

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DÉBORA BEATRIZ CLARO ZANITTI

**Avaliação do efeito do *crosstalk* na capacidade de canal em sistemas de comunicações ópticas
com multiplexação por divisão espacial**

São João da Boa Vista

2023

Programa de Pós-Graduação Interunidades em Engenharia Elétrica

DÉBORA BEATRIZ CLARO ZANITTI

**Avaliação do efeito do *crosstalk* na capacidade de canal em sistemas de comunicações ópticas
com multiplexação por divisão espacial**

Dissertação apresentada ao Conselho de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Pós-graduação em Engenharia Elétrica .

Linha de Pesquisa: Sinais e Comunicação

Orientador: Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde
Coorientadora: Profa. Dra. Cintya Wink de Oliveira Benedito

São João da Boa Vista

2023

Z31a

Zanitti, Débora Beatriz Claro

Avaliação do efeito do crosstalk na capacidade de canal em sistemas de comunicações ópticas com multiplexação por divisão espacial / Débora Beatriz Claro Zanitti. -- São João da Boa Vista, 2023

41 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Ivan Aritz Aldaya Garde

Coorientadora: Cintya Wink de Oliveira Benedito

1. Comunicações ópticas. 2. Fibras ópticas. 3. Multiplexação. 4. Sistemas MIMO. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

Este trabalho aborda um desafio importante na área de comunicações ópticas, que é o estudo de técnicas para aumentar a capacidade dos sistemas atuais para lidar com a crescente demanda por taxas de dados mais altas. Com isso, essa pesquisa estuda e analisa a técnica de multiplexação por divisão espacial (SDM) em combinação com o processamento de sinal de múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO) para aumentar a capacidade dos sistemas de comunicação óptica e analisar e mitigar o efeito do *crosstalk* em tais sistemas.

Potential impact of this research

This work addresses an important challenge in the field of optical communications, which is the study of techniques to increase the capacity of current systems to deal with the growing demand for higher data rates. Therefore, this research studies and analyzes the spatial division multiplexing (SDM) technique in combination with the multiple-input, multiple-output (MIMO) signal processing to increase the capacity of optical communication systems and analyze and mitigate the effect of crosstalk on such systems.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação do Efeito do Crosstalk na Capacidade de Canal em Sistemas de Comunicações Ópticas com Multiplexação por Divisão Espacial

AUTORA: DÉBORA BEATRIZ CLARO ZANITTI

ORIENTADOR: IVAN ARITZ ALDAYA GARDE

COORIENTADORA: CINTYA WINK DE OLIVEIRA BENEDITO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Elétrica, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. IVAN ARITZ ALDAYA GARDE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Eletronica e de Telecomunicacoes / Faculdade de Engenharia de Sao Joao da Boa Vista UNESP

Prof. Dr. RAFAEL ABRANTES PENCHEL (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Eletronica e de Telecomunicacoes / Faculdade de Engenharia de Sao Joao da Boa Vista UNESP

Profa. Dra. CARINA ALVES (Participação Virtual)
Matemática / IGCE - UNESP/Rio Claro (SP)

São João da Boa Vista, 02 de junho de 2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Priscila de Oliveira dos Santos".

Priscila de Oliveira dos Santos
Supervisora Técnica de Seção Substituta
Seção Técnica de Graduação e Pós-Graduação

RESUMO

Nesse projeto foi estudado e analisado a capacidade de sistemas de comunicações ópticas baseados em multiplexação por divisão espacial (SDM). A popularização de aplicações multimídia e a migração para sistemas de armazenamento e computação na nuvem estão conduzindo as pesquisas a desenvolverem sistemas cada vez mais eficientes, tanto em termos de eficiência espectral como energética. Além disso, o desenvolvimento da tecnologia de comunicação óptica coerente digital aumentou a capacidade do sistema próximo ao limite de Shannon imposto pela combinação de ruído aditivo e distorção não-linear. Para tal, os sistemas SDM se mostram promissores para alcançar tais objetivos pois permitem que sinais distintos sejam simultaneamente transmitidos explorando a diversidade espacial, usando fibras com múltiplos núcleos ou que suportem múltiplos modos. Estes sistemas geralmente apresentam um *crosstalk* não-desprezível além de serem afetados pela perda dependente do canal, assim sendo requerido um processamento de múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO) para compensar tais deficiências. Porém, a incipiente pesquisa de SDM em sistemas de comunicações ópticas faz com que grande parte de ferramentas já desenvolvidas para sistemas MIMO sem fio continuem sendo inexploradas. Neste contexto, no presente trabalho é mostrado a adaptação dos conceitos e ferramentas MIMO a sistemas de comunicações ópticas, considerando as particularidades destes, para atingir a maior capacidade em sistemas SDM.

PALAVRAS-CHAVE: comunicações ópticas; sistemas SDM; *crosstalk*; processamento MIMO.

ABSTRACT

In this project, the capacity of optical communication systems based on spatial division multiple-
xing (SDM) is studied and analyzed. The popularization of multimedia applications and the migration
to storage and computing systems in the cloud are driving research to develop increasingly efficient
systems in terms of both spectral and energy efficiency. Furthermore, the development of digital
coherent optical communication technology has increased the system capacity close to the Shannon
limit imposed by the combination of additive noise and non-linear distortion. To this end, SDM
systems are promising to achieve these goals because they allow different signals to be transmitted
simultaneously exploring spatial diversity, using fibers with multiple cores or that support multiple
modes. These systems generally exhibit non-negligible crosstalk in addition to being affected by
channel-dependent loss, thus requiring multiple-input multiple-output (MIMO) processing to compen-
sate for such deficiencies. However, the incipient research of SDM in optical communication systems
means that most of the tools already developed for wireless MIMO systems remain unexplored. In this
context, the present work shows the adaptation of MIMO concepts and tools to optical communication
systems, considering their particularities, to achieve greater capacity in SDM systems.

KEYWORDS: optical communication; SDM system; crosstalk; MIMO processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Tipos de fibras.	12
Figura 2	Gráfico exemplificando o número de modos em função do raio do núcleo da fibra e seus respectivos modos LP suportados.	16
Figura 3	Fibras MCFs baseadas em (a) vidros com diferentes índices de refração e (b) bu-racos de ar.	18
Figura 4	Diagrama de um Canal SDM sem e com processamento MIMO.	19
Figura 5	Diagrama de blocos de um sistema SDM óptico incluindo o estágio de processa-mento MIMO.	22
Figura 6	Capacidade do sistema considerando e não considerando o processamento MIMO em termos da potência do <i>crossstalk</i> para três níveis de potência de ruído, $P_n = 0, 1P_s, P_n = 0, 2P_s$ e $P_n = 0, 4P_s$	26
Figura 7	Capacidade do sistema em termos de transmissão de potência de cada canal quando (a) não for adotado nenhum processamento MIMO e (b) quando o processamento MIMO for incluído. (c) Aumento da capacidade em função da transmitância de potência quando o processamento MIMO é usado no receptor. Para os dois sistemas, a potência de ruído e a <i>crossstalk</i> foram ajustadas para $P_n = 0, 1P_s$ e $XT = 1$, respectivamente.	27
Figura 8	Análise do efeito do <i>crossstalk</i> na capacidade de sistemas MIMO 3×3 . (a) Autovalores de 10000 matrizes de canal geradas aleatoriamente e sua soma (b) Histograma dos autovalores e a sua soma. (c) Capacidades associadas a cada matriz de canal. (d) Histogramas dessas capacidades e a capacidade máximo teórica. (e) Capacidade total do sistema MIMO 3×3 . (f) Distribuição da penalização na capacidade total do canal MIMO e (g) distribuição cumulativa da penalização	32
Figura 9	Análise do efeito do <i>crossstalk</i> na capacidade de sistemas MIMO 4×4 . (a) Autovalores de 10000 matrizes de canal geradas aleatoriamente e sua soma (b) Histograma dos autovalores e a sua soma. (c) Capacidades associadas a cada matriz de canal. (d) Histogramas dessas capacidades e a capacidade máximo teórica. (e) Capacidade total do sistema MIMO 4×4 . (f) Distribuição da penalização na capacidade total do canal MIMO e (g) distribuição cumulativa da penalização.	33

Figura 10	Análise do efeito do <i>crosstalk</i> na capacidade de sistemas MIMO 5×5 . (a) Autovalores de 10000 matrizes de canal geradas aleatoriamente e sua soma (b) Histograma dos autovalores e a sua soma. (c) Capacidades associadas a cada matriz de canal. (d) Histogramas dessas capacidades e a capacidade máximo teórica. (e) Capacidade total do sistema MIMO 5×5 . (f) Distribuição da penalização na capacidade total do canal MIMO e (g) distribuição cumulativa da penalização.	34
Figura 11	Análise da capacidade de um sistema MIMO 3×3 com variação da SNR, onde o tracejado refere-se a capacidade máxima para cada SNR.	35
Figura 12	Análise da capacidade de um sistema MIMO 4×4 com variação da SNR, onde o tracejado refere-se a capacidade máxima para cada SNR.	35
Figura 13	Análise da capacidade de um sistema MIMO 5×5 com variação da SNR, onde o tracejado refere-se a capacidade máxima para cada SNR.	36
Figura 14	Capacidade total média em função de cada SNR.	36
Figura 15	Decaimento da capacidade em função de cada SNR.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CGH	Hologramas gerados por computador
FMF	Fibra de poucos modos
LCoS	Cristal líquido em silício
MCF	Fibras multinúcleo
MDL	Perda dependendo do modo
MIMO	Múltiplas-entradas e múltiplas-saídas
MMF	Fibras multimodo
PDM	Multiplexação por divisão de polarização
SDM	Multiplexação por divisão espacial
SISO	Única-entrada e única-saída
SLM	Modulador de luz espacial
SMF	Fibra de modo único
SNIR	Relação sinal-interferência e ruído
SNR	Relação sinal ruído
TDM	Multiplexação por divisão temporal
WDM	Multiplexação por divisão de comprimento de onda

LISTA DE SÍMBOLOS

\dagger	Transposto conjugado, conjugado Hermitiano ou transjugado
\mathbf{H}	Matriz de canal
\mathbf{H}_{CDL}	Matriz de um canal com perda dependente do canal, <i>channel dependent loss</i>
\mathbf{H}_{XT}	Matriz de um canal com <i>crosstalk</i>
\mathbf{H}_{XT-CDL}	Matriz de um canal com <i>crosstalk</i> e perda dependente do canal
C	Capacidade
C_{SDM}	Capacidade do sistema SDM
C_{MIMO}	Capacidade do sistema MIMO
I_n	Matriz identidade, onde n refere-se a dimensão do canal
j	Parte imaginária de um número complexo
P_n	Potência do ruído
P_s	Potência do sinal
XT	<i>Crosstalk</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contribuição	14
1.2	Estrutura do trabalho	14
2	SISTEMAS SDM ÓPTICOS E PROCESSAMENTO MIMO	15
2.1	Sistemas SDM baseados em divisão modal	15
2.1.1	<i>Excitação de modos em sistemas SDM por divisão modal</i>	15
2.1.2	<i>Deficiências relacionadas a divisão modal</i>	17
2.2	Sistemas SDM baseados em fibras multinúcleo	17
2.2.1	<i>Excitação dos núcleos em fibras multinúcleo</i>	18
2.2.2	<i>Deficiências relacionadas a sistemas SDM usando fibras multinúcleos</i>	18
2.3	Processamento MIMO nas comunicações ópticas	19
3	CAPACIDADE	20
3.1	Modelo de canal	20
3.2	Capacidade do sistema sem processamento MIMO	21
3.3	Capacidade do sistema com processamento MIMO	23
4	RESULTADOS	24
4.1	Sistemas MIMO 2×2	24
4.1.1	<i>Sistema sem crosstalk e com perda dependente do canal</i>	24
4.1.2	<i>Sistema sem perdas e com crosstalk</i>	24
4.1.3	<i>Sistema com perda dependente do canal e crosstalk</i>	25
4.2	Sistemas $n \times n$	28
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Com o grande avanço da tecnologia nos últimos anos, os meios de comunicação se tornaram essenciais em nosso cotidiano. A sociedade de hoje demanda e depende cada vez mais da troca de informações rápida e confiável. Sistemas de comunicação avançados apoiam a operação de indústrias, negócios e bancos (AGRELL, 2016), e o desafio para a comunidade científica continua sendo projetar sistemas de comunicação que garantam uma transmissão confiável com altas taxas de dados, bem como alta velocidade (FALOU, 2013). Esses sistemas fazem uso de redes troncais compostas de fibras ópticas, pois nenhum outro meio conhecido pode suportar as enormes demandas por taxa de dados de transmissão guiada de longa distância, confiabilidade e eficiência energética (AGRELL, 2016). Para aumentar ainda mais a capacidade de um link de telecomunicação, as técnicas de multiplexação podem ser aplicadas em 5 dimensões físicas: amplitude, quadratura, polarização, frequência e espaço (PAUWELS; SANDE; VERSCHAFFELT, 2019).

As primeiras três gerações de comunicações ópticas faziam uso da multiplexação por divisão temporal (TDM, *Time Division Multiplexing*) para transmitir diferentes sinais de voz digitalizadas por uma única fibra. A partir da quarta geração de comunicações ópticas, grande parte dos sistemas de comunicações de alta capacidade adotaram o uso da multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM, *Wavelength-Division Multiplexing*), que é uma técnica em que diversos sinais ópticos modulados em diferentes comprimentos de onda são combinados e transmitidos por uma única fibra de um único modo. Já na quinta geração, a multiplexação por divisão de polarização (PDM, *Polarization-Division Multiplexing*) foi utilizada em combinação com a WDM.

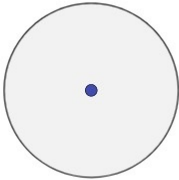
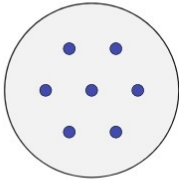
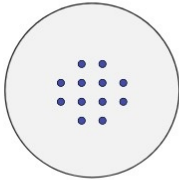
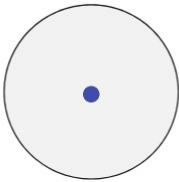
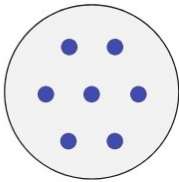

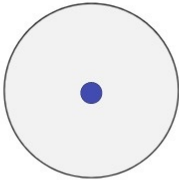
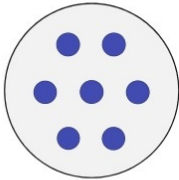
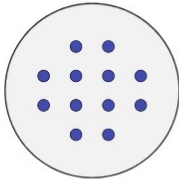
O desenvolvimento dos sistemas digitais coerentes que ocorreu na quinta geração revolucionou a forma como as redes de comunicação óptica são projetadas (LI *et al.*, 2020). Isto porquê, tais sistemas permitem a adoção de formatos avançados de modulação, que exploram a diversidade de fase e polarização, e também abrem a possibilidade de mitigar o impacto das deficiências de transmissão de forma mais eficiente (FARUK; SAVORY, 2017), como efeitos da dispersão cromática, dispersão do modo de polarização e ruído de fase.

Embora com contínuos avanços, a grande demanda por taxas de dados mais altas excederá a capacidade desses atuais sistemas, pois a combinação de distorção não-linear e ruído aditivo ainda representa uma capacidade limitada a esses sistemas. Assim, os sistemas com multiplexação por divisão espacial (SDM, *Space division multiplexing*) se tornam uma alternativa promissora, para atuar paralelamente com tais sistemas e desempenhar um papel fundamental no suporte às demandas massivas de comunicação na rede de comunicação óptica (JIANG; TSUBOKAWA, 2020). SDM refere-se à transmissão simultânea de sinais distintos explorando diferentes canais espaciais ou distribuições espaciais de campo, assim, permitindo grandes aumentos na capacidade de transmissão usando o espaço. Além disso, o SDM pode não apenas aumentar a capacidade, mas também deve melhorar a eficiência energética e permitir um custo por bit significativamente mais baixo (RICHARDSON; FINI; NELSON, 2013).

O conceito básico de SDM baseia-se em colocar em uma determinada estrutura de fibra ou arranjo

de fibra, vários canais espaciais (SARIDIS *et al.*, 2015). As primeiras tentativas de realizar SDM foram combinando várias fibras monomodo (SMF, *Single Mode-Fiber*). Porém, se tratando de espaço, não se tornou tão eficiente para a adoção (SARIDIS *et al.*, 2015). Mais recentemente, propuseram-se duas alternativas: as fibras multinúcleo (MCF, *Multi-Core Fibers*) e as fibras multimodo (MMF, *Multi-Mode Fibers*), nas quais são utilizadas a extensão espacial da fibra para criar canais de dados paralelos. A Figura 1 mostra os exemplos dos tipos de fibra utilizadas no SDM.

Figura 1 – Tipos de fibras.

Nº DE MODOS	NÚCLEO ÚNICO	MULTI NÚCLEO	
		Desacoplado	Acoplado
ÚNICO	 SMF	 MCF	 LMA
	 FMF	 Poucos modos MCF	 Acoplamento fraco
	 MMF	 Multi modo MCF	 LMA

Fonte: elaborada pela autora.

Em particular, as fibras MCF tem atraído uma crescente atenção nos últimos anos como plataforma para os sistemas SDM, (SARIDIS *et al.*, 2015; HAYASHI *et al.*, 2011). Para este tipo de fibra, existem duas opções de design para a alocação dos núcleos: núcleos desacoplados e acoplados.

Em MCFs têm-se os canais bem separados e fisicamente distintos, mantendo estes núcleos bem espaçados sendo conseqüentemente uma maneira simples de limitar o *crosstalk* (RICHARDSON; FINI; NELSON, 2013). Em sistemas ópticos, o *crosstalk* é um fenômeno indesejado que ocorre quando os feixes de luz transmitidos interagem uns com os outros, causando interferência e degradação do desempenho do sistema (RICHARDSON; FINI; NELSON, 2013). O *crosstalk* pode ser causado por diversos fatores, um deles é através do acoplamento. Quando os núcleos se encontram mais próximos, é possível garantir um melhor acoplamento, formando um arranjo de núcleos onde em que são transmitidos os denominados supermodos (RYF *et al.*, 2011a; RYF *et al.*, 2011b).

Nas fibras MCFs de núcleos desacoplados, cada núcleo é usado como um guia de onda individual, sendo cada núcleo bem organizado para ter um *crosstalk* relativamente baixo em aplicações de enlaces de grandes distâncias, pois quando temos uma distância entre núcleos muito pequena, resulta neste tipo de fenômeno (SAITOH *et al.*, 2012). No Capítulo 2, mais sobre essas fibras e do SDM serão apresentados.

Em contraste com outras técnicas de multiplexação, como WDM, os sistemas SDM são propensos a essas interferências entre canais, os *crosstalk*, não-desprezível. Neste fenômeno, parte da intensidade um sinal transmitido em um canal de transmissão cria um efeito indesejado em outro. Além disso, a excitação dos diferentes modos ou dos modos fundamentais dos núcleos da fibra, também é uma fonte de *crosstalk* não desprezível. Se não for tratado adequadamente, a interferência entre canais pode afetar gravemente a capacidade geral, fazendo com que o SDM decepcione a capacidade esperada (WINZER; FOSCHINI, 2014). Uma solução natural para este problema é implementar um esquema de processamento de sinal de múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO, *Multiple Inputs and Multiple Outputs*), que tem sido amplamente estudado em aplicações sem fio (LI *et al.*, 2014; PAUWELS; SANDE; VERSCHAFFELT, 2019).

O processamento MIMO refere-se a uma coleção de técnicas de processamento de sinal que foram desenvolvidas para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio usando várias antenas no transmissor, receptor ou ambos, tendo o principal objetivo, explorar a diversidade espacial e técnicas de multiplexação espacial (HAMPTON, 2013). Essas técnicas vem sendo amplamente estudadas e implantadas com sucesso em comunicações sem fio, porém apresentam diferentes conjuntos de condições de limite para aplicações SDM ópticas (AGRELL, 2016). Em comunicações ópticas, a técnica de processamento de sinal MIMO foi introduzida nos sistemas coerentes para compensar no domínio digital as flutuações do estado de polarização do sinal recebido. Com a implementação de sistemas SDM, o processamento MIMO também é utilizado para mitigar o efeito da interferência causada por *crosstalk* ao longo de arranjos ópticos (JIANG; TSUBOKAWA, 2020).

Existem várias diferenças substanciais na aplicação de processamento MIMO em comunicações sem fio e ópticas, fazendo necessário considerar algumas particularidades. Por um lado, em sistemas sem fio, o tempo de coerência do canal é mais curto em relação ao período de símbolo que em sistemas de comunicações ópticos. Por outro lado, em aplicações de comunicações sem fio, os sistemas MIMO exploram a diversidade entre os diferentes canais, permitindo evitar o efeito de desvanecimento (GOLDSMITH, 2012). Em sistemas de comunicações ópticas, por outro lado, permitem reduzir o efeito da interferência entre os canais. No entanto, em ambos os cenários, o processamento MIMO resulta em um aumento da capacidade do sistema (HAMPTON, 2013).

A capacidade é a maior taxa de transmissão que pode ser atingida com a maior confiabilidade possível (COVER; THOMAS, 2006), ou seja, sem que haja erros nas transmissão que possam comprometer a informação. Nos sistemas MIMO, a capacidade pode ser quantificada em função da relação sinal ruído (SNR, *Signal to Noise Ratio*), uma medida que compara o nível de sinal transmitido com o ruído sobreposto ao sinal e uma matriz que descreve as características do canal. Além disso, capacidade MIMO pode ser melhorada através da técnica *water-filling*, que é um método de alocação de potência, onde normalmente se aplica uma maior potência aos canais que apresentam boas condições e menor

potência, ou nenhuma, para os canais que possuem condições desfavoráveis. Essa capacidade é um fator importante para avaliar o desempenho dos sistemas MIMO (JIANG; TSUBOKAWA, 2020), o qual esse trabalho pretende estudar e analisar.

1.1 CONTRIBUIÇÃO

Este trabalho teve como principal objetivo e contribuição analisar a capacidade dos sistemas de multiplexação por divisão espacial ópticos utilizando técnicas de processamento de sinal MIMO. Para atingir este objetivo, foi preciso desenvolver um modelo geral de sistemas SDM que incluísse os efeitos particulares destes sistemas.

Primeiramente, foi analisado de forma teórica a capacidade de sistemas ópticos 2×2 para três cenários diferentes: um sistema com perda dependente de canal e sem *crosstalk*, um apenas com *crosstalk* e por último, um sistema com ambos. Ao modelar tais sistemas, foi possível observar que para o caso 2×2 , ao implementar um processamento MIMO no receptor é possível compensar o efeito do *crosstalk* na capacidade.

Posteriormente, utilizando-se de um modelo numérico criado para analisar sistemas SDM $n \times n$, foi exemplificado o efeito do *crosstalk* em sistemas 3×3 , 4×4 e 5×5 . Os resultados obtidos mostraram que o *crosstalk* pode ter um efeito significativo na capacidade, impactando negativamente no desempenho do sistema em termos da capacidade total.

Em resumo, este trabalho teve como principal contribuição fornecer uma análise detalhada da capacidade em sistemas ópticos 2×2 e $n \times n$, em específico 3×3 , 4×4 e 5×5 , com processamento MIMO considerando o efeito do *crosstalk* sobre os mesmos. Os resultados obtidos podem ser úteis para a compreensão desses sistemas, auxiliando em projetos de otimização de sistemas de comunicação óptica. Além disso, ajuda a entender melhor os desafios e limitações impostos pelo *crosstalk*.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 são abordados os principais conceitos de SDM em comunicações ópticas, os quais auxiliaram no desenvolvimento do trabalho e entendimento do mesmo. No Capítulo 3 é elucidado como obtém-se a capacidade para os sistemas SDM, e para isso também são apresentados alguns conceitos algébricos que são indispensáveis para o entendimento de algumas operações e é apresentado o modelo do canal. Já no Capítulo 4 são apresentados os resultados nos estudos de sistemas 2×2 e $n \times n$ ópticos, para este último, os casos 3×3 , 4×4 e 5×5 . E, por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas no desenvolvimento desde trabalho.

2 SISTEMAS SDM ÓPTICOS E PROCESSAMENTO MIMO

Um sistema de comunicação óptica usa portadoras de alta frequência principalmente nas regiões do infravermelho próximo e médio do espectro eletromagnético para a transmissão de informação de um lugar a outro (AGRAWAL, 2014). Desde 1990, com a implementação da quarta geração de sistemas de comunicações ópticas, utilizam-se sistemas WDM. Atualmente, tal tecnologia é empregada usando fibras monomodo. Os sistemas WDM permitiram incrementar significativamente a capacidade dos sistemas de comunicações ópticas mas a combinação do ruído aditivo e as não linearidades continuam estabelecendo um limite à capacidade dos sistemas. A fim de aumentar a capacidade além do mencionado limite, uma das soluções de maior potencial é a implementação de sistemas SDM. Neste capítulo descrevemos as particularidades dos sistemas SDM tanto nos sistemas baseados em divisão modal como em MCFs, e justificamos a necessidade de utilizar processamento MIMO para compensar ou mitigar alguns dos efeitos que podem inviabilizar a implementação dos sistemas SDM. Em particular, nos focaremos no *crosstalk*, o qual é um fenômeno intrínseco em todos os sistemas SDMs ópticos.

2.1 SISTEMAS SDM BASEADOS EM DIVISÃO MODAL

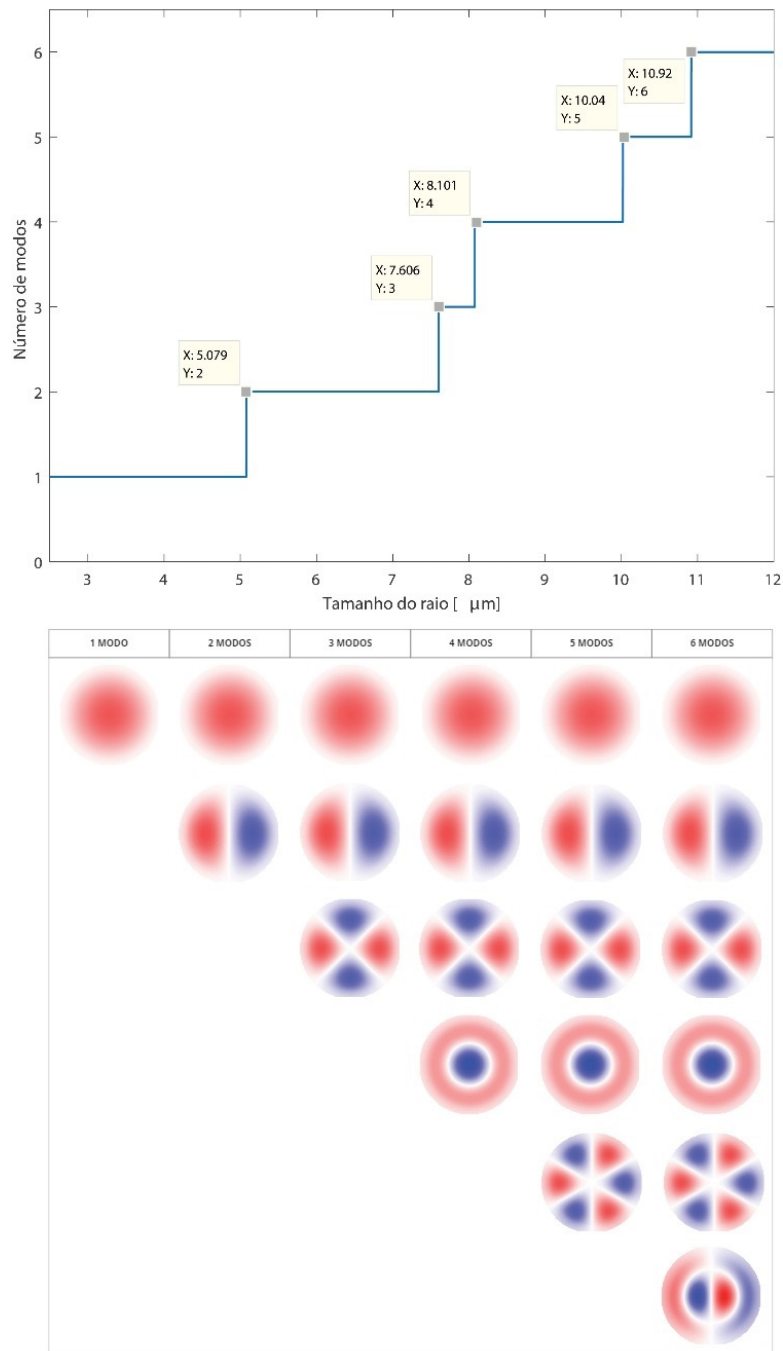
Em fibras multimodo (MMF), a luz se propaga por vários modos, o que significa que mais de uma informação pode ser enviada ao mesmo tempo. Isso ocorre devido ao diâmetro do núcleo ser superior ao das fibras monomodo. A Figura 2 exemplifica a quantidade de modos suportados por uma fibra ao aumentar o diâmetro de seu núcleo. Para tal exemplo, foi considerado uma fibra com índice de refração do núcleo e da casca de $n_1 = 1,53345$ e $n_2 = 1,52793$, respectivamente. Além disso, o comprimento de onda foi de $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ para uma variação de raio de 0 a $12,5\mu\text{m}$, em espaços de $0,001\mu\text{m}$.

2.1.1 Excitação de modos em sistemas SDM por divisão modal

Para excitar um determinado modo em uma fibra, diferentes técnicas podem ser utilizadas, sendo as principais as lanternas fotônicas, os acopladores integrados e os moduladores espaciais de luz. Uma lanterna fotônica é um dispositivo de fibra que faz a interface de um núcleo multimodo com um sistema de núcleos monomodo (BIRKS; GRIS-SÁNCHEZ; YEROLATSITIS, 2014). Estes são componentes chave em sistemas SDM para converter sinais monomodo em diferentes modos suportados por um guia de ondas multimodo e vice-versa (VELÁZQUEZ-BENÍTEZ; A.M. ANTONIO-LÓPEZ; ALVARADO-ZACARÍAS, 2018). A fabricação dessas lanternas de fibra se dá através da implantação de uma matriz circular de várias fibras ópticas monomodo que, posteriormente, serão fundidas de maneira a se tornar uma fibra multimodo (VELÁZQUEZ-BENÍTEZ; A.M. ANTONIO-LÓPEZ; ALVARADO-ZACARÍAS, 2018). A princípio, o número de modos suportados pela junção das fibras é igual ao número de fibras utilizadas no dispositivo (BIRKS; GRIS-SÁNCHEZ; YEROLATSITIS, 2014).

Os acopladores integrados são dispositivos que permitem a geração de feixes com diferentes distribuições projetadas para excitar um determinado modo. Por exemplo, em (RUIZ *et al.*, 2022a),

Figura 2 – Gráfico exemplificando o número de modos em função do raio do núcleo da fibra e seus respectivos modos LP suportados.



Fonte: elaborada pela autora.

reporta-se um acoplador que permite excitar independentemente três modos de uma fibra de poucos modos.

A modulação de luz espacial é uma tecnologia com uma ampla gama de aplicações (PINHO *et al.*, 2019). Isso porquê, prevê-se a aplicação em multiplexação por divisão de modo, ou núcleo, para melhorar a compensação de canal (PINHO; LIMA; TEIXEIRA, 2016). Entre as várias tecnologias de modulador de luz espacial (SLM, *spatial light modulator*), o mais comumente usado é o baseado em cristal líquido sobre silício (LCoS, *liquid crystal on silicon*). Em sistemas de multiplexação

por divisão espacial, plataformas de acoplamento flexível baseada em SLM vem sendo utilizadas para excitar eficientemente diferentes núcleos em fibras multinúcleos ou diferentes modos em fibras multimodos (PINHO *et al.*, 2019). Os moduladores espaciais de luz tem ganhado atenção pois podem ser empregados para excitar diferentes núcleos e/ou modos a fim de mitigar as deficiências de transmissão introduzidas por múltiplos caminhos ópticos, comuns aos sistemas SDM, pois permite a remoção ou adição arbitrária de canais com auxílio de software, ou seja, implementação de um elemento óptico difrativo por hologramas gerados por computador (CGH, *computer-generated holograms*) (PINHO *et al.*, 2019), que tem como propriedade mais útil a capacidade de controlar a fase e a amplitude da luz no campo distante.

2.1.2 Deficiências relacionadas a divisão modal

O *crosstalk* e a perda dependente do modo (MDL, *mode dependent loss*) são dois dos efeitos mais relevantes em sistemas SDM (ANTONELLI *et al.*, 2020). Um regime de transmissão acoplada está associado ao uso de fibras das quais as ondas de luz em diferentes canais espaciais são fortemente misturadas (LUÍIS *et al.*, 2018). Para tais sistemas, o *crosstalk* é tratado como um limitante do desempenho. Já a perda dependente do modo é causada pois os componentes ópticos empregados nesses sistemas possui imperfeições de fabricação, levando a deficiências significativas (LOBATO *et al.*, 2012).

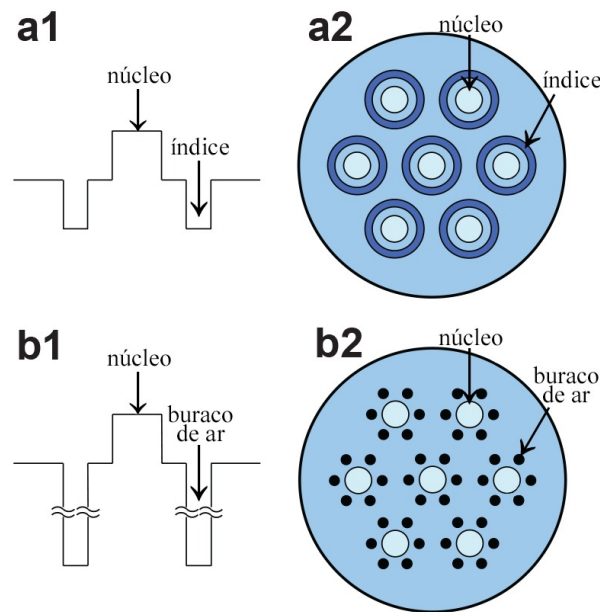
Ambas as deficiências ocorrem tanto na excitação quanto na transmissão. Na excitação, o *crosstalk* ocorre devido à correspondência de modo imperfeita e na transmissão, ocorre devido a flutuações nas dimensões e índice de refração. A perda dependente do modo ocorre porque a correspondência de modo não é a mesma para todos os modos nos estágios de excitação e na transmissão, o perfil de campo diferente dos modos faz com que a sobreposição na interface núcleo/revestimento varie.

2.2 SISTEMAS SDM BASEADOS EM FIBRAS MULTINÚCLEO

As tecnologias de transmissão por MCF, ou seja, fibras que contêm múltiplos núcleos dentro do mesmo revestimento (AGRAWAL, 2019), têm sido amplamente estudadas como uma forma mais simples de SDM. Existem muitos tipos de MCFs, mas o mais comum são as do tipo desacoplada, onde cada núcleo é considerado um caminho óptico independente (AWAJI; SAITOH; MATSUO, 2013), permitindo assim ter um *crosstalk* relativamente baixo em aplicações de longas distâncias (SAITOH *et al.*, 2012). Se os núcleos estiverem relativamente distantes, seus modos individuais se sobrepõem de forma insignificante e a fibra multinúcleo se comporta como um feixe de fibras monomodo (AGRAWAL, 2019). Em fibras multinúcleo desacopladas, os modos que viajam em um núcleo, em princípio, não se sobrepõem aos modos dos outros núcleos. No entanto, a sobreposição de modos não é desprezível se os núcleos estiverem próximos, é o que acontece em fibras multinúcleo acopladas (AGRAWAL, 2019). Esses modos são chamados de supermodos e seu número é igual ao número de núcleos de modo dentro de uma fibra. As fibras multinúcleo de modo acoplado podem ser analisadas empregando a teoria modal, estendendo os modos aos supermodos. Tudo o que mencionamos para os sistemas de divisão modal é aplicável. Cabe mencionar que os perfis de índice de refração das fibras MCFs é especialmente projetado para confinar o máximo possível a luz em cada

núcleo e minimizar o acoplamento entre núcleos. Na Figura 3 mostramos dois exemplos de fibra MCF baseadas em vidros com diferentes índices de refração e com buracos de ar.

Figura 3 – Fibras MCFs baseadas em (a) vidros com diferentes índices de refração e (b) buracos de ar.



Fonte: imagem editada de (HAYASHI, 2016).

2.2.1 Excitação dos núcleos em fibras multinúcleo

As técnicas de excitação em sistemas MCFs são parecidos aos métodos mencionados para sistemas SDM baseados em multiplexação modal. O equivalente à lanterna fotônica é denominado fan-out, o qual é implementado de forma similar a lanternas fotônicas (UEMURA *et al.*, 2014). Já em relação aos acopladores, tem sido desenvolvido acopladores compactos para acoplar luz em diferentes núcleos (RUIZ *et al.*, 2022b). Finalmente, os SLMs também podem ser utilizados para acoplar luz a cada modo (LEE *et al.*, 2015).

2.2.2 Deficiências relacionadas a sistemas SDM usando fibras multinúcleos

O *crosstalk* entre núcleos é uma limitação potencial nas taxas de dados alcançáveis em sistemas de transmissão por fibra óptica usando MCF (RADEMACHER *et al.*, 2017). Esse fenômeno surge através de um acoplamento indesejado entre os núcleos de uma fibra multinúcleo homogênea, onde potência de um sinal de um ou mais núcleos da fibra se acopla em outro núcleo, prejudicando assim um sinal que esteja sendo transmitido ali.

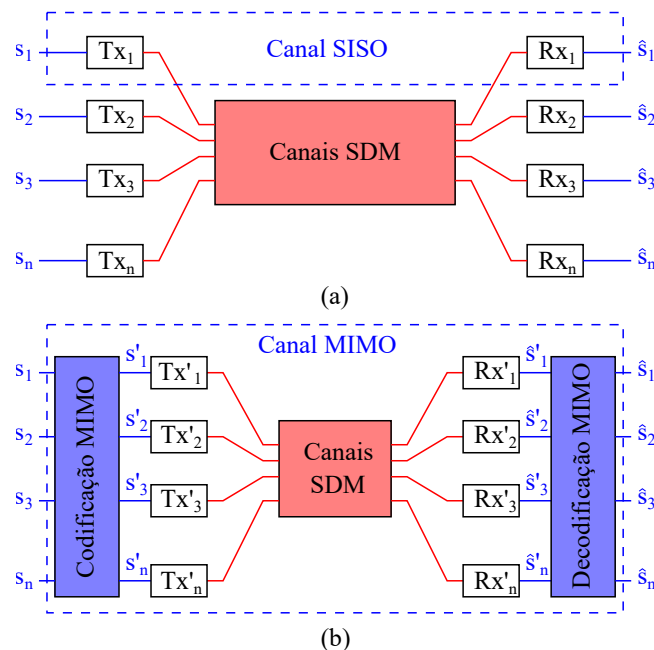
Ambas as deficiências ocorrem tanto na excitação/recuperação quanto na transmissão. Na excitação/recuperação, o *crosstalk* ocorre porque os acopladores não podem direcionar a energia apenas nas direções desejadas (os lóbulos laterais causam escape de energia). Já na transmissão, inclinações e dobras nas fibras levam ao escape de energia que é acoplado a outros núcleos.

2.3 PROCESSAMENTO MIMO NAS COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

Como já mencionado, os primeiros sistemas de processamento MIMO em sistemas de comunicação óptica eram sistemas de polarização dupla, empregados como uma forma de aumentar a eficiência espectral e de energia, especialmente em sistemas coerentes digitais (ROBERTS *et al.*, 2009). Nestes sistemas, quase todos os graus de liberdade da onda de luz, incluindo amplitude, fase e polarização, são utilizados simultaneamente para transportar informação, assim tem-se o que chamamos sistemas coerentes, capazes de aumentar a capacidade de transmitir mais informações em um período menor de tempo (ZHENG *et al.*, 2014).

Para superar o limite de capacidade de comunicação e atender à demanda insaciável de dados, pesquisadores vem estudando as técnicas de implementação e viabilidade da multiplexação por divisão espacial (SDM). Porém, SDM apresenta um *crosstalk* muito superior à outros esquemas de multiplexação como WDM. Neste contexto, o processamento MIMO, isto é, o processamento conjunto da informação dos diferentes canais SDM é necessário para que o sistema de comunicações opere satisfatoriamente.

Figura 4 – Diagrama de um Canal SDM sem e com processamento MIMO.



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 4, mostra dois sistemas SDM. Por um lado, um sistema SDM em que cada canal SDM é processado de forma independente, Figura 4(a), e por outro lado um sistema com processamento conjunto, que denominamos MIMO, Figura 4(b). Como pode-se observar, o processamento MIMO pode ser implementado tanto na entrada do sistema SDM como na saída. No presente trabalho, limitamos o nosso estudo ao processamento na saída a fim de analisar o efeito do *crosstalk* quando a informação dos diferentes sinais de saída é processada conjuntamente.

3 CAPACIDADE

Neste Capítulo é abordado o estudo sobre a obtenção da capacidade de sistemas ópticos. Para isto, inicia-se apresentando o modelo de canal e suas características.

3.1 MODELO DE CANAL

Considerando um sistema SDM óptico composto de n canais de entrada e saída única (SISO, *single-input-single-output*), obtendo-se assim o número de sinais de entrada e saída sendo o mesmo. Denominando a i -ésima entrada como $s_i(t)$ e, supondo que seja um sinal estacionário em sentido amplo de média zero, pode-se calcular a potência como:

$$P_i = \langle s_i^2(t) \rangle. \quad (3.1)$$

Também é assumido que as entradas do sistema SDM são mutuamente independentes. Esses sinais são acoplados, propagados e desacoplados, levando à interferência entre os sinais e perda dependente do canal (cada sinal pode sofrer diferentes perdas de acoplamento e propagação). A interferência e a perda dependente do canal podem ser modeladas usando a seguinte matriz (GOLDSMITH, 2012):

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

do qual h_{ij} é o coeficiente de transmissão complexo da j -ésima entrada para a i -ésima saída.

Existem dois casos particulares de \mathbf{H} que são de particular interesse. Por um lado, uma matriz diagonal ($h_{ij} = 0$ se $i \neq j$) representa um sistema livre de interferências onde cada canal tem um coeficiente de transmissão de T_i . Essa matriz tem a forma:

$$\mathbf{H}_{CDL} = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & T_n \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Portanto, a perda associada ao i -ésimo canal é dada por $1/(T_i^2)$. Por outro lado, outra matriz com interesse especial é uma matriz de *crosstalk* que descreve um sistema onde não há perda, mas a potência de um determinado sinal é acoplada não a uma única, mas a todas as saídas. O princípio da conservação de energia implica que:

$$\sum_{i=1}^n |h_{ij}|^2 = 1, \forall j \in [1, n]. \quad (3.4)$$

Neste caso, defini-se o crosstalk XT_{ij} da j -ésima entrada na i -ésima saída como

$$XT_{ij} = |h_{ij}|^2. \quad (3.5)$$

Uma vez que em sistemas digitais coerentes têm deficiências como ruído de fase, desvio de frequência, dispersão cromática e dispersão de modo de polarização são compensadas no domínio digital, e assumindo que o sistema está operando no regime de transmissão linear, onde a distorção não linear causada pelo efeito Kerr pode ser negligenciada, o prejuízo dominante é o ruído aditivo (POGGIOLINI *et al.*, 2011). Tal ruído pode ser causado pelo receptor ou por qualquer dispositivo óptico ativo dentro do link (de fato, sob certas condições os efeitos não lineares também podem ser modelados como um ruído aditivo, o que poderia expandir a aplicabilidade do modelo para o regime não linear). Após adicionar o ruído, o i -ésimo sinal de saída pode ser expresso como:

$$y_i = h_{ii}s_i + \sum_{j \neq i}^n (h_{ij} \cdot s_j) + \eta_i, \quad (3.6)$$

do qual, o primeiro elemento do lado esquerdo corresponde ao termo do sinal, enquanto o segundo e o terceiro termos representam a interferência dos outros canais e o ruído aditivo. Em uma notação compacta, podemos escrever o conjunto dos n sinais de saída \mathbf{y} em termos dos n sinais de entrada \mathbf{s} , a matriz de canais \mathbf{H} e o conjunto de sinais de ruído $\bar{\eta}$:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \bar{\eta}. \quad (3.7)$$

Na ausência de processamento MIMO, cada receptor tem a informação de um único sinal.

No caso do processamento MIMO estar incluído, os receptores não possuem informação apenas do seu sinal recebido, mas também dos demais receptores. Portanto, os sinais recebidos podem ser combinados para melhorar a capacidade do canal. A saída do estágio MIMO pode então ser escrita como:

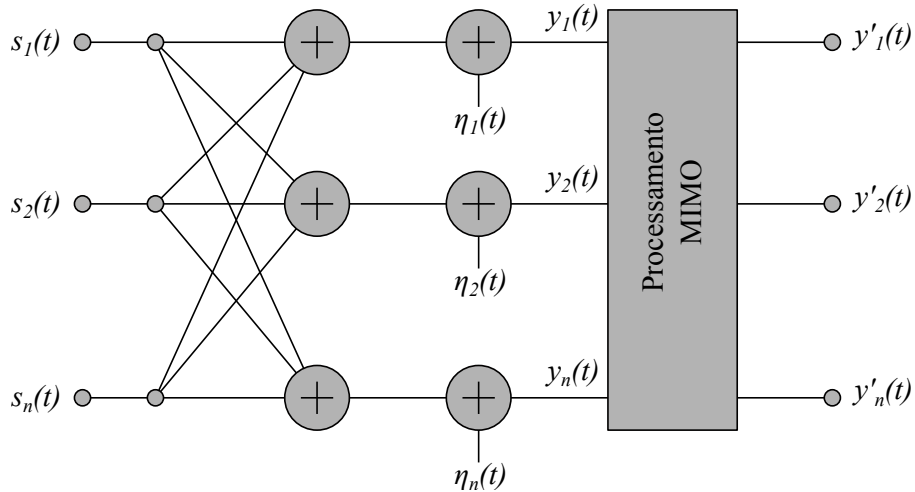
$$\mathbf{y}' = \mathbf{H}_{\text{MIMO}} \cdot \mathbf{y}, \quad (3.8)$$

do qual \mathbf{H}_{MIMO} é a matriz de processamento MIMO. A Figura 5 mostra o diagrama de blocos do sistema SDM incluindo o estágio de processamento MIMO.

3.2 CAPACIDADE DO SISTEMA SEM PROCESSAMENTO MIMO

Como mencionado anteriormente, na ausência de processamento MIMO, a única contribuição para uma determinada saída é aquela referente a sua entrada, enquanto as contribuições de outras entradas aparecem como uma interferência. Além disso, a potência da i -ésima entrada acoplada à j -ésima saída é perdida. A partir da Equação 3.6 é possível obter a relação sinal-interferência e ruído (SINR, *signal*

Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema SDM óptico incluindo o estágio de processamento MIMO.



Fonte: elaborada pela autora.

to interference and noise ratio) do i -ésimo canal (POGGIOLINI *et al.*, 2011):

$$SINR_i = \frac{|h_{ii}|^2 \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} (|h_{ij}|^2 \cdot P_j) + P_{n,i}}, \quad (3.9)$$

onde P_i e P_j são as potências dos sinais de entrada i -ésima e j -ésima e $P_{n,i}$ é a potência da contribuição do ruído para a i -th saída. Aplicando a fórmula de Shannon para a capacidade do canal, temos que para o i -ésimo canal, a capacidade máxima é:

$$C_i = \log_2 (1 + SINR_i), \quad (3.10)$$

e a capacidade total agregada do SDM é:

$$\begin{aligned} C_{SDM} &= \sum_{i=1}^n C_i \\ &= \sum_{i=1}^n \log_2 \left(1 + \frac{|h_{ii}|^2 \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} (|h_{ij}|^2 \cdot P_j) + P_{n,i}} \right). \end{aligned} \quad (3.11)$$

A Equação 3.11 pode ser simplificada se considerarmos que todos os sinais de entrada têm potência uniforme P_s e que todos os sinais de ruído têm potência P_n :

$$C_{SDM} = \sum_{i=1}^n \log_2 \left(1 + \frac{|h_{ii}|^2 \cdot P_s}{\sum_{j \neq i} (|h_{ij}|^2 \cdot P_s) + P_n} \right). \quad (3.12)$$

3.3 CAPACIDADE DO SISTEMA COM PROCESSAMENTO MIMO

Se o processamento MIMO for implementado, a capacidade total do sistema é dada por:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left[\det \left(I_n + \frac{P_s}{P_n} \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^\dagger \right) \right], \quad (3.13)$$

onde I_n é a matriz identidade de ordem n , $(\cdot)^\dagger$ denota a operação de transposição complexa, P_s é a potência do sinal e P_n é a potência de do ruído. Também é importante notar que, para chegar a esta expressão, também definimos potências de entrada e ruído uniformes.

Após algumas operações algébricas, é possível expressar a capacidade máxima do canal MIMO em termos dos autovalores da matriz $\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^\dagger$, λ_i , onde \mathbf{H}^\dagger é o transposto Hermitiano obtido através do transposto conjugado de \mathbf{H} (RAOOF; KHALIGHI; PRAYONGPUN, 2008):

$$C_{MIMO} = \sum_{i=1}^n \log_2 \left(1 + \lambda_i \frac{P_s}{P_n} \right). \quad (3.14)$$

Portanto, quando o processamento MIMO é implementado, o sistema SDM pode ser visto como um conjunto de canais SISO independentes e livres de interferência cuja potência de entrada é multiplicada por λ_i .

4 RESULTADOS

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos durante o estudo deste trabalho. Para entender o efeito do processamento MIMO na capacidade do sistema, dividiremos a presente seção em dois casos específicos: Sistemas MIMO 2×2 considerando diferentes configurações de perdas dependentes do canal e *crosstalk* e sistemas MIMO $n \times n$, baseados em simulações numéricas.

4.1 SISTEMAS MIMO 2×2

Para simplificar, inicialmente, limitou-se o estudo a um sistema 2×2 . Este sistema recai em um sistema por multiplexação de polarização, mas vale ressaltar que de tratando-se um sistema SDM, um sistema 2×2 pode ser adotado para dois núcleos ou dois modos.

4.1.1 Sistema sem *crosstalk* e com perda dependente do canal

Para o primeiro caso em estudo, a matriz do canal é representada por uma matriz diagonal simples da forma:

$$\mathbf{H}_{CDL} = \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_2 \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Como não há *crosstalk*, Equação 3.12 adquire a forma de:

$$C_{SDM} = \log_2 \left(1 + T_1^2 \frac{P_s}{P_n} \right) + \log_2 \left(1 + T_2^2 \frac{P_s}{P_n} \right), \quad (4.2)$$

onde é considerado o caso sem processamento MIMO. Já adotando-se o processamento MIMO, a capacidade pode ser calculada usando a Equação 3.14 observando que os autovalores de $\mathbf{H}_{CDL} \cdot \mathbf{H}_{CDL}^\dagger$ são $|T_1|^2$ e $|T_2|^2$:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left(1 + |T_1|^2 \frac{P_s}{P_n} \right) + \log_2 \left(1 + |T_2|^2 \frac{P_s}{P_n} \right). \quad (4.3)$$

Como pode ser observado, no caso de um sistema afetado exclusivamente por perda dependente do canal, a adoção do processamento MIMO no receptor não representa qualquer aumento da capacidade do sistema. É importante ressaltar que é analisado o processamento apenas no receptor. Contemplado-se o processamento MIMO também no transmissor, algumas técnicas poderiam ser implementadas para alocar a potência de forma mais eficiente, como a aplicação do algoritmo de *water-filling*.

4.1.2 Sistema sem perdas e com *crosstalk*

O segundo cenário considerado corresponde a um sistema SDM óptico afetado por *crosstalk*, mas sem perdas. Neste caso particular, a matriz de canais \mathbf{H} adquire a forma de:

$$\mathbf{H}_{XT} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - XT} & \sqrt{XT} \\ -\sqrt{XT} & \sqrt{1 - XT} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

do qual XT é a potência do *crosstalk*.

A capacidade do sistema SDM, se o processamento MIMO não for implementado, é dada por:

$$\begin{aligned} C_{SDM} &= \sum_{i=1}^2 \log_2 \left(1 + \frac{(1 - XT) \cdot P_s}{XT \cdot P_s + P_n} \right) \\ &= 2 \log_2 \left(1 + \frac{(1 - XT) \cdot P_s}{XT \cdot P_s + P_n} \right). \end{aligned} \quad (4.5)$$

Como esperado, essa expressão mostra que um *crosstalk* mais alto leva tanto à redução da potência do sinal quanto ao aumento da interferência.

Para calcular a capacidade quando o processamento MIMO é considerado, é preciso calcular os autovalores de $\mathbf{H}_{XT} \cdot \mathbf{H}_{XT}^\dagger$. O resultado dessa expressão retorna uma matriz identidade e, portanto, ambos os autovalores são iguais a 1. Conseqüentemente, para esses autovalores, a capacidade MIMO dada pela Equação 3.14 é:

$$C_{MIMO} = \sum_{i=1}^2 \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right) = 2 \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right). \quad (4.6)$$

É importante notar que, como os autovalores da matriz do canal não dependem do *crosstalk*, a capacidade também não. Em outras palavras, o *crosstalk* não afeta a capacidade do sistema ao adotar o processamento MIMO.

A Figura 6 mostra a capacidade do sistema SDM com e sem processamento MIMO, para três diferentes potências de ruído. Como esperado da Equação 4.5 e 4.6, quando o processamento MIMO não é aplicado, a capacidade do sistema diminui à medida que *crosstalk* aumenta, enquanto a capacidade do sistema permanece constante se o MIMO for implementado.

4.1.3 Sistema com perda dependente do canal e *crosstalk*

A matriz de canal de um sistema com perda dependente do canal e interferência pode ser construída combinando a matriz que representa um sistema com perda dependente do canal e uma matriz de interferência, ambas vistas no dois casos anteriores, assim obtendo-se:

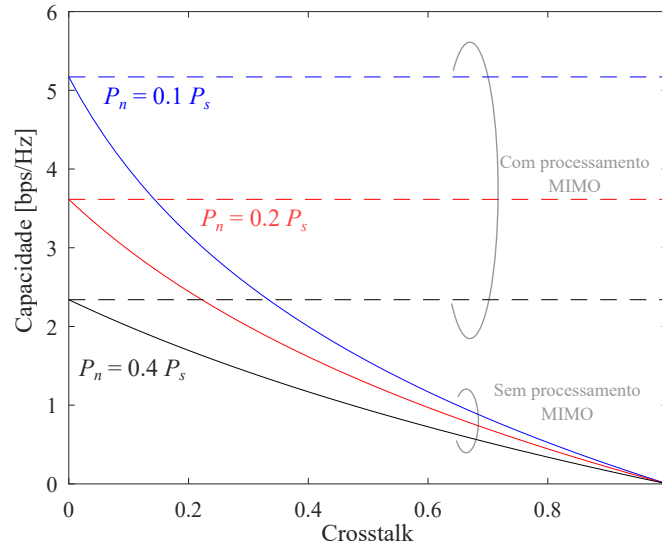
$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{CDL-XT} &= \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{1 - XT} & \sqrt{XT} \\ -\sqrt{XT} & \sqrt{1 - XT} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} T_1 \sqrt{1 - XT} & T_1 \sqrt{XT} \\ -T_2 \sqrt{XT} & T_2 \sqrt{1 - XT} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

A capacidade na ausência de processamento MIMO é:

$$C_{SDM} = \log_2 \left(1 + \frac{T_1^2(1 - XT) \cdot P_s}{T_2^2 XT \cdot P_s + P_n} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{T_2^2(1 - XT) \cdot P_s}{T_1^2 XT \cdot P_s + P_n} \right). \quad (4.8)$$

Para calcular a capacidade do sistema quando o processamento MIMO é aplicado, calcula-se

Figura 6 – Capacidade do sistema considerando e não considerando o processamento MIMO em termos da potência do *crosstalk* para três níveis de potência de ruído, $P_n = 0,1P_s$, $P_n = 0,2P_s$ e $P_n = 0,4P_s$.



Fonte: elaborada pela autora.

novamente os autovalores da matriz $\mathbf{H}_{\text{CDL-XT}} \cdot \mathbf{H}_{\text{CDL-XT}}^\dagger$:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\text{CDL-XT}} \cdot \mathbf{H}_{\text{CDL-XT}}^\dagger &= \begin{bmatrix} T_1\sqrt{1-XT} & T_1\sqrt{XT} \\ -T_2\sqrt{XT} & T_2\sqrt{1-XT} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1\sqrt{1-XT} & -T_2\sqrt{XT} \\ T_1\sqrt{XT} & T_2\sqrt{1-XT} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} T_1^2 & 0 \\ 0 & T_2^2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

cujos autovalores são $|T_1|^2$ e $|T_2|^2$. Consequentemente, a capacidade do sistema ao empregar MIMO é:

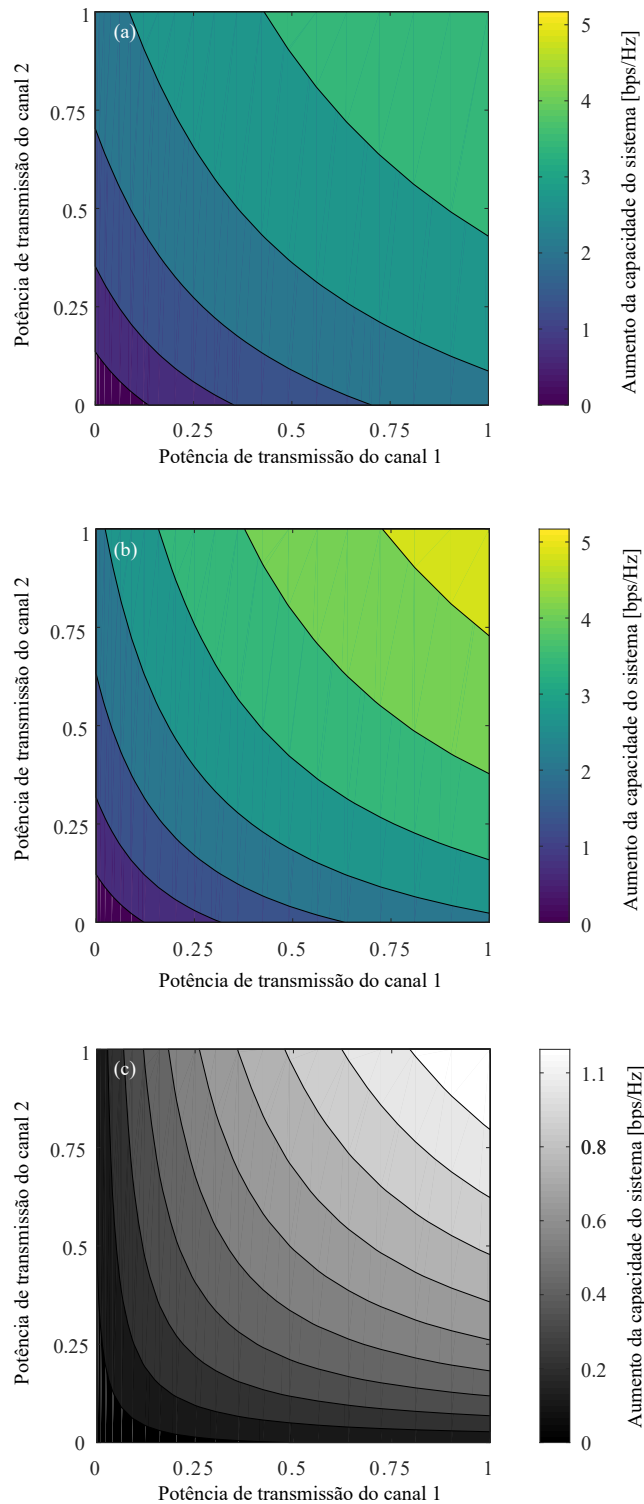
$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 \left(1 + |T_1|^2 \frac{P_s}{P_n} \right) + \log_2 \left(1 + |T_2|^2 \frac{P_s}{P_n} \right). \quad (4.10)$$

Como pode ser observado, a Equação 4.10 mostra que a capacidade do sistema quando se adota o processamento MIMO é igual àquela obtida para o caso sem *crosstalk*, Equação 4.3. Ou seja, o *crosstalk* não afeta a capacidade do sistema mesmo quando a perda dependente do canal é considerada.

Esses resultados revelam que o processamento MIMO compensa o efeito do *crosstalk* em sistemas SDM, levando a aumento da capacidade do sistema quando esse comprometimento está presente. Para quantificar esse aprimoramento, é considerado um sistema com $P_n = 0,1P_s$, $XT = 0,1$ e coeficientes de transmissão de potência para o primeiro e segundo canal cobrindo toda a faixa possível, ou seja, de 0 a 1.

As capacidades obtidas do sistema sem considerar o MIMO e o considerando são mostradas na Figura 7(a) e Figura 7(b), respectivamente. Como esperado, quanto menor a transmitância de potência dos canais, menor a capacidade do sistema para ambos os casos. No entanto, o sistema em que o processamento MIMO é empregado supera o sem processamento MIMO em termos de capacidade.

Figura 7 – Capacidade do sistema em termos de transmissão de potência de cada canal quando (a) não for adotado nenhum processamento MIMO e (b) quando o processamento MIMO for incluído. (c) Aumento da capacidade em função da transmitância de potência quando o processamento MIMO é usado no receptor. Para os dois sistemas, a potência de ruído e a *crosstalk* foram ajustadas para $P_n = 0,1P_s$ e $XT = 1$, respectivamente.



Fonte: elaborada pela autora.

Por exemplo, a capacidade máxima do sistema quando nenhum processamento MIMO é usado é de 4 bps/Hz, enquanto que quando o MIMO é implementado, a capacidade do sistema é aumentada para

5,17 bps/Hz.

O caso citado corresponde à configuração onde se consegue um maior aumento de capacidade do sistema. Como pode ser visto na Figura 7(c), o aumento da capacidade reduz para coeficientes de transferência de canal mais baixos, o que faz sentido porque o peso relativo *crosstalk* depende do nível de potência. Assim, em configurações com grandes níveis de potência, o efeito do crosstalk é mais significativo e, conseqüentemente, a adoção do processamento MIMO leva a um maior aumento de capacidade. Para níveis de potência de sinal baixos, o efeito do ruído torna-se dominante e o processamento MIMO apresenta um aprimoramento marginal.

4.2 SISTEMAS $n \times n$

Nesta seção será analisado de forma numérica o efeito do *crosstalk* na capacidade dos sistemas MIMO $n \times n$, mais propriamente, em simulações considerando canais 3×3 , 4×4 e 5×5 . Isso porquê, para o sistema 2×2 demonstrado na Seção 4.1, a capacidade do sistema é independente do nível de *crosstalk*.

Para a construção da matriz de canal MIMO 3×3 , em comparação com a apresentada em 4.4, é necessário adicionar um conjunto de *crosstalk* referente a combinação dos subcanais 1 e 2, 1 e 3 e 2 e 3, ou seja, $\sqrt{XT_{12}}e^{j\phi_{12}}$, $\sqrt{XT_{13}}e^{j\phi_{13}}$ e $\sqrt{XT_{23}}e^{j\phi_{23}}$ e, lembrando que existe a reciprocidade entre os canais, tem-se que $\sqrt{XT_{12}} = \sqrt{XT_{21}}$. Assim, matriz de canal \mathbf{H} pode ser representa como,

$$\mathbf{H}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - XT_{12} - XT_{13}} & \sqrt{XT_{12}}e^{j\phi_{12}} & \sqrt{XT_{13}}e^{j\phi_{13}} \\ -\sqrt{XT_{12}}e^{j\phi_{12}} & \sqrt{1 - XT_{12} - XT_{23}} & \sqrt{XT_{23}}e^{j\phi_{23}} \\ -\sqrt{XT_{13}}e^{j\phi_{13}} & -\sqrt{XT_{23}}e^{j\phi_{23}} & \sqrt{1 - XT_{23} - XT_{13}} \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

É importante ressaltar, que para este caso é necessário seguir as restrições em 4.12, o que torna a complexidade na geração da matriz de canal \mathbf{H} maior do que em um sistema 2×2 ,

$$\begin{cases} 1 - XT_{12} - XT_{13} > 0 \\ 1 - XT_{12} - XT_{23} > 0 \\ 1 - XT_{13} - XT_{23} > 0 \end{cases}. \quad (4.12)$$

Para analisar o efeito do crosstalk neste sistema, é utilizado um programa de simulação gerando 10000 matrizes de canal aleatórias, considerando três valores para cada um dos *crosstalk* com amplitudes distribuídas no intervalo de $[0,1]$ e fase no intervalo de $[-\pi, \pi]$, respeitando as restrições em 4.12.

Para cada uma das matrizes geradas, foi calculado os autovalores e sua soma, como mostrados na Figura 8(a). Pode-se observar neste caso que, diferente do caso 2×2 , os autovalores apresentam uma dispersão não sendo mais unitários, porém a soma dos mesmo é sempre 3. A fim de ter uma visão mais clara da distribuição dos autovalores, na Figura 8(b) é representado os histogramas dos três autovalores.

Para a capacidade, a expressão adquire uma forma mais complexa daquela vista nos sistemas

MIMO 2×2 , onde tinha-se que a matriz \mathbf{H} é unitária e portando, $\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^\dagger = I_2$ e seus autovalores são 1, como mostrado em 4.6. É através desse fato que a capacidade MIMO não depende do valor de *crosstalk* XT para este sistema.

Porém, como demonstrado pela simulação, a soma dos autovalores sempre será 3, o que recairia em uma situação semelhante a ter $\lambda_i = 1$ para $i = 1, 2, 3$, ou seja, pode-se assumir que a capacidade máxima teórica para um sistema 3×3 é dada por,

$$C_{MIMO\ 3 \times 3} |_{\text{máx}} = \sum_{i=1}^3 \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right) = 3 \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right). \quad (4.13)$$

Assim, considerando uma relação sinal ruído $\left(\frac{P_s}{P_n}\right)$ de 10 dB, a capacidade para cada autovalor e para a soma do mesmo, que é dita como a capacidade do sistema MIMO, podem ser observadas na Figura 8(c). Já a Figura 8(d) mostra o histograma dessas capacidades, no intuito de elucidar que mesmo o autovalor sendo constante, a capacidade MIMO possui uma variação com probabilidades diferentes de ocorrência.

Vale observar também, que mesmo apresentando tal variação, a capacidade média do sistema, ou aquela que mais ocorre, é em torno de 10 bps/Hz, o que é 0,38 bps/Hz abaixo da capacidade máxima calculada. A Figura 8(e) mostra em detalhes a capacidade total do sistema MIMO 3×3 e a variação que a mesma pode ter. Já a Figura 8(f) mostra a penalização na capacidade total, obtida subtraindo o valor da capacidade total do valor da capacidade máxima. Assim, é possível observar que a penalização concentra-se entre os 0 e 0,5 bps/Hz.

Outra visualização importante é a contida na Figura 8(g), que mostra a penalização acumulada da capacidade. Através dela é possível observar que ocorre uma penalização inferior a 0,5 bps/Hz no 75% dos casos e uma penalização inferior a 0,7 bps/Hz nos 90% dos casos.

Agora, considerando um sistema MIMO 4×4 , a matriz de canal \mathbf{H} é obtida na mesma forma que para um sistema 3×3 , porém, agora com novas combinações de *crosstalk* entre os canais,

$$\mathbf{H}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix},$$

dos quais, os coeficientes complexos são exposto a seguir,

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{11} = \sqrt{1 - XT_{12} - XT_{13} - XT_{14}} \\ h_{12} = \sqrt{XT_{12}} \times e^{j\phi_{12}} \\ h_{13} = \sqrt{XT_{13}} \times e^{j\phi_{13}} \\ h_{14} = \sqrt{XT_{14}} \times e^{j\phi_{14}} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} h_{21} = -\sqrt{XT_{12}} \times e^{j\phi_{12}} \\ h_{22} = \sqrt{1 - XT_{12} - XT_{23} - XT_{24}} \\ h_{23} = \sqrt{XT_{23}} \times e^{j\phi_{23}} \\ h_{24} = \sqrt{XT_{24}} \times e^{j\phi_{24}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{31} = -\sqrt{XT_{13}} \times e^{j\phi_{13}} \\ h_{32} = -\sqrt{XT_{23}} \times e^{j\phi_{23}} \\ h_{33} = \sqrt{1 - XT_{13} - XT_{23} - XT_{34}} \\ h_{34} = \sqrt{XT_{34}} \times e^{j\phi_{34}} \end{array} \right. e \left\{ \begin{array}{l} h_{41} = -\sqrt{XT_{14}} \times e^{j\phi_{14}} \\ h_{42} = -\sqrt{XT_{24}} \times e^{j\phi_{24}} \\ h_{43} = -\sqrt{XT_{34}} \times e^{j\phi_{34}} \\ h_{44} = \sqrt{1 - XT_{14} - XT_{24} - XT_{34}} \end{array} \right.$$

Assim como no caso de um sistema MIMO 3×3 , para o 4×4 , as somas de seus autovalores são $\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 4$, como mostra a Figura 9(a). Portanto, a capacidade máxima teórica é dada por:

$$C_{MIMO\ 4 \times 4} |_{\text{máx}} = \sum_{i=1}^4 \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right) = 4 \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right). \quad (4.14)$$

Bem como as análises feitas para o casos 3×3 , para o sistema MIMO 4×4 vale ressaltar algumas análises. Pela Figura 9(g) é possível observar a capacidade total do sistema e a dispersão da mesma. A SNR adotada foi igualmente de 10 dB para 10000 matrizes aleatórias de canal. Para este caso, temos que a capacidade máxima é de 13,85 bps/Hz, e considerando que a capacidade média ocorre em 13 bps/Hz, temos uma penalização de 0,85 bps/Hz.

É interessante notar que para o sistema MIMO 4×4 , o gráfico de capacidade é mais disperso, ou seja, tem-se uma faixa 3 bps/Hz de valores de capacidade ocorrendo.

Pela Figura 9(f) é analisado tal penalização, onde nota-se que a concentração maior pode ocorrer até em torno de 1,5 bps/Hz, podendo se estender a 2 bps/Hz e com menos frequência, 3 bps/Hz. Pela Figura 9(g), é visível esses casos, onde tem-se a penalização acumulada de até 1,5 bps/Hz em 75% dos casos e inferior a 2 bps/Hz nos 95% dos casos.

Agora, a fim de elucidar bem os casos de sistemas MIMO $n \times n$ é considerado um sistema MIMO 5×5 , do qual a matriz que o descreve o canal é dada por,

$$\mathbf{H}_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & h_{45} \\ h_{51} & h_{52} & h_{53} & h_{54} & h_{55} \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

onde cada um dos seus coeficientes complexos são,

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{11} = \sqrt{1 - XT_{12} - XT_{13} - XT_{14} - XT_{15}} \\ h_{12} = \sqrt{XT_{12}} \times e^{j\phi_{12}} \\ h_{13} = \sqrt{XT_{13}} \times e^{j\phi_{13}} \\ h_{14} = \sqrt{XT_{14}} \times e^{j\phi_{14}} \\ h_{15} = \sqrt{XT_{15}} \times e^{j\phi_{15}} \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} h_{21} = -\sqrt{XT_{12}} \times e^{j\phi_{12}} \\ h_{22} = \sqrt{1 - XT_{12} - XT_{23} - XT_{24} - XT_{25}} \\ h_{23} = \sqrt{XT_{23}} \times e^{j\phi_{23}} \\ h_{24} = \sqrt{XT_{24}} \times e^{j\phi_{24}} \\ h_{25} = \sqrt{XT_{25}} \times e^{j\phi_{25}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{31} = -\sqrt{XT_{13}} \times e^{j\phi_{13}} \\ h_{32} = -\sqrt{XT_{23}} \times e^{j\phi_{23}} \\ h_{33} = \sqrt{1 - XT_{13} - XT_{23} - XT_{34} - XT_{35}} \\ h_{34} = \sqrt{XT_{34}} \times e^{j\phi_{34}} \\ h_{35} = \sqrt{XT_{35}} \times e^{j\phi_{35}} \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} h_{41} = -\sqrt{XT_{14}} \times e^{j\phi_{14}} \\ h_{42} = -\sqrt{XT_{24}} \times e^{j\phi_{24}} \\ h_{43} = -\sqrt{XT_{34}} \times e^{j\phi_{34}} \\ h_{44} = \sqrt{1 - XT_{14} - XT_{24} - XT_{34} - XT_{45}} \\ h_{45} = \sqrt{XT_{45}} \times e^{j\phi_{45}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{51} = -\sqrt{XT_{15}} \times e^{j\phi_{15}} \\ h_{52} = -\sqrt{XT_{25}} \times e^{j\phi_{25}} \\ h_{53} = -\sqrt{XT_{35}} \times e^{j\phi_{35}} \\ h_{54} = -\sqrt{XT_{45}} \times e^{j\phi_{45}} \\ h_{55} = \sqrt{1 - XT_{15} - XT_{25} - XT_{35} - XT_{45}} \end{array} \right. .$$

A capacidade máxima teórica para este sistema é dada por 4.16, e assim como os demais sistemas, a soma de seus autovalores totalizaram 5, como esperado e demonstrado pela Figura 10(a),

$$C_{MIMO\ 5 \times 5} |_{\text{máx}} = \sum_{i=1}^5 \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right) = 5 \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right). \quad (4.16)$$

Assim como o sistema MIMO 4×4 , o 5×5 apresenta uma dispersão maior em sua capacidade, como visualizado em Figura 10(e). A capacidade máxima teórica para este sistema é de 17,3 bps/Hz, e sua maior ocorrência fica em torno de 16,2 bps/Hz, gerando uma penalização de aproximadamente 1,1 bps/Hz. Essa penalização pode ser vista através de Figura 10(f), onde concentra-se majoritariamente entre 0,5 e 1,5 bps/Hz, se estendendo a 2 bps/Hz e ocorrendo até 3,5 bps/Hz.

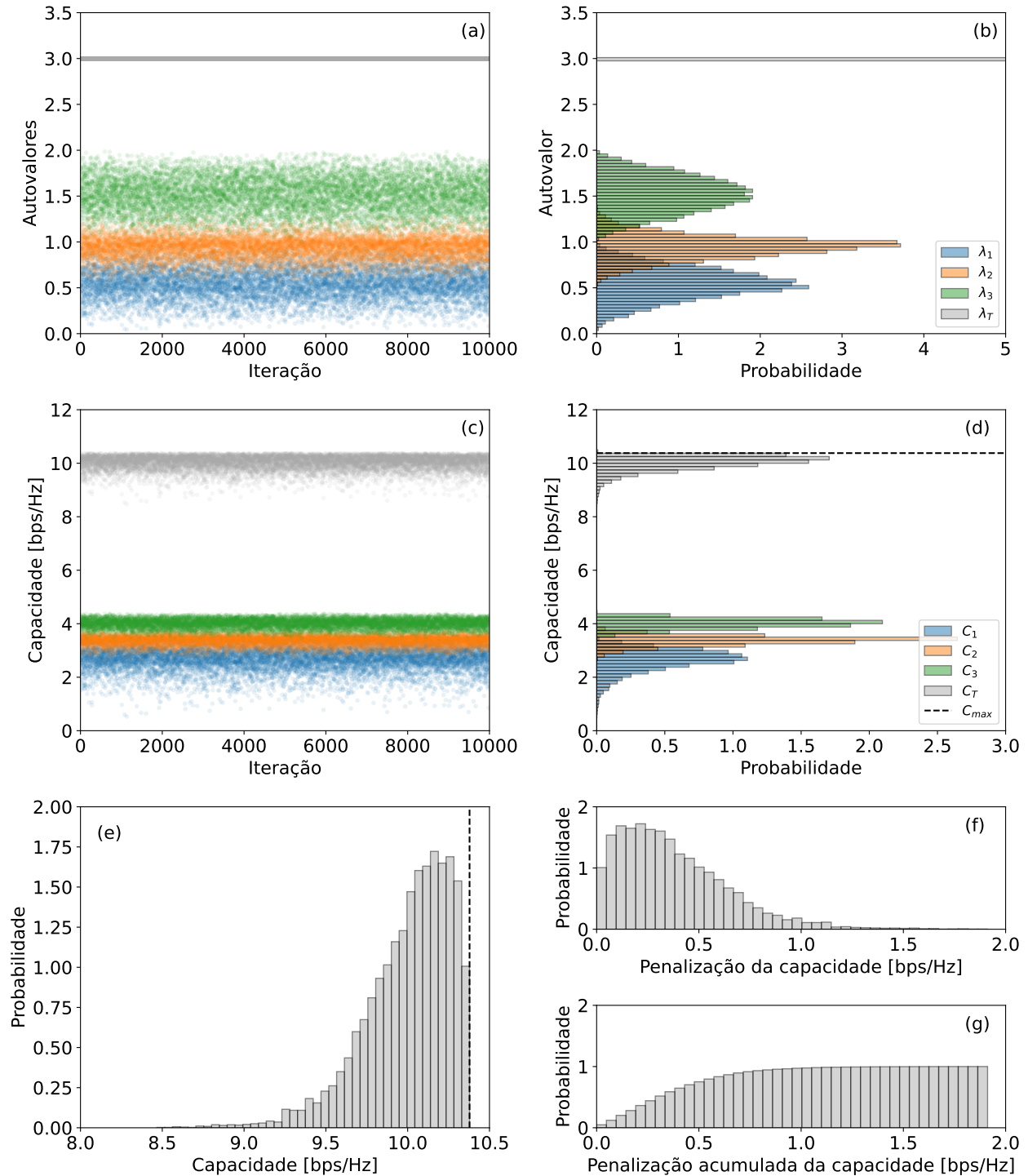
Em Figura 10(g) é possível ver a penalização acumulada do sistema MIMO 5×5 , onde pode-se ver que é bem próxima do casos 4×4 , onde tem-se a penalização inferior a 1,7 bps/Hz em 75% dos casos e inferior a 2 bps/Hz nos 95% dos casos.

A seguir, foi feito uma simulação para 10000 matrizes aleatórias de canal com diferentes valores de SNR, sendo eles: 5, 10, 20, 40, 80 e 160 (W/W), ou seja, adicionando 3 dB a cada SNR.

A Figura 11 mostra o gráfico da capacidade de um sistema MIMO 3×3 em função de cada uma dessas SNRs. É interessante observar que quanto menor a SNR, mais próxima da capacidade máxima teórica para esses sistema o histograma fica, ou seja, a perda média da capacidade é maior quanto maior for a SNR. A Figura 12 mostra a análise da capacidade para um sistema MIMO 4×4 e a Figura 13 para um sistema MIMO 5×5 .

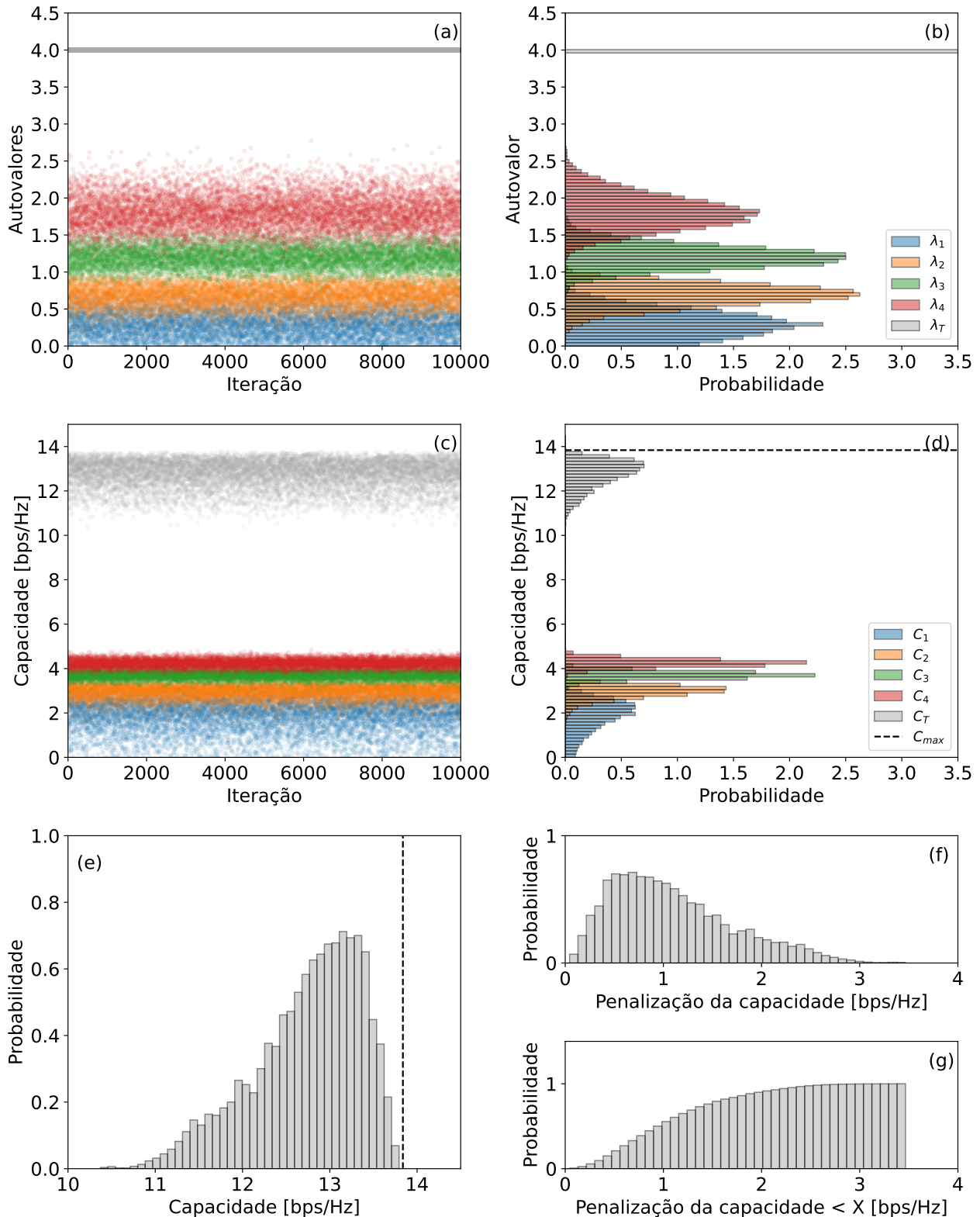
A Figura 14 mostra a comparação da capacidade total média para cada um dos sistemas em função de cada valor de SNR, enquanto a Figura 15 mostra o decaimento da capacidade. Como é possível observar na Figura 15, o decaimento da capacidade em um sistema 3×3 fica entre 0,31 bps/Hz a 0,47 bps/Hz, enquanto para o sistema 4×4 , tem-se um acréscimo de decaimento para a faixa de 0,85 bps/Hz a 1,5 bps/Hz, bem superior ao sistema 2×2 .

Figura 8 – Análise do efeito do *crossstalk* na capacidade de sistemas MIMO 3×3 . (a) Autovalores de 10000 matrizes de canal geradas aleatoriamente e sua soma (b) Histograma dos autovalores e a sua soma. (c) Capacidades associadas a cada matriz de canal. (d) Histogramas dessas capacidades e a capacidade máximo teórica. (e) Capacidade total do sistema MIMO 3×3 . (f) Distribuição da penalização na capacidade total do canal MIMO e (g) distribuição cumulativa da penalização



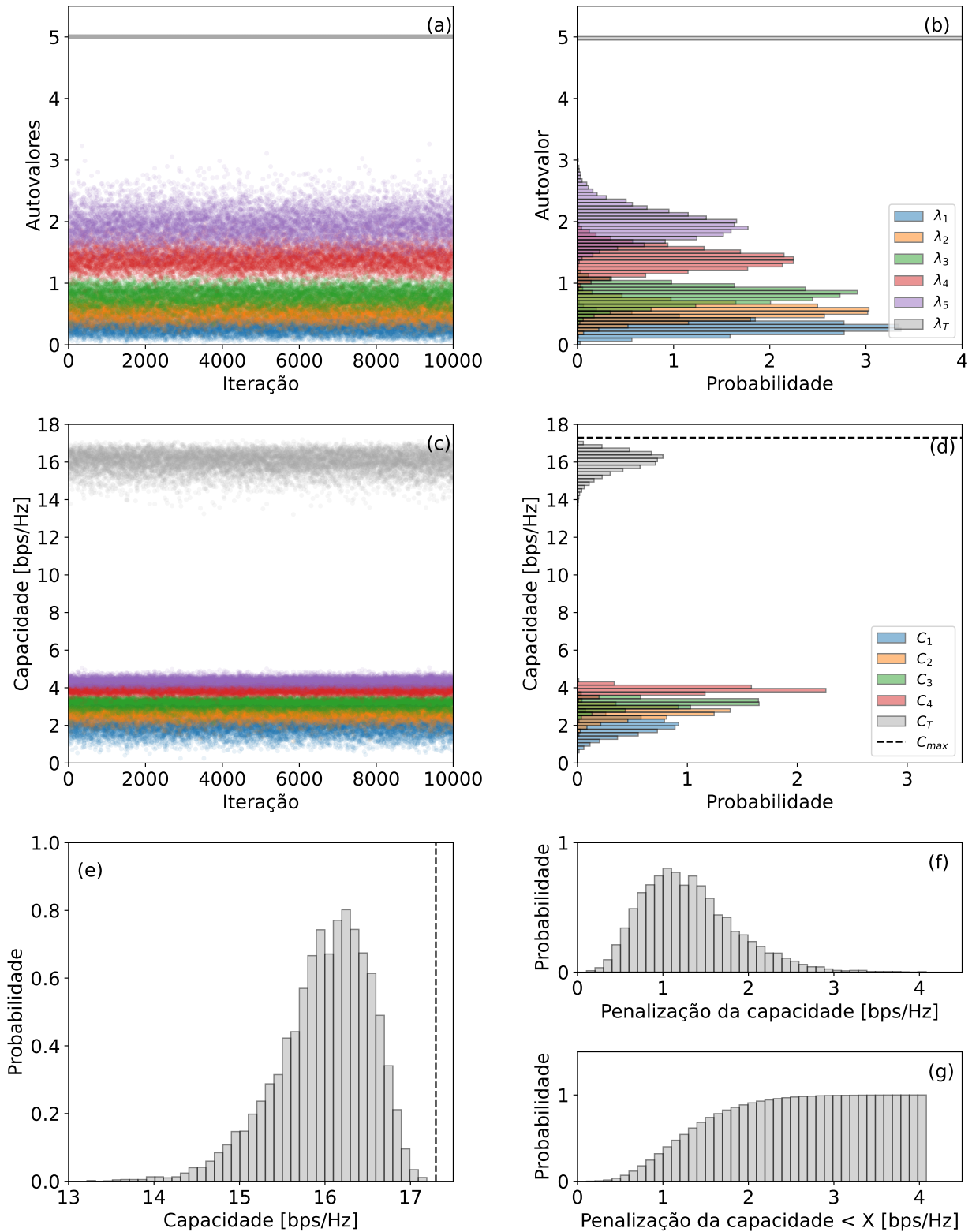
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 9 – Análise do efeito do *crosstalk* na capacidade de sistemas MIMO 4×4 . (a) Autovalores de 10000 matrizes de canal geradas aleatoriamente e sua soma (b) Histograma dos autovalores e a sua soma. (c) Capacidades associadas a cada matriz de canal. (d) Histogramas dessas capacidades e a capacidade máximo teórica. (e) Capacidade total do sistema MIMO 4×4 . (f) Distribuição da penalização na capacidade total do canal MIMO e (g) distribuição cumulativa da penalização.



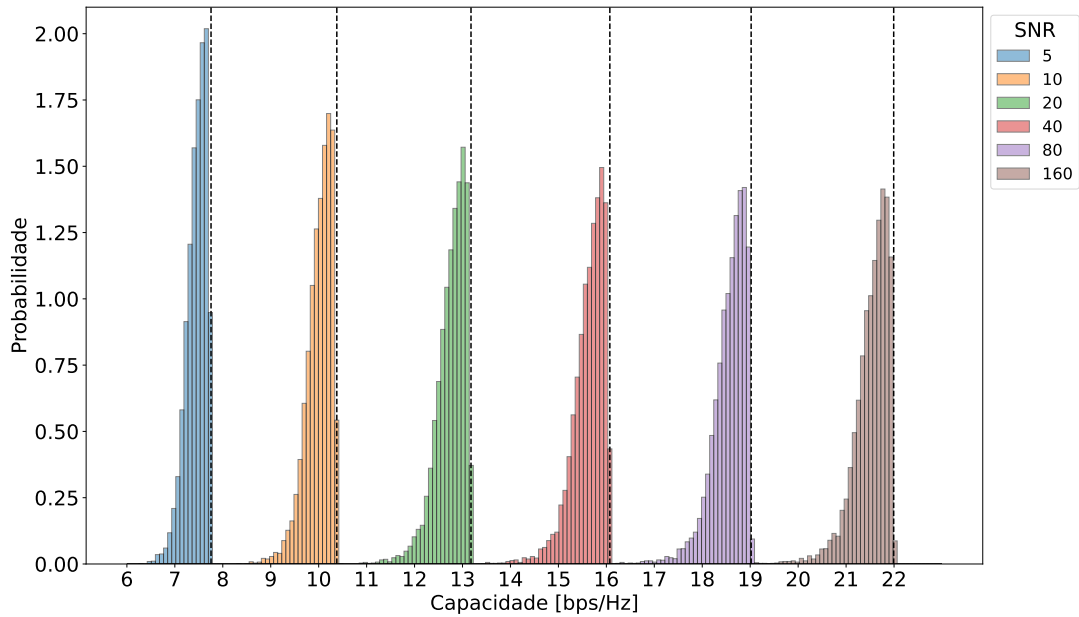
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 10 – Análise do efeito do *crosstalk* na capacidade de sistemas MIMO 5×5 . (a) Autovalores de 10000 matrizes de canal geradas aleatoriamente e sua soma (b) Histograma dos autovalores e a sua soma. (c) Capacidades associadas a cada matriz de canal. (d) Histogramas dessas capacidades e a capacidade máximo teórica. (e) Capacidade total do sistema MIMO 5×5 . (f) Distribuição da penalização na capacidade total do canal MIMO e (g) distribuição cumulativa da penalização.



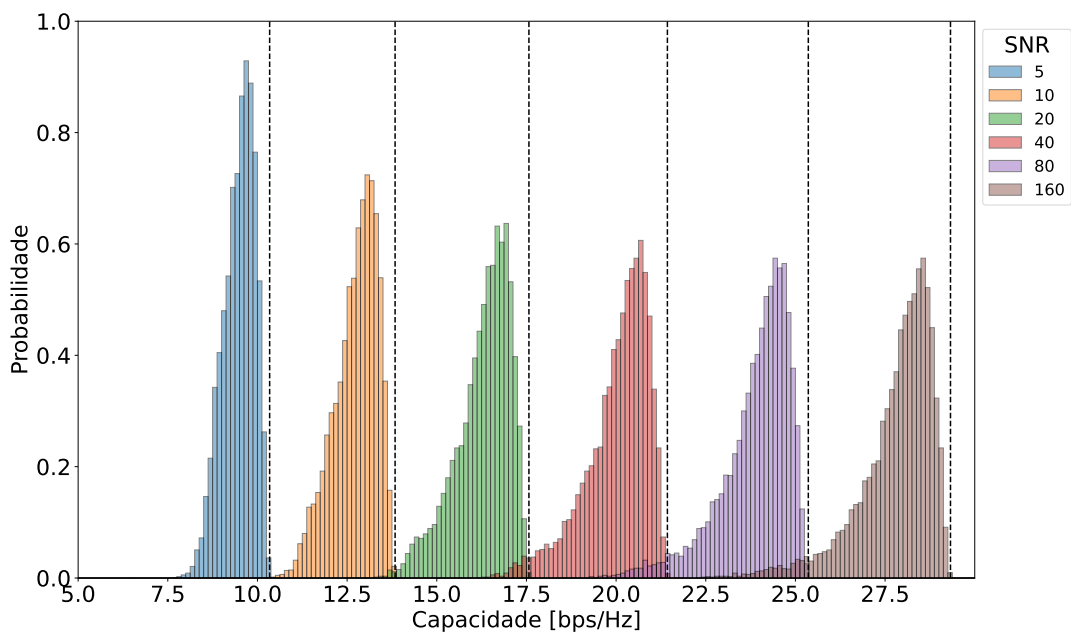
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 11 – Análise da capacidade de um sistema MIMO 3×3 com variação da SNR, onde o tracejado refere-se a capacidade máxima para cada SNR.



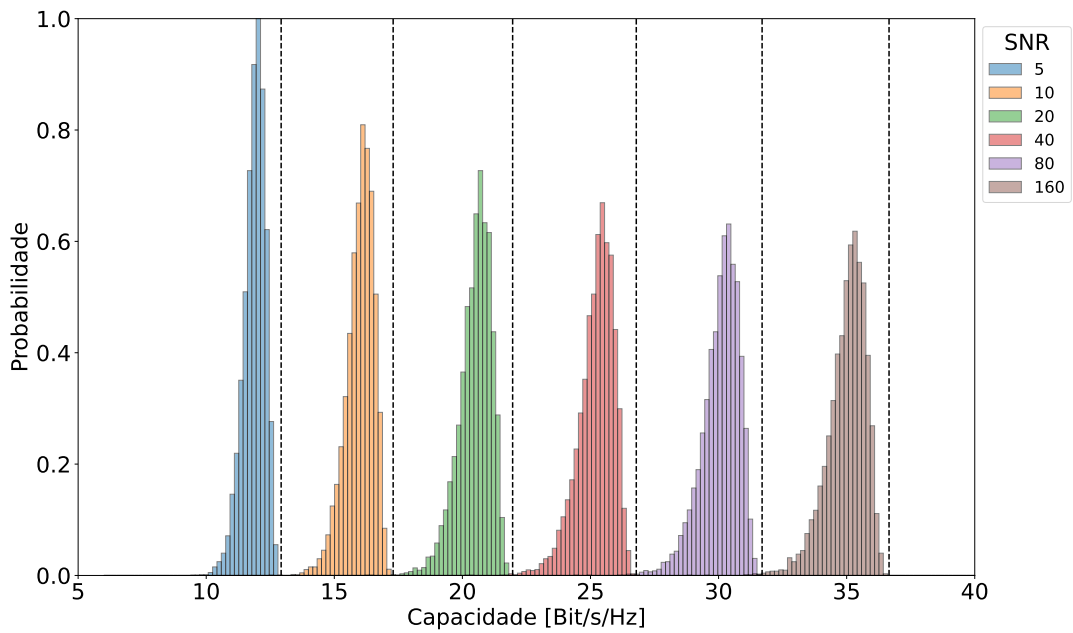
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 12 – Análise da capacidade de um sistema MIMO 4×4 com variação da SNR, onde o tracejado refere-se a capacidade máxima para cada SNR.



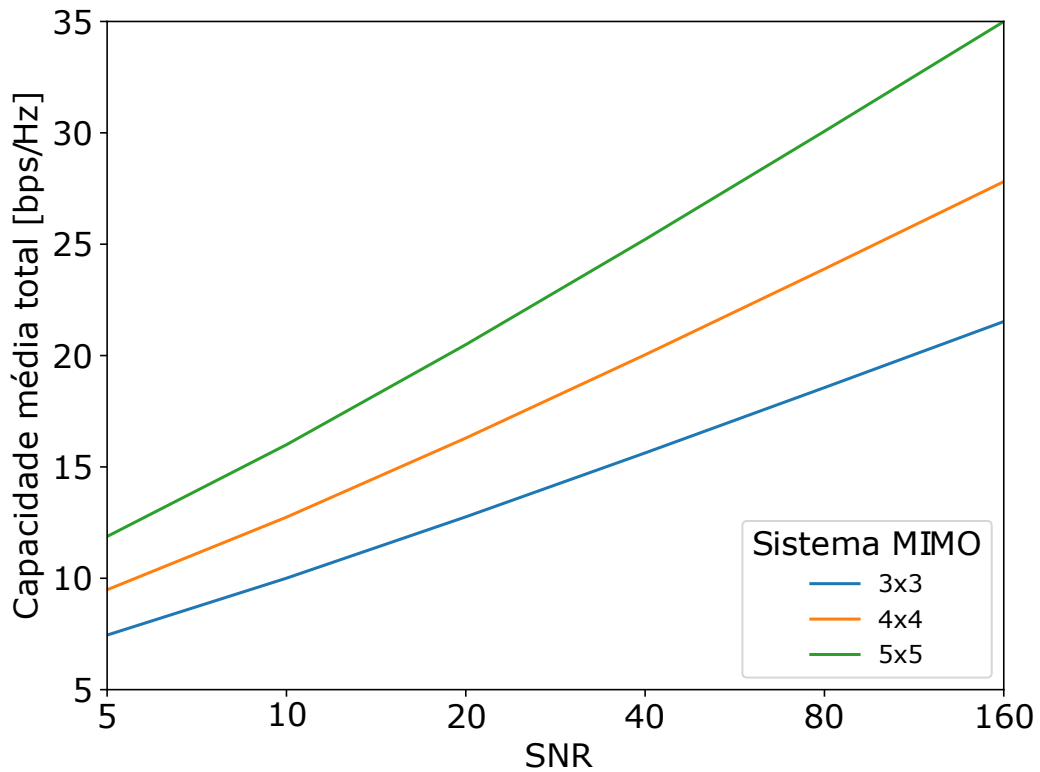
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 13 – Análise da capacidade de um sistema MIMO 5×5 com variação da SNR, onde o tracejado refere-se a capacidade máxima para cada SNR.



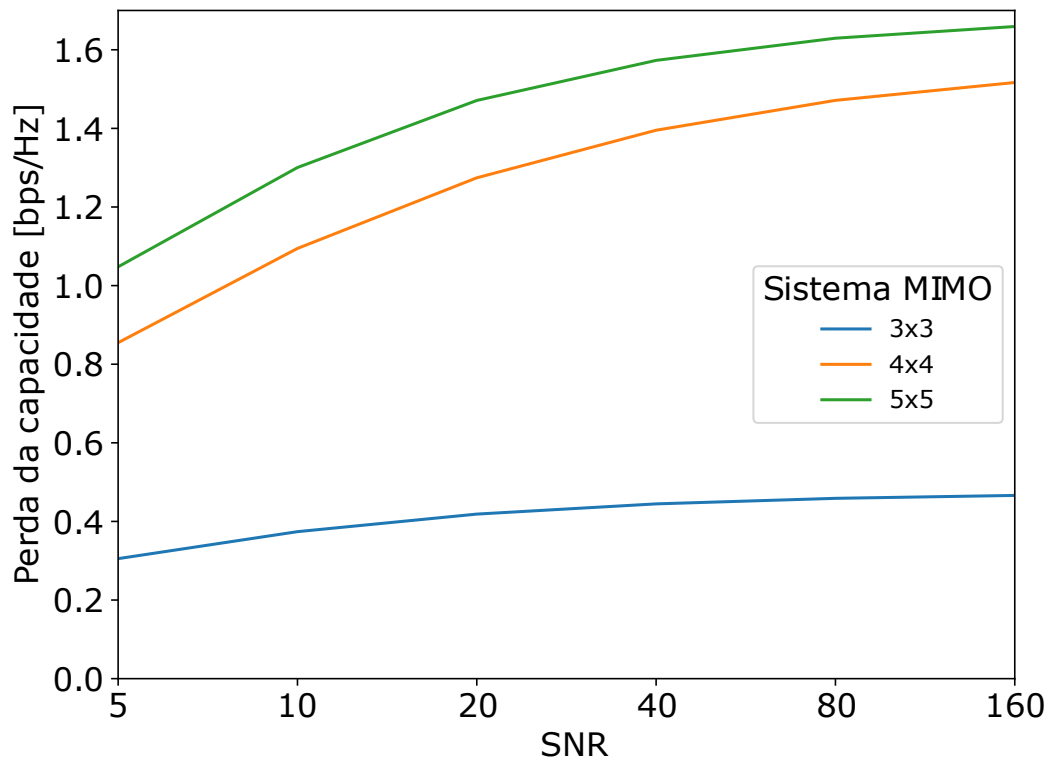
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 14 – Capacidade total média em função de cada SNR.



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 15 – Decaimento da capacidade em função de cada SNR.



Fonte: elaborada pela autora.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Sistemas ópticos baseados em SDM são uma classe de sistemas de comunicação que exploram a diversidade de trajetos ou distribuições de campos espaciais para transmitir diferentes sinais simultaneamente. Esses sistemas aproveitam a capacidade de múltiplos núcleos ou modos em fibras ópticas para aumentar a capacidade de transmissão. O acoplamento entre os sinais transmitidos pelos diferentes trajetos, ou utilizando os diferentes modos, resulta em interferência inter-canal denominada *crosstalk*.

Essa interferência pode ocorrer não somente ao acoplamento óptico entre os canais, mas também devido a reflexões indesejadas, espalhamento devido a imperfeições nos componentes ópticos, a potência dos sinais transmitidos e diversos outros fatores.

O estudo e a compreensão das fontes de *crosstalk* são fundamentais para identificar e mitigar essas interferências indesejadas. Este trabalho analisou o efeito do processamento MIMO em sistemas SDM ópticos baseados em receptores digitais coerentes para mitigar os impactos na capacidade desses sistemas. Resultados teóricos e numéricos considerando um sistema 2×2 mostram que ao incorporar o processamento MIMO no receptor, o *crosstalk* entre os canais pode ser compensado, levando a um aumento da capacidade do sistema. Este aumento é mais notório quando o *crosstalk* é dominante, ou seja, para baixa potência de ruído e pequenas perdas de canal.

Além disso, resultados numéricos foram gerados para sistemas MIMO de dimensões 3×3 , 4×4 e 5×5 . Estes resultados mostraram que, diferente do caso 2×2 em que o *crosstalk* não causava perda na capacidade do canal, nesses casos particulares de sistemas $n \times n$ o *crosstalk* reduz a capacidade total dos sistemas. Para os casos apresentados, com uma SNR de 10 dB, o *crosstalk* é reduzido em média 0,38 bps/Hz, 0,85 bps/Hz e 1,1 bps/Hz nos sistemas 3×3 , 4×4 e 5×5 , respectivamente. Também foi mostrado que a perda média da capacidade em sistemas MIMO $n \times n$ aumenta para maiores valores de SNR. Este resultado é compatível com os resultados 2×2 pois o efeito do processamento MIMO é mais significativo a medida que o ruído é menos dominante. Para sistemas onde $n > 5$, é esperado que as conclusões sejam as mesmas.

Para trabalhos futuros, é esperado estudar o efeito do processamento MIMO não apenas no receptor, mas também no lado do transmissor, uma vez que os autovalores não são unitários. Com isso, será possível a implementação de esquemas inteligentes de alocação de potência, como o algoritmo de *waterfilling* para o aumento da capacidade. Além disso, seria interessante considerar um *crosstalk* menor que o considerado neste trabalho. Pois, em exemplo, sistemas que utilizem fibras *multicore* é esperado que o *crosstalk* não seja tão significativo como o considerado. Finalmente, seria interessante considerar perdas dependentes do canal para o caso de *crosstalk* menos significativo.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. **Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica**. 4. ed. [S.l.]: GEN LTC, 2014. ISSN 9788535264258.
- AGRAWAL, G. P. Chapter 14 - multimode fibers. In: AGRAWAL, G. P. (Ed.). **Nonlinear Fiber Optics (Sixth Edition)**. Sixth edition. Academic Press, 2019. p. 621–683. ISBN 978-0-12-817042-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012817042700021X>>.
- AGRELL, E. Roadmap of optical communications. **Journal of Optics**, v. 18, n. 6, p. 063002, 2016.
- ANTONELLI, C. *et al.* Stokes-space analysis of modal dispersion of sdm fibers with mode-dependent loss: Theory and experiments. **Journal of Lightwave Technology**, v. 38, n. 7, p. 1668–1677, 2020.
- AWAJI, Y.; SAITOH, K.; MATSUO, S. Chapter 13 - transmission systems using multicore fibers. In: KAMINOW, I. P.; LI, T.; WILLNER, A. E. (Ed.). **Optical Fiber Telecommunications (Sixth Edition)**. Sixth edition. Boston: Academic Press, 2013, (Optics and Photonics). p. 617–651. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123969606000134>>.
- BIRKS, T. A.; GRIS-SÁNCHEZ, I.; YEROLATSITIS, S. The photonic lantern. In: **2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) - Laser Science to Photonic Applications**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–2.
- COVER, T. M.; THOMAS, J. A. **Elements of Information Theory (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing)**. USA: Wiley-Interscience, 2006. ISBN 0471241954.
- FALOU, A. E. Analysis and design of space-time block codes for coded mimo transmissions. 05 2013.
- FARUK, M. S.; SAVORY, S. J. Digital signal processing for coherent transceivers employing multilevel formats. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 35, n. 5, p. 1125–1141, 2017.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012. ISBN 9780511841224.
- HAMPTON, J. R. **Introduction to MIMO Communications**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013. ISSN 9781107337527.
- HAYASHI, T. Multi-core optical fibers realizing high-density/-capacity transmissions. In: **2016 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 169–172.
- HAYASHI, T. *et al.* Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. **Opt. Express**, Optica Publishing Group, v. 19, n. 17, p. 16576–16592, Aug 2011. Disponível em: <<https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-19-17-16576>>.
- JIANG, J.; TSUBOKAWA, M. Evaluation of optical mimo transmissions through multicore fiber links with an optical switch. **Optics Communications**, v. 463, p. 125381, 2020. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401820300766>>.
- LEE, H. J. *et al.* Multi-core fiber interferometer using spatial light modulators for measurement of the inter-core group index differences. **Optics Express**, Optica Publishing Group, v. 23, n. 10, p. 12555–12561, 2015.
- LI, G. *et al.* Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication. **Advances in Optics and Photonics**, Optical Society of America, v. 6, n. 4, p. 413–487, 2014.

- LI, S.-A. *et al.* Enabling technology in high-baud-rate coherent optical communication systems. **IEEE Access**, v. 8, p. 111318–111329, 2020.
- LOBATO, A. *et al.* Impact of mode coupling on the mode-dependent loss tolerance in few-mode fiber transmission. In: **2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3.
- LUÍS, R. S. *et al.* Long distance crosstalk-supported transmission using homogeneous multicore fibers and sdm-mimo demultiplexing. **Opt. Express**, Optica Publishing Group, v. 26, n. 18, p. 24044–24053, Sep 2018. Disponível em: <<https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-26-18-24044>>.
- PAUWELS, J.; SANDE, G. V. der; VERSCHAFFELT, G. Space division multiplexing in standard multi-mode optical fibers based on speckle pattern classification. **Sci Rep**, v. 9, 2019.
- PINHO, C. *et al.* Spatial light modulation as a flexible platform for optical systems. In: ALIMI, I. A.; MONTEIRO, P. P.; TEIXEIRA, A. L. (Ed.). **Telecommunication Systems**. Rijeka: IntechOpen, 2019. cap. 7. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/intechopen.88216>>.
- PINHO, C.; LIMA, M.; TEIXEIRA, A. Spatial light modulation for sdm systems. In: . [S.l.: s.n.], 2016.
- POGGIOLINI, P. *et al.* Analytical modeling of nonlinear propagation in uncompensated optical transmission links. **IEEE Photonics technology letters**, IEEE, v. 23, n. 11, p. 742–744, 2011.
- RADEMACHER, G. *et al.* Crosstalk dynamics in multi-core fibers. **Opt. Express**, Optica Publishing Group, v. 25, n. 10, p. 12020–12028, May 2017. Disponível em: <<https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-25-10-12020>>.
- RAOOF, K.; KHALIGHI, M.-A.; PRAYONGPUN, N. MIMO systems: Principles, iterative techniques, and advanced polarization. In: **Adaptive signal processing for wireless communication**. [S.l.]: CRC Press, 2008. v. 2, p. 95–134.
- RICHARDSON, D.; FINI, J.; NELSON, L. Space division multiplexing in optical fibres. **Nature Photonics**, v. 7, p. 354–362, 05 2013.
- ROBERTS, K. *et al.* Performance of dual-polarization qpsk for optical transport systems. **Journal of Lightwave Technology**, v. 27, n. 16, p. 3546–3559, 2009.
- RUIZ, J. L. P. *et al.* Efficient integrated tri-modal coupler for few-mode fibers. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 30, n. 2, p. 2539–2546, 2022.
- RUIZ, J. L. P. *et al.* Ultracompact silicon-on-insulator couplers for multicore fibers. **ACS Photonics**, ACS Publications, 2022.
- RYF, R. *et al.* Mimo-based crosstalk suppression in spatially multiplexed 3×56 -gb/s pdm-qpsk signals for strongly coupled three-core fiber. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 23, n. 20, p. 1469–1471, 2011.
- RYF, R. *et al.* Coherent 1200-km 6×6 mimo mode-multiplexed transmission over 3-core microstructured fiber. In: **2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3.
- SAITOH, K. *et al.* Crosstalk and core density in uncoupled multicore fibers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 24, n. 21, p. 1898–1901, 2012.

SARIDIS, G. M. *et al.* Survey and evaluation of space division multiplexing: From technologies to optical networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2136–2156, 2015.

UEMURA, H. *et al.* Fused taper type fan-in/fan-out device for 12 core multi-core fiber. In: IEEE. **2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology**. [S.l.], 2014. p. 49–50.

VELÁZQUEZ-BENÍTEZ; A.M. ANTONIO-LÓPEZ, J.; ALVARADO-ZACARÍAS, J. Scaling photonic lanterns for space-division multiplexing. **Sci Rep** 8, Jan 2018.

WINZER, P. J.; FOSCHINI, G. J. Optical MIMO-SDM system capacities. In: IEEE. **OFC 2014**. [S.l.], 2014. p. 1–3.

ZHENG, J. *et al.* A dual-polarization coherent communication system with simplified optical receiver for udwdm-pon architecture. **Opt. Express**, Optica Publishing Group, v. 22, n. 26, p. 31735–31745, Dec 2014. Disponível em: <<https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-22-26-31735>>.