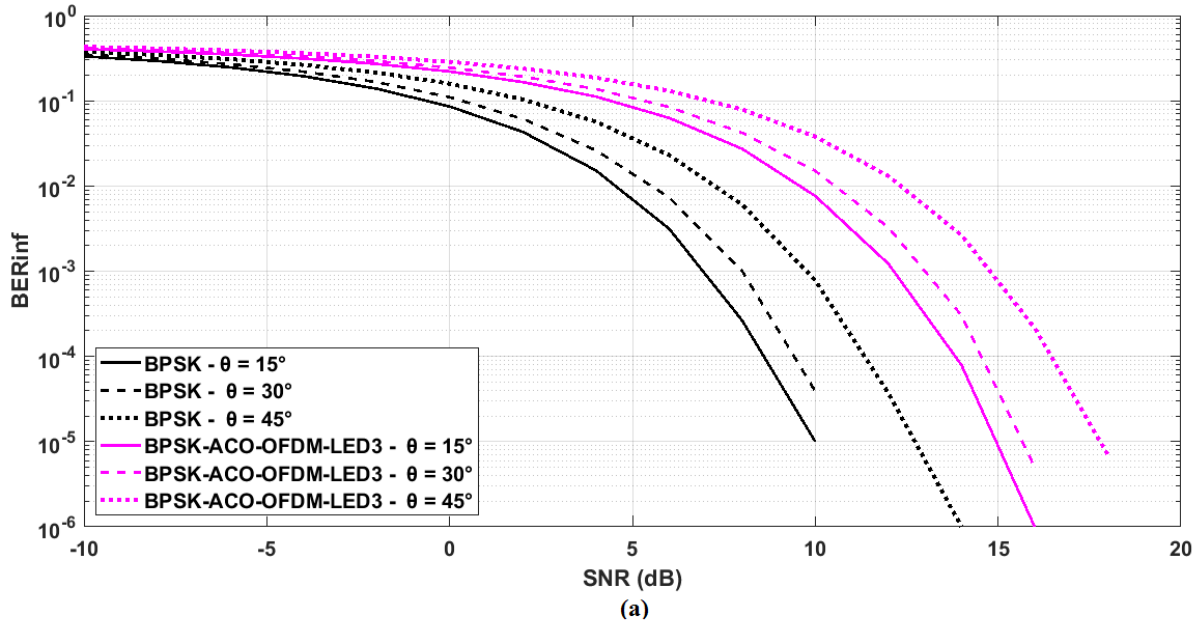


Figura 40: Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, empregando-se a modulação BPSK e BPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC, para diversos ângulos de marca d'água.

Para a modulação QPSK, aplicando-se a técnica CR, CS e ICS, as Figura 41, Figura 42 e Figura 43 apresentam a aplicação das técnicas a modulação QPSK e QPSK-ACO-

OFDM-LED3 ao canal VLC, a fim de analisar o comportamento das curvas de desempenho em termos de taxas de erro de bits de informação (BERinf) e de marca d'água (BERw). Com base na Figura 41-a, para cada α , observa-se que a modulação QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC obtém erros maiores em comparação a modulação QPSK com aplicação da marca d'água, mas por outro lado, precisam de mais energia de bit para a codificação apresentada. O BERinf aumenta, ao passo que o ângulo produzido pela marca d'água aumenta para QPSK e QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC, com quaisquer SNR. A curva QPSK com $\alpha = 0,30$ coincide com a curva de $\alpha = 0,20$. As curvas de BERw seguem uma lógica contrária. Na Figura 41-b a curva QPSK com $\alpha = 0,10$ coincide com a curva de $\alpha = 0,30$ do QPSK-ACO-OFDM-LED3. Nota-se que a probabilidade de erros bit de marca d'água aumenta para os dois casos abordados, à medida que se diminui o ângulo pela inserção de marca d'água.

Na Figura 42-a para cada α escolhido na modulação QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC as curvas obtém erro maior necessitando de mais energia de bit para a codificação. A curva correspondente a QPSK com $\alpha = 0,30$ coincide com a curva QPSK-ACO-OFDM-LED3 aplicado ao canal VLC com a intensidade de marca d'água $\alpha = 0,20$. O mesmo acontece para as curvas QPSK com $\alpha = 0,20$ e QPSK-ACO-OFDM-LED3 aplicado ao canal VLC com $\alpha = 0,10$. As curvas de BERw seguem uma lógica contrária. Observando o BERw nota-se que a probabilidade de erros bit de marca d'água aumenta para os dois casos abordado, à medida que se diminui o ângulo pela inserção de marca d'água. A curva correspondente a QPSK com $\alpha = 0,10$ coincide com a curva QPSK-ACO-OFDM aplicado ao canal VLC com a intensidade de marca d'água $\alpha = 0,20$, visto na Figura 42-b.

Observando o BERinf, apresentado na Figura 43-a, para cada α escolhido na modulação QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC as curvas obtém erro maior portanto requer mais energia para alcançar uma mesma taxa de erro de bit. A curva correspondente a QPSK com $\alpha = 0,30$ se aproxima da curva QPSK-ACO-OFDM-LED3 aplicado ao canal VLC com a intensidade de marca d'água $\alpha = 0,20$. O mesmo acontece para as curvas QPSK com $\alpha = 0,30$ e QPSK-ACO-OFDM-LED3 aplicado ao canal VLC com $\alpha = 0,10$. As curvas de BERw seguem uma lógica contrária. Na figura 43-b, nota-se que a probabilidade de erros bit de marca d'água aumenta para os dois casos abordado, à medida que se diminui o ângulo pela inserção de marca d'água. Analisando o gráfico BERw,

a curva correspondente a QPSK com $\alpha = 0,10$ se aproxima da curva QPSK-ACO-OFDM aplicado ao canal VLC com a intensidade de marca d'água $\alpha = 0,30$, visto na Figura 43-b.

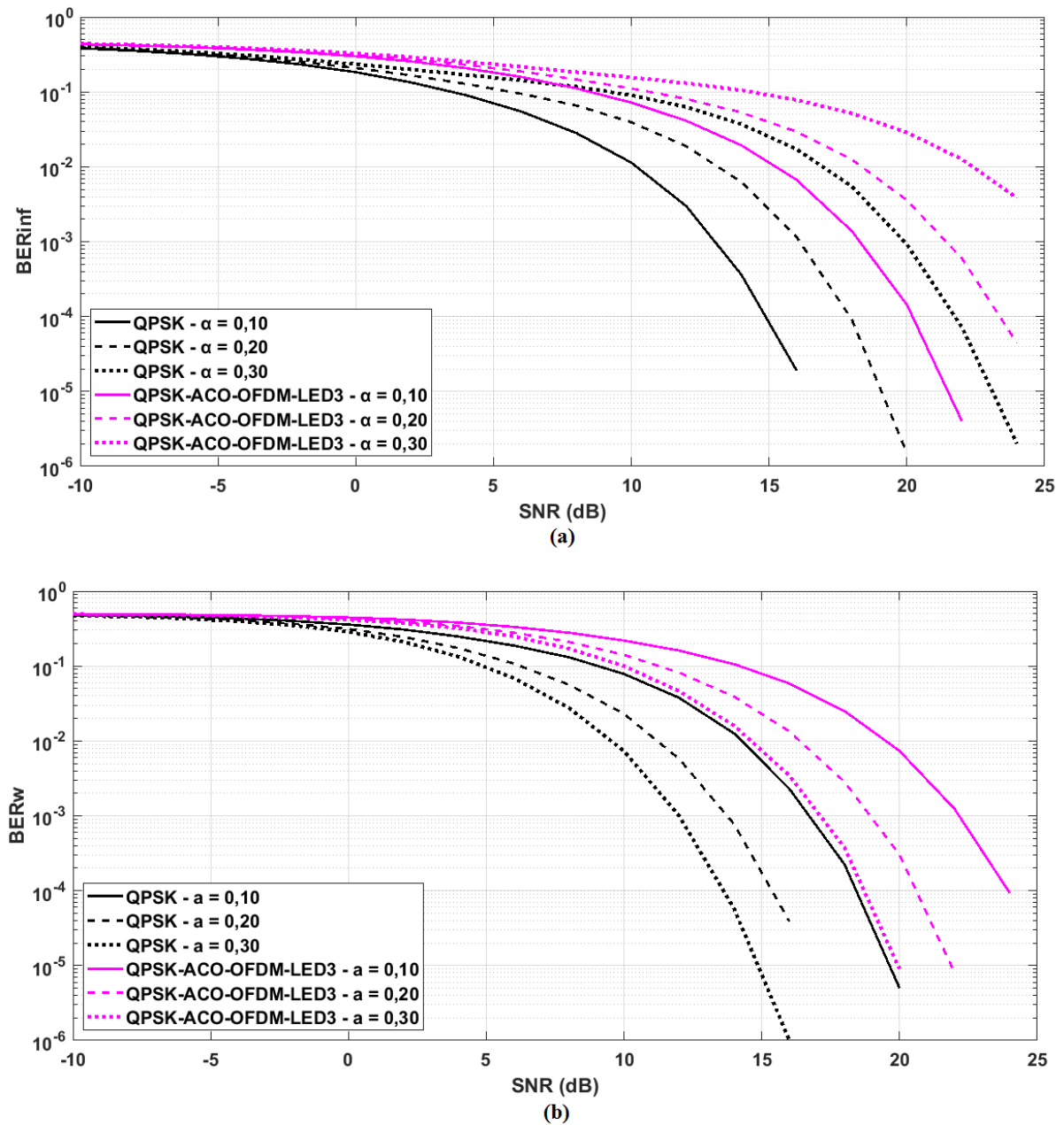


Figura 41: Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, empregando-se o esquema CR na modulação QPSK e QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC, para diversas intensidades de marca d'água.

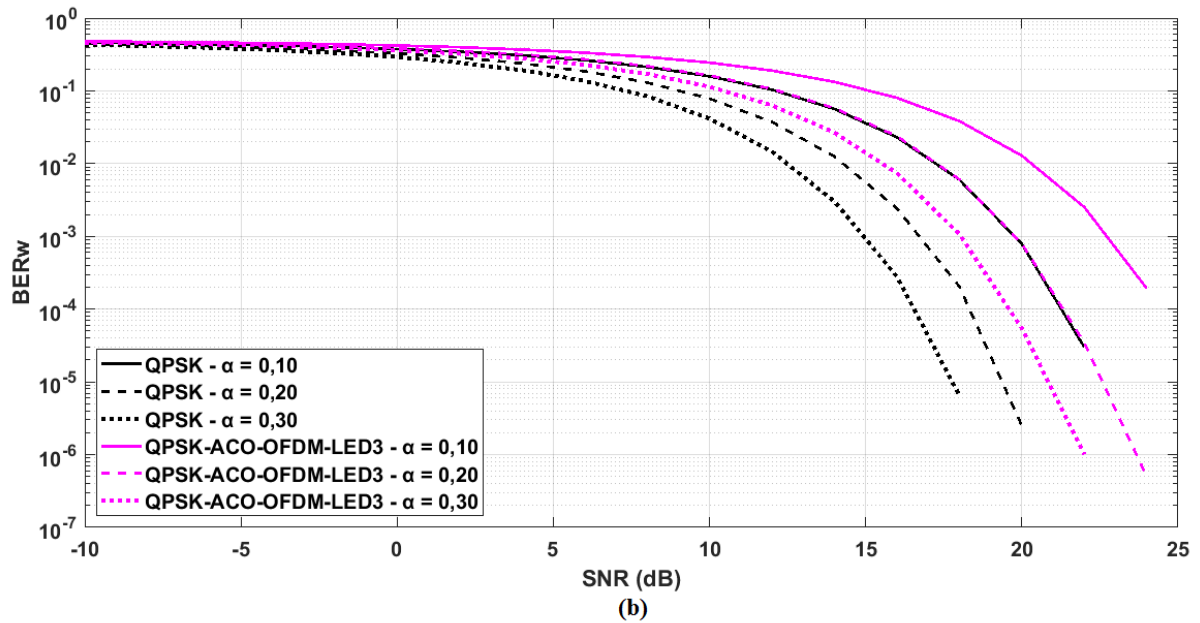
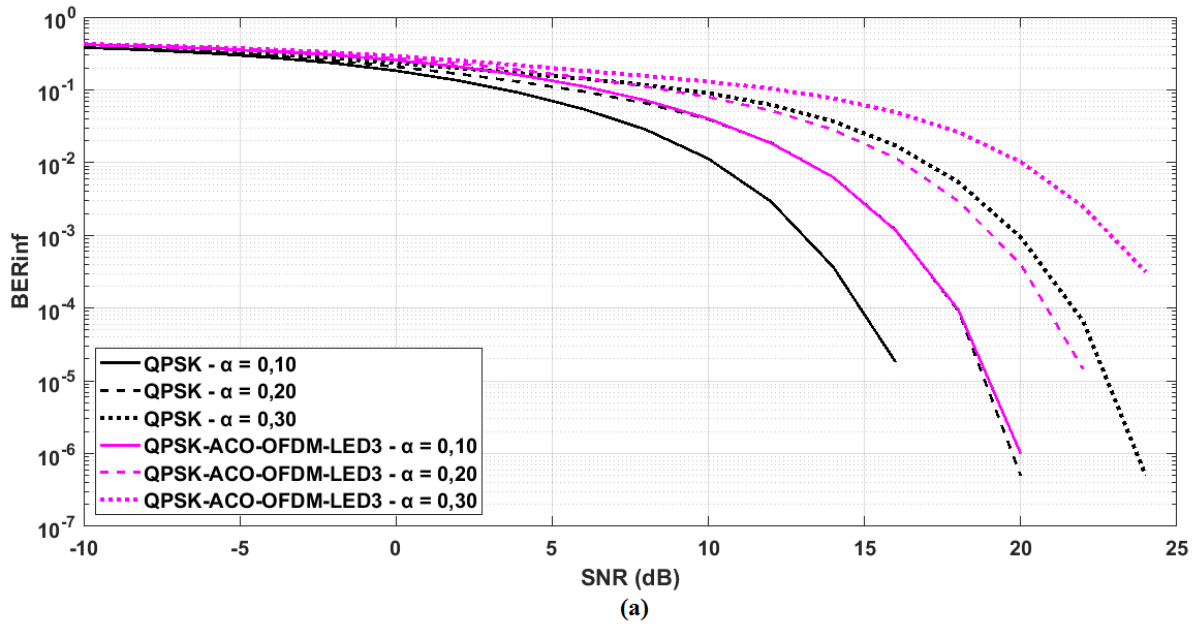


Figura 42: Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, empregando-se o esquema CS na modulação QPSK e QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC.

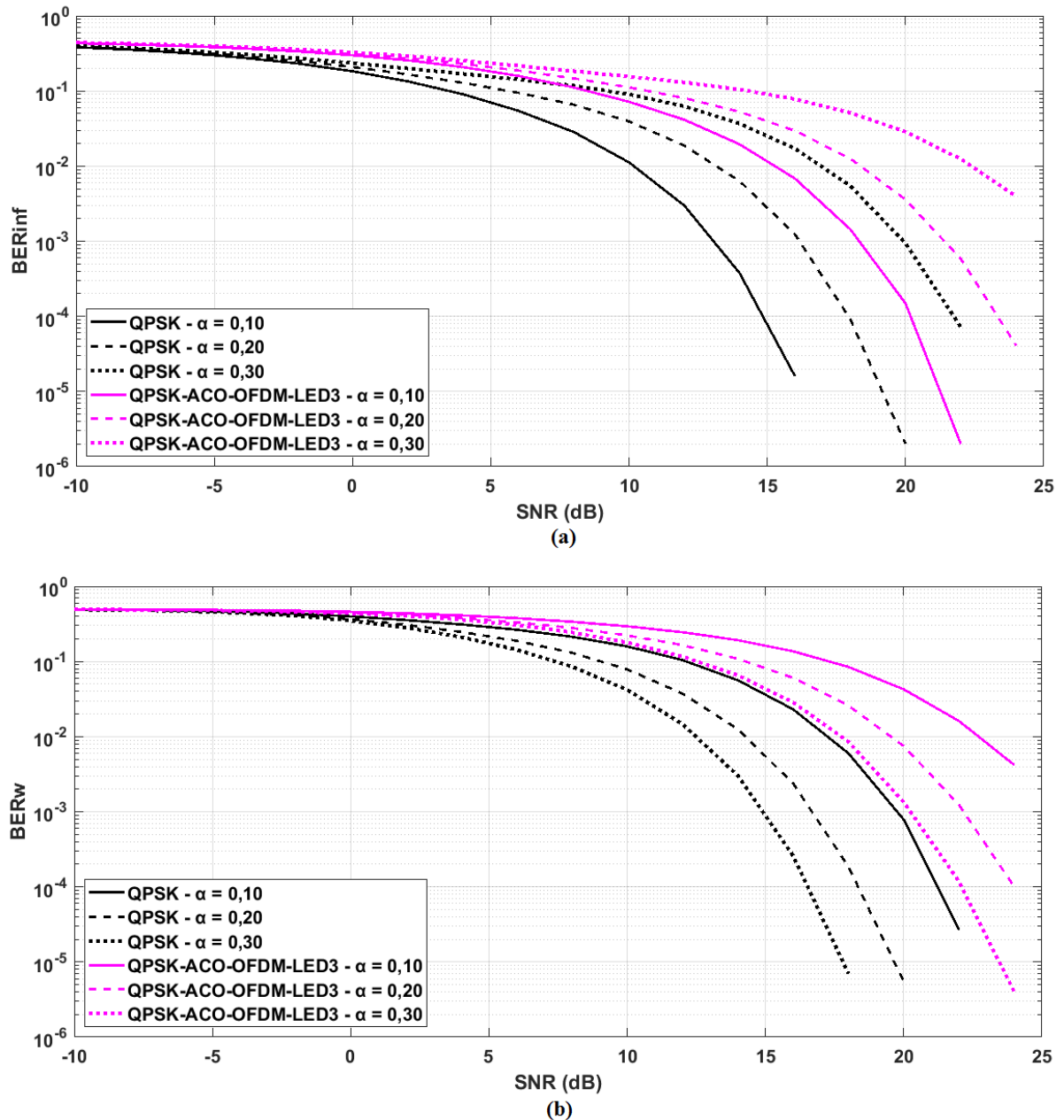


Figura 43: Curvas de BER de informação (a) e marca d'água (b), em função de SNR, empregando-se o esquema ICS na modulação QPSK e QPSK-ACO-OFDM-LED3 no canal VLC.

3.6 Comparações no sistema VLC

A Figura 44 mostra os desempenhos das quatro esquemas de modulação com emprego de marca d'água apresentadas, considerando-se os canais AWGN e VLC. O BPSK, aplicando a técnica CR, atinge sempre os melhores desempenhos, porém, obviamente, com metade da taxa de transmissão de dados. Complementarmente, a taxa de transmissão

de bits de marca d'água no BPSK é igual à do QPSK com CR e a metade do QPSK com CS e ICS. O pior desempenho das técnicas de inserção de marca d'água no QPSK comparativamente ao BPSK advém da menor distância entre os símbolos da constelação do primeiro sob uma mesma potência média de transmissão por bit.

Na modulação QPSK, os três esquemas de inserção de marca d'água impactam BER_{inf} de forma quase idêntica, conforme mostrado na Figura 44-*a*. A curva de erro da marca d'água é mostrada na Figura 44-*b*. No QPSK, o esquema CR apresenta o melhor comportamento de BER_w . Observa-se ainda que comparada com a técnica CS, a técnica ICS apresenta um ganho significativo em BER_w .

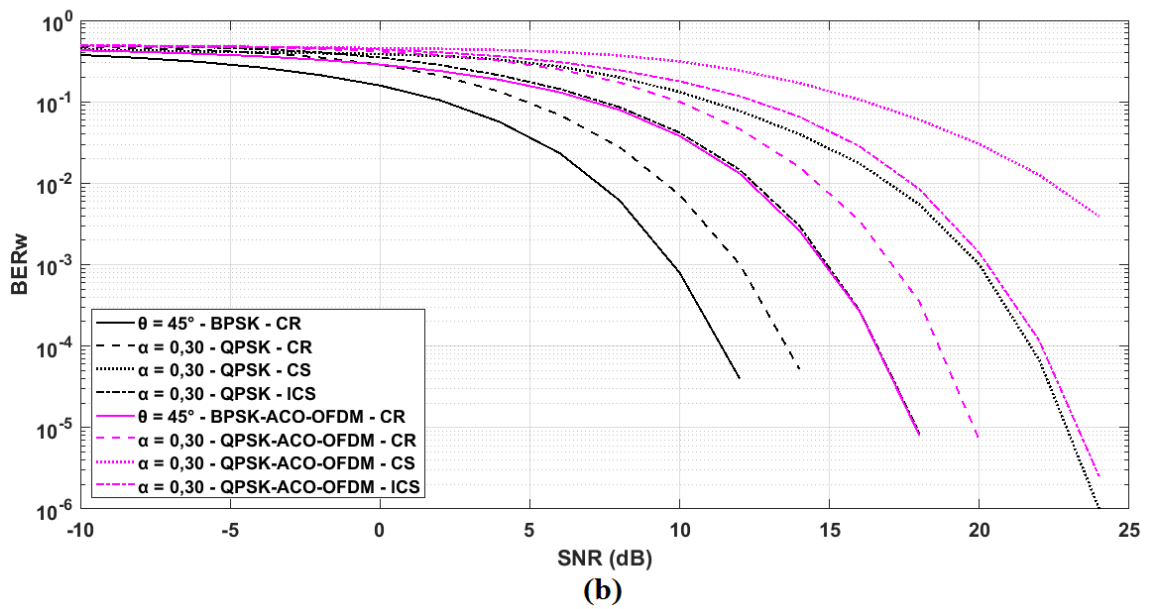
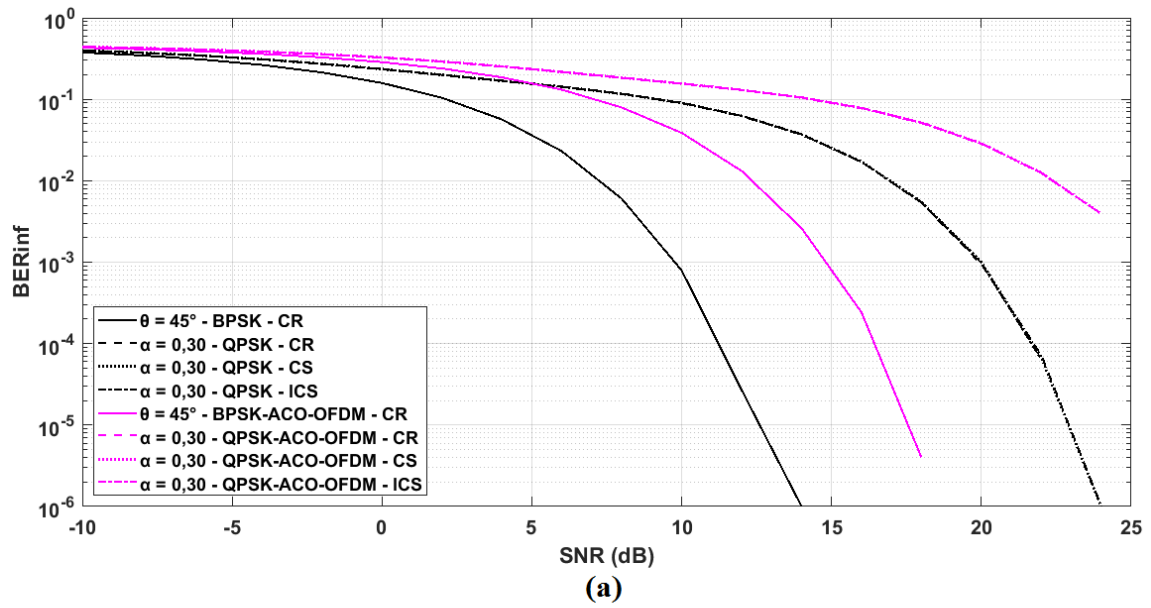


Figura 44: Curvas de desempenho para a modulação BPSK e a modulação QPSK utilizando os esquemas CR, CS e ICS sem/com o canal VLC.

CONCLUSÃO

Nesta dissertação, foram apresentadas três técnicas de marca d'água simuladas em ambientes RF e VLC. Na modulação QPSK foram estudados três esquemas de CD disponíveis para autenticação de marca d'água RF que são CR, CS e ICS proposto pelo artigo [16]. Os três esquemas foram estudados a partir de modelos matemáticos e suas perspectivas constelações através da sua curva de desempenho (curva de BER). Já no ambiente VLC, o código de marca d'água RF foi aplicado a partir dos dados extraídos do artigo [20], baseado nas modulações BPSK-OFDM e QPSK-OFDM.

Para a técnica de marca d'água aplicada à modulação BPSK, realizou-se uma análise com ângulos de marca d'água variados entre 15° e 75° . Nesse caso, não é aconselhável o uso de ângulos próximos a 90° , comprometendo seu desempenho de detecção dos bits de informação. O receptor com ângulo de marca d'água de 45° e um alcance de $\text{SNR} = 12$ dB apresentou melhores resultados comparados a outros ângulos. Quando aplicada na modulação QPSK, o ângulo da marca d'água não deve ultrapassar o ângulo de 30° , visando o não comprometimento do desempenho de transmissão. Para análise na modulação QPSK, fez-se o uso da variação de ângulos entre 13° a 42° com valor de SNR igual para todos e com força de marca d'água variando entre 0,05 a 0,45. Nesse caso, o esquema que melhor apresentou resultados satisfatórios, devido as curvas de BER_{inf} e BER_{w} equivalentes, foi a técnica CR com ângulo de marca d'água de 33° , equivalente a $\alpha = 0,30$ e $\text{SNR} = 14$ dB.

Para a técnica de marca d'água aplicada ao sistema de comunicação de LED baseado na modulação BPSK-OFDM, quando os dados adicionais difundidos são adicionados ao sinal óptico BPSK-OFDM, são simuladas as características BER do sinal LED. Através disso, o sistema de marca d'água proposto é útil como técnica de transmissão de dados adicionais. Na modulação BPSK o melhor resultado obtido em relação a taxa de erro de bits foi o ângulo de marca d'água igual a 45° . Já na técnica de marca d'água aplicada ao sistema VLC baseado na modulação QPSK, quando comparado os esquemas CS, CR e ICS, o melhor desempenho apresentado foi método CR com ângulo de 33° com $\alpha = 0,30$. No âmbito da comparação entre os sistemas CS e ICS, aquele que apresentou melhor desempenho foi o ICS proposto por [16] tal com ângulo de 33° , com força da marca d'água $= 0,30$ para ambos.

O método estudado para cenário do mundo real pode ser de grande valia podendo ser realizada no futuro utilizando USRP, no qual foi impossibilitada a sua implementação utilizando o SDR devido ao momento pandêmico que vivemos. Desta forma, para trabalhos futuros mais complexos e ambiciosos, seria interessante expandir tal método para esquemas de modulação de ordem superior, com o intuito de determinar como as taxas de erro e descrição podem ser afetadas. Além do mais, a técnica proposta pode ser aplicada de forma prática testando a autenticação na camada física, assim como algumas técnicas de supressão de ruído no canal.

REFERÊNCIAS

- [1] OLESEN, R. et al. *Watermarks/signatures for wireless communications*. [S.l.]: Google Patents, out. 2005. US Patent App. 11/032,780.
- [2] STINSON, D. *Cryptography, theory and practice* CRC press, 1995. *A Completeness Theorem*, v. 1.
- [3] BAI, L. et al. Physical layer authentication in wireless communication networks: A survey. *Journal of Communications and Information Networks*, PTP, v. 5, n. 3, p. 237–264, 2020.
- [4] PAUL, L. Y.; BARAS, J. S.; SADLER, B. M. Physical-layer authentication. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, IEEE, v. 3, n. 1, p. 38–51, 2008.
- [5] VERMA, G.; YU, P.; SADLER, B. M. Physical layer authentication via fingerprint embedding using software-defined radios. *IEEE Access*, IEEE, v. 3, p. 81–88, 2015.
- [6] PIPER, F.; MURPHY, S. *Cryptography: A Very Short Introduction*. [S.l.]: Oxford University Press, 2002.
- [7] NUNES, S. L. P. *Marca d'água digital: autenticação de imagens digitais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- [8] DELFS, H.; KNEBL, H.; KNEBL, H. *Introduction to cryptography*. [S.l.]: Springer, 2002.
- [9] COX, I. J.; MILLER, M. L.; MCKELLIPS, A. L. Watermarking as communications with side information. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 87, n. 7, p. 1127–1141, 1999.
- [10] TYLER, S. C. *The Design and Development of a Radio Frequency (RF) Watermarking Signature*. [S.l.], 2005.
- [11] KATZENBEISSER, S.; PETITCOLAS, F. *Digital watermarking*. Artech House, London, Springer, v. 2, 2000.
- [12] LEBOLD, B. *Physical layer watermarking of binary phase-shift keyed signals using standard gnu radio blocks*. Tese (Doutorado) — Oklahoma State University, 2011.

- [13] EVANGELISTA, J. V.; CHAVES, D. P.; PIMENTEL, C. Sistema de autenticação de usuário em camada física empregando sequências caóticas. *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, São Pedro, SP, Brasil*, 2017.
- [14] FIORESE, M. *Uma proposta de autenticação de usuário para ensino a distância*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.
- [15] XIE, X.; XU, Z.; XIE, H. Channel capacity analysis of spread spectrum watermarking in radio frequency signals. *IEEE Access*, IEEE, v. 5, p. 14749–14756, 2017.
- [16] XU, Z.; YUAN, W. Watermark ber and channel capacity analysis for QPSK-based RF watermarking by constellation dithering in AWGN channel. *IEEE Signal Processing Letters*, IEEE, v. 24, n. 7, p. 1068–1072, 2017.
- [17] WEST, N. *Phased Dithered Watermarking for Physical Layer Authentication*. Tese (Doutorado) — Oklahoma State University, 2014.
- [18] CONCEIÇÃO, M. L. *Comunicação por Luz Visível*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, 2015.
- [19] LOVISOLO, L.; TCHEOU, M. P.; VILA, F. R. A. Visible light-based communication and localization. *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances, Second Edition*, Wiley Online Library, p. 1121–1164, 2018.
- [20] AVILA, F. R.; LOVISOLO, L. Unsupervised time domain nonlinear post-equalization for ACO-OFDM visible light communication systems. In: IEEE. *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. [S.l.], 2017. p. 848–852.
- [21] LEE, J. et al. Positioning data watermarking scheme for QPSK-OFDM based VLC system. *International Information Institute (Tokyo). Information*, International Information Institute, v. 15, n. 3, p. 1073–1079, 2012.
- [22] RAPPAPORT, T. S. et al. *Wireless communications: principles and practice*. [S.l.]: prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [23] LEE, S.-H.; LEE, J.-H.; CHA, J.-S. A study of watermarking data transmission scheme for BPSK-OFDM based LED communication system. *The Journal of Korean*

- Institute of Communications and Information Sciences*, The Korean Institute of Communications and Information Sciences, v. 36, n. 10B, p. 1246–1251, 2011.
- [24] MARQUES, B. T. *Estudo de Sistemas de Comunicações MIMO VLC*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- [25] DANG, J.; WU, L.; ZHANG, Z. OFDM systems for optical communication with intensity modulation and direct detection. *Optical fiber and wireless communications*, Intech Open, v. 5, p. 85–103, 2017.
- [26] SILVA, L. H. R. d. *Rede sem fio sobre fibra (WoF)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2012.
- [27] ARMSTRONG, J. OFDM for optical communications. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 27, n. 3, p. 189–204, 2009.
- [28] KLEIDER, J. E. et al. Radio frequency watermarking for ofdm wireless networks. In: IEEE. *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. [S.l.], 2004. v. 5, p. V–397.
- [29] LATHI, B. P.; DING, Z. *Sistemas de comunicações analógicos e digitais modernos*. LTC, Rio de Janeiro, 2012.
- [30] LI, X. et al. Physical layer watermarking of direct sequence spread spectrum signals. In: IEEE. *MILCOM 2013-2013 IEEE Military Communications Conference*. [S.l.], 2013. p. 476–481.
- [31] SODERI, S. et al. Watermark-based secure communications in safety-related scenarios. In: IEEE. *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*. [S.l.], 2016. p. 1–5.
- [32] SCHMID, S. et al. Linux light bulbs: Enabling internet protocol connectivity for light bulb networks. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Visible Light Communications Systems*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 3–8.
- [33] DELFS, H.; KNEBL, H. *Introduction to Cryptography Principles and Applications (2007)*. [S.l.]: Springer.

- [34] COMMISSION, I. O. for S. E. et al. Information technology—open systems interconnection—basic reference model: The basic model. *ISO/IEC*, v. 427, 1994.
- [35] TELECO. Redes wi-fi ii: Tecnologias RF para 802.11. Disponível em: <https://teleco.com.br/tutoriais/tutorialwifimanaus2/pagina_3.asp/>. Acesso em: 05 de Janeiro de 2021.
- [36] VITTHALADEVUNI, P. K.; ALOUINI, M.-S. Exact BER computation of generalized hierarchical psk constellations. *IEEE Transactions on Communications*, IEEE, v. 51, n. 12, p. 2030–2037, 2003.
- [37] VENZOR, J. M. *Examination Regarding the Concealment of Watermarks in the Oscillator Phase Noise of Binary Phase Shift Keyed Signals*. Tese (Doutorado) — Oklahoma State University, 2017.
- [38] CRILLY, P. B. *Communication systems: An introduction to signals and noise in electrical communication*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2010.
- [39] JIANG, T. et al. On the limitation of embedding cryptographic signature for primary transmitter authentication. *IEEE Wireless Communications Letters*, IEEE, v. 1, n. 4, p. 324–327, 2012.
- [40] ELGALA, H.; MESLEH, R.; HAAS, H. An LED model for intensity-modulated optical communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 22, n. 11, p. 835–837, 2010.
- [41] DIMITROV, S.; HAAS, H. *Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015.
- [42] KHAN, L. U. Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 78–88, 2017.
- [43] MATHEUS, L. E. M. et al. Visible light communication: concepts, applications and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 3204–3237, 2019.
- [44] ARNON, S. *Visible light communication*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015.

- [45] LOOSE, F. et al. Ripple-based visible light communication technique for switched LED drivers. In: IEEE. *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- [46] DISSANAYAKE, S. D.; ARMSTRONG, J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 31, n. 7, p. 1063–1072, 2013.
- [47] IBHAZE, A. E.; ORUKPE, P. E.; EDEKO, F. O. High capacity data rate system: A review of visible light communication technology. *Journal of Electronic Science and Technology*, Elsevier, p. 100055, 2020.
- [48] LIFI.CO. What is visible light communication (VLC)? Disponível em: <<https://lifi.co/visible-light-communication/>>. Acesso em: 05 de Janeiro de 2021.
- [49] TELECO. Radio digital: O enlace. Disponível em: <<https://teleco.com.br/tutoriais>>. Acesso em: 18 de novembro de 2021.
- [50] MOREIRA, A. J. C. Alguns aspectos que condicionam o desempenho dos sistemas de transmissão. Disponível em: <<http://www3.dsi.uminho.pt/adriano/Teaching/Comum/FactDegrad.html>>. Acesso em: 18 de novembro de 2021.
- [51] HAYKIN, S.; MOHER, M. *Sistemas de Comunicação-5*. [S.l.]: Bookman Editora, 2011.
- [52] MA, H. *Coordinated transmission for visible light communication systems*. Tese (Doutorado) — University of British Columbia, 2017.
- [53] VITÓRIA, E. *Transmissão de Sinais OFDM com Envelope Constante em Sistemas Ópticos IM/DD*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.
- [54] TSONEV, D.; HAAS, H. Avoiding spectral efficiency loss in unipolar OFDM for optical wireless communication. In: IEEE. *2014 IEEE international conference on communications (ICC)*. [S.l.], 2014. p. 3336–3341.
- [55] WANG, T. Q.; LI, H.; HUANG, X. Diversity combining for layered asymmetrically clipped optical OFDM using soft successive interference cancellation. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 21, n. 6, p. 1309–1312, 2017.