

Jardel Terci Flores

**Alocação de Recursos de uma Rede Óptica
Passiva BS-OFDMA-PON usando Otimização
Multiobjetivo**

Vitória-ES

2020

Jardel Terceiro Flores

Alocação de Recursos de uma Rede Óptica Passiva BS-OFDMA-PON usando Otimização Multiobjetivo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo

Centro Tecnológico

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha

Coorientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva

Vitória-ES

2020

Jardel Terceiro Flores

Alocação de Recursos de uma Rede Óptica Passiva BS-OFDMA-PON usando Otimização Multiobjetivo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira
Rocha**
Orientador

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Coorientador

Prof. Dr. Reginaldo Barbosa Nunes
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

Prof. Dr. Daniel José Custódio Coura
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

Vitória-ES
2020

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde, coragem e superação em diversos momentos do curso. Jamais teria conseguido de outra maneira.

Agradeço incondicionalmente aos meus pais Vera e Mauro, pela sua incrível dedicação e suporte, além da incrível confiança que sempre me passaram. Jamais teria conseguido sem vocês.

Agradeço a todos os professores do PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), em especial ao meu orientador, Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha, e coorientador, Dr. Jair Adriano Lima Silva, pela paciência e dedicação por sempre disponibilizarem tempo e conhecimento necessários para a realização deste trabalho. Agradeço por todo o suporte e auxílio prestado ao longo desses anos.

Agradeço aos meus amigos do Labtel por todo o conhecimento compartilhado e ajuda que auxiliaram de alguma forma na realização desta pesquisa.

Agradeço aos meus amigos de Linhares, minha família e do meu convívio que torceram por mais essa vitória e por todos os momentos de descontração vividos.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se
lhe faltasse uma gota”.*
(Madre Teresa de Calcutá)

Resumo

Com o crescimento da demanda de tráfego de Internet pelos usuários e aumento da necessidade de taxa de transmissão pelas aplicações, faz-se necessário o uso eficiente e econômico da largura de banda em redes ópticas, o qual desempenha um papel importante na melhoria do fornecimento de serviços. A escalabilidade é um importante requisito necessário para satisfazer esta demanda. Para atendê-lo, pode-se prover o acesso múltiplo por meio da técnica de multiplexação OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), a qual permite uma alocação de largura de banda flexível, além de ser uma eficiente solução para a interferência intersimbólica. Por meio da variação da relação sinal-ruído óptica OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*), da ordem de modulação por subportadora e da largura das sub-bandas das ONUs (*Optical Network Units*), este trabalho abordou este importante requisito na arquitetura BS (*Bandwidth Scalable*)-OFDMA-PON (*Passive Optical Network*) na comunicação *downlink*, por meio da otimização de parâmetros via algoritmo *Multi-Objective Grey Wolf Optimizer*.

Os resultados obtidos pela simulação numérica em enlaces ópticos que variam de 20 a 40 km demonstraram a otimização dos recursos alocados à rede de modo a atender 16 ONUs e 32 ONUs com taxas de transmissão individuais iguais a 1 Gbps, mediante a adoção de mapeamentos 4, 8, 16, 32 e 64-QAM e OSNR variando entre 1 e 50 dB. No primeiro caso, 43,17 % das subportadoras úteis foram alocadas para possibilitar a taxa de transmissão de 1 Gbps para todos os usuários, para o maior OSNR encontrado, enquanto na segunda situação 68,55% foram alocados.

Palavras-chave: algoritmo *Multi-Objective Grey Wolf Optimizer*, multiplexação OFDMA, otimização, redes ópticas PON.

Abstract

With the growing demand for Internet traffic by users and the increased need for transmission rate by applications, it is necessary to use bandwidth efficiently and economically in optical networks, which plays an important role in improving service delivery. Scalability is an important requirement necessary to meet this demand. To serve it, multiple access can be provided through the OFDMA multiplexing technique (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), which allows for flexible bandwidth allocation, in addition to being an efficient solution for ISI (Inter Symbol Interference). Through the variation of the signal-to-noise ratio OSNR (Optical Signal to Noise Ratio), the level of modulation by subcarrier and the width of the sub-bands of the ONUs (Optical Network Units), this paper approach this important requirement in the architecture BS (Bandwidth Scalable)-OFDMA-PON (Passive Optical Network) in the communication downlink, by means of the optimization of parameters with Multi-Objective Grey Wolf Optimizer algorithm.

The results obtained by the numerical simulation demonstrated in optical links that would vary from 20 to 40 km demonstrated the optimization of the resources allocated to the network in order to attend 16 ONUs and 32 ONUs with individual transmission rates equal to 1Gbps, by adopting 4, 8, 16, 32 and 64-QAM e OSNR mappings ranging between 1 e 50 dB. In the first case, 43.17% of the useful subcarriers were allocated to enable a transmission rate of 1 Gbps for all users, for the highest OSNR found, while in the second situation 68.55 % were allocated.

Keywords: Multi-Objective Grey Wolf Optimizer, multiplexing OFDMA, optimization, Passive Optical Networks.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Número médio de dispositivos e conexões por pessoa. | 18 |
| Figura 2 – Velocidade média de conexão banda larga em Mbps. | 18 |
| Figura 3 – Sistema FTTx (C - <i>curb</i> , B - <i>Building</i> , H - <i>Home</i> , O - <i>Office</i>). | 20 |
| Figura 4 – Espectro de sinal com banda de guarda e sub-bandas | 21 |
| Figura 5 – Diagramas de Constelação das modulações 16-QAM e 64-QAM | 22 |
| Figura 6 – Previsão e evolução do desenvolvimento da tecnologia PON ao longo dos anos. | 27 |
| Figura 7 – Espectro de um sinal OFDM | 29 |
| Figura 8 – Esquema básico para OFDM | 30 |
| Figura 9 – Símbolo OFDM sem e com prefixo cíclico. | 31 |
| Figura 10 – Distribuição de subportadoras para um canal de comunicação com N ONUs. | 33 |
| Figura 11 – Diagrama de blocos da arquitetura BS-OFDMA-PON. | 35 |
| Figura 12 – Hierarquia do lobo cinzento (a dominância diminui do topo para a base). | 39 |
| Figura 13 – Vetores de posição 2D e 3D e suas próximas localizações possíveis. | 40 |
| Figura 14 – Atualização da posição no GWO. | 41 |
| Figura 15 – Atacar uma presa x Procurar uma presa. | 42 |
| Figura 16 – Componentes do MOGWO: a) O arquivo e b) O mecanismo de seleção de líderes. | 45 |
| Figura 17 – Fluxograma do algoritmo MOGWO. | 46 |
| Figura 18 – Frente de Pareto do algoritmo para 16 ONUs. | 53 |
| Figura 19 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 19 dB para 16 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho. | 56 |
| Figura 20 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 22 dB para 16 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho. | 56 |
| Figura 21 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 26 dB para 16 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho. | 57 |
| Figura 22 – Frente de Pareto do algoritmo para 32 ONUs. | 57 |
| Figura 23 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 24 dB para 32 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho. | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 27 dB para 32 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho. | 60 |
| Figura 25 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 29 dB para 32 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho. | 61 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Distância Splitter x ONUs | 48 |
| Tabela 2 – Formulação do problema | 49 |
| Tabela 3 – Formato da solução | 50 |
| Tabela 4 – Tipos de modulações e taxa de bits | 51 |
| Tabela 5 – Informações gerais das soluções propostas para 16 ONUs | 54 |
| Tabela 6 – Parâmetros otimizados pelo algoritmo MOGWO para 16 ONUs | 55 |
| Tabela 7 – Informações gerais das soluções propostas para 32 ONUs | 58 |
| Tabela 8 – Parâmetros otimizados pelo algoritmo MOGWO para 32 ONUs | 59 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|----------|--|
| 3D MIMO | <i>Three-Dimensional Multiple-Input-Multiple-Output</i> |
| 5G | Quinta Geração |
| A/D | Analógico-Digital |
| ADC | <i>Analog-to-Digital Converter</i> |
| APON | <i>PON with Asynchronous Transfer Mode</i> |
| BS | <i>Bandwidth Scalable</i> |
| CDMA | <i>Code Division Multiple Access</i> |
| CO-OFDM | <i>Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> |
| CP | <i>Cyclic Prefix</i> |
| C-RAN | <i>Centralized Radio Access Networks</i> |
| CW | <i>Continuous Wave</i> |
| D/A | Digital-Analógico |
| DAC | <i>Digital-to-Analog Converter</i> |
| DBA | <i>Dynamic Bandwidth Allocation</i> |
| DDO-OFDM | <i>Direct-Detection optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> |
| DSP | Processamento de Sinal Digital |
| E/O | Conversor Elétrico para Óptico |
| FDMA | <i>Frequency Division Multiple Access</i> |
| FFT | <i>Fast Fourier Transform</i> |
| FTTx | <i>Fiber-To-The-x</i> |
| FSAN | <i>Full Service Access Network</i> |
| GPON | <i>Gigabit Passive Optical Network</i> |
| GWO | <i>Grey Wolf Optimizer</i> |

| | |
|---------|---|
| ICI | <i>Inter-Carrier Interference</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> |
| IFFT | <i>Inverse Fast Fourier Transform</i> |
| IoT | <i>Internet of Things</i> |
| ISI | <i>Intersymbol Interference</i> |
| ITU-T | <i>International Telecommunication Union</i> |
| MCM | <i>Multi-Carrier Modulation</i> |
| MOGWO | <i>Multi-Objective Grey Wolf Optimizer</i> |
| NG-PON | <i>New Generation-Passive Optical Network</i> |
| NG-PON2 | <i>New Generation-Passive Optical Network 2</i> |
| NP | <i>Non-deterministic Polynomial Time</i> |
| O/E | Conversor Óptico-Eléctrico |
| OFDM | <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> |
| OFDMA | <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> |
| OLT | <i>Optical Line Terminal</i> |
| ONU | <i>Optical Network Unit</i> |
| OSNR | <i>Optical Signal to Noise Ratio</i> |
| PD | <i>Photodetector</i> |
| P/S | Paralelo-Serial |
| PON | <i>Passive Optical Network</i> |
| PSC | <i>Passive Splitter/Combiner</i> |
| QAM | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> |
| QoS | <i>Quality of Service</i> |
| SDH | <i>Synchronous Digital Hierarchy</i> |
| S/P | Serial-Paralelo |
| Sync | <i>Synchronism</i> |

| | |
|------|---|
| TDMA | <i>Time Division Multiple Access</i> |
| TWDM | <i>Time and Wavelength Division Multiplexed</i> |
| WDM | <i>Wavelength Division Multiplexing</i> |
| WDMA | <i>Wavelength Division Multiple Access</i> |

Lista de símbolos

| | |
|------------------|---|
| T_{cp} | Tempo de prefixo cíclico |
| B_w | Largura de banda |
| λ_{down} | Comprimento de onda sentido <i>downlink</i> |
| λ_{up} | Comprimento de onda sentido <i>uplink</i> |
| = | Igualdade |
| \geq | Maior ou igual |
| \leq | Menor ou igual |
| \succ | Domina |
| \forall | Para todo |
| \in | Pertence |
| \exists | Existe |
| \wedge | Conjunção lógica |
| \nexists | Não existe |
| | Tal que |
| Σ | Somatório |
| N_{FFT} | Número de subportadoras da FFT |
| N_u | Número de subportadoras úteis |
| N_s | Número de subportadoras de dados |
| Δ_f | Espaçamento entre as subportadoras |
| G | Razão de prefixo cíclico |
| T_u | Tempo útil do símbolo OFDM |
| T_s | Tempo do símbolo OFDM |
| τ_{max} | Máximo atraso por espalhamento de um canal óptico |
| R_b | Taxa de bits |
| M | Ordem de modulação QAM |

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Rede de Acesso de Banda Larga Baseada em PON | 19 |
| 1.2 | Rede Óptica Passiva Baseada em OFDMA | 20 |
| 1.3 | Motivação | 22 |
| 1.4 | Trabalhos Relacionados | 23 |
| 1.5 | Objetivos Gerais e Específicos | 24 |
| 1.6 | Principais Contribuições | 24 |
| 1.7 | Estrutura da Dissertação | 25 |
| 2 | ARQUITETURA BS-OFDMA-PON | 26 |
| 2.1 | Rede PON | 26 |
| 2.1.1 | Histórico das Redes PON | 26 |
| 2.1.2 | Técnicas de multiplo acesso de redes PON | 27 |
| 2.2 | Sistemas ópticos baseados em OFDM | 28 |
| 2.3 | Rede BS-OFDMA-PON | 32 |
| 2.3.1 | Estrutura da rede BS-OFDMA-PON | 33 |
| 3 | OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E ALGORITMO MOGWO | 36 |
| 3.1 | Conceitos iniciais | 36 |
| 3.2 | Metaheurísticas | 37 |
| 3.3 | Metaheurística Grey Wolf Optimizer | 38 |
| 3.3.1 | Hierarquia Social | 38 |
| 3.3.2 | Cercando a presa | 39 |
| 3.3.3 | Caçando a presa | 40 |
| 3.3.4 | Atacando a presa | 42 |
| 3.3.5 | Procurando pela presa | 42 |
| 3.4 | Metaheurística Multi Objective Grey Wolf Optimizer | 43 |
| 3.4.1 | Mecanismo de seleção e arquivo do MOGWO | 43 |
| 3.4.2 | Fluxograma do algoritmo MOGWO | 44 |
| 4 | MODELAGEM PROPOSTA | 47 |
| 4.1 | Parametrização do sistema OFDMA analisado | 47 |
| 4.2 | Formulação do problema | 48 |
| 4.3 | O algoritmo proposto | 49 |
| 4.3.1 | Parâmetros de entrada e saída do algoritmo | 50 |
| 4.3.2 | Taxa de transmissão e número mínimo de subportadoras de dados | 50 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.3.3 | OSNR e busca binária na Função Objetivo | 51 |
| 5 | ANÁLISE DE RESULTADOS | 53 |
| 5.1 | Resultados da simulação para 16 ONUs | 53 |
| 5.2 | Resultados da simulação para 32 ONUs | 55 |
| 5.3 | Análises conclusivas | 61 |
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 63 |
| | REFERÊNCIAS | 65 |

1 Introdução

O crescimento contínuo da demanda de tráfego de internet em combinação com o aumento de aplicativos de chamadas de vídeo, TV de alta definição, computação em nuvem e aplicações de rede, exigem uma solução econômica e escalável de infraestrutura de rede (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2010). Ademais, o tempo de utilização desses serviços pelos usuários também está aumentando, tornando comum o consumo de programas completos de TV e filmes via *streaming*. Além disso, parece não haver saturação à vista para esta tendência e, com isso, a demanda por conteúdo continuará crescendo para taxas extremamente elevadas (SHAFI et al., 2017).

Segundo o Relatório Anual de Internet da Cisco dois terços da população global possuirão acesso a internet em 2023. Serão 5,3 bilhões de usuários, o que representará 66% da população global em 2023, contra 3,9 bilhões, 51% da população mundial em 2018 (CISCO, 2020). Ainda segundo o relatório, ocorrerá um aumento do número de dispositivos e conexões por pessoa e da velocidade média de navegação banda larga. O aumento desses dados por regiões do planeta, é mostrado nos gráficos da Figura 1 e na Figura 2, respectivamente. Na Figura 1 nota-se que o número médio de conexões por pessoa passará de 2 para mais de 3 de conexões no mundo, aumentando em mais de 50% em 5 anos, destacando-se a América do Norte e Europa Ocidental com perspectivas de atingirem valores maiores do que 12 e 8 conexões por pessoa em 2023, respectivamente. Observa-se um crescimento ainda mais elevado na velocidade média de conexão a qual passará de pouco mais de 40 Mbps para mais de 100 Mbps no mundo, aumento aproximado de 150%, e chegará a 150 Mbps na região Ásia-Pacífico.

Uma resposta a estas demandas de tráfego e crescimento de dispositivos e usuários conectados está na implantação da quinta geração de redes móveis (5G). Essa nova tecnologia pretende prover um salto revolucionário em termos de taxas de dados, latência, massiva conectividade, confiabilidade da rede e eficiência energética (SHAFI et al., 2017). Estes recursos serão direcionados para permitir a ocorrência de conexões de alta velocidade, implantação da Internet das Coisas IoT (*Internet of Things*) e realidade virtual aumentada, dentre outros. No entanto, espera-se cumprir os requisitos do 5G utilizando grandes larguras de banda disponíveis, cobertura mais ampla por meio de grandes arranjos de antenas e 3D MIMO (*three-dimensional multiple-input-multiple-output*) e novas formas de onda que forneçam escalabilidade e flexibilidade (SHAFI et al., 2017).

De fato, a necessidade de custo e eficiência energética e escalabilidade requerem uma rede flexível que possua uma granularidade fina, de modo a fornecer adaptativamente a capacidade necessária para atender as demandas de sub ou super comprimento de

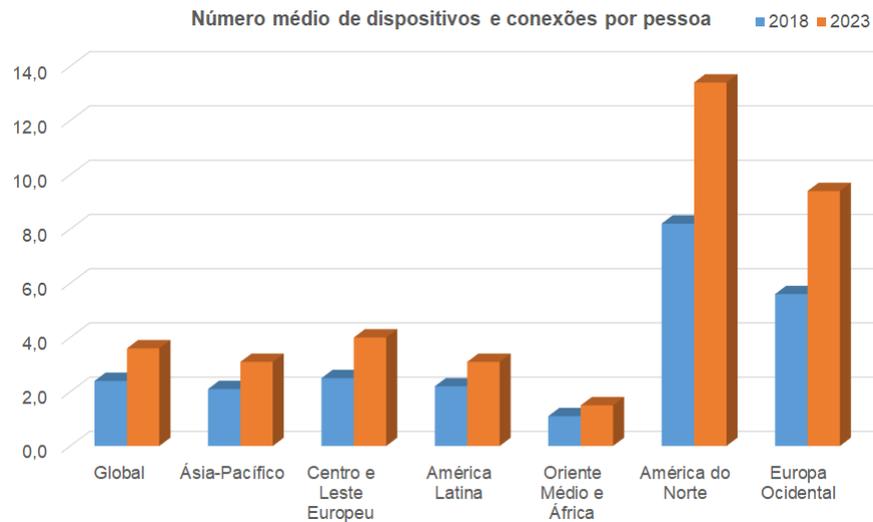


Figura 1 – Número médio de dispositivos e conexões por pessoa.

Fonte: (CISCO, 2020).

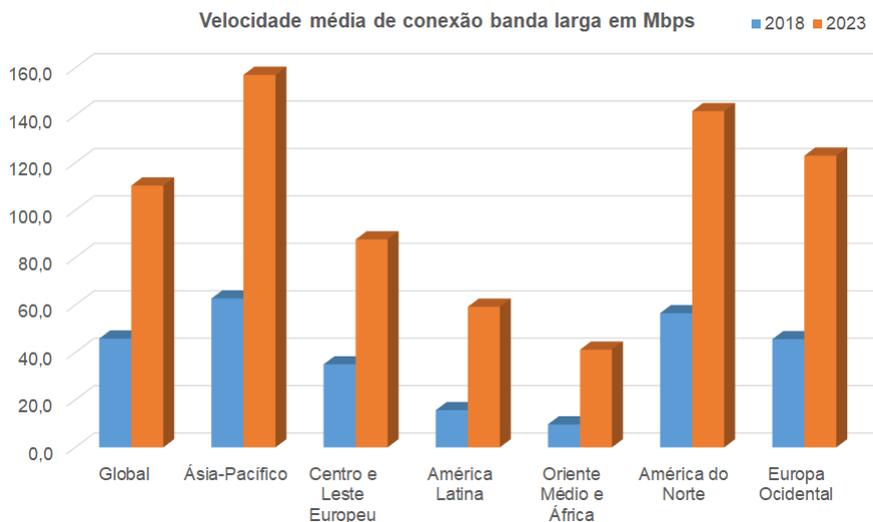


Figura 2 – Velocidade média de conexão banda larga em Mbps.

Fonte: (CISCO, 2020).

onda (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011). Além disso, utiliza-se a escalabilidade em termos de largura de banda, a fim de atender dinamicamente a demanda de cada usuário. A rede PON é uma solução atraente que atende a esses requisitos, principalmente para a implementação do conceito de rede centralizada C-RAN (*Centralized Radio Access Networks*) da rede 5G, especificamente nos segmentos *backhaul* e *fronthaul* devido a sua baixa latência, alta capacidade e flexibilidade oferecida (BROWNING et al., 2017).

1.1 Rede de Acesso de Banda Larga Baseada em PON

Por meio da criação do comitê FSAN (*Full Service Access Network*), as PONs passaram a ser padronizadas sob a forma de procedimentos do IEEE (*Institute of Electric and Electronic Engineers*) ou de recomendações da ITU-T (*International Telecommunication Union*) (ITU-T, 2005). Outros países, especialmente os asiáticos, têm investido muito em redes ópticas passivas para atender demandas residenciais, já que este tem sido o grande desafio - estender a transmissão óptica até o usuário final mantendo a viabilidade econômica (NUNES, 2016). Devido a isto, essas redes ópticas de acesso em banda larga têm despertado grande atenção da indústria e comunidade científica, por seu enorme potencial em reduzir o estrangulamento (ou gargalo) de banda aliado ao baixo custo (HARBOE; SOUZA, 2013).

Na rede PON, apenas componentes passivos são utilizados para a transmissão do sinal. Ela é composta por um link de fibra óptica interligando um equipamento terminal de linha óptica OLT (*Optical Line Terminal*), com maior complexidade e responsável pela conexão com redes de backbone, como as redes de transporte SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), a um elemento óptico passivo divisor/combinador (*splitter/combiner*), o qual conecta-se a vários outros equipamentos chamados unidades de rede ópticas ONU (*Optical Network Units*) localizados em condomínios, gabinetes nas calçadas, sites e residências (NUNES, 2016). A Figura 3 apresenta o sistema FTTx (*Fiber-To-The-x*) que demonstra as várias possibilidades de interconexões utilizadas nas PONs.

Como não há dispositivos ativos entre a central e o assinante, não há necessidade do uso de esquemas de alimentação elétrica e gerenciamento nos cabos, o que acelera a introdução de novos serviços e reduz custos de um modo geral, além de largura de banda oferecida não decrescer com o aumento da distância devido a sua baixa atenuação (HARBOE; SOUZA, 2013). Dessa maneira, as PONs se destacam entre as tecnologias concorrentes adaptadas para 5G, sendo uma escolha atraente devido a topologia ponto multiponto, pelo uso eficiente de recursos de fibra e as amplas implementações em todo o mundo (WEY; ZHANG, 2018).

No entanto, para explorar propriedades como flexibilidade e escalabilidade da rede, faz-se necessário a utilização de técnicas que tornem isto possível. Desta forma, para atender este requisito, pode-se prover o acesso múltiplo por meio da técnica de multiplexação OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), a qual permite uma alocação de largura de banda flexível, além de ser uma eficiente solução para a interferência intersimbólica, possuir boa eficiência espectral, baixa latência e capacidade de estabelecer links virtuais ponto a ponto no domínio da frequência a fim de atender áreas que possuam alta densidade de células (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011), (CVIJETIC et al., 2012).

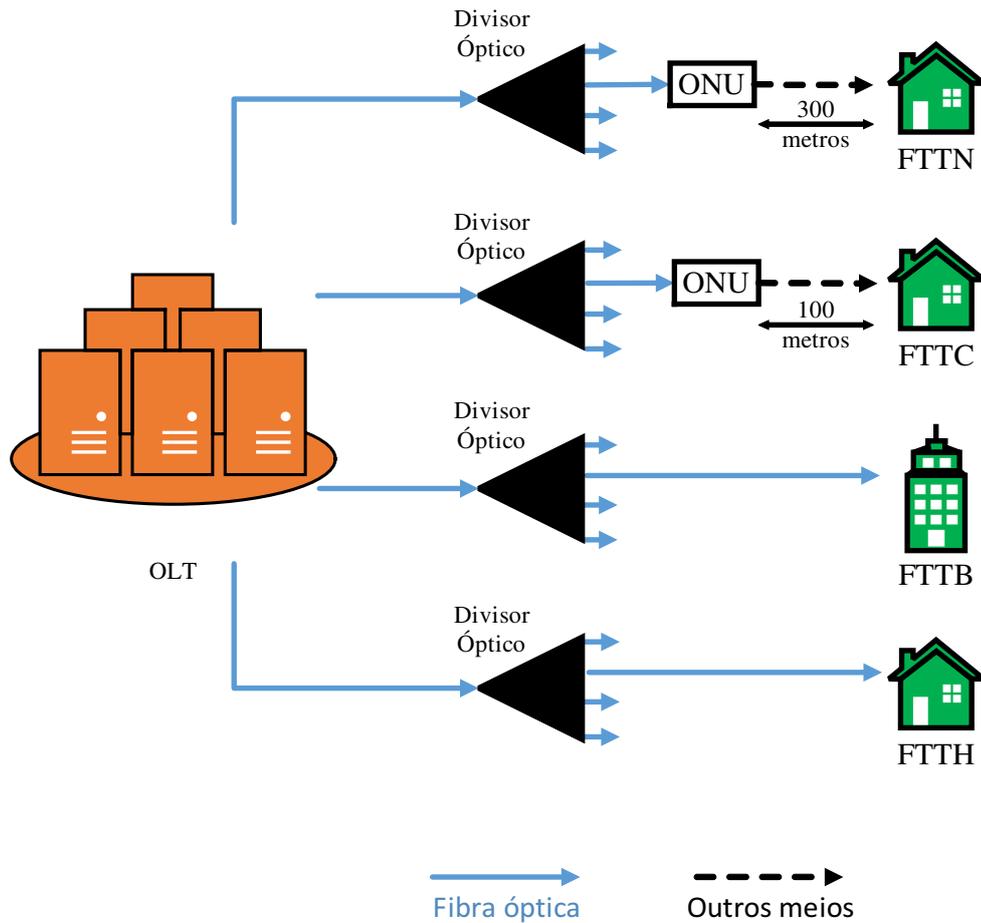


Figura 3 – Sistema FTTx (C - *curb* , B - *Building*, H - *Home*, O - *Office*).

1.2 Rede Óptica Passiva Baseada em OFDMA

A multiplexação OFDMA apresenta-se como técnica promissora para compartilhamento de recursos em PONs, já que consumo de energia e complexidade computacional são restrições que podem ser reduzidas mediante sua implantação. Entretanto, um sistema de controle da largura de banda ocupada pelos variados usuários deve ser estabelecido nesta técnica quando aplicado a sistemas ópticos com várias sub-bandas elétricas. A arquitetura BS (*Bandwidth Scalable*)-OFDMA-PON é uma das baseadas em OFDMA em que a camada física compartilha o mesmo símbolo OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) entre todas as diversas ONUs. Ela fornece um gerenciamento de largura de banda para aumentar a granularidade de alocação da mesma. Além disso, prevê-se que esta arquitetura melhora a eficiência espectral do sistema, reduzindo a banda de guarda entre sub-bandas e a banda de guarda presente no início do espectro óptico (NUNES et al., 2016).

Para cada ONU é destinado uma sub-banda a qual recebe uma quantidade determinada de subportadoras, que serão utilizadas para a transmissão dos dados. No entanto, faz-se necessária a inserção de banda de proteção óptica no início do espectro do símbolo

OFDM, quando a transmissão ocorre via detecção direta (COURA, 2009), e a possível inserção de bandas de guarda entre as sub-bandas de cada ONU, devido a diferente ordem de modulação utilizada para cada usuário, a fim de evitar interferência entre elas. Apesar de exercerem uma função essencial de proteção, deve-se evitar o excesso de subportadoras destinadas a este fim, visto que este é um recurso limitado de sistemas OFDMA e dessa forma, menos estarão disponíveis para a transferência de dados. As sub-bandas e as bandas de guarda estão representados em um espectro de sinal na Figura 4.

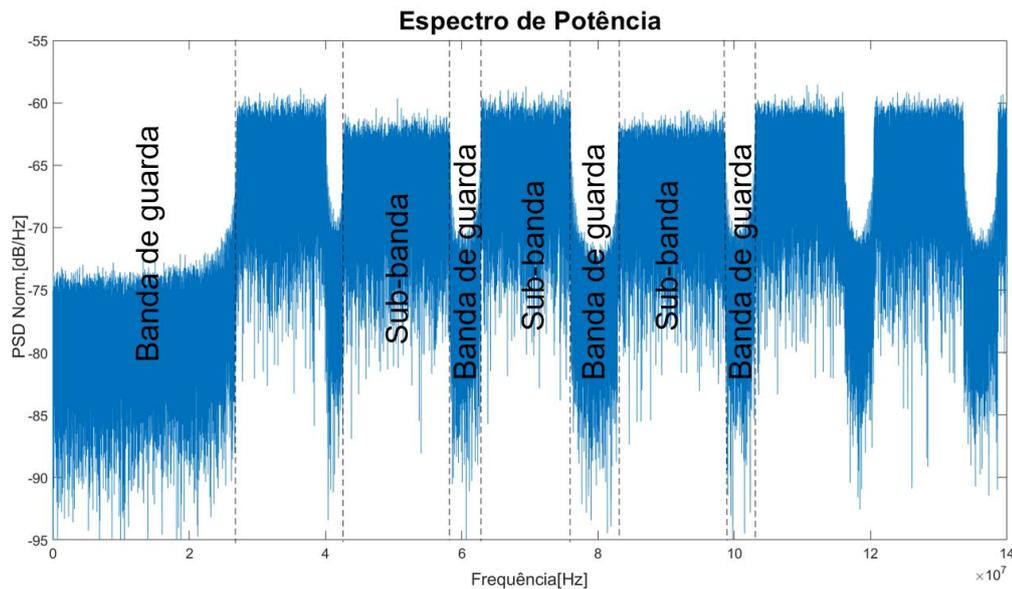


Figura 4 – Espectro de sinal com banda de guarda e sub-bandas

Ademais, a multiplexação OFDMA é eficiente ao realizar a modulação e demodulação, durante a transmissão usando o processamento do sinal digital, devido a utilização da transformada rápida de Fourier FFT (*Fast Fourier Transform*) e sua inversa IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). Além disso, pode suportar modulações adaptativas com a utilização de diferentes Modulações de Amplitude em Quadratura QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) de constelações definidas por software, sem qualquer alteração de hardware no transmissor e receptor (YI; SHIEH; MA, 2008). Entretanto para utilizar uma modulação com maior quantidade de pontos de constelação, e de maior eficiência espectral, faz-se necessário um maior valor de relação sinal-ruído óptica OSNR (*optical signal to noise ratio*).

De fato, demonstra-se em (FREUDE et al., 2012) que uma maior ordem de modulação requer um maior valor de OSNR para alcançar um mesmo valor de taxa de erros de bits BER (*Bit Error Rate*). Desta maneira, um maior valor de OSNR permite utilizar ordens de modulações com melhor eficiência espectral, pois aumentam a quantidade de bits por elemento de sinal e utilizam menos largura de banda. Em contrapartida, por possuir maior quantidade de símbolos, a distância euclidiana entre estes é menor tornando-

as mais suscetíveis a erros de interpretação no receptor quando se detecta um símbolo, ofertando uma pior qualidade de serviço QoS (*Quality of Service*), conforme pode ser visto na Figura 5. Como exemplo, a modulação 16 QAM é mais robusta a erros que 64 QAM. Para compensar essa suscetibilidade acrescenta-se as bandas de guarda descritas anteriormente.

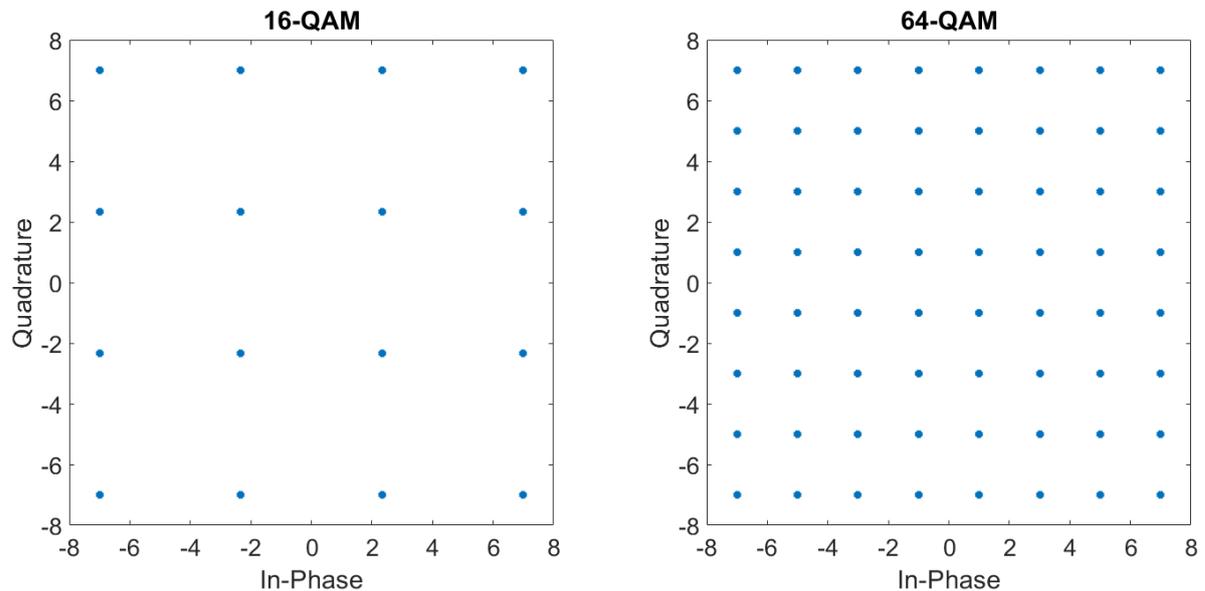


Figura 5 – Diagramas de Constelação das modulações 16-QAM e 64-QAM

1.3 Motivação

O dimensionamento do valor de OSNR, ordem de modulação QAM utilizada, número de subportadoras destinadas a transmissão de dados para cada usuário, número de subportadoras utilizadas para a banda de guarda, são relevantes a fim de atender requisitos de BER e taxa de transmissão para cada ONU em um sistema de comunicação. Além disso, necessita-se utilizar uma rede flexível e escalável para permitir o uso de uma tecnologia que permita alocar dinamicamente largura de banda tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, com o propósito de aumentar a granularidade do sistema e responder mais rapidamente às variações de demanda (NUNES, 2016) que atenda a maior quantidade de usuários possíveis.

Para automatizar este dimensionamento pode-se utilizar programação linear, heurísticas ou Metaheurísticas com o intuito de otimizar os recursos do sistema de comunicação. Neste presente trabalho propõe-se a utilização do algoritmo de otimização MOGWO (*Multi-Objective Grey Wolf Optimizer*) para reduzir a utilização de largura de banda utilizando uma infraestrutura de rede BS-OFDMA-PON para a transmissão do sinal a fim de garantir um respectivo QoS e atender as demandas de cada usuário.

1.4 Trabalhos Relacionados

Na literatura existem trabalhos que exploram sistemas de comunicação flexíveis e escaláveis para atenderem de maneira personalizada às demandas. Em (ZAOUGA et al., 2019) é explorada a alocação dinâmica de largura de banda em protocolos atuais de redes PON. Foi proposto a utilização do algoritmo DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*) para atender requisitos de latência de rede em seguimentos *fronthaul* do 5G a fim de maximizar a taxa de transmissão.

De fato, as redes PON estão sendo estudadas para serem uma possível solução de rede para atender elevadas taxas de transmissão. Pesquisas recentes, (DESANTI et al., 2020), (DU; LAM, 2020) estão estendendo o conceito de redes PON, para redes Super PON, as quais serão capazes de atingir elevadas taxas de transmissão para dezenas quilômetros de transmissão em fibra. O conceito de Super PON já existe desde a segunda metade dos anos 90, (MESTDAGH; MARTIN, 1996), entretanto, uma possibilidade de implementação em larga escala ainda não ocorreu na época devido às estudos de viabilidade e limitações tecnológicas. No entanto, a evolução tecnológica das redes PON vem ocorrendo, tendo sua capacidade de transmissão elevada com os anos, sendo capaz de fornecer 1 Gbps inicialmente (GROUP et al., 2018), aumentando para 40 Gbps (ITU-T, 2019).

Com este advento de evolução tecnológica e alta demanda de conectividade, a redução de largura de banda tornou-se um fator preponderante. Em (LI et al., 2020) investiga-se no sentido de comunicação (*downstream*) uma largura de banda e taxa de amostragem flexível em comunicações de curto alcance por meio da utilização da multiplexação OFDM, devido a sua flexibilidade. No trabalho atendeu-se redes de alcance em torno de 20 Km, capaz de dobrar a eficiência do espectro, sendo capaz de atingir velocidade de 50,4 Gbps. Demais trabalhos na literatura utilizado as vantagens da multiplexação OFDM, e por consequência OFDMA, em conjunto com a rede PON, pode-se citar: (LI; HAN; ZHAO, 2019), (KANG et al., 2020), (CHAO et al., 2019).

A estrutura OFDMA-PON possui várias vantagens, no entanto o gerenciamento de alocação de recursos desse sistema é uma tarefa complexa e pode-se utilizar heurísticas ou até mesmo redes neurais artificiais por meio de aprendizagem por reforço profundo aplicadas a sistemas OFDMA-PON (CHEN et al., 2019) para uma atribuição dinâmica de subportadoras a fim de obter eficiência energética em OFDMA-PONs. Em (HUA; ZHANG; WANG, 2020) é proposto a utilização de um algoritmo multidimensional de alocação de recursos para uma rede de acesso óptico elástica definida por software, sendo uma junção de TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexed*)/OFDM-PON, o qual possui controle de congestionamento e controle de alocação de largura de banda.

Neste trabalho foi utilizado uma metaheurística para alocação de recursos. Optou-se pelo algoritmo MOGWO (MIRJALILI et al., 2016) devido a sua simplicidade e capacidade

de rápida convergência. Outros trabalhos já utilizaram o algoritmo MOGWO, dentre os quais: (KAMALOVA et al., 2019) que o utilizou para a exploração de robô em locais desconhecidos; (SAHOO; CHANDRA, 2017), utiliza para melhoras de lesões cervicais. Na literatura existem até variações deste algoritmo, como (NUAEKAEW et al., 2017) que utiliza uma estrutura de dois arquivos apresentando boas soluções para o problema de despacho de potência reativa ideal e (LU et al., 2017) utiliza-o de um modo híbrido com programação dinâmica para resolver um problema do mundo real na indústria de soldagem.

1.5 Objetivos Gerais e Específicos

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a escalabilidade da largura de banda da rede BS-OFDMA-PON e propor uma solução geral para a otimização de largura de banda, mediante a variação da quantidade de subportadoras de dados e da ordem de modulação por subportadora no sentido de comunicação *downlink* para atender uma respectiva quantidade de usuários e garantir uma taxa de transmissão igual a 1 Gbps por usuário. Para atingir o objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- a criação de uma simulação da rede BS-OFDMA-PON para permitir a utilização de diferentes gerações de rede PON;
- formular matematicamente o problema de otimização multiobjetivo com as respectivas restrições do sistema de comunicação;
- minimizar a utilização da largura de banda disponível levando em consideração diferentes valores de OSNR para atender um valor de BER através da *Metaheurística* MOGWO;
- a análise dos resultados do número de subportadoras alocadas e o seu respectivo valor de OSNR propostas pelo simulador para diferentes quantidades de usuários atendidos.

1.6 Principais Contribuições

A partir deste estudo uma contribuição foi o desenvolvido de um método heurístico com a finalidade de atender as restrições de um sistema de comunicação. A partir dele tornou-se possível otimizar a utilização de largura de banda e obter o respectivo OSNR na rede estudada, explorando os conceitos de escalabilidade e flexibilidade da mesma podendo ser aplicado a outras gerações de redes PON. Além disso, possibilitou-se a utilização de distintas ordens de modulação QAM para a transmissão dos dados a diversos usuários, possibilitando a redução de subportadoras alocadas para maiores ordens de modulação. Por

fim, outra contribuição é a proposta de uma metodologia de busca binária para localizar o menor valor de OSNR que atende aos requisitos de transmissão. Além disso, o presente trabalho permitiu a publicação do seguinte artigo em congresso nacional:

- Flores, J. T.; Camporez, H. A. F.; Silva, J. A. L.; Rocha, H. R. O. "**Otimização dos Recursos de Redes Ópticas Passivas Baseadas em OFDMA com Banda Escalável**". Em: *MOMAG*, 2020, Rio de Janeiro-RJ.

1.7 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma: no Capítulo 2 está descrito as principais características de uma Rede PON e da multiplexação OFDMA, além de explanar sobre a arquitetura BS-OFDMA-PON. No Capítulo 3 explica-se importantes conceitos de otimização multiobjetivo e apresenta, as etapas do algoritmo MOGWO. No Capítulo 4 tem-se a parametrização do sistema proposto que é utilizado para validar a modelagem proposta. Apresenta-se também as adaptações realizadas no MOGWO para aplicá-lo ao problema analisado. No Capítulo 5 tem-se os resultados obtidos e uma análise deles é realizada. No Capítulo 6 tem-se as conclusões deste trabalho e trabalhos futuros.

2 Arquitetura BS-OFDMA-PON

Neste capítulo é apresentado o histórico de protocolos da rede PON e suas técnicas de acesso. Posteriormente, realiza-se uma explanação sobre multiplexação OFDM. Por fim, apresenta-se a rede BS-OFDMA-PON utilizada neste trabalho.

2.1 Rede PON

2.1.1 Histórico das Redes PON

A rede PON não necessita de alimentação de energia elétrica entre a OLT e a ONU, além de não empregar amplificadores ópticos ao longo do enlace. Por consequência, é uma opção para banda larga óptica de larga escala com custo reduzido (NUNES, 2016). Além disso, apresentam altas taxas de transmissão, a baixa atenuação e dessa forma maior comprimento de enlaces, maior segurança e confiabilidade (KOKANGUL; ARI, 2011). Diante de tais vantagens, inúmeras pesquisas e padrões ocorreram visando a evolução das redes PON.

As tecnologias de uma rede PON tiveram seu início com a padronização da tecnologia PON sobre Modo de Transferência Assíncrona APON (*PON with Asynchronous Transfer Mode*), na qual a sincronia ocorre pela multiplexação de informação utilizada (ITU-T, 2000). A tecnologia APON teve sua padronização em 1998, onde foi definido uma taxa máxima de 600 Mbps. Posteriormente, o próximo avanço significativo se deu na tecnologia GPON (*Gigabit Passive Optical Network*), a qual foi padronizada em 2003 e alcançou taxas nas ordens de 2,4 Gbps, além da máxima do divisão do sinal aumentar de 64 para 128 usuários, do primeiro para o segundo caso, respectivamente (ITU-T, 2008) (SILVA, 2019).

Em seguida, criou-se tecnologias sendo nomeadas de nova geração de redes ópticas passivas NG-PON (*New Generation -Passive Optical Network*) sendo um sistema PON com taxa de transmissão de 10 Gb/s e taxa de transmissão *upstream* incluem 2,5 e 10 Gb/s, dependendo das aplicações alvo, bem como custo e viabilidade de dispositivos necessários (KANI et al., 2009). NG-PON2 é considerado para abranger possíveis soluções de longo prazo, cuja pretensão é alcançar de 40 à 160 Gbps até o ano de 2022. Além disso, técnicas de modulação como OFDM e multiplexação por divisão de comprimento de onda WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) foram sugeridas para NG-PON2. Posteriormente, sugeriu-se uma combinação das técnicas OFDM/WDM na NG-PON2, visando aumentar o alcance das redes, surgindo assim o denominado *long-reach* PON (SILVA, 2019). A representação cronológica dessa evolução está mostrada na Figura 6.

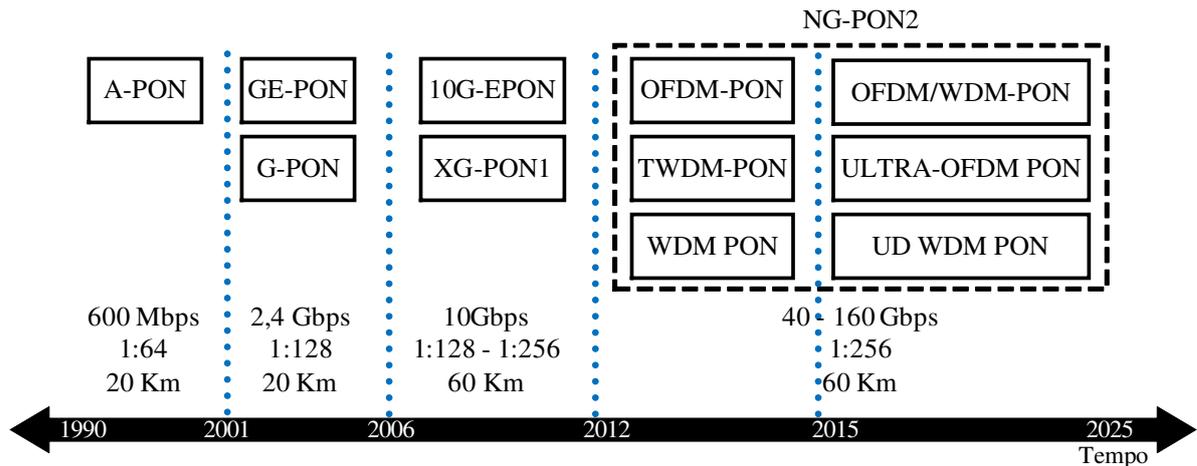


Figura 6 – Previsão e evolução do desenvolvimento da tecnologia PON ao longo dos anos.

Fonte: (SILVA, 2019)

2.1.2 Técnicas de multiplo acesso de redes PON

A evolução dos recursos tecnológicos está possibilitando maiores taxas de transmissão, capazes de fornecer alguns Gbps por usuário e alcance a maiores distâncias. No entanto, um acesso eficiente a esses recursos pelos clientes faz-se necessário. A fim de prover esta eficiência, uma rede deve permitir modelos de acesso ao meio com alta flexibilidade, granularidade e escalabilidade. Na literatura, os modelos de camada de controle de acesso utilizam diversas técnicas de divisão do canal de comunicação e compartilhamento dos recursos da rede.

Dentre as principais técnicas de acesso múltiplo, (NUNES, 2016) destaca o acesso múltiplo por divisão de frequência FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), na qual cada usuário utiliza uma parte da largura de banda do canal correspondente a uma fatia do espectro total; o acesso múltiplo por divisão de tempo TDMA (*Time Division Multiple Access*) sendo que nele cada usuário utiliza toda a largura de banda do canal durante um intervalo de tempo. Este pode ser fixo ou variável de acordo com a demanda. Além disto, o tempo de retorno ao primeiro usuário pode ser fixo ou variável. Além deles, cita-se o acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda WDMA (*Wavelength Division Multiple Access*) - onde cada cliente utiliza um comprimento de onda específico para transmitir e receber suas informações. Trata-se de canais de espectro largo utilizados em fibras ópticas, de modo que sua separação ocorre em medida de comprimentos de onda.

Em (NUNES, 2016) destaca-se ainda, o acesso múltiplo por divisão de código CDMA (*Code Division Multiple Access*) na qual, cada usuário utiliza um código ortogonal, no qual cada bit é representado por uma sequência de *chips* bits em uma frequência maior que o bit original, gerando um espalhamento espectral do sinal. Dessa maneira,

vários usuários podem transmitir simultaneamente no canal e recuperar a informação recombinação o sinal recebido com o seu código. Por fim, a multiplexação OFDMA, que constitui-se de uma técnica que divide o canal na frequência, entretanto, difere do FDMA, pois utiliza portadoras em frequências ortogonais, cujo produto escalar é nulo. Deste modo, não são necessárias bandas de guarda entre as portadoras, sendo estas estabelecidas bem próximas umas das outras e um único comprimento de onda pode ser dividido em muitas subportadoras.

Vale ressaltar que na rede BS-OFDMA-PON, utilizada neste trabalho e explicada com mais detalhes na Seção 2.3.1, a ordem de multiplexação QAM de cada usuário, poderá ser diferente. Desta forma algumas subportadoras irão ser empregadas na banda de guarda entre as sub-bandas destinadas a cada ONU. Apesar da utilização delas para este fim, este acréscimo de banda entre as sub-bandas, pode ser compensado pela redução da banda de guarda principal no início do espectro óptico.

Além disso, a heterogeneidade de ordens de modulação QAM, permite alterar a multiplexação de alguns usuários, sem que seja necessário aumentar o valor de OSNR a fim de atender $BER \leq 10^{-3}$. Conforme demonstrado em (FREUDE et al., 2012), maiores ordens de modulação demandam maior valor de OSNR, para determinada BER, podendo elevar de maneira considerável a potência necessária do sinal, caso seja necessário alterar a multiplexação de todos os usuários a fim de manter essa unicidade de ordem de modulação. Ademais, ao elevar a ordem de modulação de alguns usuários mantendo o OSNR, menos subportadoras de dados são alocadas reduzindo a largura de banda ocupada para transmissão de dados.

2.2 Sistemas ópticos baseados em OFDM

A multiplexação OFDM tem sido proposta como uma técnica de modulação em redes ópticas há alguns anos (YANG; MA; SHIEH, 2008), (ZHANG et al., 2012) podendo ser utilizado para transmissão em grandes distâncias de fibra (SHIEH; YI; TANG, 2007). No OFDM as informações são distribuídas em múltiplas subportadoras. As motivações para o uso de OFDM e conseqüentemente, o uso de compartilhamento de canal via OFDMA podem ser evidenciadas pelas seguintes vantagens destacadas por (HOSHINO, 2013) e (NUNES, 2016):

- baixo custo de implantação, pois permite a utilização de processamento de sinal digital (DSP);
- permite uma modulação multinível avançada capaz de compensar as dispersões ao longo do canal e possuir maior imunidade ao efeito do canal. Além de alcançar maior eficiência espectral e alta velocidade de transmissão;

- o uso de subportadoras OFDM permite que a largura de banda do canal possa ser distribuída entre os usuários com alta granularidade, aumentando a eficiência na agregação dinâmica de tráfego multiusuário em redes ópticas de acesso ponto-a-ponto.

A multiplexação OFDM pertence a uma classe especial de modulação multiportadora MCM (*multi-carrier modulation*) que distribui um fluxo de dados de alta velocidade dividindo-os em uma série de canais ortogonais, referidos como subportadoras, com menor taxa de transmissão de dados em cada uma delas (SHIEH; DJORDJEVIC, 2009). Por consequência da ortogonalidade, as subportadoras possuem um nulo no centro de suas frequências a fim de evitar a ocorrência de interferência entre subportadoras ICI (*inter-carrier interference*). Diante disto, a multiplexação OFDM permite a sobreposição do espectro de subportadoras individuais devido à sua ortogonalidade, conforme ilustrado na Figura 7.

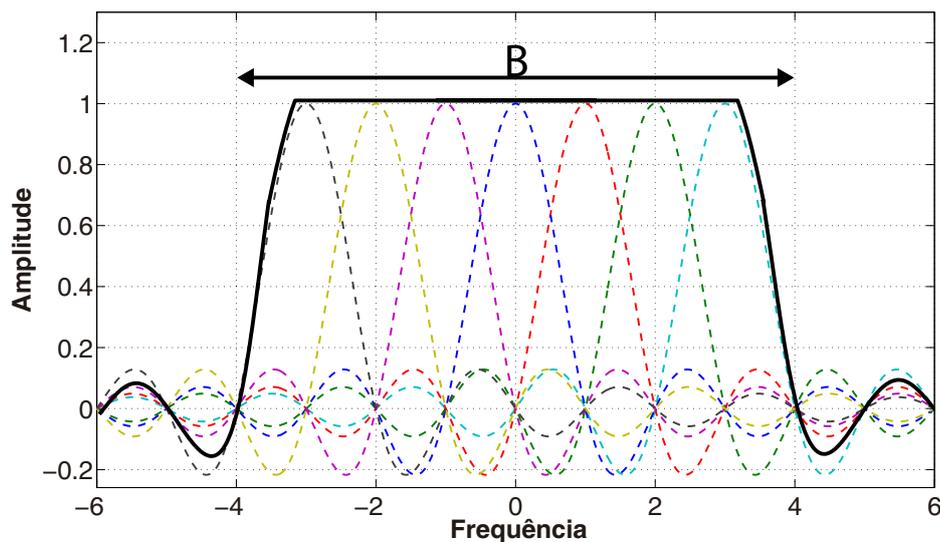


Figura 7 – Espectro de um sinal OFDM

Na Figura 8 está representado um diagrama de blocos o qual será utilizado para gerar os sinais OFDM neste trabalho. Nele o fluxo de bits de dados, possui uma taxa de transmissão R_b bps que será dividida por um conversor série-paralelo em N fluxos menores com taxas de transmissão $R_N = \frac{R_b}{N}$ bps. Esses fluxos menores são mapeados em QAM e posteriormente passarão pelo bloco HS, o qual irá aplicar uma Simetria Hermitiana. Este é um importante bloco, pois ele obriga que o tamanho da IFFT/FFT seja de $2N + 2$. Apesar de elevar o tamanho da IFFT, o benefício pelo uso da simetria Hermitiana é compensado, pois o sinal será composto somente por números reais ao invés de números complexos. Posteriormente, o sinal passará por conversor paralelo-serial P/S e será adicionado um

prefixo cíclico CP (*cyclic prefix*) e passará por um conversor digital-analógico D/A e será transmitido pelo canal.

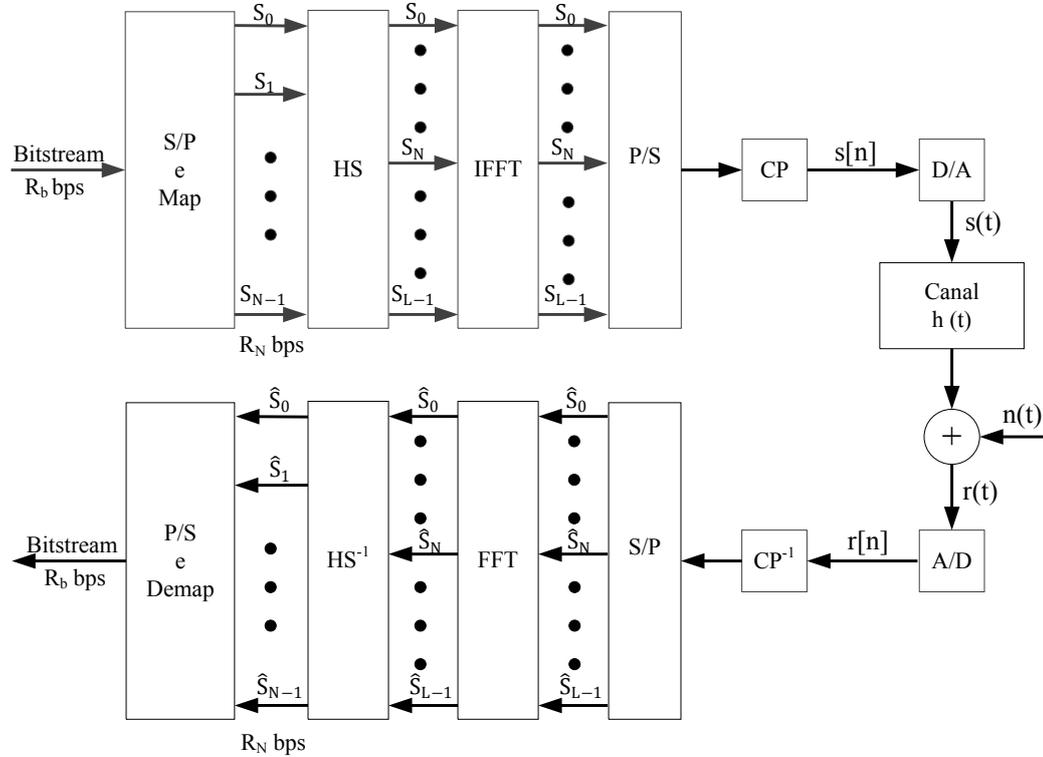


Figura 8 – Esquema básico para OFDM

No receptor o sinal passará pelo conversor analógico-digital A/D , após ser retirado o CP, bloco CP^{-1} na figura, passa por um conversor serial-paralelo S/P para depois ser demodulado pela FFT. Retira-se a simetria hermitiana, HS^{-1} , demapeia-se os símbolos QAM e por fim são alinhados pelo conversor paralelo-série.

Um parâmetro importante para o OFDM é o tamanho da FFT/IFFT, pois aumentá-lo reduz a taxa de símbolo de cada subportadora fazendo o sinal menos vulnerável a ISI e permite diminuir o tamanho do CP, porém aumenta a complexidade do processamento digital do transmissor e do receptor (JANSEN et al., 2007). Outro parâmetro importante para o OFDM é o CP, o qual é uma técnica eficaz para eliminar a interferência intersimbólica ISI (*Intersymbol Interference*) e para compensar os desvios de sincronização do símbolo OFDM. Ele funciona como um intervalo de guarda entre os símbolos. O CP é a cópia das últimas amostras do símbolo colocadas no início desse mesmo símbolo. É desejável que seja o menor possível, pois é cópia de informações já existentes, sendo então uma informação redundante. Na Figura 9 está mostrado um símbolo OFDM sem CP e posteriormente o símbolo com a duração estendida.

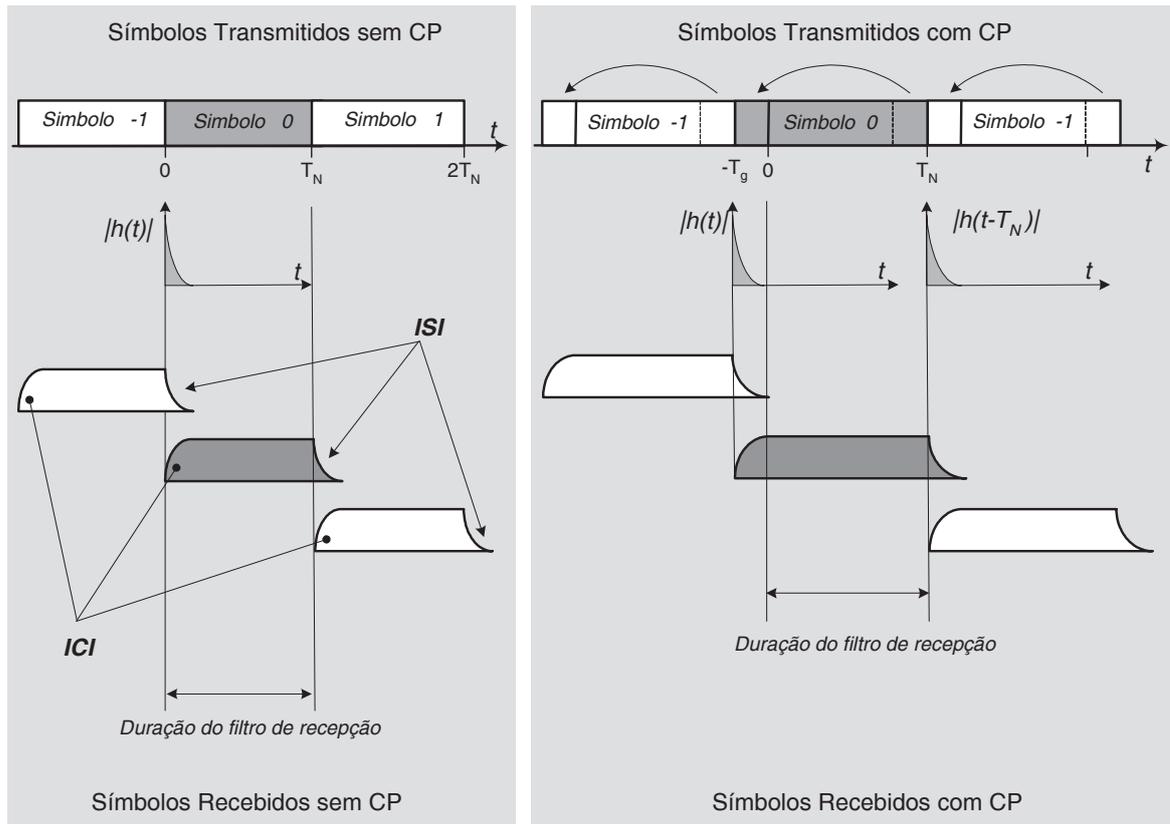


Figura 9 – Símbolo OFDM sem e com prefixo cíclico.

Uma das principais causas do ISI em sistemas ópticos OFDM é a dispersão cromática. Um critério aproximado para minimizar o tamanho da banda de guarda t_{cp} é mostrado em (COURA, 2009), o qual pode ser expresso por:

$$T_{cp} \geq \frac{c}{f^2} \cdot |D| \cdot L \cdot B_w, \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade da luz, f é a frequência da portadora óptica, D é o coeficiente de dispersão da fibra, L é o comprimento da fibra e B_w a largura de banda, sendo essa determinada por $B_w = N_u \times \Delta_f$, onde N_u é a largura de banda efetiva e Δ_f é o espaçamento entre as subportadoras (SHIEH; ATHAUDAGE, 2006).

Finalmente, a utilização de OFDM em redes ópticas pode ser classificada em função da forma de detecção do sinal óptico. A primeira é a multiplexação CO-OFDM (*coherent optical-OFDM*) que é ativada por detecção digital coerente. O OFDM óptico coerente (CO-OFDM) traz benefícios semelhantes aos de sistemas coerentes baseados em portadora única (IP et al., 2008). Possui alta eficiência espectral e alta sensibilidade do receptor, enquanto oferece adicionalmente capacidade de adaptação do transmissor (BOCOI et al., 2008) e estimativa e compensação de canal eficiente (SPINLER; HAUSKE; KUSCHNEROV, 2008). No entanto, os efeitos não lineares da fibra podem causar severa degradação do sinal na transmissão CO-OFDM de longa distância (LOWERY; WANG;

PREMARATNE, 2007).

A segunda maneira de detecção é a multiplexação DDO-OFDM (*direct-detection optical-OFDM*), sendo esta uma candidata promissora para acesso redes, data centers e topologias de banda larga sem fio principalmente por causa de sua simplicidade na arquitetura do receptor (PEREIRA et al., 2015). No entanto, ela possui uma menor eficiência espectral quando comparada à detecção óptica coerente por necessitar da inserção de banda de proteção óptica entre a portadora e as subportadoras OFDM (JANSEN et al., 2008; LEIBRICH et al., 2009; LOWERY; ARMSTRONG, 2007). Apesar disto, o extenso número de parâmetros envolvidos no desempenho da transmissão de sinais OFDM em sistemas DDO é compensado no projeto entre a potência do sinal transmitido, sensibilidade do receptor, robustez contra dispersão cromática de fibra e eficiência espectral geral do sistema (SCHMIDT; LOWERY; ARMSTRONG, 2008; PENG et al., 2009).

2.3 Rede BS-OFDMA-PON

A rede BS-OFDMA-PON foi proposta por (COURA; SILVA; SEGATTO, 2009). A rede BS-OFDMA-PON é uma rede baseada em uma topologia em árvore a qual utiliza dois comprimentos de onda, um para cada sentido de transmissão da rede. Em ambos os comprimentos de onda, a rede dividirá a largura de banda total de transmissão em N sub-bandas, onde cada sub-banda receberá uma quantidade de subportadoras requisitadas pelas ONUs (COURA, 2009).

A técnica de multiplexação utilizada na rede é a OFDMA, na qual o mesmo símbolo OFDM é compartilhado com todos os usuários. Ela é formada por um conjunto de subportadoras ortogonais e a quantidade de subportadoras dentro destes conjuntos pode ser alterada a qualquer instante. Dessa maneira, OFDMA habilita a alocação dinâmica de banda de transmissão entre as ONUs, aumentando ou diminuindo a taxa de transmissão de uma ONU, alocando mais subportadoras para determinada ONU ou diminuindo, respectivamente. Essa característica fornece propriedades relevantes e importantes para os atuais canais de comunicação, como flexibilidade e escalabilidade. A Figura 10 demonstra a distribuição de subportadoras para N ONUs.

Nota-se na Figura 10 que a distribuição de subportadoras não necessariamente é igualitária. A alocação dinâmica de banda depende de fatores como prioridade de tráfego, tamanho da fila, velocidade de transmissão que deseja-se atingir. Este procedimento pode ser realizada de maneira simples ao se modificar o tamanho dos conversores série/paralelos e paralelos/série da OLT e das ONUs. Diante disso, as alterações necessárias ocorrem via programação eximindo a necessidade de alteração de hardware.

Segundo (COURA, 2009) os fatores importantes na alocação dinâmica de banda para a BS-OFDMA-PON são:

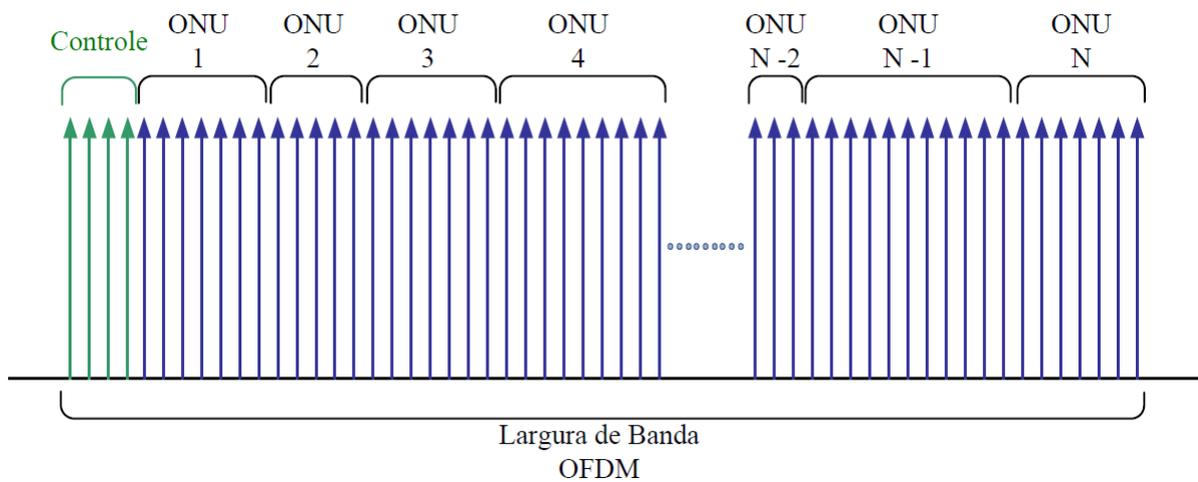


Figura 10 – Distribuição de subportadoras para um canal de comunicação com N ONUs.

Fonte: (COURA; SILVA; SEGATTO, 2009)

- distância entre a OLT e a ONU, pois quanto maior a distância menor é a banda de transmissão que a ONU pode utilizar para enviar seus tráfegos;
- quantidade de subportadoras úteis, que são as subportadoras que podem carregar os tráfegos das ONUs, excluindo-se as que são utilizadas para envio de pilotos, banda de guarda no início e no fim do símbolo OFDM;
- tamanho da FFT/IFFT, pois determina a granularidade das alterações da largura de banda. Quanto maior a FFT menor será a porção de banda que pode ser passada de uma ONU para outra;
- intervalo de tempo em que as distribuições são realizadas. Quanto menor o intervalo maior será a agilidade da rede em atuar no aumento por demanda das ONUs.

2.3.1 Estrutura da rede BS-OFDMA-PON

A rede BS-OFDMA-PON utilizada neste trabalho pode ser vista na Figura 11. Esta rede teve seu desempenho analisado em (COURA; SILVA; SEGATTO, 2009) e (NUNES et al., 2017) e foi comprovada experimentalmente em (NUNES et al., 2016). Conforme pode ser visto nela, no sentido *downlink* na OLT, um conjunto de dados binários destinados, a cada respectiva ONU, passa por um mapeamento QAM. Posteriormente, emprega-se uma simetria Hermitiana na entrada do modulador IFFT para geração dos sinais OFDM com coeficientes reais. Além disso, um CP é adicionado para atenuar os danos causados pela dispersão das fibras. Em seguida, os sinais OFDM em banda base são convertidos em sinais analógicos com um conversor DAC (*Digital-to-Analog Converter*) antes da modulação em

intensidade óptica via um laser CW (*Continuous Wave*), que faz o papel de conversor eletro/óptico E/O (*electro/optical*).

Em seguida, um multiplexador óptico concatena os dois comprimentos de onda antes da propagação via fibra monomodo até o PSC (*passive splitter/combiner*), o qual irá dividir o sinal óptico por N usuários. Então, o sinal óptico é propagado para as ONUs através de fibras sem compensação por dispersão. Na recepção um fotodetector PD (*photodetector*) é utilizado no receptor como conversor óptico-elétrico (O/E), após a separação dos comprimentos de onda. Cada ONU seleciona suas subportadoras de dados com o auxílio de um filtro digital que emprega o artifício *zero padding*. Em seguida, passa-se o sinal por um ADC (*Analog-to-Digital Converter*) e posteriormente retira-se o CP. O sinal é demultiplexado pela transformação rápida de Fourier (FFT), retira-se a simetria Hermitiana e por fim os dados são demapeados.

No sentido *uplink*, os sinais dos usuários são combinados no PSC, antes da propagação até a OLT via fibra óptica. Para cada um dos sentidos de comunicação utiliza-se um comprimento de onda diferente, sendo o λ_{down} para *downlink* e sendo o λ_{up} para *uplink*. Convém ressaltar que este trabalho foca os estudos na comunicação apenas no sentido *downlink*. Mais detalhes sobre a arquitetura, nomeadamente os relacionados aos controladores e sincronismo Sync (*Synchronism*) podem ser encontrados em (COURA; SILVA; SEGATTO, 2009) e (NUNES et al., 2017).

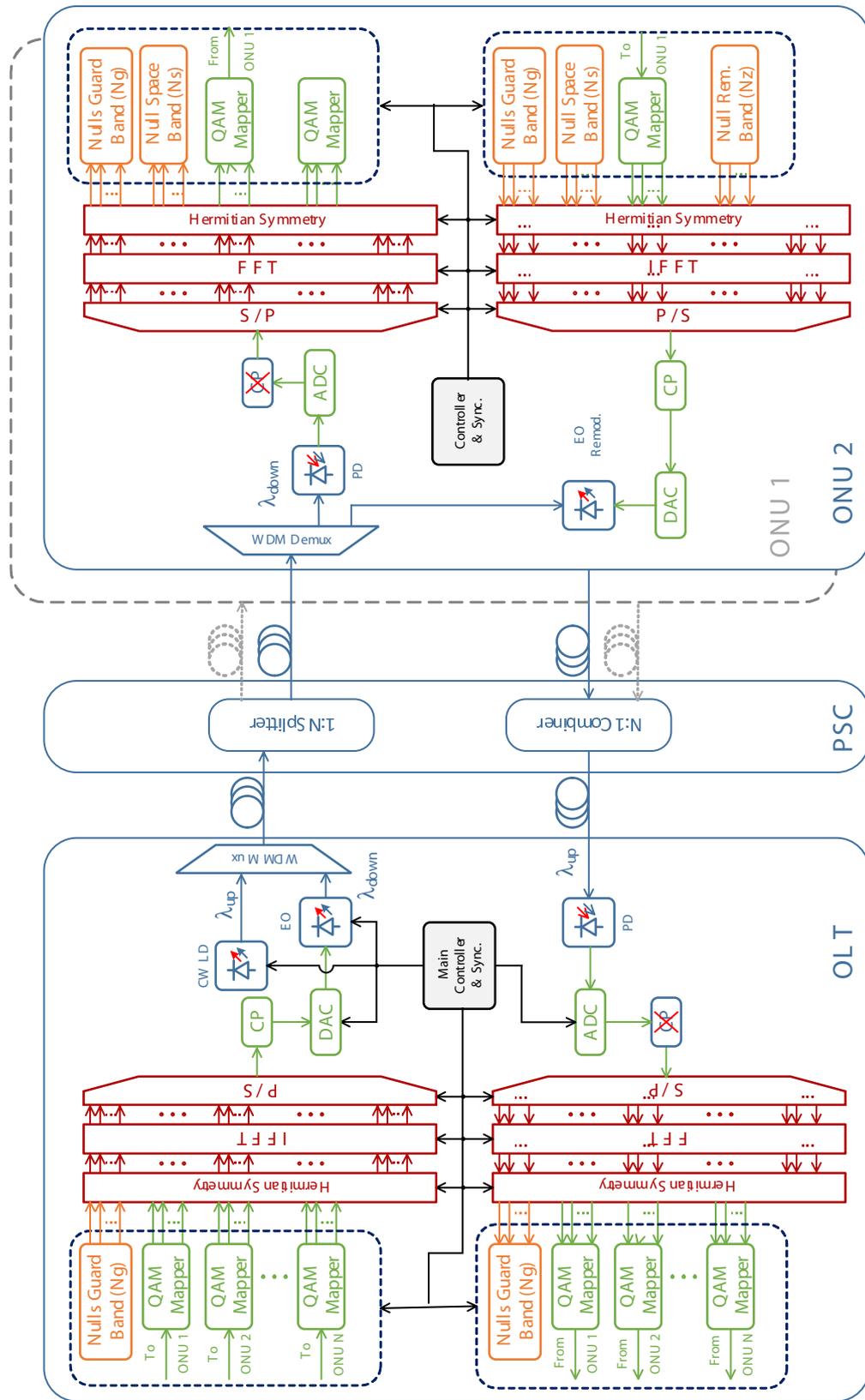


Figura 11 – Diagrama de blocos da arquitetura BS-OFDMA-PON.

Fonte: (NUNES et al., 2017).

3 Otimização Multiobjetivo e Algoritmo MOGWO

Neste capítulo são apresentados conceitos iniciais de otimização multiobjetivo a fim de elucidar a compreensão. Posteriormente, são elencadas inúmeras metaheurísticas existentes na literatura. Por fim, é descrito de maneira detalhada sobre o algoritmo de otimização MOGWO, o qual será utilizado neste trabalho.

3.1 Conceitos iniciais

A otimização multiobjetivo aborda os problemas de otimização que possuem diversas funções objetivo, sejam de maximização ou minimização, que devem ser atingidas simultaneamente. Elas geralmente são conflitantes e não existe uma única solução que otimize todas as funções concomitantemente. Desta maneira, em contraste à otimização mono-objetivo, obtém-se um conjunto de soluções que devem satisfazer as restrições do problema. Pode-se formular, sem perda de generalidade, um problema de maximização da seguinte maneira:

$$\text{Maximizar: } F(\vec{x}) = f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_o(\vec{x}) \quad (3.1)$$

$$\text{Sujeito: } g_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.2)$$

$$h_i(\vec{x}) = 0, i = 1, 2, \dots, p \quad (3.3)$$

$$L_i \leq x_i \leq U_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

sendo n o número de variáveis, o o número de funções objetivo, m o número de restrições de desigualdade, p o número de restrições de igualdade, g_i a i -ésima restrição de desigualdade, h_i a i -ésima restrição de igualdade, e $[L_i, U_i]$ os limites da i -ésima variável (MIRJALILI et al., 2016).

O conceito de comparação entre duas soluções em problemas multiobjetivo foi inicialmente explorado por Francis Ysidro (EDGEWORTH, 1881), sendo estendido por Vilfredo Pareto (PARETO, 1964). Na otimização mono-objetivo as soluções podem ser comparadas facilmente devido a uma única função objetivo. No entanto, na otimização multiobjetivo, uma solução somente é melhor que a outra (dominante) quando o seu valor é melhor ou igual em todos os objetivos e fornece um melhor valor em pelo menos uma das

funções objetivo. A esta relação de dominância entre soluções dá-se o nome de Dominância de Pareto.

Para melhor entendimento de uma otimização multiobjetivo, faz-se necessário a compreensão de conceitos inerentes a ela. Desta forma, estes conceitos estão descritos a seguir e estão aplicados, sem que ocorra perda de generalidade, a um problema de minimização.

Definição 1 - A definição matemática da Dominância de Pareto descrita por Coello (COELLO; PULIDO; LECHUGA, 2004) é a seguinte:

Suponha que existam dois vetores $\vec{u} = (u_1, \dots, u_k)$ e $\vec{v} = (v_1, \dots, v_k)$ é dito que o vetor u *domina* o vetor v (representado como $\vec{u} \preceq \vec{v}$) se e somente se u é parcialmente menor que v , ou seja:

$$\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, k\} : u_i < v_i. \quad (3.5)$$

Definição 2- Ótimo de Pareto: uma solução $\vec{u} \in U$ é chamada de ótimo de Pareto se (NGATCHOU; ZAREI; EL-SHARKAWI, 2005):

$$\nexists \vec{v} \in U \mid F(\vec{v}) \preceq F(\vec{u}). \quad (3.6)$$

Definição 3- Conjunto ótimo de Pareto: um conjunto que inclui todas as soluções não dominadas de um problema sendo chamado de conjunto de Pareto, sendo definido como:

$$P_s = \{\vec{u} \in U \mid \nexists \vec{v} \in U F(\vec{v}) \preceq F(\vec{u})\} \quad (3.7)$$

Definição 4- Frente ótima de Pareto: um conjunto contendo o resultado das funções objetivo das soluções pertencentes ao conjunto ótimo de Pareto, ou seja:

$$P_f = \{F(\vec{u}) \mid \vec{u} \in P_s\} \quad (3.8)$$

Desta maneira, uma otimização multiobjetivo obterá um conjunto ótimo de Pareto o qual pode possuir mais de um elemento, ao contrário da otimização monobjetivo, cujo conjunto solução, predominantemente é unário.

3.2 Metaheurísticas

A busca de soluções eficientes em problemas de otimização combinatória multiobjetivo não é trivial. Os casos práticos envolvem um elevado número de dimensões, configurando um espaço de varredura de soluções de natureza combinatória (HASHIMOTO, 2004). O aumento desta quantidade de dimensões e conseqüentemente da complexidade do problema, não apresenta um comportamento linear sendo este exponencial na classe de problemas NP (*non-deterministic polynomial time*), problemas cuja solução não consegue ser

dada de forma polinomial, o que implica em um elevado acréscimo no tempo computacional utilizado durante a busca por soluções ótimas para o problema a ser solucionado.

Uma solução usada para sanar este problema é a utilização dos algoritmos metaheurísticos, que foram desenvolvidos com a finalidade de resolver problemas de otimização combinatória, com elevado nível de complexidade, como problemas NP-Completo. Uma metaheurística tem como objetivo percorrer espaços de busca à procura de soluções as mais próximas possíveis da ótima, juntamente com um tempo computacional razoável (SILVA, 2019).

De fato, existem inúmeras metaheurísticas na literatura a fim de elucidar problemas multiobjetivo. Dentre as quais, podem-se citar: *Strength-Pareto Evolutionary Algorithm* (ZITZLER; THIELE, 1999); *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (SRINIVAS; DEB, 1994); *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm version 2* (DEB et al., 2002); *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (COELLO; PULIDO; LECHUGA, 2004); *Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition* (ZHANG; LI, 2007); *Pareto Archived Evolution Strategy* (KNOWLES; CORNE, 2000); *Pareto-frontier Differential Evolution* (ABBASS; SARKER; NEWTON, 2001); *Multi-Objective Bat Algorithm* (YANG, 2011); *Multi-Objective Grey Wolf Optimizer* (MIRJALILI et al., 2016).

Dentre as inúmeras metaheurísticas disponíveis para buscar a solução do problema proposto, foi escolhida a metaheurística MOGWO devido a sua simplicidade de programação, além de não apresentar um elevado tempo computacional para encontrar soluções eficientes.

3.3 Metaheurística Grey Wolf Optimizer

O algoritmo GWO é um método de otimização metaheurístico desenvolvido por Mirjalili e seus colegas (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014) baseado na caça do lobo cinzento. Estes são excelentes predadores, estando no topo da cadeia alimentar. Normalmente os lobos vivem em alcateias, sendo grupos normalmente constituídos de 5 a 12 animais. A alcateia possui uma importante hierarquia social a qual influencia diretamente na modelagem matemática do processo de caça.

3.3.1 Hierarquia Social

O líder da alcateia é chamado de *alpha* (α), sendo o responsável por tomar decisões sobre caçar, local de dormir, hora de acordar, entre outros, pois é o lobo dominante. Em seguida, no segundo nível da hierarquia, estão os lobos denominados *beta* (β). Os *betas* são lobos subordinados que ajudam o *alpha* na tomada de decisões e são os possíveis substitutos caso *alpha* venha a envelhecer ou falecer. Abaixo deles estão os chamados *delta* (δ) os quais vigiam os limites do território e avisam a iminência de algum perigo. Por

fim, os demais são denominados *ômega* (ω) sendo subordinados a todos os outros. Essa hierarquia pode ser visualizada na Figura 12.

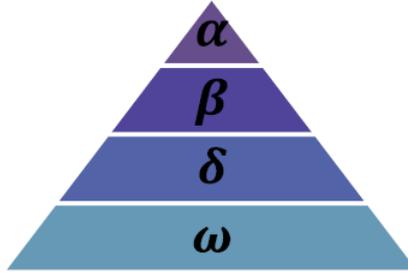


Figura 12 – Hierarquia do lobo cinzento (a dominância diminui do topo para a base).

Fonte: (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014).

3.3.2 Cercando a presa

Os lobos cinzentos inicialmente cercam as presas (*encircling prey*) durante a caça. Em (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014) são propostas as seguintes equações para simular este comportamento:

$$\vec{D} = | \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) |, \quad (3.9)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}, \quad (3.10)$$

sendo t a iteração atual, \vec{A} e \vec{C} são vetores de coeficientes, \vec{X} representa o vetor posição do lobo cinzento e o vetor \vec{X}_p a posição da presa. Os vetores \vec{A} e \vec{C} são calculados como:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}, \quad (3.11)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2, \quad (3.12)$$

sendo os componentes de \vec{a} decrescidos linearmente de 2 até 0, de acordo com o decorrer das iterações. Já \vec{r}_1 e \vec{r}_2 são vetores randômicos com coeficientes entre 0 e 1.

Para visualizar os efeitos das Equações 3.9 e 3.10, um vetor de posição bidimensional e possíveis vizinhos são ilustrados na Figura 13 (a).

Um lobo de posição (X, Y) pode atualizar sua localização de acordo com a posição da presa (X^*, Y^*) . Diferentes lugares ao redor do melhor lobo podem ser alcançados em relação à posição atual ajustando o valor dos vetores \vec{A} e \vec{C} . Por exemplo, $(X^* - X, Y^* - Y)$ pode ser alcançado definindo $\vec{A} = (1, 0)$ e $\vec{C} = (1, 1)$. As possíveis posições atualizadas de um lobo no espaço 3D estão representados na Figura 13 (b). Os vetores randômicos \vec{r}_1 e

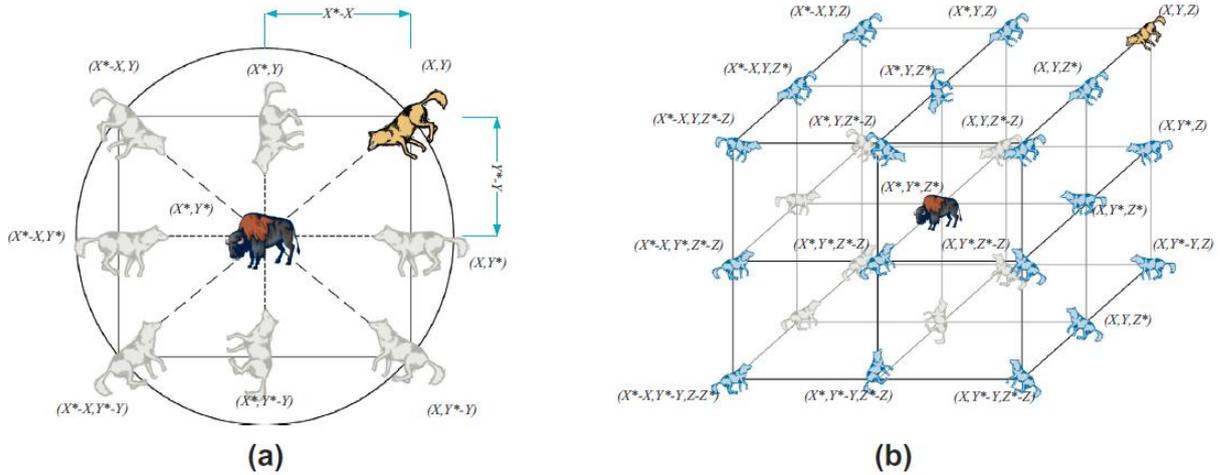


Figura 13 – Vetores de posição 2D e 3D e suas próximas localizações possíveis.

Fonte: (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014).

\vec{r}_2 permitem que os lobos alcancem qualquer posição entre os pontos ilustrados na Figura 13. Assim, um lobo atualiza sua posição dentro do espaço ao redor da presa em qualquer local randômico usando as Equações 3.9 e 3.10. Da mesma maneira, pode-se estender o conceito para um espaço de busca com n dimensões e os lobos cinzentos se moverão em hipercubos ao redor da melhor solução obtida até um determinado momento.

3.3.3 Caçando a presa

Os lobos possuem a habilidade de reconhecer a localização da presa e circundá-la. A caça (*hunting*) é guiado pelo *alpha* e esporadicamente por *beta* e *delta*. No entanto, em um espaço de busca abstrato, estes não detêm conhecimento da localização da presa (solução ótima). Diante disto, o algoritmo salva as três primeiras melhores soluções até um determinado momento e obriga os demais lobos a atualizarem as suas posições em relação a eles (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014). Dessa maneira a modelagem considera as seguintes equações:

$$D_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \quad (3.13)$$

$$D_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \quad (3.14)$$

$$D_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}|, \quad (3.15)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \quad (3.16)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \tag{3.17}$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta, \tag{3.18}$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}, \tag{3.19}$$

nas quais \vec{X}_α , \vec{X}_β e \vec{X}_δ representam as posições dos lobos *alpha*, *beta* e *delta*, respectivamente. $T+1$ representa a iteração posterior do algoritmo e \vec{X} representa a posição do lobo.

A Figura 14 mostra como um lobo atualiza sua posição de acordo com *alpha*, *beta* e *delta* em um espaço de busca 2D. A posição final seria algum lugar aleatório dentro de um círculo que é definido pelas posições de *alpha*, *beta* e *delta* inserido no espaço de busca. Em outras palavras α , β e δ estimam a posição da presa e os demais atualizam suas posições aleatoriamente em torno dela.

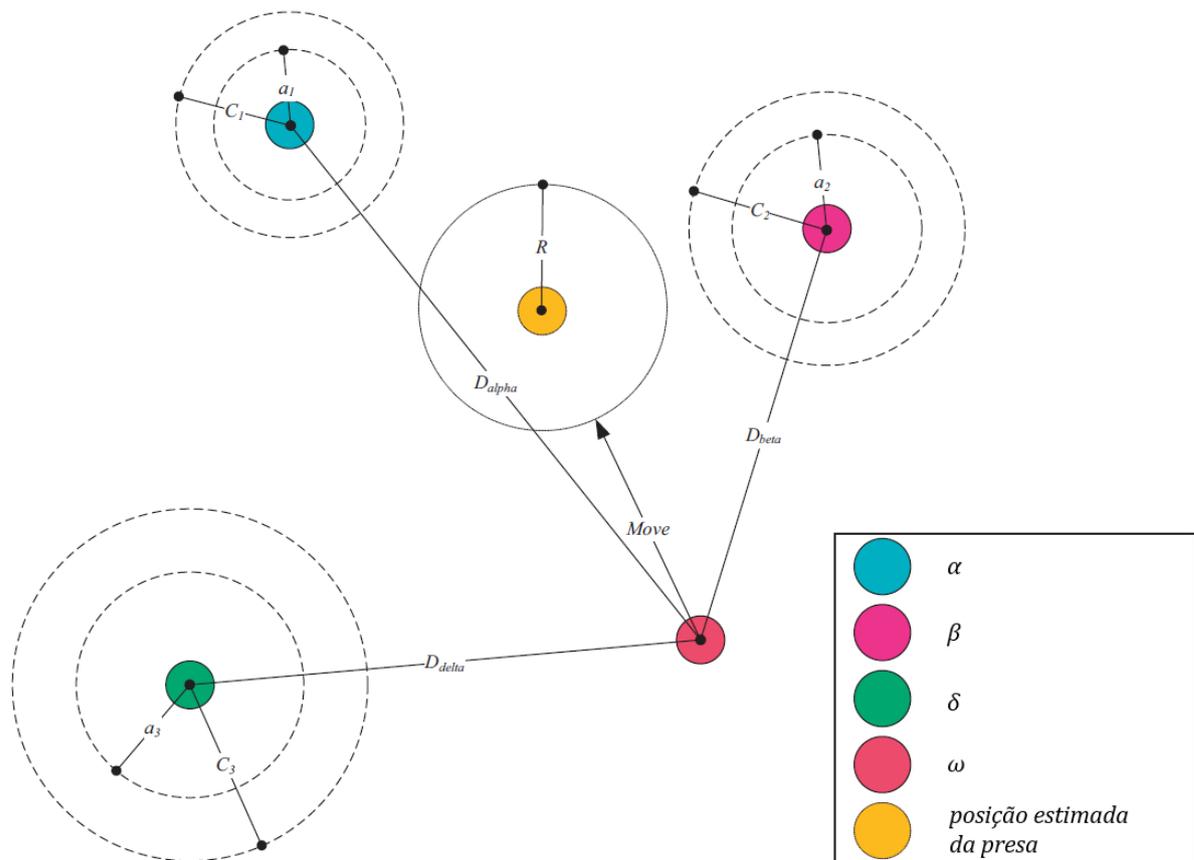


Figura 14 – Atualização da posição no GWO.

Fonte: (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014) (modificada).

3.3.4 Atacando a presa

Os lobos cinzentos finalizam a caça da presa (*Attacking prey*) paralisando o movimento da mesma. Isto é representado matematicamente decrescendo-se o valor de \vec{a} e consequentemente, restringe-se o intervalo de flutuação de \vec{A} . O valor de \vec{a} é calculado pela seguinte equação:

$$\vec{a} = 2 - \frac{2 \cdot \phi}{\theta}, \quad (3.20)$$

sendo ϕ a iteração atual e θ a quantidade máxima de iterações. Quando o valor de \vec{a} pertence ao intervalo $[-1,1]$, o lobo se aproxima da presa conforme mostrado na Figura 15 (a). Logo, caso $|A| < 1$, o lobo é forçado a atacar a presa.

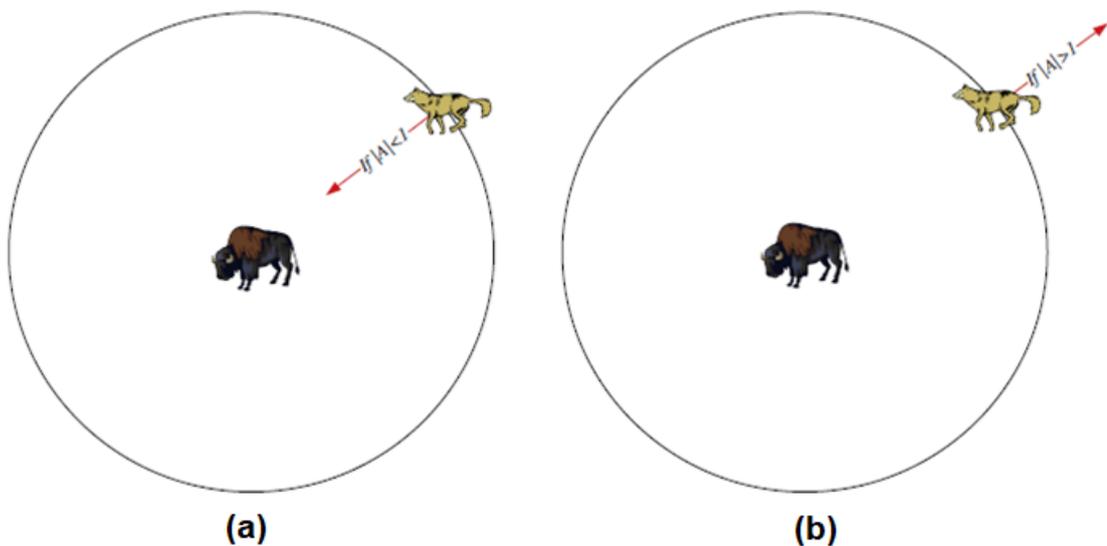


Figura 15 – Atacar uma presa x Procurar uma presa.

Fonte: (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014)

3.3.5 Procurando pela presa

Os lobos são guiados principalmente pela posição de *alpha*, *beta* e *delta*. Eles divergem um do outro para procurar a presa e convergem para atacar a presa. Modela-se matematicamente a divergência da presa com $|\vec{A}| > 1$ para que o lobo encontra uma presa mais apta. Esse comportamento enfatiza a exploração e permite que o algoritmo GWO realize uma busca global. Este comportamento está representado na Figura 15(b).

Outro parâmetro que favorece a exploração é \vec{C} , cujo valores variam entre $[0, 2]$ conforme Equação 3.12. Este componente fornece pesos aleatórios para presas a fim de estocasticamente enfatizar ($\vec{C} > 1$) ou diminuir ($\vec{C} < 1$) o efeito dela na definição da

distância na Equação 3.9. Isto ajuda o GWO a mostrar um comportamento mais aleatório ao longo da otimização, favorece a exploração e evita estagnar em um ótimo local.

Vale ressaltar que $\vec{C} > 1$ não é linearmente diminuído em contraste com A . Exige-se que \vec{C} forneça valores aleatórios em todos os momentos e torne-se muito útil em caso de estagnação em ótimo local. Além disto, \vec{C} pode ser considerado como o efeito de obstáculos para abordar presas na natureza. De um modo geral, os obstáculos da natureza aparecem nos caminhos de caça dos lobos e de fato impede-os de se aproximarem rapidamente em uma presa, e de forma conveniente. Dependendo da posição de um lobo, pode-se aleatoriamente dar um peso à presa e torná-la mais difícil e mais distante para ser alcançada por lobos, ou vice-versa (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014).

Para resumir, o processo de pesquisa começa com a criação de um população de lobos cinzentos (soluções candidatas) no algoritmo GWO. Ao longo das iterações, lobos *alpha*, *beta* e *delta* são utilizados para estimar a posição provável da presa. Cada solução candidata atualiza sua distância dela. O parâmetro a é diminuído de 2 a 0 para enfatizar a exploração e aproveitamento, respectivamente. As soluções candidatas tendem a divergir da presa quando $|\vec{A}| > 1$ e convergem para a presa quando $|\vec{A}| < 1$. Finalmente, o algoritmo GWO é encerrado pela satisfação de um critério.

3.4 Metaheurística Multi Objective Grey Wolf Optimizer

3.4.1 Mecanismo de seleção e arquivo do MOGWO

Para realizar a otimização de inúmeros objetivos pelo GWO, (MIRJALILI et al., 2016) integrou dois novos componentes. Estes novos componentes são muito semelhantes aos utilizados em (COELLO; PULIDO; LECHUGA, 2004). O primeiro é um arquivo, no qual ficam armazenadas as soluções não dominadas, conhecido como frente ótimo de Pareto até o atual momento. O segundo é uma estratégia de seleção dos lobos α , β e δ dentre as soluções presentes no arquivo.

O arquivo é uma unidade de armazenamento simples que pode salvar ou recuperar as soluções ótimas de Pareto não dominadas obtidas até a iteração atual do algoritmo. A cada iteração, as soluções não dominadas obtidas até então, são comparados com as residentes do arquivo. Após isto, as soluções ótimas de Pareto dominantes até o momento serão incluídas. No entanto, existe um número máximo de membros para o armazenamento. Caso esta seja excedida, o *grid mechanism* deve reorganizar a segmentação do *objective space* e encontrar o segmento mais cheio a fim de deletar uma de suas soluções. Após esse procedimento, a nova solução deve ser inserida no segmento menos congestionado (MIRJALILI et al., 2016).

A probabilidade de excluir uma solução é elevada proporcionalmente ao número de

soluções presentes no hipercubo (segmentos). Caso o arquivo esteja cheio, os segmentos mais lotados são selecionados primeiro e omite-se uma solução a fim de liberar espaço para uma nova. Há um caso especial em que uma solução é inserida fora dos hipercubos. Neste caso, todos os segmentos são estendidos para cobrir as novas soluções. Então, os segmentos de outras soluções também podem ser alterados.

O segundo componente é a seleção dos líderes. Em (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014), as três melhores soluções até o momento são utilizadas como α , β e δ e guiam os demais lobos (ω) a fim de encontrar soluções ótimas. No entanto, as soluções não podem ser tão facilmente comparadas entre si em uma pesquisa multi-objetivo, devido aos conceitos descrito na seção 3.1. Desta maneira, (MIRJALILI et al., 2016) utilizou-se um mecanismo de seleção no qual é escolhido o segmento menos populoso existente no arquivo de soluções e a probabilidade de determinado lobo ser escolhido dentro desse hipercubo é dado pela seguinte equação:

$$P_i = \frac{c}{N_i}, \quad (3.21)$$

onde c é uma constante de Pareto maior que 1 e N é o número de soluções ótimas de Pareto existentes no i -ésimo segmento.

Nota-se na Equação 3.21 que hipercubos menos lotados têm maior probabilidade de sugerir novos líderes. A probabilidade de escolher um hipercubo para selecionar líderes aumenta quando o número de soluções no hipercubo é pequena. Caso existam três soluções no segmento menos lotado, três deles são atribuídos aleatoriamente a α , β e δ . Se houver menos de três soluções no menor hipercubo, o segundo menos lotado é localizado para escolher outros líderes. Este cenário é o mesmo, caso o segundo hipercubo menos lotado ter uma solução, então o líder δ deve ser escolhido a partir do terceiro hipercubo menos lotado. Desta maneira, evita-se que o MOGWO escolha líderes semelhantes para α , β e δ .

Um exemplo desse mecanismo de seleção pode ser visto na Figura 16. Na Figura 16 (a) nota-se o arquivo com três hipercubos nos quais estão as soluções não dominadas para a iteração t do algoritmo. O segundo componente é a seleção do líder, na qual escolhe-se o hipercubo menos congestionado do espaço de busca, neste exemplo o hipercubo 1 (Figura 16(b)). Como o hipercubo 1 apresenta apenas duas soluções, a terceira pode ser obtida no segundo hipercubo menos congestionado, sendo o hipercubo 2.

3.4.2 Fluxograma do algoritmo MOGWO

Na Figura 17 está representado um fluxograma do algoritmo MOGWO com as etapas descritas ao longo deste capítulo. Inicialmente ocorre a geração da população inicial com a escolha dos lobos α , β e δ . As posições dos lobos são atualizadas pelas Equações 3.13-3.18. Novas soluções não-dominadas são adicionadas ao arquivo a cada iteração do

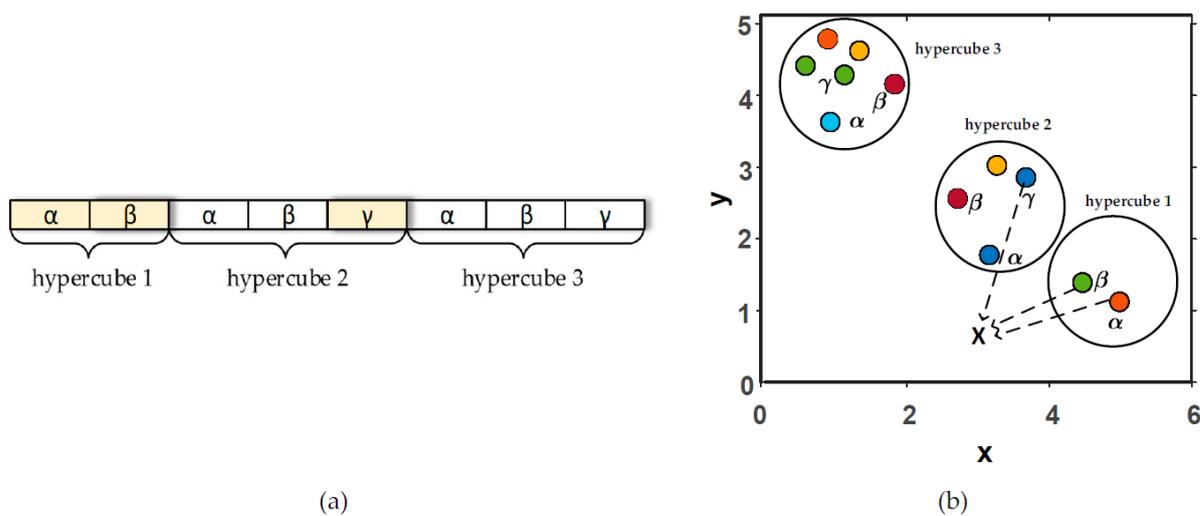


Figura 16 – Componentes do MOGWO: a) O arquivo e b) O mecanismo de seleção de líderes.

Fonte: (KAMALOVA et al., 2019)

algoritmo. Ao final das iterações, o arquivo é retornado. Estas etapas estão demonstradas na Figura 17.

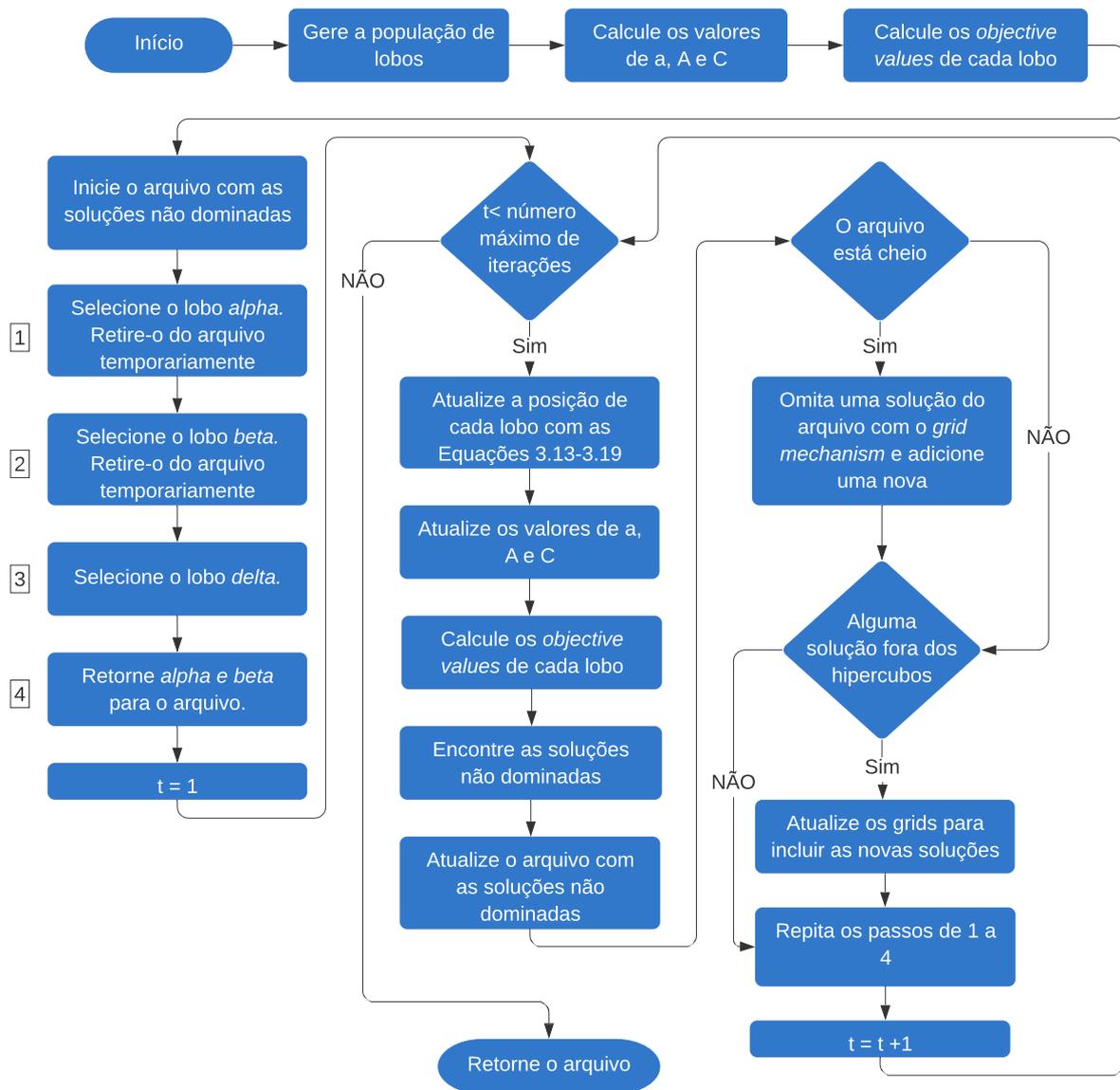


Figura 17 – Fluxograma do algoritmo MOGWO.

4 Modelagem proposta

Neste capítulo será apresentado o problema de otimização multiobjetivo aplicado a rede BS-OFDMA-PON simulada, descrita na subseção 2.3.1. As propriedades de flexibilidade e escalabilidade da rede serão exploradas a fim de atender requisitos, como taxa de transmissão e número de usuários atendidos pelo sistema de comunicação. A parametrização da rede, modelagem matemática do problema e método de otimização utilizado nesta pesquisa serão descritas nas seções posteriores.

4.1 Parametrização do sistema OFDMA analisado

Para as simulações, os sinais OFDM terão a largura de banda de $B_w = 10$ GHz, que é igual à largura de banda efetiva para um sinal óptico no comprimento de onda de 1550 nm em uma fibra óptica monomodo padrão com 20 km de comprimento (COURA; SILVA; SEGATTO, 2009). O número de ONUs da rede será dividido em 2 casos de estudo sendo o primeiro de 16 ONUs, o qual irá simular uma menor quantidade de usuários e 32 ONUs, valor comum das redes TDMA-PONs comerciais.

Para explorar a granularidade do sistema OFDM o tamanho da FFT escolhida foi de $N_{FFT} = 8192$. Segundo (COURA, 2009), para calcular o número de subportadoras úteis, N_u , deve-se diminuir de N_{FFT} as subportadoras posicionadas na frequência de Nyquist e a primeira portadora (posição da frequência de corrente contínua), e devido à operação Hermitiana o número resultante deve ser dividido por 2, ficando $N_u = \frac{N_{FFT}-2}{2}$.

Visto que $N_{FFT} = 8192$, tem-se que $N_u = \frac{8192-2}{2} = 4095$ para as simulações. No entanto, nem todas essas subportadoras estão disponíveis para transmissão de dados, sendo algumas zeradas para formarem uma banda de guarda (ALI; LEIBRICH; ROSENKRANZ, 2008), sendo esta necessária devido a utilização da transmissão DD-OFDM. Desta maneira, o número de subportadoras destinadas a transmissão de dados, N_s , será igual a 3686 nas simulações. Além disso, o valor N_u é diretamente utilizado para calcular a separação das subportadoras, sendo:

$$\Delta_f = \frac{B_w}{N_u}. \quad (4.1)$$

Por consequência, $\Delta_f = \frac{10 \text{ GHz}}{4095} \approx 2,442$ MHz e o período do símbolo utilizável (sem CP), $T_u = \frac{1}{\Delta_f} \approx 409,5$ ns. A taxa de CP escolhida foi $G = \frac{T_{cp}}{T_u} = \frac{1}{64}$, onde T_{cp} é o tempo do CP, $T_{cp} = T_u \times G = 409,5 \text{ ns} \times \frac{1}{64} \approx 6,40$ ns e $T_s = T_u + T_{cp} = 409,5 \text{ ns} + 6,40 \text{ ns} = 415,9$ ns, onde T_s é o tempo do período do símbolo com CP. Vale ressaltar que $T_{cp} = 6400$ ps

é muito maior que o máximo atraso por espalhamento de um canal óptico $\tau_{max} = 270$ ps e desde que a Equação 2.1 seja satisfeita a dispersão da fibra óptica é compensada.

Por fim, calcula-se a taxa de transmissão em bps fazendo:

$$R_b = \frac{B_w}{N_u} \cdot \frac{N_s \times \log_2(M)}{1 + G}, \quad (4.2)$$

onde M é a ordem de modulação QAM utilizado no mapeamento para cada usuário e N_s número de subportadoras de dados (COURA, 2009).

4.2 Formulação do problema

Para avaliar o desempenho da otimização proposta na rede BS-OFDMA-PON, foi realizada uma simulação Monte Carlo, utilizando a linguagem de computação Matlab e cujo desempenho foi mensurado pela contagem de bits errados recebidos. Na simulação, aproximadamente 15000 sinais OFDM foram transmitidos. O transmissor da OLT converte o sinal OFDM para o domínio óptico usando um modulador externo Mach-Zehnder, cuja tensão de polarização é de $V_{bias} = 2,8$ V, para a simulação com 16 ONUs, e $V_{bias} = 2,5$ V para 32 usuários. A variação da relação sinal ruído-óptica (OSNR) foi definido entre 1 dB a 50 dB, pois os valores de OSNR presentes nesse intervalo garantiram uma baixa BER em trabalhos anteriores.

A OLT e o *Splitter* são interligados por um enlace de fibra óptica monomodo padrão de 20 Km de comprimento. Entre o *Splitter* e as ONUs foram utilizadas fibras de comprimento que variavam de 1 a 20 Km. A distância de cada ONU até o *Splitter* pode ser consultada na Tabela 1. Neste trabalho nenhuma perda por inserção do *Splitter* foi considerada. A potência do sinal de entrada na fibra é de 0 dBm. Além disso, como principais parâmetros da fibra, tem-se o coeficiente de atenuação $\alpha = 0.2$ dB/Km e coeficiente de dispersão $D = 17$ ps/nm/km. Foi utilizado o comprimentos de onda $\lambda_d = 1550$ nm para o sentido de transmissão OLT-ONUs.

TABELA 1 – Distância Splitter x ONUs

| ONUs | Distância (em Km) |
|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|
| 1 | 13 | 9 | 6 | 17 | 12 | 25 | 9 |
| 2 | 8 | 10 | 1 | 18 | 12 | 26 | 17 |
| 3 | 10 | 11 | 20 | 19 | 11 | 27 | 19 |
| 4 | 4 | 12 | 12 | 20 | 7 | 28 | 7 |
| 5 | 3 | 13 | 19 | 21 | 4 | 29 | 6 |
| 6 | 16 | 14 | 2 | 22 | 15 | 30 | 19 |
| 7 | 14 | 15 | 2 | 23 | 1 | 31 | 16 |
| 8 | 1 | 16 | 6 | 24 | 20 | 32 | 18 |

A otimização tem como objetivo manter a taxa de transmissão de 1 Gbps por usuário, diminuir a relação sinal-ruído OSNR a fim de atender uma $BER \leq 10^{-3}$ e reduzir a largura de banda utilizada. Além disso, esta otimização possui restrições de BER por usuário, nível de modulação, quantidade máxima de largura de banda disponível, dentre outras que podem ser consultadas na Tabela 2.

TABELA 2 – Formulação do problema

$$\begin{array}{c}
 \text{Min. } \sum_{i=1}^N B_w^i + B_G^i \\
 \text{Min. OSNR} \\
 \text{s.t.} \\
 \hline
 4 \leq M\text{-QAM}^i \leq 64; i = 1, \dots, N \\
 0 \leq B_G^i \leq B_w^T; i = 1, \dots, N \\
 BER^i \leq 10^{-3}; i = 1, \dots, N \\
 B_w^T \leq 10 \text{ GHz} \\
 R_b^i = 1 \text{ Gbps}; i = 1, \dots, N \\
 1 \text{ dB} \leq OSNR \leq 50 \text{ dB} \\
 \sum_{i=1}^N N_s^i \leq 3686 \\
 M\text{-QAM} = 4, 8, 16, 32, 64
 \end{array}$$

No início da tabela, estão destacados os 2 objetivos a serem atingidos pela otimização proposta: minimizar a largura de banda e minimizar o valor de OSNR utilizado. Na 1ª restrição, estão representadas as ordens de modulação QAM que cada usuário pode possuir, sendo elas: 4, 8, 16, 32, 64-QAM. Na 2ª restrição está escrito que a largura de banda, destinada a banda de guarda, não pode ultrapassar a quantidade total de largura de banda. Na 3ª restrição, cada usuário deverá possuir uma taxa de BER menor ou igual a 10^{-3} . Na 4ª, afirma-se que a largura de banda total são 10 GHz. Na 5ª, cada usuário deverá possuir 1 Gbps de taxa de bits. Na 6ª, os valores de OSNR testados estarão entre 1 dB e 50 dB. Por fim, o somatório das subportadoras de dados destinadas a cada cliente deve ser menor que o total existente, cujo valor é de $N_s = 3686$.

Convém ressaltar que devido aos objetivos destacados anteriormente e por consequência das definições descritas na seção 3.1 de conjunto de Pareto, soluções ótimas de Pareto e dominância, ao final da otimização se obtém um conjunto de soluções com diversos valores de OSNR e largura de banda ocupada. As soluções que atendem as restrições presentes na Tabela 2 são consideradas válidas.

4.3 O algoritmo proposto

A metaheurística utilizada nas simulações foi o algoritmo MOGWO, o qual possui todas as etapas descritas no Capítulo 3. No entanto, efetuou-se algumas modificações na implementação para que este se adeque ao problema proposto. Tais alterações, estão descritas nas subseções seguintes.

4.3.1 Parâmetros de entrada e saída do algoritmo

Como parâmetro de entrada do algoritmo, é gerada uma população de soluções cujo formato está descrito na Tabela 3. Cada ONU é representada por 2 colunas consecutivas, sendo que a primeira coluna de cada ONU representa a modulação sorteada dentre as existentes conforme a Tabela 2. A segunda coluna da primeira ONU mostra quantas subportadoras foram destinadas para banda de guarda principal, alocada no início do espectro óptico. Posteriormente, a segunda coluna das outras ONUs representam a quantidade de subportadoras existentes na banda de guarda entre as subbandas dos usuários.

TABELA 3 – Formato da solução

| | ONU 1 | | ONU 2 | | ONU 3 | |
|--------|-------|-----|-------|----|-------|----|
| Lobo 1 | 4 | 203 | 3 | 12 | 5 | 14 |

A Metaheurística implementada utiliza números reais nas suas etapas e os parâmetros do problema, tais como ordem de modulação utilizada por determinado usuário, quantidade de subportadoras utilizadas e valor de OSNR necessário para atingir determinado BER, são números naturais. Devido a isso, utilizou-se limites inferiores e superiores para a ordem de modulação e para a quantidade de subportadoras utilizadas nas bandas de guarda. Sorteou-se para todos os usuários uma quantidade randômica entre os limites inferiores e superiores e verificou-se em qual faixa de intervalo este se encontrava. Desta forma, pôde-se obter a ordem de modulação daquele respectivo usuário.

Exemplificando para melhor elucidação: existem 5 ordens de modulação possíveis, logo, caso se sorteie um valor de 0 a 1, este corresponderá a 4-QAM, se for sorteado um número entre 1 e 2, este corresponderá a 8-QAM e assim por diante. De maneira análoga, ocorre com a quantidade de subportadoras destinadas as bandas de guarda. Por fim, a saída do algoritmo é um arquivo com todas as soluções pertencentes ao conjunto de Pareto. Cada uma apresenta um valor de OSNR e quantidade de subportadoras utilizadas, sendo algumas destinadas a dados e as demais para a banda de guarda.

4.3.2 Taxa de transmissão e número mínimo de subportadoras de dados

Conforme restrição presente na Tabela 2, deseja-se garantir a taxa de bits de 1 Gbps para cada usuário. Esta é calculada pela Equação 4.2 sendo os valores de B_w , N_u e G , todos valores utilizados na respectiva equação, já são conhecidos e descritos na seção 4.1 sendo necessário definir apenas o valor de M e N_u . No entanto, o valor de M já é fornecido pela metaheurística e conseqüentemente, basta substituir os valores já conhecidos das variáveis na equação e obter a quantidade mínima de subportadoras de dados necessárias para atingir a taxa de 1 Gbps. Estes valores foram calculados e estão representados na Tabela 4.

TABELA 4 – Tipos de modulações e taxa de bits

| Tipos de modulação | Quantidade Mínima de Subportadoras de dados para 1 Gbps | Taxa de bits (R_b) (em Gbps) |
|--------------------|---|----------------------------------|
| 4-QAM | 208 | 1.000 |
| 8-QAM | 139 | 1.003 |
| 16-QAM | 104 | 1.000 |
| 32-QAM | 84 | 1.010 |
| 64-QAM | 70 | 1.010 |

4.3.3 OSNR e busca binária na Função Objetivo

Conforme pode ser visualizado Tabela 2 o problema possui dois objetivos a serem atendidos: minimizar a largura de banda ocupada e obter o menor valor de OSNR possível a fim de atender uma $BER \leq 10^{-3}$. A quantidade de subportadoras destinadas a banda de guarda e a ordem de modulação QAM de cada usuário serão valores obtidos pelo algoritmo MOGWO, conforme descrito no Capítulo 3.

Desta maneira, torna-se necessário obter o menor valor de OSNR a fim de atender a BER, sendo que $1 \text{ dB} \leq \text{OSNR} \leq 50 \text{ dB}$. Este processo de localizar o menor valor de OSNR, dentre um intervalo ordenado, equivale a um processo de busca. Na literatura existem vários métodos de busca como sequencial, por tabela Hash, binária, em árvores e por interpolação. Neste trabalho optou-se por utilizar a busca binária para localizar o menor valor de OSNR, em virtude de sua simplicidade e possuir complexidade $O(\log n)$ em contraposição a um método de busca sequencial que possui complexidade $O(n)$ (ZIVIANI, 2004).

Um pseudocódigo da busca binária aplicado a este problema está apresentado no Algoritmo 1. Neste, o valor de OSNR será sempre a média aritmética dos valores extremos do intervalo que está sendo testado. Caso o valor de OSNR garanta $BER \leq 10^{-3}$ para todos os usuários, torna-se desnecessário testar valores maiores que o atual, visto que o objetivo é minimizar o valor de OSNR e dessa maneira o valor do extremo superior se tornará o valor atual de OSNR. De maneira análoga, caso o valor de OSNR não garanta $BER \leq 10^{-3}$, se faz desnecessário verificar os valores inferiores e além disso, o valor do extremo inferior será o valor atual de OSNR. Em consequência disso, a cada iteração o intervalo de busca se reduz pela metade. Finaliza-se o algoritmo quando o valor atual de OSNR já foi testado. Por fim, retorna-se o menor valor que possibilitou $BER \leq 10^{-3}$.

Algoritmo 1: Busca binária

Entrada: $osnrMin$, $osnrMax$;**Saída:** $osnrFinal$;**início** $osnr \leftarrow \frac{osnrMin + osnrMax}{2}$;**faça**

| transmita o sinal OFDM para todos os usuários;

| **se** para todos os usuários $BER \leq 10^{-3}$ **então**| | $osnrMax \leftarrow osnr$;| | **se** $osnr < osnrFinal$ **então**| | | $osnrFinal \leftarrow osnr$;| | **fim**| **senão**| | $osnrMin \leftarrow osnr$;| **fim**| $osnr \leftarrow \frac{osnrMin + osnrMax}{2}$;**enquanto** o valor de $osnr$ atual não foi testado anteriormente;**fim**

5 Análise de Resultados

Para avaliar o desempenho da metaheurística aqui proposta e otimizar a alocação de recursos da rede BS-OFDMA-PON, explorando a flexibilidade e escalabilidade da mesma, realizou-se simulações em um laptop *Intel Core i5*, de 12 GB de memória e ssd NVMe. As análises para os dois casos de teste serão realizadas nas seções seguintes.

5.1 Resultados da simulação para 16 ONUs

Na Figura 18 tem-se a frente de Pareto, na qual consta-se as soluções obtidas pelo algoritmo correlacionando o número de subportadoras ocupadas e o OSNR. Nota-se uma queda considerável do número de subportadoras ocupadas para $19 \leq \text{OSNR} \leq 22$, com uma quase estagnação entre 22 e 24 dB e retornando a uma queda mais acentuada para $\text{OSNR} \geq 24$. Isto ocorreu devido a pouca alteração nas ordens de modulação destinadas a cada usuário para $22 \leq \text{OSNR} \leq 24$. Para $\text{OSNR} \geq 24$, maiores ordens de modulações foram adotadas ocupando menos subportadoras de dados.

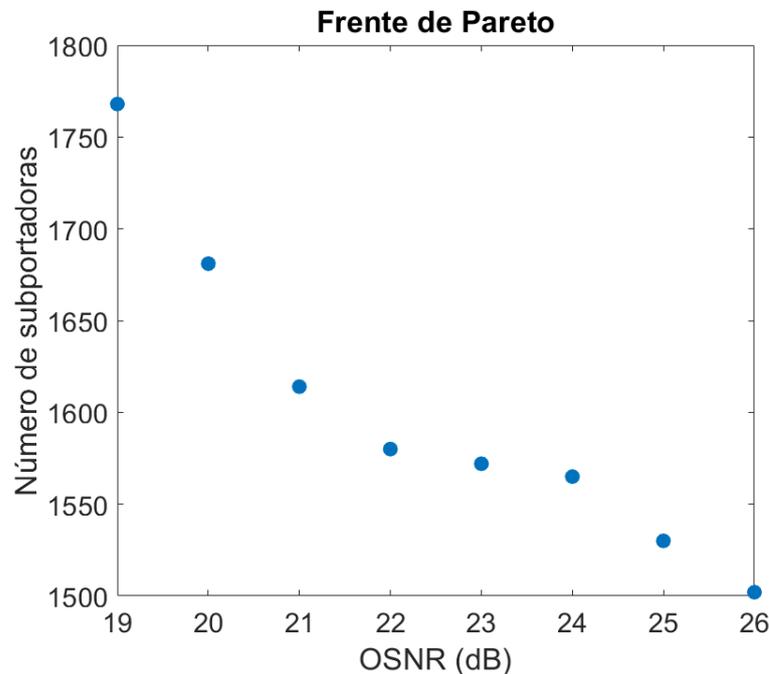


Figura 18 – Frente de Pareto do algoritmo para 16 ONUs.

Todas as soluções obtidas pelo algoritmo presentes na Figura 18 com as suas principais informações estão na Tabela 5. Nota-se que a metaheurística apresentou soluções que obtiveram um redução de 15,05% do número total de subportadoras ocupadas para os valores de OSNR igual a 19 dB e 26 dB. Além disso, observa-se uma redução de

aproximadamente 20,45%, de 19 dB para 26 dB, do número de subportadoras de dados utilizadas. Isto ocorre pois altas ordens de modulação necessitam de maior OSNR para atingir determinada BER. Desta forma, elevados valores de OSNR possibilitam utilizar ordens de modulação maiores e por consequência, o número de subportadoras de dados utilizadas é reduzido.

Tabela 5 – Informações gerais das soluções propostas para 16 ONUs

| OSNR | Dados | Quantidade de subportadoras | | | Total |
|------|-------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------|
| | | Banda de guarda principal | Banda de guarda entre sub-bandas | Banda de guarda total | |
| 19 | 1584 | 60 | 124 | 184 | 1768 |
| 20 | 1484 | 65 | 132 | 197 | 1681 |
| 21 | 1410 | 66 | 138 | 204 | 1614 |
| 22 | 1376 | 65 | 139 | 204 | 1580 |
| 23 | 1334 | 87 | 151 | 238 | 1572 |
| 24 | 1286 | 85 | 194 | 279 | 1565 |
| 25 | 1294 | 78 | 158 | 236 | 1530 |
| 26 | 1260 | 51 | 191 | 242 | 1502 |

Analisa-se ainda na Tabela 5 que apesar do decréscimo do número de subportadoras de dados, elevou-se a banda de guarda. Maiores valores de OSNR, permitiram a adoção de elevadas ordens de modulação, no entanto, além da variabilidade da mesma, estas constelações são mais suscetíveis a menores níveis de ruído, devido a pequena distância euclidiana entre os seus símbolos, o que torna necessária uma maior proteção. Observa-se que apesar do aumento da banda de guarda, a redução no número de subportadoras de dados compensou este acréscimo e desta forma a largura de banda total ocupada diminuiu com o aumento de OSNR. A diminuição da largura de banda total ocupada foi mais acentuada de 19 dB para 20 dB, aproximadamente 4,92%, e quase inexpressiva de 25 dB para 26 dB, 1,83%.

A diferença na ordem de modulação utilizada com os diferentes valores de OSNR pode ser analisada na Tabela 6. A solução para OSNR igual a 19 dB atende com 16-QAM a 12 dos 16 usuários, o que corresponde a 75,00% destes, diminuindo este valor para 18,75% para OSNR = 22 dB e não sendo utilizada para 26 dB. Para 22 dB, a maioria das ONUs possui a modulação 32-QAM, 68,75% do total, mantendo-se em torno de 62,50% para 26 dB e o resto são modulações 64-QAM. Esta não foi utilizada para OSNR = 19 dB, pois necessita de uma maior relação-sinal ruído, devido a pequena distância euclidiana entre os seus símbolos.

A rede aqui simulada, possivelmente está próxima do seu limiar máximo de economia de largura de banda, que corresponde a quantidade de subportadoras de dados utilizadas acrescidas com as destinadas a banda de guarda, visto que o maior valor encontrado pela metaheurística foi 26 dB, sendo o valor máximo de OSNR analisado igual a 50 dB, mantendo

1 Gbps por usuário. Desta forma, vai reduzir-se a quantidade de subportadoras de dados, no entanto necessita-se de uma elevada banda de guarda para evitar a degradação do sinal devido aos ruídos. Apesar da utilização da busca binária, a metaheurística não conseguiu encontrar soluções com maiores OSNR que não fossem dominadas, pelas presentes na Tabela 5. A utilização da busca binária concedeu maior eficiência ao algoritmo e permitiu analisar um intervalo maior de OSNR, requerendo menor esforço computacional que um método sequencial.

Tabela 6 – Parâmetros otimizados pelo algoritmo MOGWO para 16 ONUs

| ONU | OSNR = 19 dB | | | OSNR = 22 dB | | | OSNR = 26 dB | | |
|-------------------|--------------|-----|----------------------|--------------|-----|----------------------|--------------|-----|----------------------|
| | QAM | BG | BER | QAM | BG | BER | QAM | BG | BER |
| 1 | 16 | 60 | $9,8 \times 10^{-4}$ | 32 | 65 | $7,1 \times 10^{-4}$ | 32 | 51 | $4,9 \times 10^{-4}$ |
| 2 | 16 | 7 | $8,8 \times 10^{-4}$ | 32 | 7 | $9,3 \times 10^{-4}$ | 64 | 12 | $8,1 \times 10^{-4}$ |
| 3 | 32 | 6 | $6,3 \times 10^{-4}$ | 32 | 6 | $7,3 \times 10^{-4}$ | 32 | 14 | $6,8 \times 10^{-4}$ |
| 4 | 16 | 6 | $9,6 \times 10^{-4}$ | 32 | 8 | $6,5 \times 10^{-4}$ | 32 | 13 | $3,1 \times 10^{-4}$ |
| 5 | 32 | 6 | $5,0 \times 10^{-4}$ | 32 | 7 | $5,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 19 | $4,4 \times 10^{-4}$ |
| 6 | 32 | 11 | $4,9 \times 10^{-4}$ | 64 | 12 | $8,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 14 | $4,0 \times 10^{-4}$ |
| 7 | 16 | 8 | $8,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 9 | $5,1 \times 10^{-4}$ | 64 | 5 | $3,7 \times 10^{-4}$ |
| 8 | 16 | 7 | $9,9 \times 10^{-4}$ | 32 | 8 | $6,8 \times 10^{-4}$ | 32 | 13 | $3,5 \times 10^{-4}$ |
| 9 | 16 | 14 | $7,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 15 | $6,9 \times 10^{-4}$ | 32 | 18 | $3,8 \times 10^{-4}$ |
| 10 | 16 | 13 | $9,5 \times 10^{-4}$ | 32 | 15 | $5,6 \times 10^{-4}$ | 64 | 10 | $1,9 \times 10^{-4}$ |
| 11 | 16 | 11 | $6,6 \times 10^{-4}$ | 16 | 12 | $5,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 13 | $1,8 \times 10^{-4}$ |
| 12 | 32 | 7 | $6,3 \times 10^{-4}$ | 64 | 8 | $2,5 \times 10^{-4}$ | 32 | 6 | $2,1 \times 10^{-4}$ |
| 13 | 16 | 7 | $7,9 \times 10^{-4}$ | 32 | 9 | $4,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 11 | $1,7 \times 10^{-4}$ |
| 14 | 16 | 13 | $7,1 \times 10^{-4}$ | 16 | 15 | $4,3 \times 10^{-4}$ | 32 | 15 | $1,3 \times 10^{-4}$ |
| 15 | 16 | 4 | $8,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 4 | $1,8 \times 10^{-4}$ | 64 | 15 | $7,1 \times 10^{-5}$ |
| 16 | 16 | 4 | $5,0 \times 10^{-4}$ | 16 | 4 | $2,4 \times 10^{-4}$ | 32 | 13 | $7,1 \times 10^{-5}$ |
| Portadoras usadas | 1584 | 184 | | 1376 | 204 | | 1260 | 242 | |
| Total | 1768 | | | 1580 | | | 1502 | | |

Nas Figuras 19, 20 e 21 estão representados os espectros elétricos dos sinais recebidos da Tabela 6. Neles é possível notar a presença da banda de guarda no início da portadora óptica e a diferença na ordem de modulação utilizada, devido a diferença de amplitude. Além disso, ilustra-se o diagrama de constelação do sinal recebido, evidenciando o valor de $BER \leq 10^{-3}$ e as diferentes modulações recebidas.

5.2 Resultados da simulação para 32 ONUs

Na Figura 22 tem-se a frente de Pareto para as soluções, na qual correlaciona-se o número de subportadoras e o valor de OSNR. Nota-se uma queda considerável do número de subportadoras totais utilizadas com o aumento do valor de OSNR, sendo esta mais acentuada, do que a notada quando comparada com os resultados da simulação de 16 ONUs. Ao contrário da primeira simulação, não houve momento de quase estagnação no número de subportadoras utilizadas.

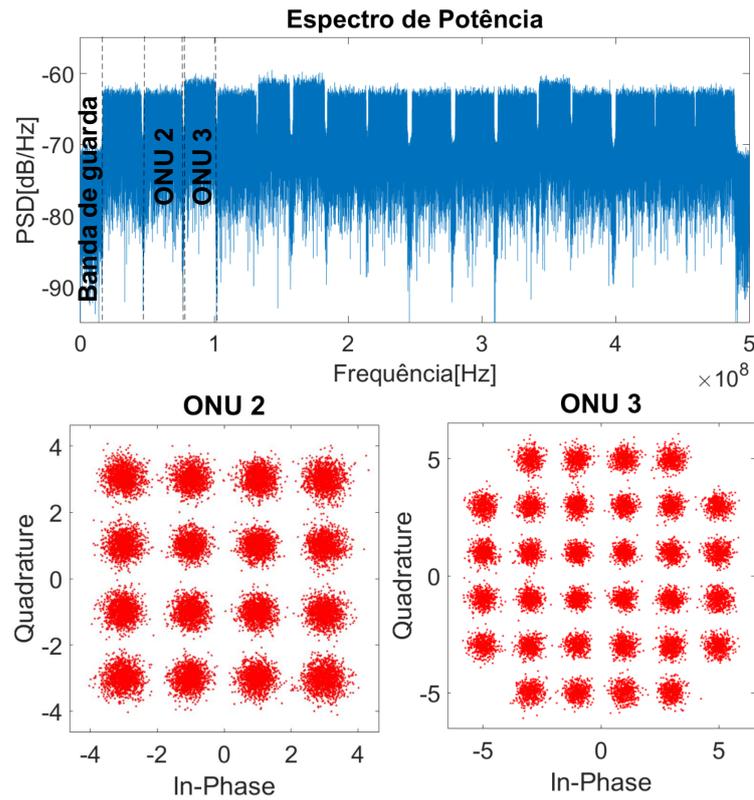


Figura 19 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 19 dB para 16 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho.

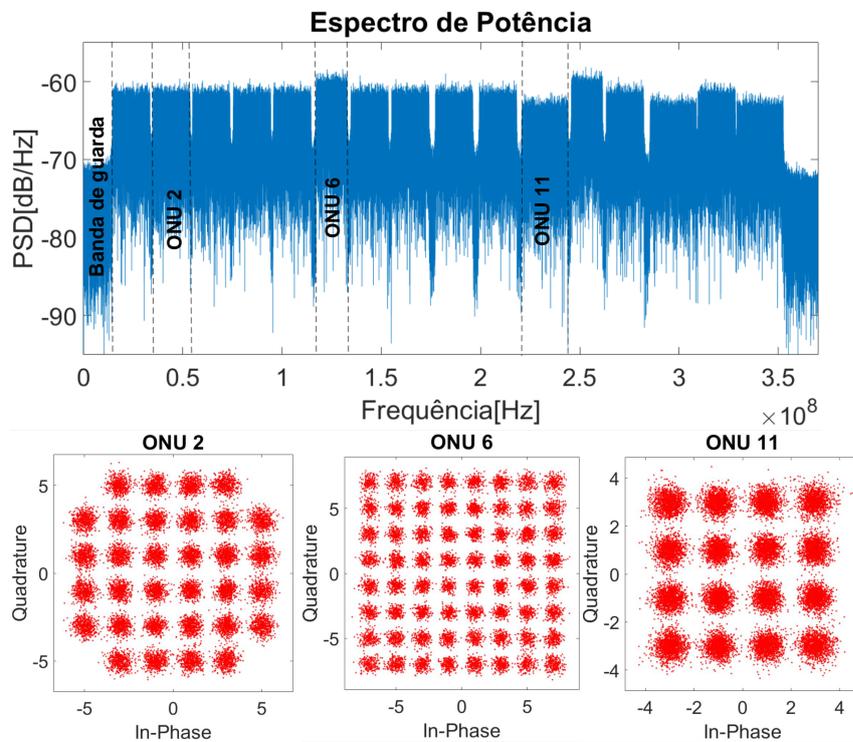


Figura 20 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 22 dB para 16 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho.

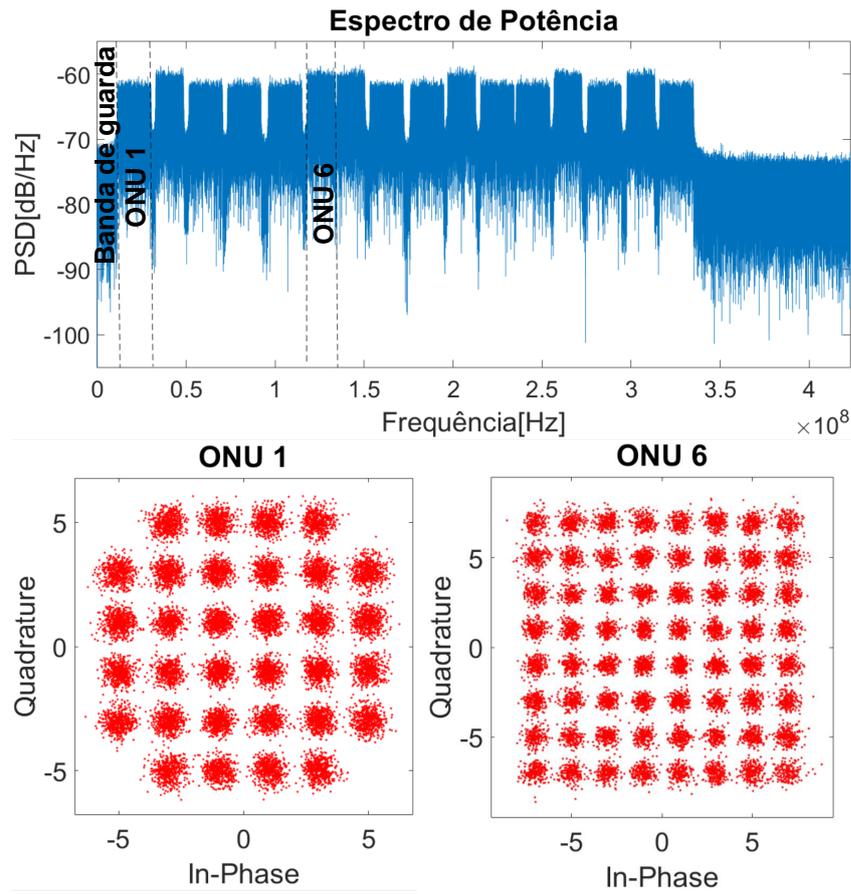


Figura 21 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 26 dB para 16 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho.

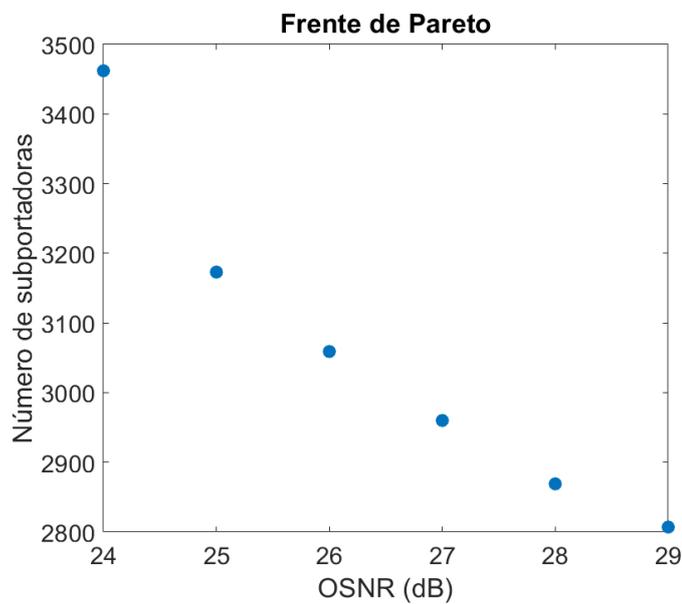


Figura 22 – Frente de Pareto do algoritmo para 32 ONUs.

As soluções obtidas pelo algoritmo e representadas na Figura 22 estão descritas mais detalhadamente na Tabela 7. Nota-se que a metaheurística foi novamente capaz de

encontrar um conjunto de soluções que atendem às restrições do problema. Inicialmente, para o valor de OSNR = 24 dB, 3462 das 4095 subportadoras úteis, sendo 84,45% do total foram utilizadas, em contraposição a 68,55% quando OSNR= 29 dB. A maior queda fica concentrada no número de subportadoras de dados, das quais inicialmente 3108 de 3686 estavam utilizadas, o que representa 84,32% e posteriormente decaiu para 62,29%.

Tabela 7 – Informações gerais das soluções propostas para 32 ONUs

| OSNR | Dados | Quantidade de subportadoras | | | Total |
|------|-------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------|
| | | Banda de guarda principal | Banda de guarda entre sub-bandas | Banda de guarda total | |
| 24 | 3108 | 63 | 291 | 354 | 3462 |
| 25 | 2752 | 76 | 345 | 421 | 3173 |
| 26 | 2610 | 80 | 369 | 449 | 3059 |
| 27 | 2506 | 75 | 379 | 454 | 2960 |
| 28 | 2380 | 83 | 406 | 489 | 2869 |
| 29 | 2296 | 81 | 430 | 511 | 2807 |

No entanto, em relação ao valor de 2296 relatado anteriormente, o número de subportadoras úteis, N_u , é 4095 e o número de subportadoras de dados, é 3686, logo a quantidade de subportadoras destinadas a banda de guarda será 409. Nota-se que a metaheurística obteve apenas uma solução com a quantidade de subportadoras de banda de guarda abaixo deste valor. Isto justifica-se pela formulação do problema descrita na Tabela 2, na qual observa-se que restringiu-se apenas o número total de subportadoras de dados, mas não limitou-se o valor da banda de guarda.

Desta forma, o valor real de subportadoras de dados ocupadas em relação a 3686, quando OSNR = 29 dB, é de 102, o quanto 511 excede 409, ou seja, necessitou-se de 102 subportadoras que inicialmente seriam usadas para dados e estas foram utilizadas para formarem a banda de guarda. Posteriormente, acrescentou-se estas 102 subportadoras nas 2296 informadas inicialmente, alocando ao todo, 2398, 65,06% do total, o que ainda representa uma queda considerável em relação aos 84,32% das subportadoras de dados ocupadas, para OSNR= 24 dB.

Um outro valor relevante neste caso a ser analisado, é a razão entre o número de subportadoras de banda de guarda em relação as destinadas para dados. Inicialmente esta medida correspondia a 11,39%, para OSNR= 24 dB, e passou para 22,26% quando OSNR = 29 dB. Isto ocorre devido as maiores ordens de modulação utilizadas com o aumento do valor de OSNR, o que reduz o número de subportadoras de dados necessárias. Em contrapartida, necessitou-se de maior quantidade de subportadoras para a banda de guarda em virtude da baixa distância euclidiana entre os símbolos. A metaheurística foi eficiente para atender aos requisitos iniciais, mas um estudo posterior de métodos para diminuir esta largura de banda, podem ser adotados.

Na Tabela 8 foram selecionadas 3 soluções das propostas pelo algoritmo. Novamente

para elevados valores de OSNR maiores as ordens de modulação propostas. Um exemplo é a modulação 16 QAM, a qual é predominante para o valor de 24 dB, o que representa 65,63% do total de ONUs, e posteriormente não é utilizada para 27 dB. Neste valor, 19 das 32 ONUs, 59,38 %, utilizam 32-QAM. Ressalta-se ainda, o aumento percentual de 64-QAM que foi de 41,62% para 87,50% para os valores 27 dB para 29 dB, respectivamente. Ressalta-se que a condição de $BER \leq 10^{-3}$ foi atendida em todas as situações.

Tabela 8 – Parâmetros otimizados pelo algoritmo MOGWO para 32 ONUs

| ONU | OSNR = 24 dB | | | OSNR = 27 dB | | | OSNR = 29 dB | | |
|-------------------|--------------|-----|----------------------|--------------|-----|----------------------|--------------|-----|----------------------|
| | QAM | BG | BER | QAM | BG | BER | QAM | BG | BER |
| 1 | 16 | 63 | $3,7 \times 10^{-4}$ | 64 | 75 | $3,9 \times 10^{-4}$ | 64 | 81 | $4,8 \times 10^{-4}$ |
| 2 | 16 | 6 | $4,4 \times 10^{-4}$ | 32 | 8 | $6,2 \times 10^{-4}$ | 64 | 10 | $4,4 \times 10^{-4}$ |
| 3 | 32 | 11 | $1,8 \times 10^{-4}$ | 64 | 13 | $3,2 \times 10^{-4}$ | 64 | 15 | $4,6 \times 10^{-4}$ |
| 4 | 16 | 10 | $3,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 15 | $3,7 \times 10^{-4}$ | 64 | 18 | $6,4 \times 10^{-4}$ |
| 5 | 16 | 5 | $5,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 10 | $3,6 \times 10^{-4}$ | 64 | 12 | $4,8 \times 10^{-4}$ |
| 6 | 32 | 7 | $1,8 \times 10^{-4}$ | 64 | 9 | $2,1 \times 10^{-4}$ | 64 | 11 | $4,2 \times 10^{-4}$ |
| 7 | 16 | 8 | $2,0 \times 10^{-4}$ | 64 | 10 | $1,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 12 | $4,6 \times 10^{-4}$ |
| 8 | 16 | 8 | $5,4 \times 10^{-4}$ | 32 | 9 | $3,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 10 | $5,4 \times 10^{-4}$ |
| 9 | 16 | 15 | $4,7 \times 10^{-4}$ | 32 | 18 | $4,3 \times 10^{-4}$ | 64 | 20 | $2,0 \times 10^{-4}$ |
| 10 | 16 | 9 | $3,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 13 | $2,0 \times 10^{-4}$ | 32 | 15 | $4,9 \times 10^{-4}$ |
| 11 | 16 | 3 | $5,0 \times 10^{-4}$ | 32 | 4 | $9,8 \times 10^{-4}$ | 32 | 5 | $3,5 \times 10^{-4}$ |
| 12 | 16 | 9 | $3,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 13 | $3,8 \times 10^{-4}$ | 64 | 15 | $5,4 \times 10^{-4}$ |
| 13 | 32 | 4 | $2,9 \times 10^{-4}$ | 64 | 5 | $4,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 5 | $9,0 \times 10^{-4}$ |
| 14 | 32 | 17 | $3,0 \times 10^{-4}$ | 32 | 23 | $3,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 25 | $3,1 \times 10^{-4}$ |
| 15 | 16 | 10 | $3,4 \times 10^{-4}$ | 32 | 16 | $7,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 19 | $8,3 \times 10^{-4}$ |
| 16 | 32 | 8 | $2,7 \times 10^{-4}$ | 64 | 9 | $3,9 \times 10^{-4}$ | 64 | 10 | $9,7 \times 10^{-4}$ |
| 17 | 32 | 10 | $5,7 \times 10^{-4}$ | 64 | 8 | $3,1 \times 10^{-4}$ | 64 | 7 | $4,9 \times 10^{-4}$ |
| 18 | 16 | 10 | $3,1 \times 10^{-4}$ | 32 | 13 | $2,9 \times 10^{-4}$ | 64 | 15 | $3,9 \times 10^{-4}$ |
| 19 | 16 | 12 | $3,4 \times 10^{-4}$ | 32 | 15 | $3,0 \times 10^{-4}$ | 64 | 16 | $2,5 \times 10^{-4}$ |
| 20 | 32 | 12 | $3,6 \times 10^{-4}$ | 32 | 13 | $7,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 14 | $3,9 \times 10^{-4}$ |
| 21 | 32 | 21 | $1,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 23 | $4,9 \times 10^{-4}$ | 64 | 24 | $4,6 \times 10^{-4}$ |
| 22 | 16 | 4 | $4,0 \times 10^{-4}$ | 64 | 6 | $4,3 \times 10^{-4}$ | 64 | 7 | $4,0 \times 10^{-4}$ |
| 23 | 16 | 8 | $3,4 \times 10^{-4}$ | 32 | 11 | $6,1 \times 10^{-4}$ | 64 | 13 | $3,5 \times 10^{-4}$ |
| 24 | 32 | 4 | $2,4 \times 10^{-4}$ | 64 | 8 | $2,1 \times 10^{-4}$ | 64 | 10 | $4,8 \times 10^{-4}$ |
| 25 | 16 | 11 | $5,0 \times 10^{-4}$ | 32 | 18 | $5,4 \times 10^{-4}$ | 64 | 22 | $3,2 \times 10^{-4}$ |
| 26 | 16 | 4 | $3,5 \times 10^{-4}$ | 32 | 7 | $3,0 \times 10^{-4}$ | 64 | 9 | $4,2 \times 10^{-4}$ |
| 27 | 32 | 14 | $1,7 \times 10^{-4}$ | 64 | 18 | $5,5 \times 10^{-4}$ | 64 | 20 | $1,5 \times 10^{-4}$ |
| 28 | 16 | 14 | $4,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 17 | $7,3 \times 10^{-4}$ | 64 | 18 | $3,3 \times 10^{-4}$ |
| 29 | 32 | 9 | $2,0 \times 10^{-4}$ | 64 | 13 | $2,3 \times 10^{-4}$ | 64 | 15 | $1,8 \times 10^{-4}$ |
| 30 | 16 | 4 | $5,0 \times 10^{-4}$ | 32 | 8 | $4,2 \times 10^{-4}$ | 32 | 11 | $2,3 \times 10^{-4}$ |
| 31 | 16 | 11 | $5,0 \times 10^{-4}$ | 32 | 11 | $6,7 \times 10^{-4}$ | 64 | 11 | $6,9 \times 10^{-4}$ |
| 32 | 16 | 13 | $3,8 \times 10^{-4}$ | 32 | 15 | $1,9 \times 10^{-4}$ | 64 | 16 | $3,6 \times 10^{-4}$ |
| Portadoras usadas | 3108 | 354 | | 2506 | 454 | | 2296 | 511 | |
| Total | 3462 | | | 2960 | | | 2807 | | |

Nas Figuras 23, 24 e 25 estão representados os espectros dos sinais OFDMA. Nota-se a existência das bandas de guarda destinada a proteção óptica no início do espectro do símbolo OFDM e entre as sub-bandas. Verifica-se a flexibilidade e escalabilidade exercida com a presença de diferentes valores de ordem de modulação, o qual está comprovado pela variação dos níveis de intensidade no espectro. Diagramas de constelação acompanham as figuras e corroboram com a constatação dos desempenhos alcançados.

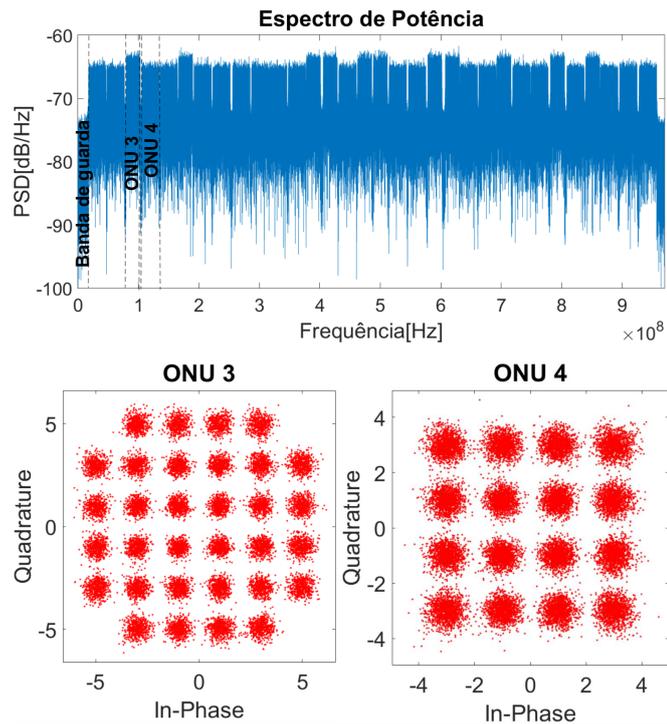


Figura 23 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 24 dB para 32 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho.

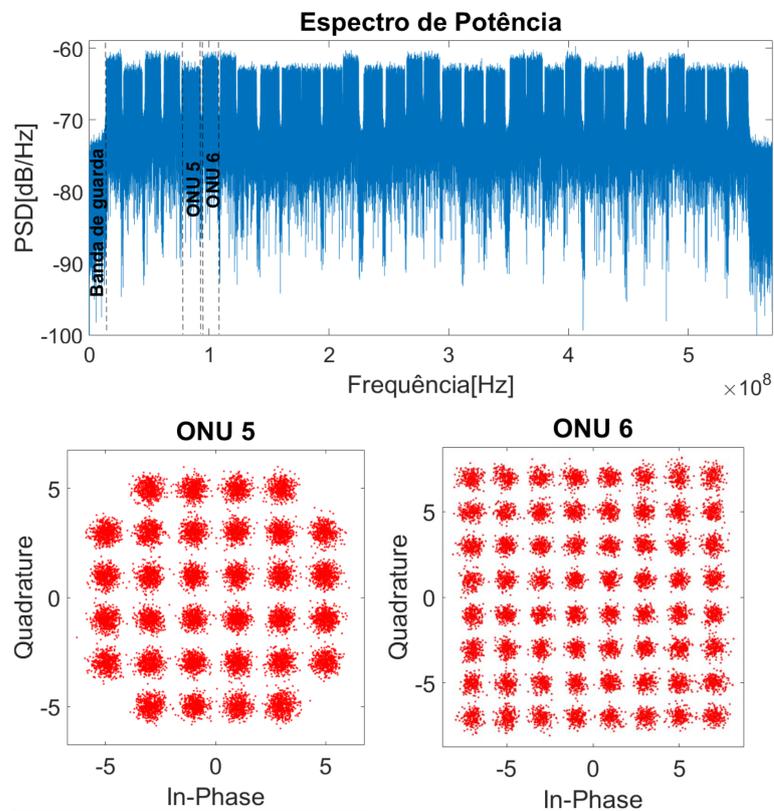


Figura 24 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 27 dB para 32 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho.

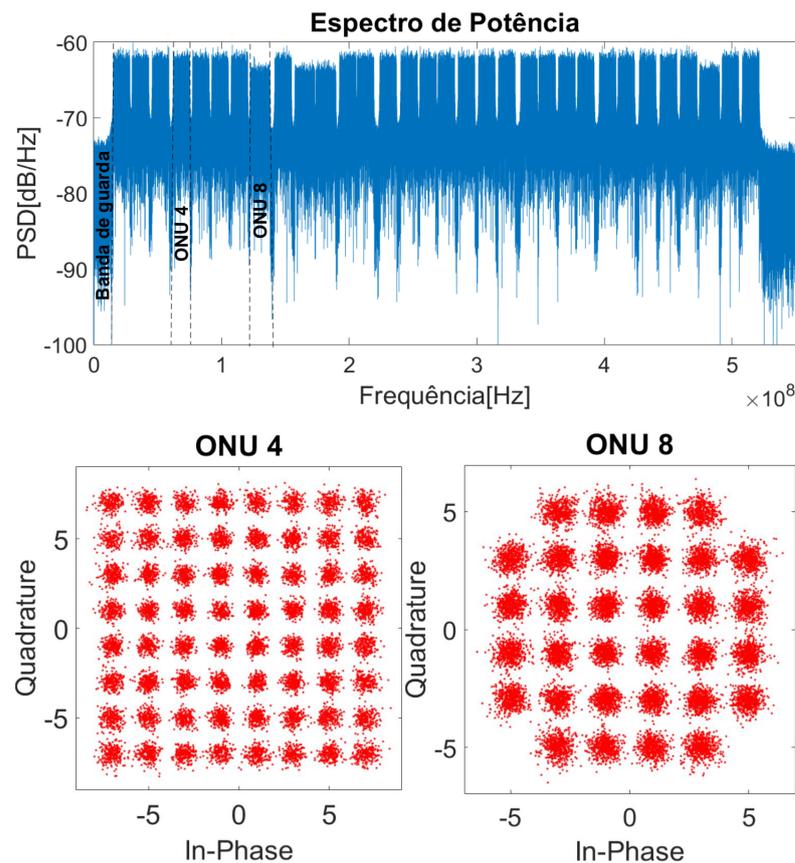


Figura 25 – Espectro elétrico dos sinais OFDMA recebidos com OSNR= 29 dB para 32 ONUs. Diagramas de constelação são mostrados para ilustrar o desempenho.

5.3 Análises conclusivas

Ao comparar os resultados obtidos para 16 e 32 ONUs observou-se a diferença de OSNR necessário para atender aos usuários, no qual para 16 ONUs, o valor máximo necessário foi de 26 dB, e para 32, 29 dB. Desta forma, caso se pretenda atender mais clientes, provavelmente serão necessários maiores valores de OSNR, do que os obtidos para 16 e 32 ONUs. Além disso, constata-se que a faixa de valores entre 24 dB e 26 dB, foi capaz de atender ambos os casos, no entanto para a 1ª situação as modulações existentes eram predominantemente constituídas de 32 e 64 QAM, e na 2ª situação 16 e 32 QAM. Observou-se ainda que, para um mesmo valor de OSNR, as ordens de modulação influenciam diretamente na quantidade de clientes possíveis de atender.

Repara-se também, na diferença da quantidade de subportadoras de banda de guarda alocadas em ambas as situações a fim de garantir a BER pretendida. Devido ao dobro de número de usuários, obteve-se um elevado aumento da banda de guarda. A maior quantidade alocada na 1ª situação foram 279 subportadoras e posteriormente 511, representando um acréscimo de 83,15%. Diante disto, este padrão deve ocorrer para situações com maiores quantidades de ONUs. Outro ponto a ser resolvido, será o elevado

tempo computacional devido principalmente a simulação da camada física. O algoritmo para 32 usuários executou por 16h12min e com 16 ONUs, 10h13min. Desta maneira nota-se uma elevada exigência computacional, mesmo com a utilização da busca binária, a qual tende a aumentar, caso aumente-se a quantidade de ONUs e variação de outros parâmetros.

6 Conclusões e trabalhos futuros

Um algoritmo baseado na metaheurística *Multi-Objective Grey Wolf Optimizer* foi utilizado neste trabalho para otimizar a alocação de recursos na rede BS-OFDMA-PON visando atender a 16 e 32 ONUs, a fim de prover 1 Gbps por usuário. A escalabilidade da largura de banda do sistema de comunicação foi avaliada, mediante a variabilidade da quantidade de subportadoras de dados destinados a cada usuário, da ordem de modulação por sub-banda e da relação sinal-ruído óptica (OSNR). Além desses quesitos, a rede possui como desvantagem a existência de uma banda de guarda quando a comunicação ocorre por detecção direta e devido a isto, necessitou-se da alocação de subportadoras destinadas a banda de guarda.

Em virtude da complexidade de gerenciamento de alocação destes recursos, foi utilizado um método de busca binária em conjunto com a metaheurística, para identificar o menor valor de OSNR capaz de atender uma taxa de erros de bits $BER \leq 10^{-3}$ de cada usuário. Os resultados obtidos pela simulação em enlaces ópticos que variam de 20 a 40 km demonstraram a otimização dos recursos alocados à rede de modo a atender ambas as quantidades de ONUs, mediante a adoção de mapeamentos 4, 8, 16, 32 e 64-QAM e OSNR variando entre 1 e 50 dB.

Para 16 ONUs, 43,17% das subportadoras úteis foram alocadas para possibilitar a taxa de transmissão de 1Gbps para todos os usuários, para o maior OSNR encontrado, enquanto na segunda situação 68,55% foram utilizadas. Inúmeras soluções foram encontradas, cujo quantidade de subportadoras alocadas é inversamente proporcional ao valor de OSNR. Para 16 ONUs, encontrou-se soluções para estes valores de OSNR variando de 19 a 26 dB e para 32 ONUs, de 24 a 29 dB.

Desta maneira, a metaheurística atendeu aos requisitos propostos. Todavia, a inserção de banda de guarda foi um problema analisado, a qual se mostrou necessária para elevada quantidade de usuários e altas ordens de modulação. Para 16 ONUs, quando $OSNR = 16$ dB utilizou-se 279 subportadoras para a banda de guarda e posteriormente 511 subportadoras foram utilizadas. Esta tendência deve aumentar, caso se deseje atender mais usuários. Diante disso, a metodologia proposta pode e deve ser melhorada. A inserção de informações como perda de potência no splitter, componente passivo da PON, e outros testes da metaheurística com diferentes redes e com distintas quantidade de usuários, podem melhorar a acurácia desta.

Assim, para trabalhos futuros, fica como proposta a validação experimental dos resultados obtidos. Além disso, a aplicação de outras metaheurísticas para efeito de comparação é necessário. Pode-se utilizar a metaheurística aqui proposta e torná-la mais

eficiente, ampliando a metodologia e adicionando novas restrições ao trabalho a fim de abarcar uma gama maior de aplicações e situações. A avaliação da metodologia proposta para redes com mais ONUs e taxas maiores é uma proposta futura de trabalho.

Referências

- ABBASS, H. A.; SARKER, R.; NEWTON, C. Pde: a pareto-frontier differential evolution approach for multi-objective optimization problems. In: IEEE. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*. [S.l.], 2001. v. 2, p. 971–978. Citado na página 38.
- ALI, A.; LEIBRICH, J.; ROSENKRANZ, W. Spectrally efficient ofdm-transmission over single-mode fiber using direct detection. In: *13th International OFDM Workshop*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 47.
- BOCOI, A. et al. Cost comparison of networks using traditional 10 and 40 gb/s transponders versus ofdm transponders. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2008. p. OThB4. Citado na página 31.
- BROWNING, C. et al. 5g wireless and wired convergence in a passive optical network using uf-ofdm and gfdm. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. [S.l.], 2017. p. 386–392. Citado na página 18.
- CHAO, H. et al. Ofdma-pon with mqam downlink for flexible allocation. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, BIAI, v. 30, n. 6, p. 1090–1095, 2019. Citado na página 23.
- CHEN, B. et al. Deep reinforcement learning based policy for power efficient dynamic subcarrier assignment in ofdma-pons. In: IEEE. *2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. [S.l.], 2019. p. 1–3. Citado na página 23.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Routing and spectrum allocation in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation. In: IEEE. *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado na página 17.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 29, n. 9, p. 1354–1366, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- CISCO. *Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. 2020. Cisco White Paper. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>>. Acesso em: 07/10/2020. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- COELLO, C. A. C.; PULIDO, G. T.; LECHUGA, M. S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 256–279, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 43.
- COURA, D. J.; SILVA, J. A.; SEGATTO, M. E. A bandwidth scalable ofdm passive optical network for future access network. *Photonic Network Communications*, Springer, v. 18, n. 3, p. 409, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 47.

COURA, D. J. C. *Arquiteturas de Redes Ópticas Passivas Baseadas nas Modulações por Sub-Portadora OFDM e SCM*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — UFES, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 21, 31, 32, 47 e 48.

CVIJETIC, N. et al. Novel optical access and digital processing architectures for future mobile backhaul. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 31, n. 4, p. 621–627, 2012. Citado na página 19.

DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002. Citado na página 38.

DESANTI, C. et al. Super-pon: an evolution for access networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 12, n. 10, p. D66–D77, 2020. Citado na página 23.

DU, L. B.; LAM, C. F. Super-pon: technology and standards for simplifying fttb deployment. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Photonic Networks and Devices*. [S.l.], 2020. p. NeTu2B–1. Citado na página 23.

EDGEWORTH, F. Y. *Mathematical psychics: An essay on the application of mathematics to the moral sciences*. [S.l.]: Kegan Paul, 1881. v. 10. Citado na página 36.

FREUDE, W. et al. Quality metrics for optical signals: Eye diagram, q-factor, osnr, evm and ber. In: IEEE. *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.], 2012. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.

GROUP, I. . W. et al. *Ieee standard for ethernet*. [S.l.], 2018. Citado na página 23.

HARBOE, P. B.; SOUZA, J. R. Passive optical network: characteristics, deployment, and perspectives. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 11, n. 4, p. 995–1000, 2013. Citado na página 19.

HASHIMOTO, K. *Técnicas de otimização combinatória multiobjetivo aplicadas na estimação do desempenho elétrico de redes de distribuição*. Tese (Doutorado em Engenharia de Eletricidade) — USP, 2004. Citado na página 37.

HOSHINO, F. K. G. *Estudo e simulação da modulação OFDM aplicada em redes ópticas de nova geração*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Unicamp, 2013. Citado na página 28.

HUA, B.; ZHANG, Z.; WANG, L. Joint multi-dimensional resource allocation algorithm for a twdm/ofdm-pon-based software-defined elastic optical access network. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 55, p. 102136, 2020. Citado na página 23.

IP, E. et al. Coherent detection in optical fiber systems. *Optics express*, Optical Society of America, v. 16, n. 2, p. 753–791, 2008. Citado na página 31.

ITU-T. *G.983.2: ONT management and control interface specification for ATM PON*. 2000. Citado na página 26.

ITU-T. *G.983: Broadband optical access system based on Passive Optical Network (PON)*. 2005. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987/en>>. Acesso em: 08/10/2020. Citado na página 19.

- ITU-T. *G.984.1: Gigabit-capable passive optical networks (gpon): General characteristics*. 2008. Citado na página 26.
- ITU-T. *G.989.2: 40-gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): physical media dependent (PMD) layer specification*. 2019. Citado na página 23.
- JANSEN, S. L. et al. Coherent optical 25.8-gb/s ofdm transmission over 4160-km ssmf. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 26, n. 1, p. 6–15, 2008. Citado na página 32.
- JANSEN, S. L. et al. 20-gb/s ofdm transmission over 4,160-km ssmf enabled by rf-pilot tone phase noise compensation. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.], 2007. p. PDP15. Citado na página 30.
- KAMALOVA, A. et al. Multi-robot exploration based on multi-objective grey wolf optimizer. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 14, p. 2931, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 45.
- KANG, S.-M. et al. Multiple access noise compensation in co-ofdma-pon uplink transmission using digital phase conjugated-pilot tones. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 23470–23479, 2020. Citado na página 23.
- KANI, J.-i. et al. Next-generation pon-part i: Technology roadmap and general requirements. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 47, n. 11, p. 43–49, 2009. Citado na página 26.
- KNOWLES, J. D.; CORNE, D. W. Approximating the nondominated front using the pareto archived evolution strategy. *Evolutionary computation*, MIT Press, v. 8, n. 2, p. 149–172, 2000. Citado na página 38.
- KOKANGUL, A.; ARI, A. Optimization of passive optical network planning. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 35, n. 7, p. 3345–3354, 2011. Citado na página 26.
- LEIBRICH, J. et al. Impact of modulator bias on the osnr requirement of direct-detection optical ofdm. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 21, n. 15, p. 1033–1035, 2009. Citado na página 32.
- LI, Y. et al. Investigation of a flexible downstream scheme for sampling rate and bandwidth reduction in short reach communication systems. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 59083–59090, 2020. Citado na página 23.
- LI, Y.; HAN, J.; ZHAO, X. Performance investigation of a cost-and power-effective high nonlinearity tolerance ofdma-pon scheme based on sub-nyquist sampling rate and dft-spread. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 43137–43142, 2019. Citado na página 23.
- LOWERY, A. J.; ARMSTRONG, J. Orthogonal-frequency-division multiplexing for optical dispersion compensation. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2007. p. OTuA4. Citado na página 32.
- LOWERY, A. J.; WANG, S.; PREMARATNE, M. Calculation of power limit due to fiber nonlinearity in optical ofdm systems. *Optics express*, Optical Society of America, v. 15, n. 20, p. 13282–13287, 2007. Citado na página 32.

- LU, C. et al. A hybrid multi-objective grey wolf optimizer for dynamic scheduling in a real-world welding industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 57, p. 61–79, 2017. Citado na página 24.
- MESTDAGH, D. J.; MARTIN, C. M. The super-pon concept and its technical challenges. In: SPRINGER. *International Conference on Broadband Communications*. [S.l.], 1996. p. 333–345. Citado na página 23.
- MIRJALILI, S.; MIRJALILI, S. M.; LEWIS, A. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, Elsevier, v. 69, p. 46–61, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 38, 39, 40, 41, 42, 43 e 44.
- MIRJALILI, S. et al. Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 47, p. 106–119, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 23, 36, 38, 43 e 44.
- NGATCHOU, P.; ZAREI, A.; EL-SHARKAWI, A. Pareto multi objective optimization. In: IEEE. *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems*. [S.l.], 2005. p. 84–91. Citado na página 37.
- NUAEKA EW, K. et al. Optimal reactive power dispatch problem using a two-archive multi-objective grey wolf optimizer. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 87, p. 79–89, 2017. Citado na página 24.
- NUNES, R. B. *OFDMA PON - Arquitetura para Redes Ópticas Passivas com Acesso Múltiplo por Divisão de Frequências Ortogonais*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — UFES, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 19, 22, 26, 27 e 28.
- NUNES, R. B. et al. A mac layer protocol for a bandwidth scalable ofdma pon architecture. *Computer Communications*, Elsevier, v. 105, p. 145–156, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.
- NUNES, R. B. et al. Experimental demonstration of a 33.5-gb/s ofdm-based pon with subcarrier pre-emphasis. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 28, n. 8, p. 860–863, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 33.
- PARETO, V. *Cours d'économie politique*. [S.l.]: Librairie Droz, 1964. v. 1. Citado na página 36.
- PENG, W.-R. et al. Theoretical and experimental investigations of direct-detected rf-tone-assisted optical ofdm systems. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 27, n. 10, p. 1332–1339, 2009. Citado na página 32.
- PEREIRA, E. d. V. et al. Impact of optical power in the guard-band reduction of an optimized ddo-ofdm system. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 33, n. 23, p. 4717–4725, 2015. Citado na página 32.
- SAHOO, A.; CHANDRA, S. Multi-objective grey wolf optimizer for improved cervix lesion classification. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 52, p. 64–80, 2017. Citado na página 24.

- SCHMIDT, B. J.; LOWERY, A. J.; ARMSTRONG, J. Experimental demonstrations of electronic dispersion compensation for long-haul transmission using direct-detection optical ofdm. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 26, n. 1, p. 196–203, 2008. Citado na página 32.
- SHAFI, M. et al. 5g: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE journal on selected areas in communications*, IEEE, v. 35, n. 6, p. 1201–1221, 2017. Citado na página 17.
- SHIEH, W.; ATHAUDAGE, C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing. *Electronics letters*, IET, v. 42, n. 10, p. 587–589, 2006. Citado na página 31.
- SHIEH, W.; DJORDJEVIC, I. B. *OFDM for optical communications*. [S.l.]: Academic press, 2009. Citado na página 29.
- SHIEH, W.; YI, X.; TANG, Y. Transmission experiment of multi-gigabit coherent optical ofdm systems over 1000km ssmf fibre. *Electronics letters*, IET, v. 43, n. 3, p. 183–184, 2007. Citado na página 28.
- SILVA, D. M. I. *Algoritmos Evolutivos Aplicados em Projetos de Redes Ópticas Passivas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFES, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 38.
- SPINNLER, B.; HAUSKE, F.; KUSCHNEROV, M. Adaptive equalizer complexity in coherent optical receivers. In: IEEE. *2008 34th European Conference on Optical Communication*. [S.l.], 2008. p. 1–2. Citado na página 31.
- SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, MIT Press, v. 2, n. 3, p. 221–248, 1994. Citado na página 38.
- WEY, J. S.; ZHANG, J. Passive optical networks for 5g transport: technology and standards. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 37, n. 12, p. 2830–2837, 2018. Citado na página 19.
- YANG, Q.; MA, Y.; SHIEH, W. 107 gb/s coherent optical ofdm reception using orthogonal band multiplexing. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Optical Fiber Communication Conference*. [S.l.], 2008. p. PDP7. Citado na página 28.
- YANG, X.-S. Bat algorithm for multi-objective optimisation. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, Inderscience Publishers, v. 3, n. 5, p. 267–274, 2011. Citado na página 38.
- YI, X.; SHIEH, W.; MA, Y. Phase noise effects on high spectral efficiency coherent optical ofdm transmission. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 26, n. 10, p. 1309–1316, 2008. Citado na página 21.
- ZAOUGA, A. et al. Dynamic bandwidth allocation algorithms for ng-pon2 to support 5g fronthaul services. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Signal Processing in Photonic Communications*. [S.l.], 2019. p. SpT1E–2. Citado na página 23.
- ZHANG, G. et al. A survey on ofdm-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 65–87, 2012. Citado na página 28.

-
- ZHANG, Q.; LI, H. Moea/d: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, IEEE, v. 11, n. 6, p. 712–731, 2007. Citado na página 38.
- ZITZLER, E.; THIELE, L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, IEEE, v. 3, n. 4, p. 257–271, 1999. Citado na página 38.
- ZIVIANI, N. Projeto de algoritmos com implementação em pascal e c. *Thomson Editora*, 2a edição, 2004. Citado na página 51.