



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

LUÍS GUSTAVO TOLEDO ZULAI

**ESTUDO DE MECANISMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
E ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS
PASSIVAS DE PRÓXIMA GERAÇÃO**

Londrina
2015

LUÍS GUSTAVO TOLEDO ZULAI

**ESTUDO DE MECANISMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
E ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS
PASSIVAS DE PRÓXIMA GERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina (UEL), como requisito para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand.

Área de concentração: Redes de Comunicações Ópticas

Londrina
2015

Ficha Catalográfica

Zulai, Luís Gustavo Toledo.

Estudo de Mecanismos de Eficiência Energética e Alocação de Recursos em Redes Ópticas Passivas de Próxima Geração / Luís Gustavo Toledo Zulai. - Londrina, 2015. 79p

Orientador: Fábio Renan Durand.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Redes Ópticas Passivas - Teses. 2. Eficiência Energética - Teses. 3. Comunicações Ópticas - Teses. 4. Otimização por Enxame de Partículas - Teses. I. Durand, Fábio Renan. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

LUÍS GUSTAVO TOLEDO ZULAI

**ESTUDO DE MECANISMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
ALOCÇÃO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS PASSIVAS DE
PRÓXIMA GERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina (UEL), como requisito para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Bruno Bogaz Zarpelão
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Paulo Rogério Scalassara
Universidade Tecnológica Federal do Paraná -
UTFPR

Londrina, 17 de dezembro de 2015.

Dedico este trabalho a minha esposa Aline e ao meu filho Pedro Henrique por todo amor, carinho, apoio e paciência ao longo de todos esses anos juntos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida, ao meu filho Pedro Henrique, que iluminou a minha vida e a minha esposa Aline, por sua paciência, apoio e compreensão durante todo este tempo juntos.

Aos meus pais Nelson e Arioni (*in memoriam*) pelo exemplo, carinho, incentivo constante e palavras de coragem para enfrentar as adversidades e percorrer o caminho da vida.

Aos colegas de curso e de trabalho que sempre me ajudaram nas horas de dificuldade e me proporcionaram excelentes momentos de risadas e convívio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Renan Durand, não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, paciência, tempo e conhecimento que foi compartilhado e principalmente pelo exemplo a ser seguido como mestre e amigo.

À minha chefe imediata Prof. Ma. Carmen Lúcia Ruiz Schlichting pelo auxílio e compreensão nos momentos mais críticos.

Ao Prof. Dr. Taufik Abrão por seu apoio e suporte durante a realização deste trabalho.

“Para mim, viver é estar continuamente motivado. O significado da vida não é simplesmente existir, sobreviver, mais sim crescer, alcançar e conquistar.”

Arnold Schwarzenegger

ZULAI, Luís Gustavo Toledo. **ESTUDO DE MECANISMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS PASSIVAS DE PRÓXIMA GERAÇÃO**, 2015. 80 páginas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina - PR, 2015.

RESUMO

As redes ópticas passivas de próxima geração apresentam poucos estudos que abordam o dimensionamento de consumo de energia e aspectos de eficiência energética. Dessa forma, esse tema oferece uma boa oportunidade de seu aprofundamento. Na presente dissertação de mestrado, o foco encontra-se no desenvolvimento de um mecanismo de eficiência energética aplicado às redes ópticas passivas, por meio do controle da alocação de recursos às potências de transmissão. Assim, direcionam-se esforços para proposição de um algoritmo baseado no *sleep mode* em conjunto com a otimização por enxame de partículas, no qual deseja-se ajustar a potência transmitida de acordo com os requisitos de qualidade de serviço e de demanda de tráfego da rede, maximizando a eficiência energética global. Simulações em dois cenários são apresentadas, de modo a se verificar os resultados obtidos por meio da utilização do algoritmo proposto. Ao final, apresentam-se também as possibilidades de continuidade dos estudos de eficiência energética.

Palavras-chave: redes ópticas passivas, eficiência energética, *sleep mode*, otimização por enxame de partículas.

ZULAI, Luís Gustavo Toledo. **STUDY OF ENERGY EFFICIENCY AND RESOURCE ALLOCATION MECHANISMS IN NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORKS**, 2015. 80 pages. Dissertation (Master's degree in Electrical Engineering) – State University of Londrina, Londrina - PR, 2015.

ABSTRACT

Next-generation passive optical networks have few studies about energy consumption dimensioning and their energy efficiency aspects, making this a good issue to be explored. Therefore, this master thesis focuses on developing an energy efficiency mechanism applied to passive optical networks using resource allocation control to the laser transmission power. Thus, the target is on proposing an energy efficiency mechanism applied with the particle swarm optimization, adjusting the laser power transmission according to the quality of service parameters and network traffic demands, in order to achieve global network energy efficiency. Simulations on two scenarios are presented in order to evaluate the obtained results of the proposed algorithm. Also, some possibilities for further studies are also mentioned.

Keywords: passive optical networks, energy efficiency, sleep mode, particle swarm optimization.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	REDES ÓPTICAS PASSIVAS (PON)	22
2.1.	TDM-PON	25
2.2.	WDM-PON	26
2.3.	OCDM-PON	28
2.3.1.	Sistemas Ópticos Coerentes e Não-Coerentes.....	31
2.3.2.	Interferência por Acesso Múltiplo (MAI)	32
2.3.3.	Codificador/decodificador multiporta em AWG.....	33
2.3.4.	Códigos ópticos	35
2.4.	10GE-(WDM/OCDM)-PON	36
3.	MECANISMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES PON	40
3.1.	Sleep mode.....	41
3.1.1.	Power shedding mode.....	41
3.1.2.	Deep sleep mode.....	42
3.1.3.	Dozing mode	42
3.1.4.	Fast sleep mode	42
3.2.	Otimização por Enxame de Partículas (PSO)	44
4.	ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES PON.....	49
4.1.	Formulação do Problema de Alocação de Recursos.....	49
4.2.	PSO aplicada ao controle de potência em redes PON	52
4.3.	Análise de complexidade	57
5.	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS MECANISMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES PON.....	58
5.1.	Descrição dos mecanismos de eficiência baseado na alocação de recursos	58
5.2.	Modelamento do consumo de potência das ONU	59
5.3.	Modelamento do consumo de Energia em sleep mode.....	60
6.	RESULTADOS NUMÉRICOS.....	62
7.	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 – <i>Downlink</i> e <i>uplink</i> de dados em rede PON básica [21].....	22
Fig. 2.2 - <i>Roadmap</i> da evolução das redes óticas a partir das redes GPON [23].....	23
Fig. 2.3 – Alocação de recursos em rede TDM.....	25
Fig. 2.4 - Topologia TDM-PON ponto-multiponto [21].....	25
Fig. 2.5 – Alocação de recursos em rede WDM-PON.....	26
Fig. 2.6 – Rede WDM-PON ponto-a-ponto.....	27
Fig. 2.7 - Comprimentos de onda em rede CWDM-PON [21].....	28
Fig. 2.8 – Compartilhamento de recursos em rede CDMA e OCDMA [21].....	29
Fig. 2.9 - Sistema básico de codificação óptica utilizando tecnologia OCDM [21].....	30
Fig. 2.10 - Sistema ilustrativo de codificação e decodificação OCDM [40]: (a) codificação; (b) decodificação.....	32
Fig. 2.11 – Representação de codificação/decodificação multiportas AWG [21]: (a) codificação, (b) decodificação.....	34
Fig. 2.12 – Propriedade cíclica de um codificador/decodificador multiportas 5×5 : (a) codificação; (b) decodificação [21].....	35
Fig. 2.13 – Sistema de multiplexação OCDM [21]: (a) OOK coerente; (b) PSK (BPSK) não- coerente [21].....	36
Fig. 2.14 - Topologia de rede 10GE-(WDM/OCDM)-PON: Arquitetura PON.....	38
Fig. 2.15 - Topologia de rede 10GE-(WDM/OCDM)-PON: (a) esquema de multiplexação OCDM/TDMA, (b) esquema de multiplexação WDM/OCDM/TDMA.....	39
Fig. 2.16 – arquitetura de nó óptico PON.....	39
Fig. 3.1 – Variação de níveis de potência para ONU em <i>fast sleep mode</i> [16].....	43
Fig. 3.2 – Ponto máximo de uma função delimitada f [53].....	46
Fig. 3.3 – Estado inicial da PSO [53].....	47
Fig. 3.4 – Algoritmo PSO básico [53].....	48
Fig. 6.1 – Potência transmitida como uma função do número de iterações: (a) primeiro cenário; (b) segundo cenário.....	64
Fig. 6.2 - Taxa de economia de energia como uma função do número de iterações: (a) primeiro cenário; (b) segundo cenário.....	67
Fig. 6.3 - Energia por bit por comprimento de onda versus o número de iterações: (a) primeiro cenário; (b) segundo cenário.....	68

Fig. 6.4 – Potência transmitida por comprimento de onda pelo número de iterações:	
(a) primeiro cenário; (b) segundo cenário	69
Fig. 6.5 - Taxa de convergência pelo número de iterações: (a) primeiro cenário;	
(b) segundo cenário	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tabela de comparação de redes PON	24
Tabela 2.2 - Comparação entre os códigos ópticos coerentes e não-coerentes.	31
Tabela 6.1 - Parâmetros do sistema	63
Tabela 6.2 - Parâmetros do <i>sleep mode</i>	63
Tabela 6.3 - Parâmetros da PSO	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

10GEPON *Ten Gigabit per Second Ethernet - Passive Optical Network*

10GE-(WDM/OCDM)-PON *Ten Gigabit per Second Ethernet – (Wavelength Division Multiplexing / Optical Code Division Multiplexing) - Passive Optical Network*

ASE *Amplified Spontaneous Emission*

ATM *Asynchronous Transfer Mode*

APON *Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network*

AWG *Arrayed Waveguide Rating*

BER *Bit Error Rate*

BiPON *Bit Interleaving Passive Optical Network*

BPON *Broadband Passive Optical Network*

CDMA *Code Division Multiple Access*

CIR *Carrier to Interference Ratio*

CWDM *Coarse/Conventional Wavelength Division Multiplexing*

DBA *Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm*

DBT *Downstream Burst Transmission*

DSL *Digital Subscriber Line*

DWDM *Dense Wavelength Division Multiplexing*

EDFA *Erbium Doped Fiber Amplifier*

EFM *Ethernet in the First Mile Alliance*

EPON *Ethernet Passive Optical Network*

FEC *Forward Error Correction*

Fi-Wi *Fiber-Wireless*

FSAN *Full Service Access Network*

FSR *Free Spectral Range*

FTTH *Fiber to the Home*

FTTX *Fiber to the X*

GPON *Gigabit Passive Optical Network*

GE-PON *Gigabit Ethernet - Passive Optical Network*

HFC *Hybrid Fiber Coax*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

ICT *Information and Communication Technologies*

ITU-T *International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*

LED *Light Emission Diode*

MAC *Medium Access Control*

MAI *Multiple Access Interference*

NG-PON1 *1st Next Generation Passive Optical Network*

NG-PON2 *2nd Next Generation Passive Optical Network*

NG-PON3 *3rd Next Generation Passive Optical Network*

NMSE *Normalized Mean Square Error*

OC *Optical Coding*

OCDM *Optical Code Division Multiplexing*

OCDMA *Optical Code Division Multiple Access*

ODN *Optical Distribution Network*

OFDM *Optical Frequency Division Multiplexing*

OLT *Optical Line Terminal*

ONU *Optical Network Unit*

OOC *Optical Orthogonal Code*

OOK *On Off Keying*

P2MP *point-to-multipoint*

PON *Passive Optical Network*

PSK *Phase Shift Keying*

PSO *Particle Swarm Optimization*

QoS *Quality of Service*

RSOA *Reflective Semiconductor Optical Amplifier*

SDH *Synchronous Digital Hierarchy*

SNIR *Signal to Noise plus Interference Ratio*

SNR *Signal to Noise Ratio*

SONET *Synchronous Optical Networking*

SS *Spread Spectrum*

STM *Synchronous Transfer Mode*

TDM *Time Division Multiplexing*

TWDM *Time and Wavelength Division Multiplexing*

WDM *Wavelength Division Multiplexing*

XG-PON / 10GEPON *Ten Gigabits per Second Ethernet Passive Optical Network*

CONVENÇÕES E LISTA DE SÍMBOLOS

Na notação das fórmulas, as seguintes convenções foram utilizadas:

- letras maiúsculas são conjuntos, exemplo: \mathcal{P}, \mathcal{G} ;
- letras minúsculas são elementos de conjunto, exemplo: $\rho \in \mathbb{R}$,
- subscrito diferencia um elemento de um conjunto de outro, exemplo: $g_{\text{seleção}}$;
- letras minúsculas em negrito expressam vetores, exemplo: \mathbf{v} e \mathbf{p} ;
- letras maiúsculas em negrito expressam matrizes, exemplo: \mathbf{G} ;
- $\{ \}^T$ é o operador de transposição;
- $\{ \}^{-1}$ é operador matriz inversa;
- i e j são indexadores de usuários receptores e transmissores, respectivamente;

Os seguintes símbolos serão utilizados:

Símbolo **Descrição**

K	número de usuários ativos na rede óptica
T_{xi}	nó transmissor
R_{xi}	nó receptor
P_i	potências dos lasers
L_{ij}	comprimento da fibra óptica
P_r	potência recebida
P_t	potência transmitida
a	coeficiente de atenuação da fibra
$a_{estrela}$	atenuação do acoplador estrela
α	atenuação da fibra
γ	relação de perda excessiva
G	matriz de atenuação da fibra
σ^2	variância
\mathbf{P}	vetor de potência óptica
P_E	probabilidade de erro de bit
Γ	interferência de onda portadora (CIR)
$\mathbf{1}^T$	$[1, \dots, 1]$
$G_{ij}G_{ij}$	atenuação da fibra entre o j -ésimo nó transmissor e o i -ésimo nó receptor

I	matriz identidade
H	matriz interferência normalizada
p*	vetor potência otimizado
\mathcal{P}	tamanho da população do PSO
c_1	coeficiente de aceleração para soluções locais no PSO
c_2	coeficiente de aceleração para soluções globais no PSO
ω	inércia da partícula no PSO

1. Introdução

O surgimento de novos serviços e aplicações como *High Definition Television* (HDTV), *Ultra-High Definition Television* (4K e 8K), *Video on Demand* (VoD), jogos online, aplicações na nuvem, entre outros, tem motivado o desenvolvimento de redes de comunicação para atender as demandas com relação a características como taxa de transmissão, latência, duração e frequência de utilização das conexões. Neste sentido, é necessário atender as restrições de tráfego e requisitos de qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) específicos. Portanto, é preciso desenvolver redes de comunicação flexíveis que permitam o compartilhamento dinâmico e eficiente de recursos como potência transmitida, largura de banda e taxa de transmissão, entre outros.

A popularização dos dispositivos móveis tem contribuído para o aumento da demanda de largura de banda nas redes de comunicação. Desta forma, o tráfego estimado para o *Internet Protocol* (IP) entre *data centers* que era de 3,1 zettabytes (ZB) deverá apresentar uma taxa de crescimento anual de 23%, atingindo 8,6 zettabytes até o ano de 2018 [1]. As perspectivas de crescimento de demanda de tráfego mostram que mais da metade deste crescimento será impulsionado pelos serviços oferecidos por dispositivos móveis.

Neste contexto, frente a perspectiva do crescimento exponencial das infraestruturas de serviços de tecnologia da informação e comunicação, denominadas ICT (*Information and Communications Technology*), as quais têm seu consumo estimado em 4% da energia elétrica consumida em escala global [2], tornou-se relevante estudar as questões referentes a eficiência energética dessas ICTs. Em [3], estima-se que a parcela de consumo de energia das redes *core* crescerá rapidamente, não somente pelo consumo de equipamentos exclusivamente, mas também pela sua demanda de ambientes com condições controladas de temperatura. Desta forma, estudos como [3-5] têm sido desenvolvidos com foco na discussão de modelos de consumo de potência e também no aumento da eficiência energética dessas estruturas [6-7] sob diferentes abordagens. Por exemplo, em [6], estudam-se técnicas de alocação de espectro e, em [7], técnicas de eficiência energética utilizando modulação adaptativa e a busca de desenvolvimento de novos dispositivos, concebidos com a finalidade de diminuir os valores nominais de potência dos equipamentos sem prejuízo às ICTs.

De uma forma geral, observa-se que não é trivial quantificar e identificar as oportunidades de economia de energia em redes de comunicação mantendo os requisitos de QoS. Por consequência, várias oportunidades de pesquisa e desenvolvimento estão sendo exploradas.

As *Passive Optical Network* (PON) se consolidaram como uma das principais tecnologias de redes de acesso de banda larga e sua cobertura tem se expandido também para redes de maior alcance como redes metropolitanas ou mesmo redes de acesso, conforme mencionado em [8]. As arquiteturas das redes PON apresentam topologia *point-to-multipoint* (P2MP), permitindo que uma única fibra óptica seja compartilhada por múltiplos usuários, sem o emprego de elementos ativos entre os equipamentos instalados no ambiente das operadoras de telecomunicações, denominados *Optical Line Terminal* (OLT) e as *Optical Network Unit* (ONU) instaladas nos ambientes dos usuários/assinantes. As PONs podem ser utilizadas sozinhas ou em conjunto com outras tecnologias como *Digital Subscriber Line* (DSL), *Hybrid Fiber Coax* (HFC), *Fiber-Wireless* (Fi-Wi), entre outros. Além disso, a aplicação de multiplexações híbridas por divisão do tempo (TDM), do comprimento de onda (WDM), da frequência (FDM) e de códigos ópticos (OCDM) [9] podem ser empregadas. Em [10], por exemplo, verifica-se a tecnologia híbrida TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexing*) utilizada como padrão para redes de nova geração NG-PON2. Dessa forma, as redes PON vêm continuamente evoluindo e aumentando o seu alcance inicial de 20/40 km para aproximadamente 100 km, quando levados em conta elementos de eficiência energética (EE) e de eficiência espectral (SE – da sigla em inglês de *spectral efficiency*) [9].

Na padronização atual das redes PON usando TDM, IEEE 802.3ah para redes *Gigabit Ethernet PON* (GE-PON) [11] e ITU-T G.984 para redes *Gigabit PON* (G-PON) [12], existe suporte para até 128 ONUs. O padrão GE-PON é o padrão dominante na Ásia e o GPON é o padrão largamente empregado nos EUA, Europa e Brasil. Essas padronizações empregam a transmissão por *broadcasting* com taxas de transmissão de dados de 2,5 Gbps (G-PON) e 1,25 Gbps (GE-PON) no sentido da OLT para as ONU (*downstream*) e transmissão por rajadas com taxas de 1,25 Gbps na direção das ONU para a OLT (*upstream*) em ambos os padrões. A evolução da padronização das redes PON, baseada em tecnologia TDM combinada com outras técnicas adiante descritas (redes híbridas), levou ao desenvolvimento do XG-PON e do 10GE-PON (NG-PON2), ambos com taxas de transmissão na ordem de 10 Gbps para *downstream* [10].

As redes ópticas passivas de terceira geração (NG-PON3) ainda estão em discussão. Um parâmetro importante é o aproveitamento das redes já implantadas, como a NG-PON1 e NG-PON2, por exemplo. Outro ponto importante é a continuidade e desenvolvimento da multiplexação híbrida. Nesse contexto, as redes 10GE-(WDM/OCDM)-PON que, além das multiplexações TDM (implementada mesmo que ausente da sigla) e WDM, agregou-se a

Optical Code Division Multiplexing (OCDM) que, conforme estudos apresentados em [13-14], mostrou-se factível e viável por contemplar a possibilidade de sobreposição (*overlay*) com as tecnologias PON de gerações anteriores. A aplicação dos mecanismos de proteção de rede que também são estudados em [14], além do emprego de um único par codificador/decodificador lado a lado entre OLT e ONU, eliminando assim a necessidade de um decodificador em cada uma das ONU [15]. Nenhum desses estudos, porém, discutem-se os seus aspectos de eficiência energética.

Nas redes 10GE-(WDM/OCDM)-PON, os estudos de Vetter [16] discute a economia de energia utilizando a técnica de *sleep mode*. Este mecanismo, normatizado pela padronização IEEE 1.904.1-2013 [17], consiste em colocar em *sleep mode* (modo de hibernação, em tradução livre) os dispositivos e/ou partes das ONU que estejam ociosas. O *sleep mode* apresenta resultados relevantes de economia de energia, porém este tipo de mecanismo é baseado somente nos dispositivos da camada de enlace da rede, sendo, portanto, um mecanismo eficaz quando a utilização da rede é baixa, mas quando o tráfego de rede aumenta substancialmente, um suporte na camada física é necessário.

Como as pesquisas relacionadas à eficiência energética nas redes óticas passivas são ainda incipientes, o presente trabalho tem relevância acadêmica, já que avança na investigação e no desenvolvimento de um mecanismo de eficiência energética em redes óticas passivas de próxima geração ao utilizar-se de técnica meta-heurística de controle de alocação de recursos. A economia de recursos é relevante não só do ponto de vista econômico, mas também do ponto de vista socioambiental, pois uma demanda menor de energia além de reduzir os custos de operação da rede, mas também diminui a demanda de energia, processo cuja produção ainda resulta na maioria das vezes em degradação do meio ambiente.

Especificamente, podem ser descritos:

- Continuidade e evolução de estudos de eficiência energética já publicados para redes óticas passivas e sem fio, como os demonstrados por Durand e Abrão [18] em redes WDM/OCDM e os de Tang et al [19] para redes CDMA (*Code Division Multiple Access*).
- Aplicação direcionada de técnicas de otimização de recursos, como *sleep mode* e PSO.
- Proposta de um algoritmo de eficiência energética aplicável em redes óticas de próxima geração 10GE-(WDM/OCDM)-PON baseado no controle de potência transmitida utilizando as técnicas de otimização de recursos.

O restante desta dissertação está organizado da seguinte maneira:

O Capítulo 2 apresenta os conceitos de redes ópticas passivas baseadas em multiplexação no tempo (TDM-PON), comprimento de onda (WDM-PON) e códigos ópticos (OCDM-PON), descrevendo e ilustrando suas teorias, características, arquiteturas de rede, particularidades, vantagens e também as suas limitações.

O Capítulo 3 traz um referencial teórico sobre o mecanismo de eficiência energética em redes PON conhecido como *sleep mode*, subdividido em *power shedding mode*, *fast sleep mode* e *deep sleep mode*, onde são analisadas as possibilidades já estudadas e aplicadas nas redes PON.

O Capítulo 4 foca na otimização e a alocação de recursos nas redes PON por meio de algoritmos heurísticos.

O Capítulo 5 destina-se a trazer o modelamento da análise de desempenho dos mecanismos de eficiência energética baseando-se no modelamento do consumo de potência e energia da ONU, do *sleep mode* e no controle de potência baseado na PSO.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos das simulações em dois cenários, bem como uma breve discussão para cada um dos resultados.

No Capítulo 7 serão apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho, e também a proposta de cronograma para finalização.

Esta pesquisa possibilitou o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Luis G. T. Zulai, Fábio R. Durand e Taufik Abrão, “Proposta de um Mecanismo de Eficiência Energética em Redes Ópticas Passivas de Próxima Geração”, em MOMAG 2014: 16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo 31 Agosto - 3 Setembro 2014, Curitiba (PR) – Brasil;
- Luis G. T. Zulai, Fábio R. Durand & Taufik Abrão, “Análise do Consumo de Potência e Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas”, em MOMAG 2014: 16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo 31 Agosto - 3 Setembro 2014, Curitiba (PR) – Brasil;
- Luis G. T. Zulai, Fábio R. Durand & Taufik Abrão (2015), “*Energy-Efficient Next-Generation Passive Optical Networks Based on Sleep Mode and Heuristic Optimization*”, *Fiber and Integrated Optics*, Vol. 34, No. 3, 2015. DOI: 10.1080/01468030.2015.1044680.

2. Redes Ópticas Passivas (PON)

Neste capítulo serão abordadas as principais características das redes ópticas passivas. O objetivo é apresentar seus princípios de funcionamento, padronização de suas arquiteturas por meio do IEEE e ITU-T e ainda observar as estratégias de evolução previstas.

As redes PON foram idealizadas na década de 1970, sendo padronizadas e comercialmente implementadas a partir de meados dos anos 1990 pela normatização ITU G.983 [20]. Estas redes apresentaram um desenvolvimento promissor e atualmente ocupam grande faixa do mercado das redes de acesso. A Fig. 2.1 mostra uma configuração básica de rede PON.

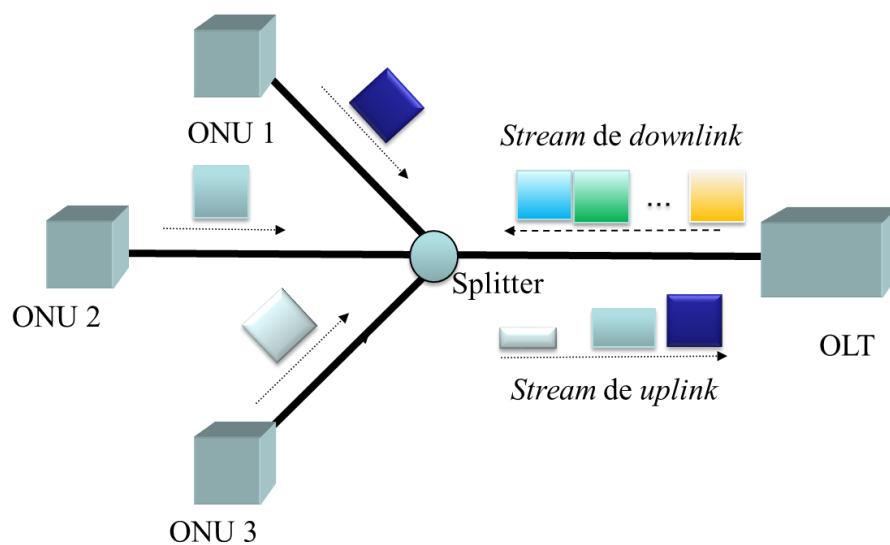


Fig. 2.1 – *Downlink* e *uplink* de dados em rede PON básica [21]

Em TDM, a centralização e o gerenciamento das informações são realizados pela OLT. A multiplexação no domínio do tempo, porém, implica no compartilhamento de banda nesse domínio para várias ONU, ou seja, a banda total é repartida reduzindo-a da ordem da dezena de gigabits por segundo para poucas dezenas de megabits por segundo individualmente por ONU. Mesmo com essa desvantagem, as PON consolidaram-se como redes ópticas de acesso as mais adequadas para o transporte de informações pela sua flexibilidade, escalabilidade, bem como facilidade de uso e de operação.

Observando-se o *roadmap* mostrado na Fig. 2.2 reproduzido pelo IEEE em [22], verifica-se que as redes PON devem evoluir continuamente apresentando melhorias graduais, ou seja, a rede NG-PON1 evolui para a rede NG-PON2, que, por sua vez, evolui para NG-PON3.

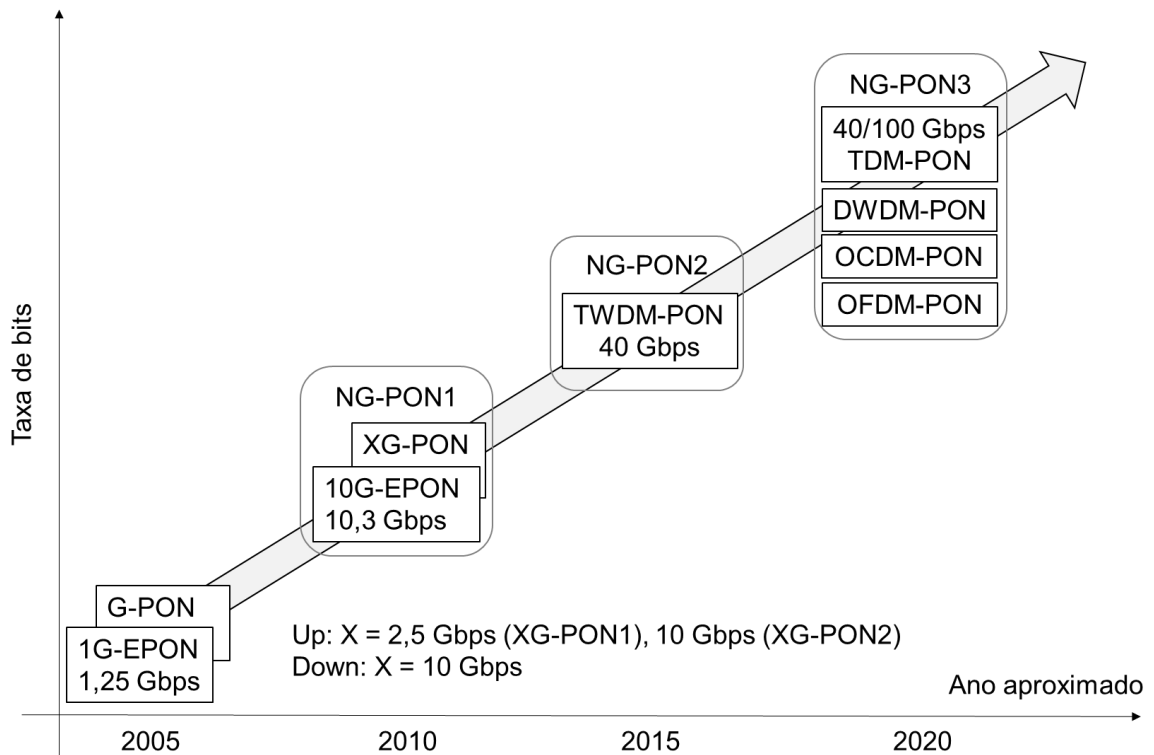


Fig. 2.2 - Roadmap da evolução das redes óticas a partir das redes GPON [23]

Mais detalhadamente, as premissas matemáticas e operacionais das redes NG-PON1 [25-26] devem contemplar migrações graduais com possíveis sobreposições de tecnologias de rede (*overlay*). Para isso, é necessária uma compatibilidade entre redes que possibilite a coexistência com as redes de gerações anteriores (como GPON e EPON, por exemplo), possibilitando, assim, um melhor aproveitamento da fibra óptica. A esse cenário é dada a denominação de *Greenfield PON*, sendo previsto na normatização ITU G.989 [27]. Seu contraponto é denominado, por sua vez, de *Brownfield PON*, onde as infraestruturas de rede óticas instaladas são desativadas ou abandonadas, levando a necessidade de implementação de redes completamente novas e, conseqüentemente, maiores custos.

Ainda segundo o *roadmap*, as redes NG-PON1 (X-GPON/10GE-PON) [23], projetadas para o início da década de 2010, apresentam como meta uma taxa de transferência na ordem de uma dezena de gigabits por segundo para o *downstream*. As redes TDM-PON, em um cenário com compartilhamento da mesma fibra pelos usuários, ainda é capaz de atender as demandas projetadas, porém, as limitações impostas pela potência de transmissão, pelo limiar de recepção e ainda pela elevada dispersão cromática [24] podem impossibilitar o atendimento dos requisitos necessários para as gerações seguintes denominadas NG-PON2 e NG-PON3, previstas para meados desta década e início da próxima, respectivamente.

Historicamente, as padronizações, normas e recomendações para redes PON foram discutidas e consolidadas pelo *Full Service Access Network* (FSAN), com participação do ITU-T e pelo *Ethernet in the First Mile Alliance* (EFM) em conjunto com o IEEE [11][12][17][20][23-27]. A Tabela 2.1 mostra as características e evoluções das redes PON, utilizando a multiplexação TDM: A/B-PON, EPON, GPON e 10GE-PON, além da multiplexação híbrida TDM/OCDM/WDM (NG-PON2).

Tabela 2.1 – Tabela de comparação de redes PON

Características	A-PON/ B-PON	EPON	GPON	10G-EPON (NG-PON1)	XG-PON (NG-PON1)	TWDM-PON (NG-PON2)
Padronização	ITU-T G.983	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984	IEEE 802.3av	ITU-T G.987	ITU-T G.989
Ano	1998/2001	2004	2008	2009	2010	2013
Capacidade de transmissão	155/622 Mbps (↓↑)	1,25 Gbps (↓↑)	2,5 Gbps (↓) 1,25 Gbps (↑)	10 Gbps (↓↑)	10 Gbps (↓) 2,5 Gbps (↑)	40 Gbps (↓) 10 Gbps (↑)
Tamanho dos pacotes de dados	Fixo de 53 bytes	Variável de 64 bytes a 1518 bytes	Variável de 53 bytes a 1518 bytes	Variável de 64 bytes a 1518 bytes	Variável de 53 bytes a 1518 bytes	Variável até 9000 bytes
Protocolo	ATM	Ethernet	ATM/ Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet
Comprimento de onda <i>downstream</i>	1480 a 1500 nm	1490 a 1510 nm	1480 ou 1500 nm	1577 a 1590 nm	1575 a 1580 nm	1575 a 1580 nm
Comprimento de onda <i>upstream</i>	1260 a 1360 nm	1310 nm	1260 a 1360 nm	1310 nm	1260 a 1280 nm	1260 a 1280 nm
Alcance	20 km	20 km	20 km	20 km	20 km	40-80km
Taxa de fracionamento	1:16 ou 1:32	1:16 ou 1:32	1:32 ou 1:64	1:128	1:128	1:256
Largura de banda média por usuário	20/40 Mbps	30-60 Mbps	40-80 Mbps	≥100 Mbps	≥100 Mbps	2,5 Gbps
Custo estimado	Baixo	Baixo	Médio	Alto	Alto	Alto

Uma observação importante sobre a tecnologia híbrida TWDM-PON é que essa foi a solução encontrada para atender principalmente os requisitos de banda para redes NG-PON2 [10][28], fazendo utilização de multiplexação híbrida no tempo (TDM) e em comprimentos de onda distintos (WDM) [18][29].

Para as redes NG-PON3 as padronizações ainda estão a ser definidas e possivelmente tecnologias híbridas serão utilizadas, partindo da solução encontrada já para as redes NG-PON2, agregando além da multiplexação no tempo e comprimento de onda, a multiplexação por códigos ópticos (OCDM) à solução que permanece em discussão [29].

2.1. TDM-PON

A multiplexação por divisão de tempo (TDM) baseia-se na transmissão de informação em canais distintos no domínio do tempo, denominados *timeslots*, intercalando-se com outros canais de transmissão, conforme ilustrado na Fig. 2.3.

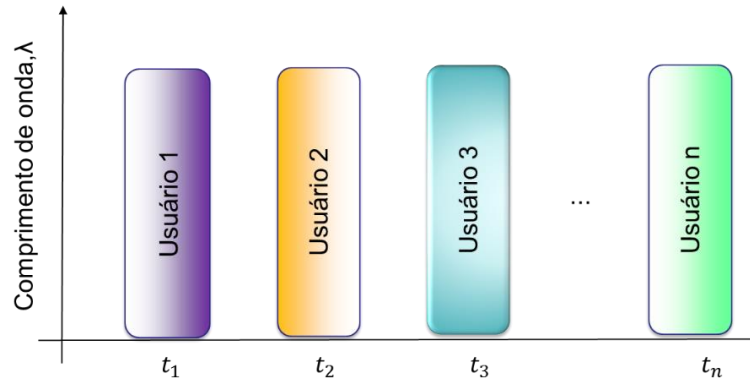


Fig. 2.3 – Alocação de recursos em rede TDM

As redes SONET/SDH (*Synchronous Optical Networking / Synchronous Digital Hierarchy*) são padronizadas para a multiplexação e transmissão de sinais ópticos TDM baseadas em topologias redes em *broadcast* ou que usam comutação óptica [21]. Nas redes *broadcast* não existe comutação na rede, sendo as informações transmitidas das OLT para todos os nós de rede denominados ONU.

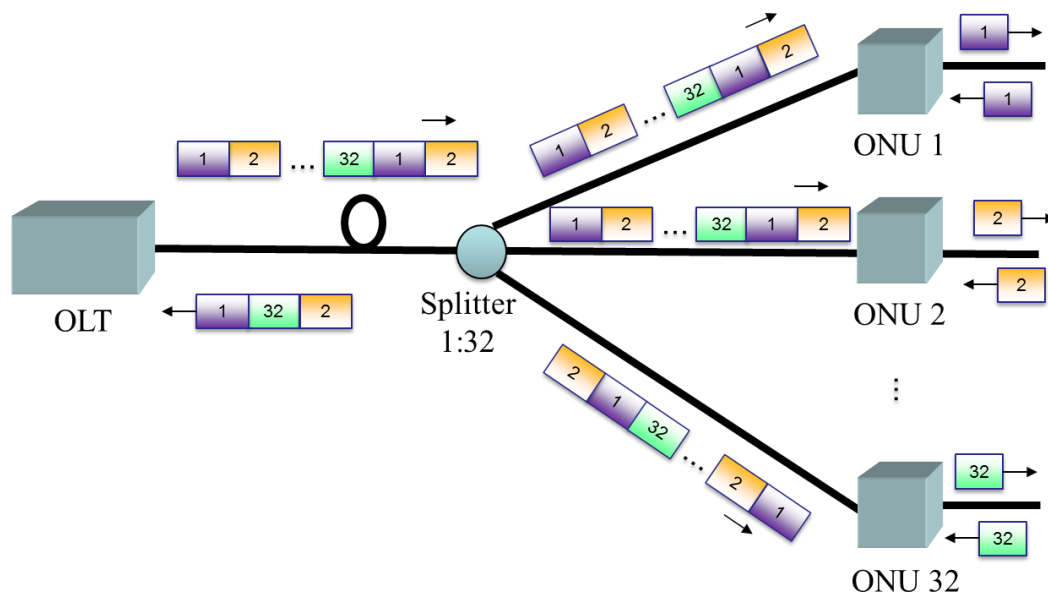


Fig. 2.4 - Topologia TDM-PON ponto-multiponto [21]

Dentro dessas arquiteturas, todos os sinais multiplexados no tempo nas redes TDM-PON chegam em um *splitter* que pode fazer uma divisão da rede na proporção 1:N e replicar o

mesmo sinal multiplexado transmitido pela OLT para todas as ONU. Estes equipamentos são capazes de identificar o *timeslot* contendo as informações a eles destinadas, filtrando as demais e reconstruindo as informações originalmente a eles destinadas, conforme ilustrado na Fig. 2.4.

2.2. WDM-PON

A técnica WDM é interessante pela utilização do domínio da frequência (FDM – *Frequency Division Multiplexing*) em detrimento do domínio do tempo utilizado na multiplexação TDM. Na tecnologia WDM, vários canais de informação são multiplexados em apenas um único canal de transmissão que carrega sinais com variados comprimentos de onda por fibra óptica, permitindo a multiplicação de capacidade de transmissão de dados. Além disso, cada comprimento de onda pode ter uma modulação e uma velocidade de transmissão distintas.

A rede WDM-PON apresentam escalabilidade e similaridade suficientes para o atendimento das redes de arquitetura FTTX (*Fiber to the X*), particularmente com as redes FTTH (*Fiber to the Home*), como as demonstradas em [30]. A Fig. 2.5 mostra a alocação de recursos em uma rede WDM.

A tecnologia WDM foi concebida e desenvolvida em laboratório em meados da década de 1970. Economicamente e comercialmente, tornou-se viável somente no início dos anos 1990. Nessa técnica, a filtragem dos sinais ópticos é feita com etalons, dispositivos chamados interferômetros *Fabry-Perot* em que a luz incidente (sinal óptico) é refratada e repetidamente refletida entre duas superfícies em múltiplos feixes que são então focados em conjunto, fazendo com que ocorra uma auto interferência da luz.

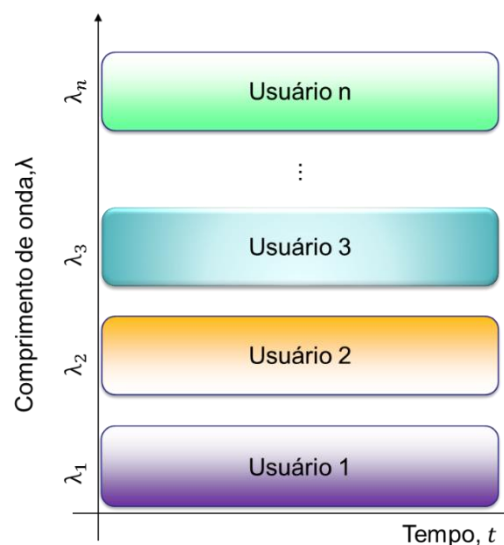


Fig. 2.5 – Alocação de recursos em rede WDM-PON

No início dos anos 2010, os sistemas WDM já estavam desenvolvidos a ponto de serem capazes de trabalhar com mais de 160 comprimentos de onda simultâneos com taxas de aproximadamente 40 Gbps [31]. Os sistemas WDM normalmente utilizam fibra óptica monomodo (SMF – *single mode fiber*), que trabalha com apenas um único modo óptico e com um diâmetro central de 9 nm. A Fig. 2.6 ilustra a rede WDM-PON ponto-a-ponto.

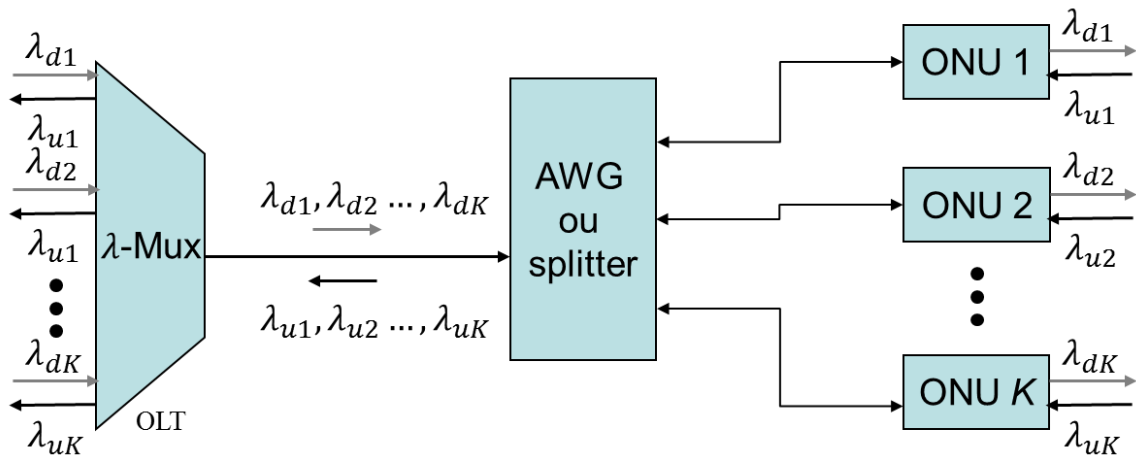


Fig. 2.6 – Rede WDM-PON ponto-a-ponto

A tecnologia WDM subdivide-se em duas, de acordo com a quantidade e separação dos comprimentos de onda:

- *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM): padronizado pelo ITU G.694.1 [32]. Atua entre os comprimentos de onda 1530 nm e 1565 nm (banda C) do *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA). Opera com multiplexação em 40 canais em espaçamento de 100 GHz ou com 80 canais em espaçamento de 50 GHz, utilizando frequências em um intervalo estreito. É utilizado em comunicações em distâncias longas com amplificação do sinal óptico com auxílio da amplificação Raman [33], utilizando sinal óptico na Banda-L (entre 1565 nm e 1625 nm);
- *Coarse/Conventional Wavelength Division Multiplexing* (CWDM), também conhecido como WDM Convencional, é padronizado pela ITU G.694.2 [34]. Essa técnica trabalha com canais multiplexados simultaneamente em duas regiões de comprimentos de onda de 1310 e 1550 nm com frequências de intervalo amplo. É utilizado em comunicações em curtas distâncias que dispensem amplificação do sinal óptico. A Fig. 2.7 ilustra a divisão de comprimentos de onda em uma rede CWDM.

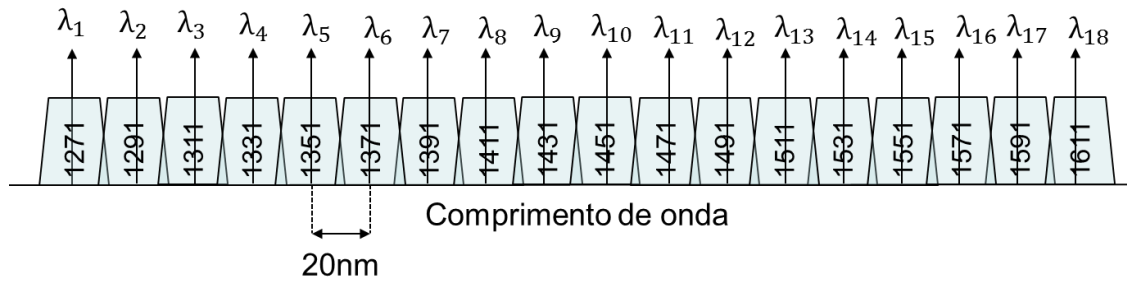


Fig. 2.7 - Comprimentos de onda em rede CWDM-PON [21]

Teoricamente, o WDM-PON é limitado apenas pela quantidade de comprimentos de onda disponíveis, além da grande escalabilidade e suporte às arquiteturas de redes do tipo FTTH. Entretanto, como a rede é baseada em multiplexação por divisão de comprimentos de onda, a configuração lógica do serviço é ponto-a-ponto, ou seja, mesmo se a topologia física estiver de maneira diferente, como anel e *mesh* por exemplo, um comprimento de onda só pode ser utilizado dessa forma, implicando em um custo operacional elevado para a rede e baixo aproveitamento de recursos.

Uma maneira de se evitar o uso de um mesmo comprimento de onda por toda a extensão do enlace óptico é a utilização de lasers baseados em *Reflective Semiconductor Optical Amplifiers* (RSOA) sintonizáveis em comprimento de onda que possuem custo baixo e possibilitam um *jump* óptico, ou seja, possibilitam uma mudança de comprimento de onda em parte ou no restante do trecho do sinal óptico. Isso, porém, complica o gerenciamento e a operação da rede.

No contexto das próximas gerações de redes PON, o WDM não consegue atender os requisitos de compatibilidade com as redes de gerações anteriores, ficando prejudicado seu uso isolado para redes NG-PON2 e NG-PON3.

2.3. OCDM-PON

As redes ópticas têm crescido, extrapolando o seu domínio antes restrito aos *backbones* e às redes metropolitanas, tornando-se parte também das redes de acesso, eliminado as interfaces elétricas, com a transmissão de sinais sendo feita em meios ópticos exclusivamente, denominadas de AON (*All-Optical Network*) [35]. A tecnologia de acesso por meio da divisão de código ópticos CDMA (*Code Division Multiple Access*) empregada em redes sem fio passou a ser empregada às redes PON por meio do OCDM (*Optical Code Division Multiplexing*).

As redes OCDM-PON que fazem parte desse processo de integração óptica utilizam a técnica de multiplexação/demultiplexação óptica de sinais para sua transmissão por meio de códigos ópticos, sendo que cada sinal óptico possui uma codificação própria que o diferencia dos demais sinais transmitidos simultaneamente.

O CDMA sem fio utiliza técnicas de espalhamento espectral (SS – *spread spectrum*) que têm sido estudadas desde a década de 1950, sendo aplicáveis em sistemas de comunicações, de navegação e de teste que não utilizam os formatos usuais de padronização de sinal, aumentando a eficiência espectral e possibilitando que usuários distintos compartilhem a mesma faixa de frequências.

Apesar desse sucesso nas redes sem fio, ainda é recente a pesquisa e desenvolvimento de redes ópticas CDMA (OCDMA ou OCDM-PON) comercialmente viáveis. Entre as décadas de 1960 e 1980, a imaturidade tecnológica dos dispositivos ópticos, como codificadores/decodificadores e dispositivos para redes de acesso, não permitiu o desenvolvimento de redes OCDM-PON naquela ocasião [35]. Só recentemente, com a crescente e contínua demanda por banda, os dispositivos de codificação óptica apresentaram avanços e já são uma alternativa viável às redes TDM-PON e WDM-PON.

A rede OCDM-PON pode operar de forma assíncrona, não necessitando de um controle centralizado, não sofrendo com colisão de pacotes e sem a necessidade de qualquer gerenciamento no tempo ou frequência. Diferentemente das redes TDM-PON e WDM-PON, as redes OCDM-PON possuem um grau de liberdade que vai além desses domínios, podendo-se valer também da polarização do sinal óptico para composição do código óptico. Assim, cada usuário tem seu próprio código óptico único na rede, sendo possível o compartilhamento da mesma fibra tanto no tempo como no comprimento de onda, mostrado na Fig. 2.8.

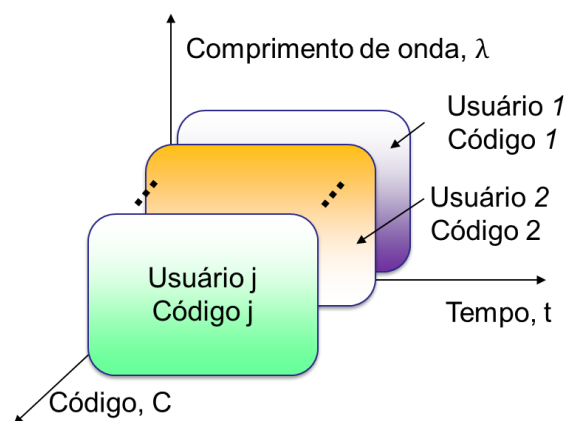


Fig. 2.8 – Compartilhamento de recursos em rede CDMA e OCDMA [21]

A rede OCDM-PON, cuja topologia básica é apresentada na Fig. 2.9 é uma rede de acesso baseada em fibras ópticas e consiste na codificação e decodificação em meio totalmente óptico, ou seja, de comutação óptica.

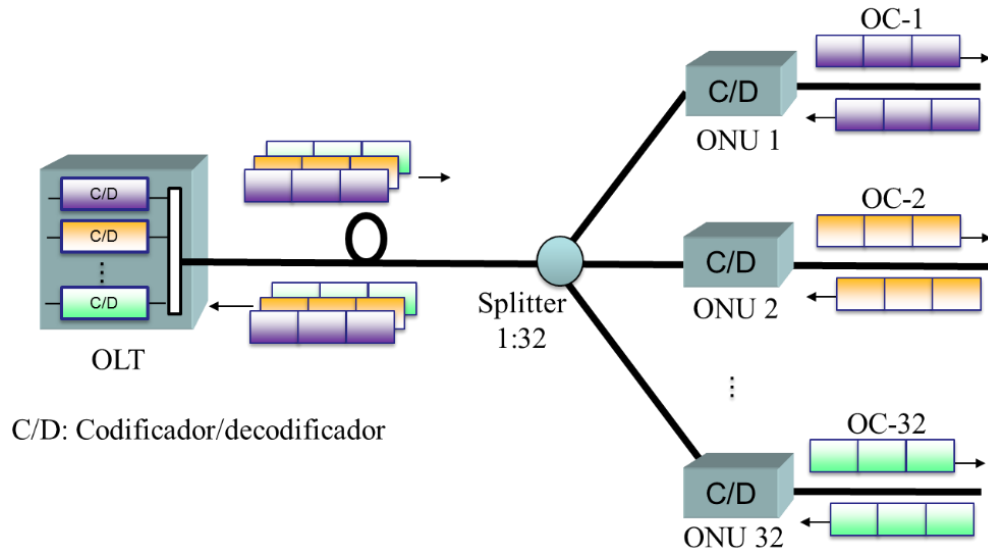


Fig. 2.9 - Sistema básico de codificação óptica utilizando tecnologia OCDM [21]

O acoplador estrela é responsável por fazer dentro da rede, a interconexão óptica dos códigos. Observa-se que essa rede faz a transmissão dos dados em *broadcast*, ou seja, toda a informação transmitida chega a todos os usuários de forma simultânea e sem atraso. Um algoritmo é responsável por formar os códigos ópticos que o codificador utiliza, podendo se utilizar de um ou mais comprimentos de onda. Na recepção do sinal, é necessário um dispositivo denominado correlator óptico que possui um filtro casado, sendo que este dispositivo possui uma cópia do código de origem para que seja possível decodificar a informação por meio de um pulso de auto correlação que possui a potência maior que as potências dos demais pulsos dentro de um limiar. Sob o ponto de vista dos comprimentos de onda, o que diferencia o sistema WDM do sistema OCDM, é que no primeiro cada canal é representado por um único pulso com seu respectivo comprimento de onda, ao passo que, no segundo, o comprimento de onda é utilizado apenas na composição do código. Esse código óptico representa o endereço do usuário e cada bit transmitido transporta consigo essa informação pela rede que representa o endereço de origem e o endereço de destino da informação. A codificação óptica (OC – *optical coding*) é o processo pelo qual um código é inserido ou extraído de um sinal óptico, sendo um componente aplicado nas tecnologias de comutação óptica.

Uma das grandes vantagens conseguidas por meio da codificação em sistemas OCDM é a segurança de informações, uma vez que as informações transmitidas são atribuídas

de forma exclusiva para cada usuário. Estes códigos podem ser construídos no domínio do tempo, frequência, espaço, fase ou mesmo agregando-se mais de um domínio simultaneamente. Podem ser classificados como códigos unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), sendo que esses dois últimos utilizam mais de um domínio.

2.3.1. Sistemas Ópticos Coerentes e Não-Coerentes

As redes OCDMA podem ser classificadas em termos da natureza da superposição do sinal óptico como sistemas coerentes e sistemas não-coerentes.

O sistema coerente faz uso da propriedade da luz e implementa codificação bipolar do sinal óptico, ou seja, os receptores ópticos recebem o sinal e fazem sua detecção através da sua codificação de fase. A forma de adição de sinais é a superposição das amplitudes dos sinais ópticos. Esse sistema opera com pulsos de sinais ópticos de banda larga ultracurtos.

Já o sistema não-coerente é baseado em codificação em amplitude espectral [37], codificação espacial [38], espalhamento temporal [39] e de codificação de espalhamento temporal em conjunto com salto de comprimento de onda. A codificação, em dimensões múltiplas, como amplitude espectral e espalhamento temporal em conjunto com salto de comprimento de onda dá mais flexibilidade e ao mesmo tempo aumentam a capacidade e a performance. Essas redes OCDMA utilizam pulsos ou da ausência destes para representação dos binários “1” e “0”, respectivamente, fazendo uma codificação unipolar, onde os sinais de luz são detectados nos terminais de recepção. Essa forma de ação é a superposição das potências dos sinais de luz. Esse sistema utiliza fontes de luz não-coerentes, tais como: ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) e diodo emissor de luz (LED – *Light Emission Diode*).

A Tabela 2.2 mostra uma comparação entre códigos não coerentes e códigos coerentes [35].

Tabela 2.2 - Comparação entre os códigos ópticos coerentes e não-coerentes.

	Não coerente	Coerente
Tipo de código	Unipolar	Bipolar
Modulação	Intensidade	Fase
Ortogonalidade	Pseudo-ortogonal	Ortogonal
SIR	\sim Chip	\sim Chip ²

A Fig. 2.10 [40], faz uma ilustração do sistema de codificação e decodificação OCDM.

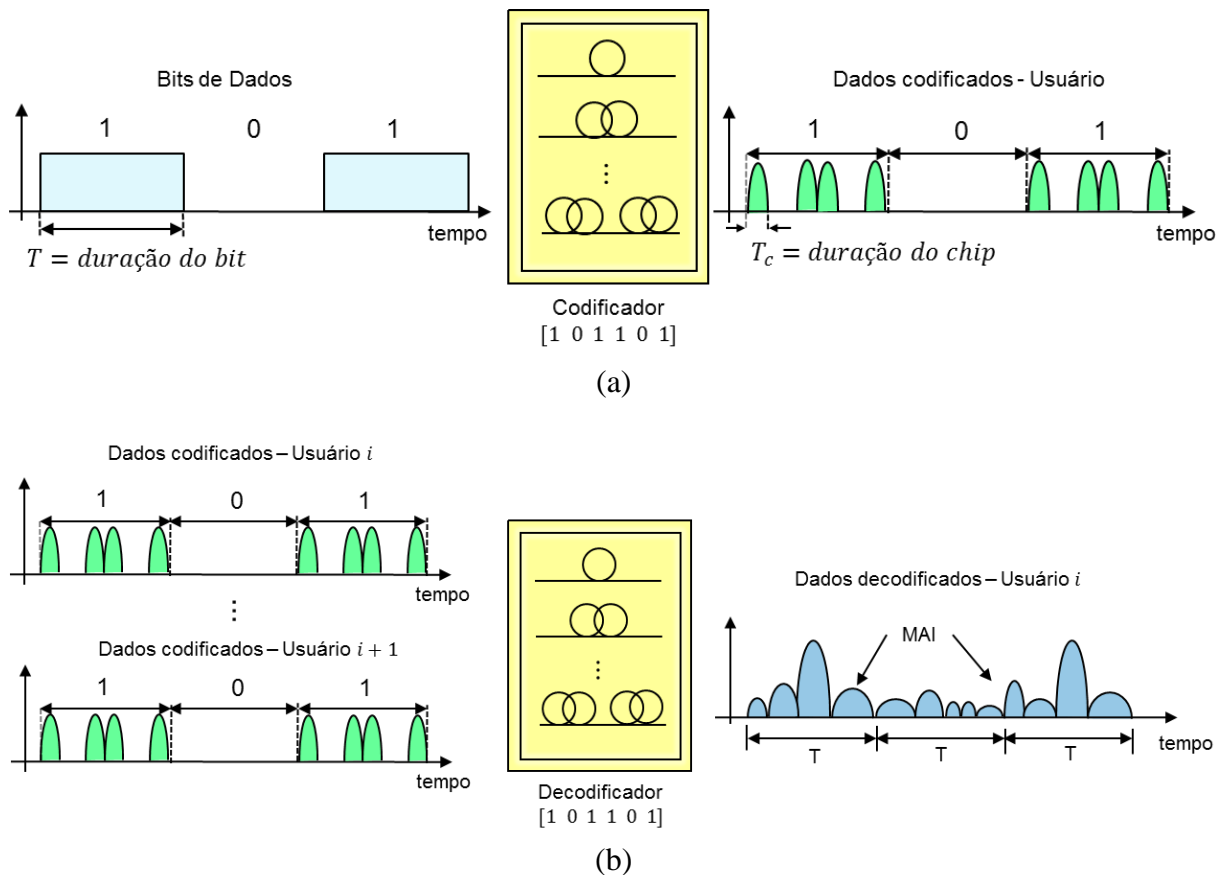


Fig. 2.10 - Sistema ilustrativo de codificação e decodificação OCDM [40]: (a) codificação; (b) decodificação

A fonte dominante de ruído e principal fonte de erros de bit na rede OCDMA é o efeito *crosstalk* ocasionado pela interferência gerada entre diferentes usuários que compartilham a mesma fibra denominada *Multiple Access Interference* (MAI).

Com o objetivo de minimizar os efeitos da MAI, é necessária a seleção de códigos ópticos com boas propriedades de correlação para codificar a informação transmitida [39].

2.3.2. Interferência por Acesso Múltiplo (MAI)

A sobreposição de espectros de diferentes usuários acessando simultaneamente um sistema CDMA sem fio ou OCDM causa um fenômeno conhecido por *Multiple Access Interference* (MAI). Isso limita o acesso de usuários simultâneos ao sistema de comunicação, bem como a capacidade de banda disponível para cada um desses usuários.

Pode-se determinar matematicamente a capacidade de um sistema CDMA. Assumindo-se que exista um número K de usuários no sistema, o sinal multiplexado apresenta

potência S , e a potência de cada sinal $(K - 1)$ também é S , a razão entre potência de sinal e de interferência em presença da MAI é:

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{(K - 1)S + \sigma^2} = \frac{1}{(K - 1)S + \sigma^2/S} \quad (2.1)$$

onde σ^2 é a variância da potência de ruído aditivo

Uma relação de densidade entre energia e ruído pode ser estabelecida como (E_b/N_o) , sendo E_b [J] definido como a potência de sinal desejada S dividida pela taxa de bits de dados B [bps], e a densidade de ruído [W/Hz] é definido como a potência do ruído dividido pela largura de banda W :

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S/B}{(K - 1)S/W + \sigma^2/W} = \frac{WB}{(K - 1)S + \sigma^2/S} = \left(\frac{W}{B}\right) \frac{S}{N} \quad (2.2)$$

onde a relação de taxa de bits de dados e a largura de banda total W/B refere-se ao ganho do processo.

É possível afirmar então que W/B mostra que a relação sinal-ruído aumenta por um fator de ganho de processamento. O número de usuários ativos pode então ser determinado por

$$K = 1 + \frac{W/B}{E_b/N_o} - \frac{\sigma^2}{S} \quad (2.3)$$

Como consequência, quanto maior a relação W/B , menor é a relação de densidade de energia de bit e ruído E_b/N_o , de modo que mais usuários podem ser adicionados ao sistema de comunicação. Tanto a tecnologia CDMA sem fio como a OCDMA utilizam esses conceitos por meio de seqüências de código de espalhamento espectral no tempo ou espelhamento não atrelado ao tempo.

2.3.3. Codificador/decodificador multiporta em AWG

Observa-se na Fig. 2.11 na arquitetura de rede 10GE-(WDM/OCDM)-PON um componente identificado como codificador/decodificador AWG. Esse dispositivo é um *Planar Lightwave Circuit* (PLC) passivo de silício com N entradas e N saídas e que possui uma configuração AWG que difere da encontrada nos multiplexadores/demultiplexadores de comprimento de onda (WDM) [41] e se assemelham aos encontrados nos codificadores ópticos (OCDMA). Nesta configuração são gerados simultaneamente N códigos ópticos PSK em N saídas, semelhante a um codificador AWG, com $N - \text{chip}$, N seqüências de códigos de nível de fase e amplitude PSK, funcionando também como decodificador, conforme mostrado na Fig. 2.12. Quando um código óptico é adicionado à entrada, todos os sinais ópticos correlacionados entre o código de entrada e os N códigos geram-se sinais nas diferentes saídas do dispositivo.

Devido à propriedade cíclica semelhante à do AWG, a combinação de números na porta de entrada do dispositivo no qual um código óptico é lançado e no qual o pico de auto correlação aparece imediatamente detecta o respectivo código óptico. A propriedade cíclica de um codificador/decodificador de cinco portas é mostrada na Fig. 2.15. Cada porta possui seu número e seu código óptico, respectivamente, como por exemplo: $OC_0^0, OC_1^0, OC_2^0, OC_3^0, OC_4^0$ que são cinco códigos ópticos colocados na porta 0, com as saídas correlacionadas, OC_0^0 na porta 0, OC_1^0 na porta 1, OC_2^0 na porta 2, OC_3^0 na porta 3 e OC_4^0 na porta 4.

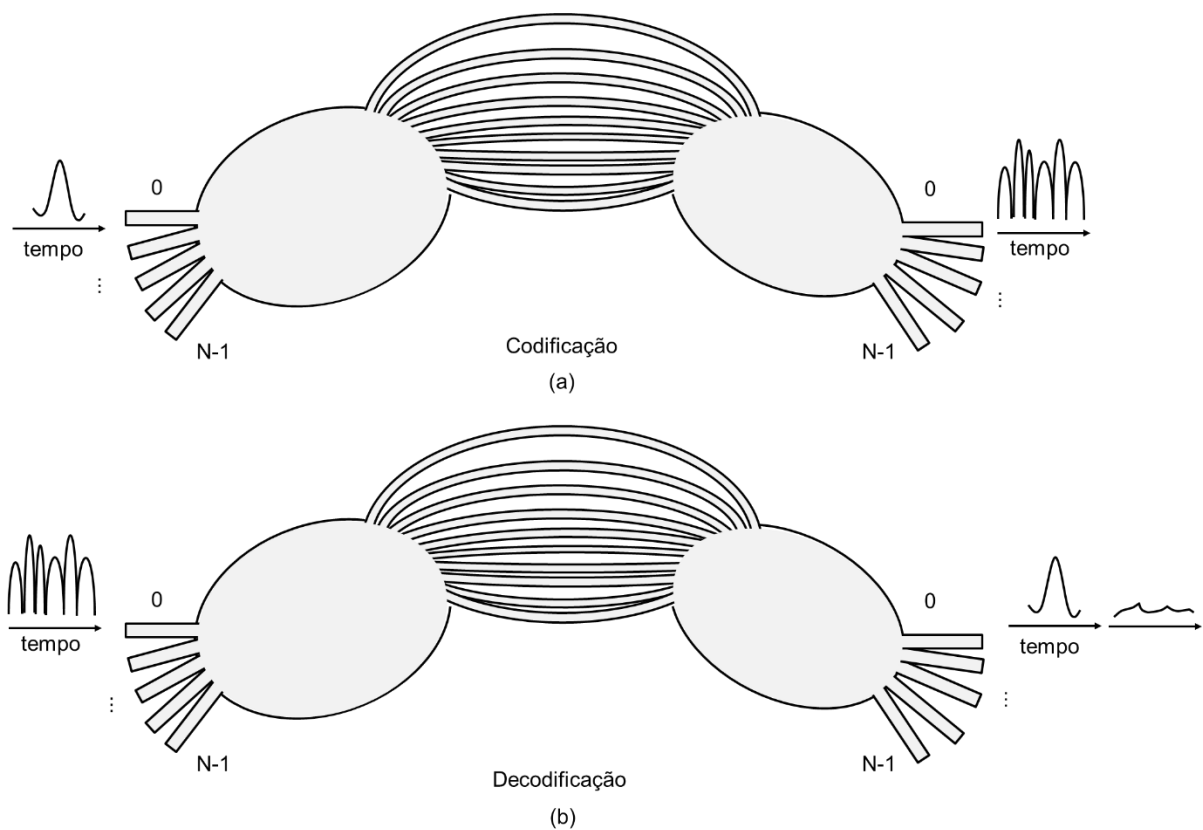


Fig. 2.11 – Representação de codificação/decodificação multiportas AWG [21]:
(a) codificação, (b) decodificação

Um dispositivo de codificação/decodificação multiportas AWG é capaz de gerar N códigos simultaneamente. Porém um número muito elevado de códigos implicaria em incremento da largura de código. Assim, para se evitar esse problema, os códigos são criados ortogonalmente, tendo-se códigos multidimensionais. Por exemplo: um dispositivo com $N = 8$ entradas/saídas e $n = 4$ pulsos de entrada gera um número de $\binom{N}{n} = \binom{8}{4} = 70$ códigos ortogonais e um dispositivo com $N = 16$ entradas/saídas e $n = 8$ pulsos de entrada gera um número de $\binom{16}{8} = 12\ 870$ códigos ortogonais.

O mecanismo utilizado para se criar uma sequência de códigos ópticos no domínio do tempo é mostrada na Fig. 2.12. Ao se colocar na entrada um pulso óptico, N cópias dele são geradas pelo *splitter*.

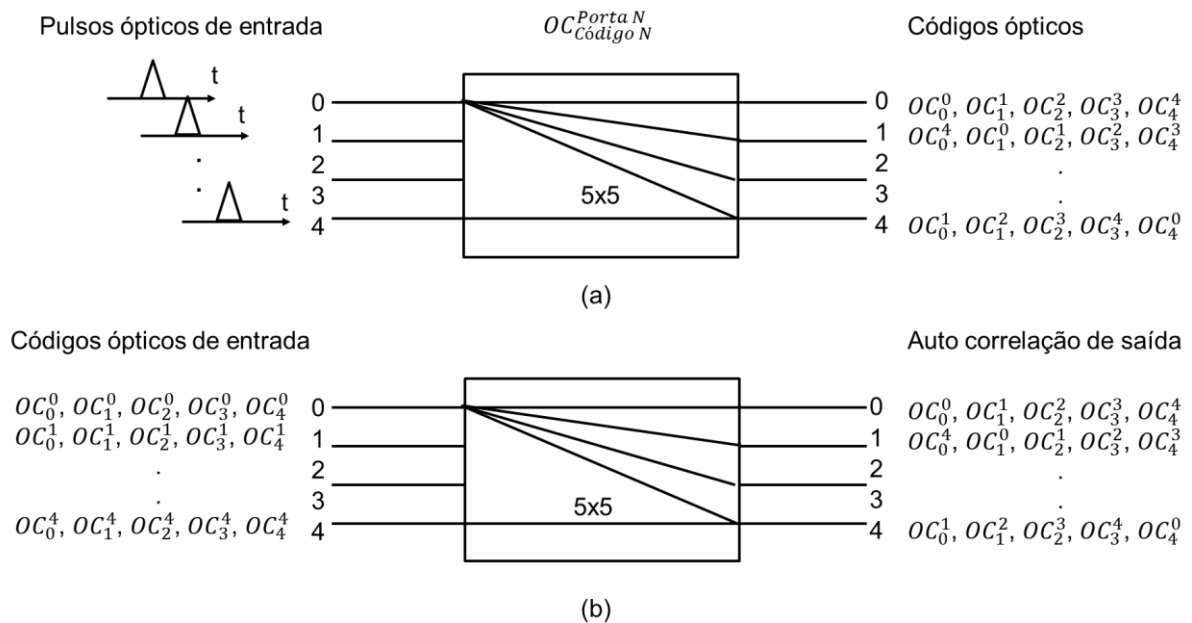


Fig. 2.12 – Propriedade cíclica de um codificador/decodificador multiportas 5×5 : (a) codificação; (b) decodificação [21]

2.3.4. Códigos ópticos

Aplicações OCDM-PON necessitam de sequências de códigos ópticos que apresentem máxima auto correlação, mínima correlação cruzada e grande cardinalidade, simultaneamente. Para redes CDMA sem fio as sequências de códigos são classificadas em: *Prime e Gold* [42].

Em redes OCDMA podem ser classificados em:

- *On Off Keying* (OOK): utilizado em sistemas OCDMA não coerentes de detecção direta, onde o bit "1" representa presença de sinal óptico e o bit "0" a ausência.
- *Orthogonal Optical Code* (OOC): utilizado em sistemas OCDMA por meio da *Differential Phase Shift Keying* (DPSK), onde a representação do bit está associada a um deslocamento de fase π em pulsos de igual amplitude, cuja detecção é feita com receptor balanceado, no qual a diferença entre o sinal recebido e uma versão deslocada corresponde ao sinal enviado [43].

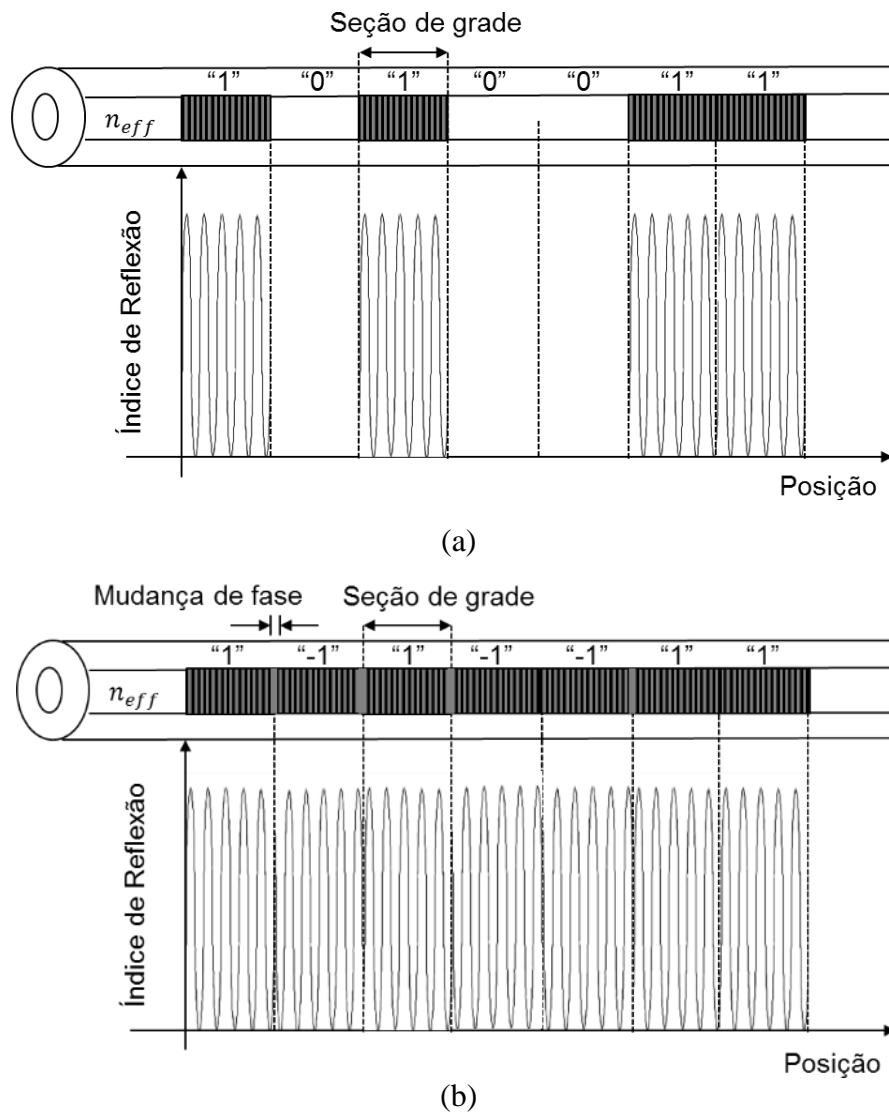


Fig. 2.13 – Sistema de multiplexação OCDM [21]: (a) OOK coerente; (b) PSK (BPSK) não-coerente [21]

2.4. 10GE-(WDM/OCDM)-PON

No contexto das redes NG-PON3, uma tecnologia com uma abordagem promissora para ampliação de capacidade de transmissão e de número de usuários nas redes ópticas passivas atuais é a rede 10GE-(WDM/OCDM)-PON, que aumenta o número de usuários ativos, bem como eleva a capacidade de transmissão de todo o sistema.

Assim como a tecnologia híbrida TWDM-PON, as redes 10GE-(WDM/OCDM)-PON utilizam os domínios de tempo (TDM), comprimentos de onda (WDM) e códigos ópticos (OCDM) para multiplexação de vários canais em um único sinal óptico. Essa arquitetura da PON é a utilizada no presente trabalho e apresentada na Fig. 2.13 (a) e (b). Nesta arquitetura

são utilizados os codificadores/decodificadores multiportas baseados em arranjo de guias de onda AWG [36].

O intervalo entre os comprimentos de onda é ordenado de acordo com a faixa espectral livre (FSR) do AWG e, além disso, os códigos ópticos possibilitam a reutilização de todos os comprimentos de onda. Esse esquema possibilita m pacotes TDM, n códigos OCDM e k comprimentos de onda [14]. Nesse contexto, uma taxa de transmissão agregada é dada por $Gbps \times n \times k$, com uma taxa de transmissão em *upstream* de $10Gbps/m$ para cada ONU. Por exemplo, para uma arquitetura com 16 ONUs ($m = 16$), 8 códigos ópticos ($n = 8$) e k comprimentos de onda apresenta uma taxa agregada de transmissão de $k \times 80 Gbps$ e taxa de transmissão de $600 Mbps$ individual. O mecanismo para OCDM para elaboração do conjunto de códigos ópticos pode ser descrito considerando-se o AWG com N entradas/saídas no domínio do tempo. Se um pulso de luz curto é direcionado a uma interface de entrada de um equipamento, N cópias do pulso são geradas pelo acoplador estrela da entrada, com fase dada pela configuração circular de Rowland [36]. O pulso óptico atravessa diferentes caminhos na rede e o acoplador em estrela de saída recombina os pulsos para a construção de N códigos nas interfaces de saída dos equipamentos. Cada código PSK é obtido por meio da combinação de N *chips* ópticos e o atraso diferencial do caminho no arranjo é escolhido de maneira que seja maior que a largura do pulso de entrada, de maneira os *chips* na codificação óptica não sobreponham. Assim, cada código PSK é obtido através da combinação de N pulsos de luz com diferença de fase. O intervalo de *chip* (T_c), que representa a quantidade de intervalo de tempo entre dois pulsos consecutivos em cada código óptico é dado por $\Delta\tau = n_s \Delta L / c$, sendo n_s o índice de refração dos guias de onda e c a velocidade da luz [14]. O intervalo de *chip* é igual ao inverso da FSR e o número de códigos gerados (cardinalidade) depende da combinação de pulsos na entrada do dispositivo. Entretanto, empregando uma combinação conservadora $N/2$, pode-se obter uma cardinalidade dada pelo binômio $\binom{N}{N/2}$ ou $\frac{N!}{(N/2)!(N-N/2)!}$. Nota-se que N é o comprimento do código será N e a máxima correlação desses códigos dada por $(N - 1)^2$ e máxima auto correlação dada por N^2 [14][15].

Um nó óptico, que representa ONU e unidades de OLT, consiste de um transceptor óptico e circuitos eletrônicos e as implementações posteriores da camada de *Medium Access Control* (MAC), conforme mostrados na Fig. 2.13 [36]. Esses nós ópticos são tradicionalmente aplicados em PON que combinam TDM-PON com multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) em uma multiplexação PON híbrida de tempo e comprimento de onda

[16][36]. Os blocos do transceptor são constituídos tanto de componentes ópticos como de eletrônicos.

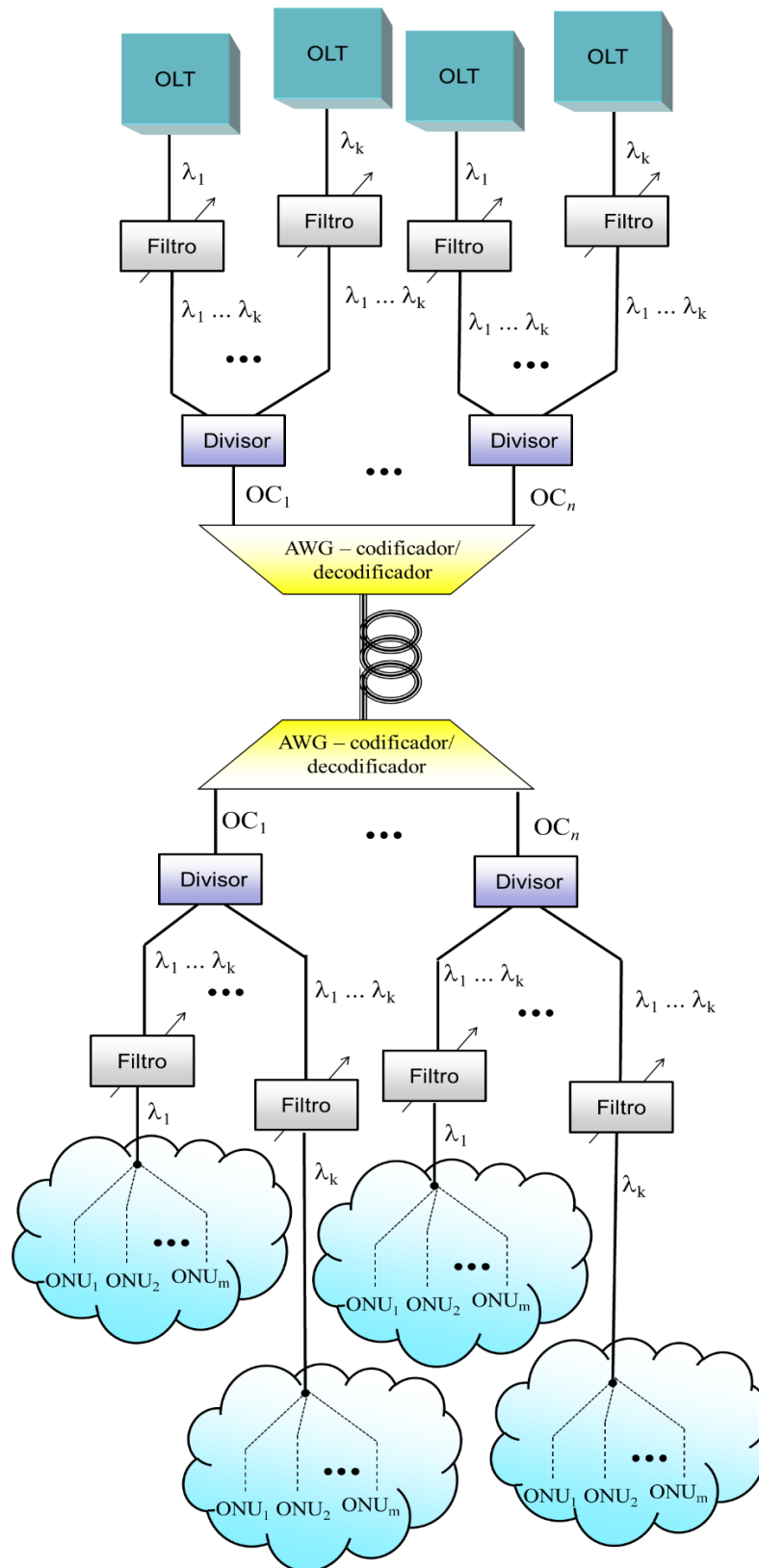
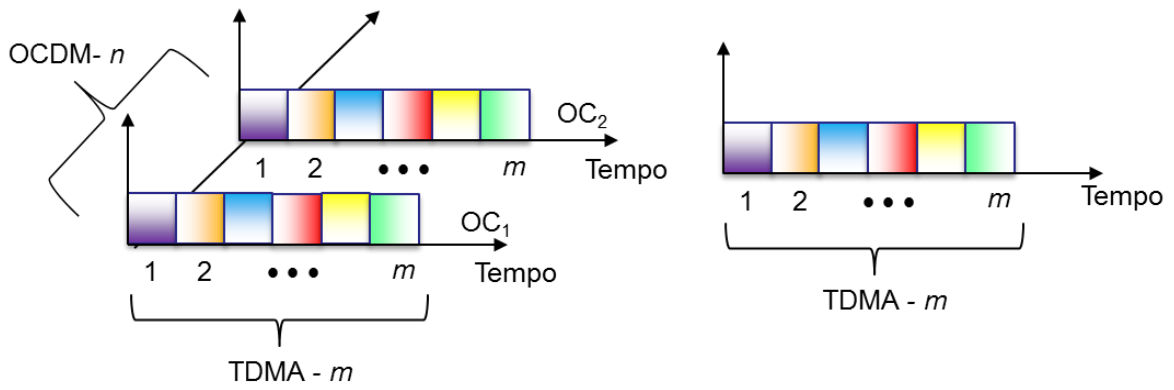
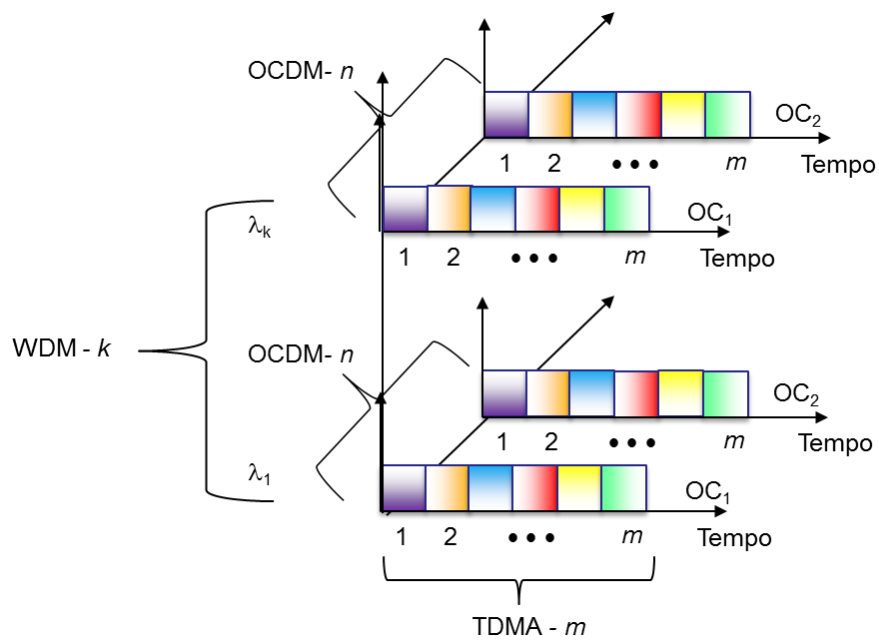


Fig. 2.14 - Topologia de rede 10GE-(WDM/OCDM)-PON: Arquitetura PON



(a)



(b)

Fig. 2.15 - Topologia de rede 10GE-(WDM/OC2M)-PON: (a) esquema de multiplexação OC2M/TDMA, (b) esquema de multiplexação WDM/OC2M/TDMA

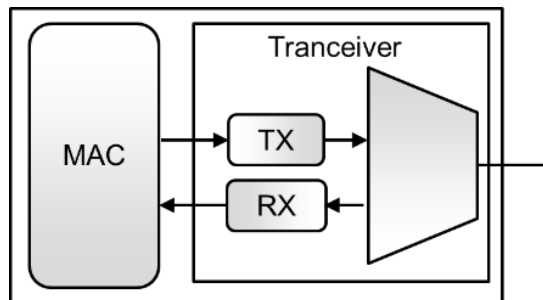


Fig. 2.16 – arquitetura de nó óptico PON

3. Mecanismos de eficiência energética em redes PON

Segundo Pickavet et al [44], no ano de 2011, as ICTs (*Information and Communication Technology*) foram responsáveis por um valor entre 2% e 4% do total de lançamento de carbono na atmosfera e proporcionalmente essa emissão de gases poderia dobrar até o ano de 2020. Do ponto de vista de consumo, as ICT, segundo [45], já absorvem cerca de 4% do total de energia elétrica produzida globalmente. Com isso, tanto a emissão de gases como o consumo de energia tendem a aumentar, devido à crescente demanda de largura de banda. Isso implica em infraestruturas cada vez mais sofisticadas para geração, transmissão e distribuição de energia. Nesse ponto, enquanto as fontes de fornecimento de energia sustentáveis (eólica, solar, marés, etc.) não puderem servir como as principais fontes da matriz energética, os meios baseados em fontes não-renováveis (petróleo, gás, carvão, etc.) continuarão a ser utilizados, tornando-se relevante evitar desperdícios e realizar o aproveitamento máximo dos recursos disponíveis.

No contexto das redes PON inseridas nessas ICT, diversos estudos e aperfeiçoamentos de técnicas para economia energia têm sido realizados. De uma forma geral, essas pesquisas têm como foco principal o desenvolvimento de metodologias para quantificar o consumo de energia das redes PON de modo a aumentar as suas eficiências energéticas. Dentre as metodologias mais aplicadas estão o *sleep mode* [16] e [22], o PSO [18][19], códigos corretores de erro [35] e armazenamento de dados em *buffer* [43].

No contexto das redes PON, os mecanismos de eficiência energética (EE) são classificados de acordo com a camada física em que são implementados [16]: camada física, camada de enlace de dados e camada híbrida (ambas). Normalmente, o foco da eficiência energética na camada física tem como objetivo melhorar os aspectos construtivos de dispositivos e equipamentos. Nesse ponto, um alto nível de integração é bastante importante para economizar energia. Por outro lado, o foco da eficiência energética na camada de enlace está na aplicação de técnicas de gerenciamento que têm como objetivo diminuir o consumo de potência global. As técnicas de maior sucesso são baseadas na camada de enlace e colocam dispositivos ou partes ociosas da ONU em *sleep* [16].

A eficiência energética nas redes PON é obtida basicamente desligando-se componentes ou funções da ONU quando esta estiver completamente sem qualquer atividade [22]. Os tipos de economia de potência na XG-PON e na 10GEPON são bastante similares e são classificados conforme mostrado em [16][20][22]: *power shedding*, *dozing* e *sleep mode*, sendo esta última subdividida em *deep sleep* e *fast sleep*.

De uma maneira teórica e generalista, o *sleep mode* é uma metodologia pela qual são reduzidos os níveis de potência de equipamentos e dispositivos eletrônicos. Isso permite uma economia significativa no consumo de energia elétrica se comparado com o consumo de energia de um equipamento ou dispositivo em funcionamento pleno. Simultaneamente, isso permite a economia de tempo e de recursos, uma vez que não é necessário reinsserir instruções ou mesmo aguardar um determinado equipamento reiniciar seu funcionamento.

Dentro do contexto das redes PON, o *sleep mode* tem como objetivo um equilíbrio entre o consumo de potência e o tráfego na rede óptica, por meio da redução dos níveis de potência de ONU e OLT. Isso é executado por meio do desligamento total, ou parcial dos transceptores e de circuitos de processamento ou ainda de partes desses quando o tráfego em *downstream* está abaixo da capacidade máxima de processamento. A maioria das técnicas e estudos recentes que abordam o *sleep mode* têm como foco a economia de recursos na ONU, com a OLT gerenciando esses processos e ambas podem ter sua parcela de contribuição.

3.1. *Sleep mode*

3.1.1. *Power shedding mode*

Essa técnica utiliza as interfaces da ONU, classificando-as como essenciais, as quais devem permanecer ativas o tempo todo, e não essenciais, sendo que estas poderiam, teoricamente, ficar inativas por um determinado intervalo de tempo sem que isso tenha impacto no desempenho do equipamento de transmissão, sendo necessário, para isso manter os transceptores da ONU sempre ativos à espera de dados advindos da OLT. O *power shedding mode* se utiliza de redução dos níveis de potência para funções e serviços não essenciais (interfaces, por exemplo) enquanto o enlace óptico é mantido completamente operacional.

Essa técnica foi desenvolvida originalmente para ser aplicada em equipamentos alimentados em corrente alternada (CA) que pudessem apresentar falhas de alimentação e é aplicada em telefones celulares, notebooks e monitores. No contexto de redes ópticas passivas PON especificamente, cada interface da ONU recebe uma classificação de prioridade, que lhe sinaliza um determinado intervalo de tempo na qual essa interface tem que estar ativa ou não. Além disso, o *power shedding mode* é capaz de verificar períodos em que determinadas interfaces da ONU não estão sendo utilizadas, visando economizar energia desligando-as, sendo, porém, da OLT a responsabilidade pelo controle e gerenciamento do consumo de energia da ONU.

3.1.2. *Deep sleep mode*

O *deep sleep mode* (modo de hibernação profunda, em tradução livre) é a técnica que mais economiza recursos. Possui como base o desligamento completo da maioria das funcionalidades, interfaces, transmissores e receptores durante um determinado intervalo de tempo, mantendo ativos opcionalmente apenas algumas funções como detecção de atividade de tráfego e de sincronização (*clock*). Uma ONU pode ser retirada do *deep sleep mode* através da detecção de tráfego de *upstream* ou *downstream* ou ainda ao final de cada intervalo de tempo determinado. A OLT é informada que a ONU está em *deep sleep mode*, mas com esta preparada para receber tráfego de *downstream* de maneira a se evitar perda de informação, permitindo uma ressincronização mais rápida da ONU com a OLT ou mesmo evitando a geração de alarmes de defeito na ONU. Em alguns casos, o próprio ponto de última milha onde está fisicamente alocada a ONU pode optar por desligar manualmente seu equipamento.

3.1.3. *Dozing mode*

O *dozing mode* (modo soneca, em tradução livre) tem a função de desligar o transmissor da ONU quando essa não tiver dados a serem transmitidos, enquanto mantém a recepção da ONU ativa o tempo todo. O transmissor da ONU (*upstream*) pode ser desligado em determinados intervalos de tempo enquanto o seu receptor (*downstream*) fica ligado o tempo todo, ou seja, o *upstream* fica inativo e o *downstream* ativo retendo o tráfego até uma requisição de envio da OLT. A OLT pode mandar requisições de envio de tráfego constantes, mas sem expectativa de envio real de informação, visando garantir que a ONU não tenha perda de dados antes de serem enviados.

3.1.4. *Fast sleep mode*

A técnica *fast sleep mode* (modo de hibernação rápida, em tradução livre) permite ciclos de hibernação da ONU em determinados intervalos de tempo, sendo o perfil de consumo semelhante ao observado no *deep sleep mode*, ou seja, a ONU se desliga quase que por completo, exceto seus circuitos responsáveis pela detecção de informação e sincronismo (*clock*). A ONU, fora desse período de desligamento, está completamente ativa, sendo que o controle desses intervalos de desligamento é programado na ONU. A OLT retém a informação em seus *buffers* e faz a transmissão no intervalo de atividade da ONU após sua ressincronização com a rede. Nessa técnica, a ONU perde o tráfego em *downstream* a ela encaminhado e desperta somente quando recebe um estímulo interno para que seja novamente

ativada ou quando um intervalo de hibernação determinado localmente se acaba. O *fast sleep mode* baseia-se na alternância de períodos (ciclos) de hibernação e de atividade. Nos primeiros o transceptor da ONU é completamente desligado, bem como todas as funções não essenciais. Já nos períodos de atividade, o transceptor óptico e as funções de suporte necessárias estão ligadas. O levantamento de informações necessárias para seleção e escolha do modo de redução dos níveis de potência é feito por meio de um canal de serviço (sinalizações) entre a OLT e a ONU.

Observando-se a Fig. 3.1, é possível verificar os intervalos de *sleep* da ONU, a qual apresenta um consumo de energia bastante baixo. A cada intervalo cíclico uma sinalização entre ONU e OLT verifica se é necessário fazer a transmissão de dados, que podem estar retidos nos buffers. Caso não exista informação alguma, a ONU entra em novo intervalo de *sleep* até outra sinalização de verificação de tráfego. Caso exista informação a ser transmitida, o equipamento é resincronizado com a rede e faz-se a transmissão e/ou recepção dos dados até que não exista tráfego remanescente. A ONU volta ao estado de hibernação até outra sinalização que indique novo tráfego de *upstream* e/ou *downstream*.

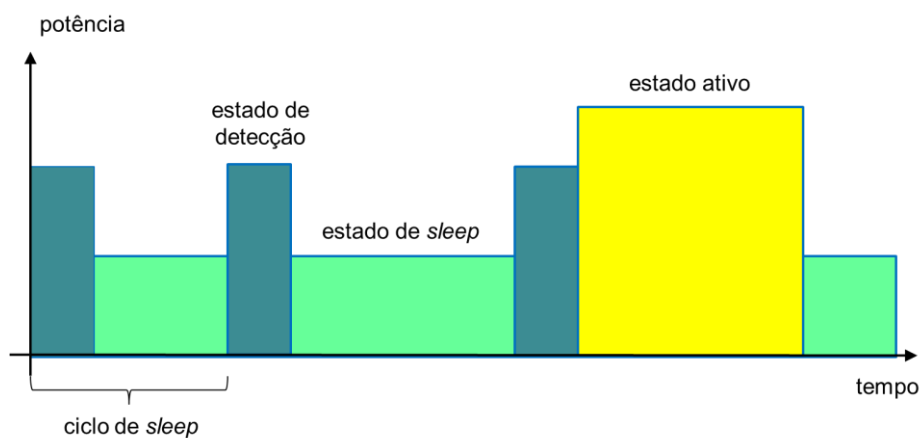


Fig. 3.1 – Variação de níveis de potência para ONU em *fast sleep mode* [16]

As técnicas baseadas em *sleep mode* têm como base os estudos de consumo de potência das redes PON, analisando seus perfis de consumo. As redes TDM-PON possuem diversos estudos que verificam possibilidades de redução no consumo [15][19], mas também são aplicadas em redes WDM-PON [43][46] e OCDM-PON [47].

Uma rede TDM-PON que apresenta configuração em uma topologia em estrela (*point-to-multipoint*) faz uma transmissão em *broadcast* OLT para a ONU. Mesmo em redes de capacidade de 1 Gbps (EPON, GPON) e de 10 Gbps (XG-PON, 10GE-PON) a OLT gerencia

todas as informações, mas faz a transmissão indiscriminadamente, ou seja, compete à ONU filtrar e tratar os dados que realmente lhe são relevantes. Isso significa que os transceptores de todas as ONU ficam o tempo todo ativos, mas na verdade, têm utilidade real em uma pequena parcela do tempo, ou seja, são pouco aproveitados comparando-se o tempo real de recebimento de informação endereçada e o tempo total de atividade. O princípio de economia de energia baseia-se justamente nesses intervalos em que os transceptores não são estritamente necessários para o tráfego de informações naquela ONU, propondo seu desligamento total ou parcial nesses momentos, sem que, com isso, haja descarte de informação, queda de qualidade de serviço (QoS) da PON ou quaisquer outros problemas para rede. Em teoria, o sucesso desse princípio possibilita uma economia substancial de energia, visto que os transceptores da ONU passariam a ficar na maior parte do tempo inativos [22].

Outras variações do *sleep mode* como o *Bit Interleaving* vem sendo aplicado em redes PON (BiPON) [16]. A ideia é fornecer subsídios para que a ONU, antes de sincronizar, separar e corrigir eventuais erros, seja capaz de interpretar os bits que são e os que não são a ela destinados, de modo a deixar inativos os circuitos que executem as tarefas de processamento mencionadas quando a informação recebida não lhe é endereçada. Isso é feito usando-se o quadro de informação TDM, composto basicamente de um *header* (cabeçalho, em tradução livre) e um *payload* no qual a informação útil está contida. Os dados contidos no cabeçalho são analisados pela ONU, dando a ela informações acerca da velocidade de transmissão no destino final que é normalmente muito inferior à velocidade do enlace total (exceto em casos de rede ponto a ponto), quando a informação que lhe é útil é transmitida. Os resultados obtidos em [16] mostram uma economia de energia na ordem de 75%.

3.2. Otimização por Enxame de Partículas (PSO)

A Otimização por Enxame de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*) é uma técnica de otimização estocástica baseada em uma série de métodos e algoritmos heurísticos desenvolvidos por James Kennedy e Russell Eberhart em 1995 [48]. Foi inicialmente desenvolvida para estudar o comportamento social de pequenas populações como um bando de pássaros ou um cardume de peixes, mas acabou se mostrando eficiente no estudo de problemas de otimização, sendo aplicada atualmente em diversos ramos da física, química, economia e engenharia.

A técnica busca otimizar um problema de forma iterativa buscando uma medida máxima ou mínima. Por exemplo: máxima eficiência de produção, ponto mínimo de uma função, etc. A partir de uma determinada função em um espaço delimitado de busca ou

pesquisa, busca-se uma solução candidata a partir de uma população de soluções candidatas, denominadas “partículas” dentro de um espaço delimitado de busca ou pesquisa fazendo-se uso de parâmetros matemáticos que determinam a posição e a velocidade dessas partículas. O movimento de cada partícula é influenciado pela sua melhor posição individualmente já encontrada, bem como a posição global do restante da população de partículas dentro de um delimitado espaço de busca ou pesquisa. O objetivo é fazer a nuvem de partículas convergir rapidamente para as melhores soluções possíveis.

Não se verificam, no entanto, todas as soluções candidatas existentes, mas sim as consideradas mais interessantes, observando-se o comportamento corporativo das partículas havendo uma comunicação entre elas.

A técnica de otimização PSO é uma meta-heurística, já que assume poucas ou nenhuma hipótese acerca do problema a ser otimizado e pode ser aplicada em grandes espaços de soluções candidatas. Porém, como toda meta-heurística, não garante uma solução ótima em todos os casos.

Qualitativamente, pode-se compreender a PSO comparando-a com um enxame de abelhas, por exemplo. As abelhas buscam alimento em uma região que seja densamente ocupada por flores, pois nesse tipo de local é maior a possibilidade de haver pólen em abundância. Inicialmente, cada abelha voa de maneira dispersa no espaço, buscando o local que tenha observado uma maior quantidade de flores. Já um enxame, sabe coletivamente qual a região, dentre todas as já exploradas, a que possui a maior quantidade de flores. Cada abelha faz seu movimento individual de acordo com estes dois direcionamentos até um local intermediário. É possível que a abelha, durante o percurso, encontre um local mais interessante, com maior quantidade de flores do que o já conhecido por ela (solução ótima local) ou pelo enxame (solução ótima global) até aquele momento. Nesta última hipótese, todo o enxame passa a se orientar para essa nova direção. Após algum tempo, é possível que o enxame encontre um local ainda melhor com maior densidade de flores e a movimentação é novamente alterada para esse local, repetindo-se o processo por diversas vezes.

Matematicamente, as soluções candidatas ou partículas do PSO se deslocam pelo espaço de busca ou pesquisa respeitando determinadas regras, por exemplo: limitação do tamanho da nuvem a ser analisada [49-52] como soluções menores que zero, o fato das partículas não poderem ocupar o mesmo lugar no espaço (colisões) e/ou evitar uma convergência prematura a um ponto ótimo (poucas iterações), por exemplo. A movimentação de cada partícula depende da melhor posição particular por ela já conhecida, bem como da melhor posição global em todo o espaço de busca ou pesquisa. Na medida em que posições

mais interessantes são encontradas, essas informações passam a orientar os movimentos das partículas. O processo se repete iterativamente com o objetivo (mesmo que não garantido) de se encontrar em algum momento uma solução que seja suficientemente satisfatória (solução ótima).

Formalmente, seja uma função $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ a função custo (também chamada de função erro, função objetiva ou função *fitness*) que se deseja minimizar. A função f toma como argumento uma solução candidata, representada como um vetor de números reais e fornece como resultado um número real que indica o valor da função custo para a solução candidata obtida. As melhores posições correspondem aos melhores valores da função custo f . O objetivo é encontrar uma solução x que verifique $f(x) \leq f(x) \forall x \in \mathbb{R}^n$, implicando em um x mínimo global. O processo inverso, ou seja, a maximização, pode ser obtida utilizando-se a função também definida como $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, mas com objetivo de se encontrar $(x) \geq f(x) \forall x \in \mathbb{R}^n$.

Detalhando-se alguns pontos importantes, \mathbb{R}^n é o espaço delimitado de busca em que cada elemento é uma solução candidata possível e x é a solução ótima. Já o n expressado refere-se à dimensionalidade do espaço de busca ou pesquisa. Observa-se que para uma função f diferenciável, o cálculo do resultado da função custo pode fornecer um número mínimo ou máximo com facilidade. Porém, em casos reais, o valor da função custo não é conhecido inicialmente, o que provoca um “voo às cegas” a princípio, devendo-se aplicar alguns parâmetros para se obter algum valor na saída da função. Esse resultado é uma solução candidata e é a solução da função custo nessa primeira iteração

A Fig. 3.2 [53] mostra uma determinada região de uma curva obtida através de uma função f . Ela mapeia um parâmetro unidimensional (números reais \mathbb{R}) por outra função também unidimensional (também números reais \mathbb{R}), sendo que a ordenada ilustra as soluções candidatas e a abcissa os resultados da função custo ao se aplicar essas soluções candidatas. Nessa função de otimização é possível observar uma solução candidata máxima local e uma solução candidata máxima global.

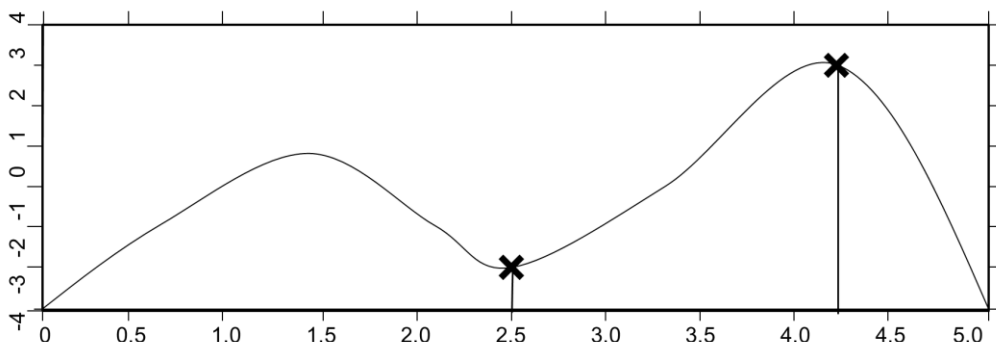


Fig. 3.2 – Ponto máximo de uma função delimitada f [53]

A solução candidata máxima global encontra-se no ponto cujo eixo y (ordenada) apresenta valor 3 e seu respectivo correspondente no eixo x (abscissa) 4,2 formando o ponto (3; 4,2). A solução máxima local, por sua vez, é obtida dentro de uma área mais restrita do espaço de busca ou pesquisa. Por exemplo, ao restringir-se a busca ao intervalo entre 1 e 2,5 para o eixo das abscissas. A solução candidata local é então o ponto com coordenadas (2,5; -3).

Inicialmente, o algoritmo da PSO escolhe aleatoriamente soluções candidatas no espaço de busca ou pesquisa limitado, conforme mostrado na Fig. 3.3 [53], no qual se busca uma maximização global unidimensional. O espaço de busca ou pesquisa é mostrado ao longo do eixo x e a curva mostra a função custo. Observa-se que a o algoritmo da PSO não possui relação com a função custo e não tem a capacidade, portanto, de avaliar de as soluções candidatas se aproximam ou se afastam dos máximos local e global. O algoritmo da PSO simplesmente utiliza a função custo para avaliar suas soluções candidatas e opera de acordo com os valores resultantes do domínio de busca ou pesquisa.

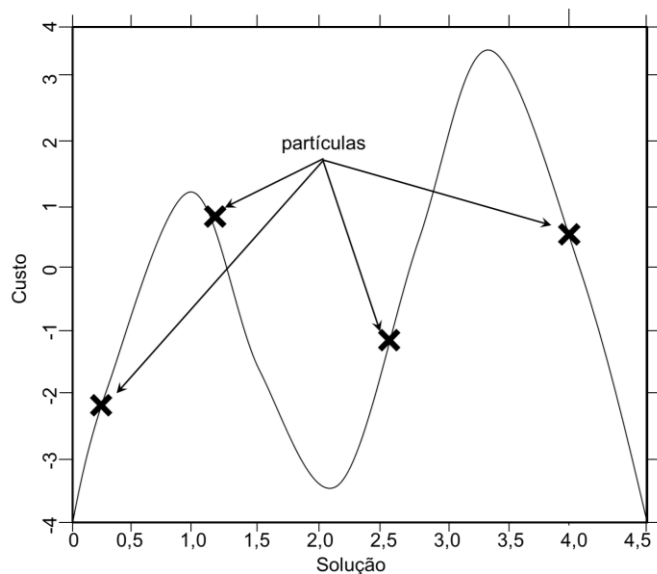


Fig. 3.3 – Estado inicial da PSO [53]

Um algoritmo PSO consiste basicamente de três passos, que se repetem até que uma condição de parada seja obedecida:

- 1) Avaliação da situação de cada partícula;
- 2) Atualizar os valores da melhor solução candidata individual e global;
- 3) Atualizar velocidade e posição de cada partícula.

Assim, um algoritmo PSO básico pode ser descrito como: seja S o número de partículas na nuvem, cada uma tem uma posição $x_i \in \mathbb{R}^n$ no espaço de pesquisa e uma

velocidade $v_i \in \mathbb{R}^n$. Seja $b_p(p_i)$ a melhor posição conhecida por uma partícula $p(i)$ e $b_g(g)$ a melhor posição global conhecida.

Cada partícula mantém sua posição, composta pela solução candidata (avaliação e velocidade). A cada iteração, a partícula se ajusta usando sua avaliação de posição e sua velocidade em direção à direção sua melhor performance (solução candidata local) e a melhor performance de sua vizinhança (solução candidata global), de maneira que ocorre uma soma de três vetores combinados linearmente que é a base de uma PSO básica, ilustrado na Fig. 3.4 [53].

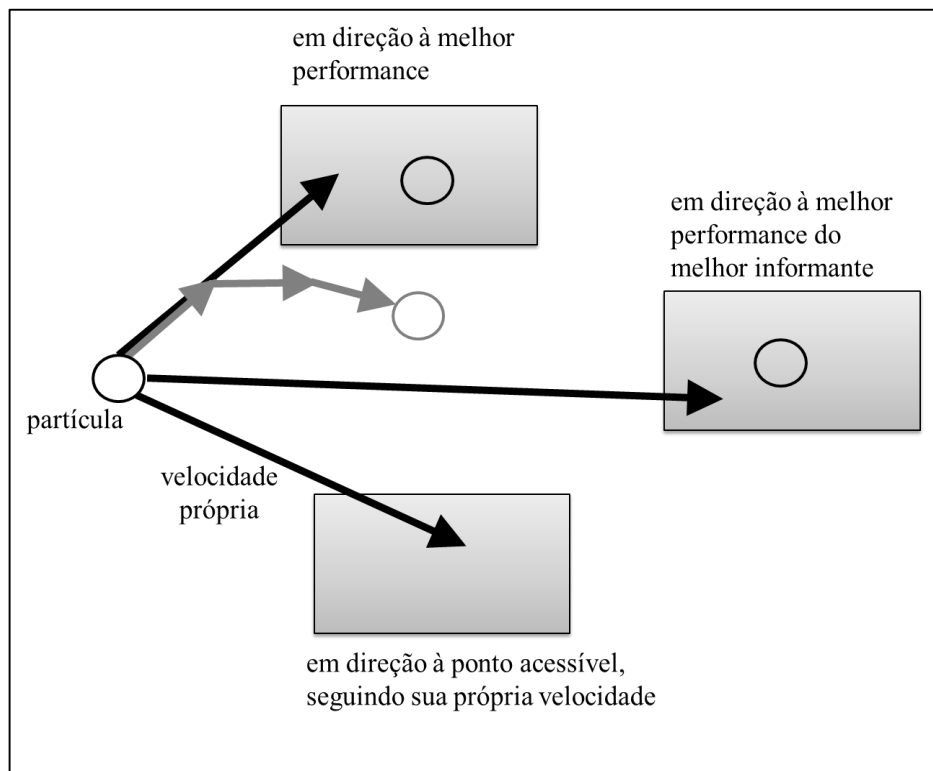


Fig. 3.4 – Algoritmo PSO básico [53]

O algoritmo mostrado na Fig. 3.4 anteriormente é apenas o de um PSO básico. Existem, entretanto, outras variações de algoritmos para PSO que determina velocidades iniciais nulas [54] e variações que incluem simplificações [4][48], otimização multiobjetiva [55][56], além de algoritmos binários, discretos e combinacionais.

4. Alocação de recursos em redes PON

A alocação de recursos permite uma maior capacidade e flexibilidade na utilização dos recursos disponíveis na rede. Os algoritmos heurísticos como *Local Search*, *Simulated Annealing*, *Genetic Algorithm* (GA), Otimização por Enxame de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*), *Ant Colony Optimization* (ACO), assim como a metodologia *Game Theory* (GT) podem ser utilizadas para regular a potência transmitida, a variação de taxa de bit e o número de usuários ativos de maneira a maximizar o *throughput* agregado das redes ópticas [18][19][55-59]. O problema da otimização da relação sinal-ruído de interferência (SNIR – *Signal-to-Noise Interference Ratio*) se apresenta como um desafio complicado nas redes OCDM, uma vez que a interferência de acesso múltiplo (MAI) introduz o problema do efeito *near-far* [35]. Além do mais, se as distâncias dos trechos entre os nós forem comparativamente muito diferentes entre si, como realmente acontece nas redes PON, a potência do sinal recebido a partir de vários nós será significativamente diferente. Assim, considerando-se um nó óptico como referência, o desempenho dos nós mais próximos será várias ordens de magnitude melhor que a dos nós mais distantes. Então, um controle de potência eficiente é necessário para se lidar com esse problema, melhorar a performance e o *throughput* da rede; que pode ser atingida através da otimização do SNIR, como proposto por Tarhuni em [35]. Nesse caso, que é análogo ao sistema celular CDMA, a política de controle de potência (centralizada ou distribuída) é uma das questões mais importantes, devido ao seu impacto significativo tanto na performance como na capacidade da rede [19].

O controle de potência é a maneira mais eficiente de se evitar o problema do efeito *near-far* e incrementar a SNIR. Nesse contexto, o procedimento de otimização heurística e evolucionária, como a otimização utilizando a PSO, é utilizada com objetivo de solucionar eficientemente o problema da alocação de recursos (quase-)ótimos, incluindo a otimização da SNIR em redes WDM/OCDM com qualidade de serviço (QoS) e parâmetros de eficiência energética [18][19][56]. O método de otimização baseadas na abordagem heurística da PSO é interessante devido à relação de equilíbrio entre performance e complexidade e também devido ao equilíbrio com os métodos de otimização que aplicam inversão matricial, procedimentos numéricos, assim como quando comparadas com outras abordagens heurísticas [19][60–62].

4.1. Formulação do Problema de Alocação de Recursos

A fim de se atingir uma qualidade de serviço (QoS) específica, que está associada a uma taxa de erro de bit (BER) máxima tolerada pelo i -ésimo nó óptico, a relação portadora -

interferência com ruído (CIR) necessária no decodificador do receptor da rede pode ser definida como [35]:

$$\Gamma_i = \frac{p_i G_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^K p_j G_{ij} + 2\sigma^2} \geq \Gamma^* \quad (4)$$

sendo p_i é a potência do i -ésimo nó, K é o valor dimensional do vetor coluna da potência óptica transmitida ($\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]^T$), $2\sigma^2$ representa a potência total de ruído recebido, uma vez que o valor da constante 2 é levada em conta devido aos dois modos de polarização apresentados em uma fibra monomodo. Γ^* representa o valor da CIR desejável, enquanto os elementos G_{ij} representam os pares de conexões de transmissão-recepção, que em unidades lineares que consideram a perda de potência causada pela propagação na fibra, é dada por [4]:

$$G_{ij} = 2a_c L_c e^{(-\alpha_f d_{ij})} \quad (5)$$

sendo que α_f representa a atenuação da fibra (km^{-1}), a_c é a atenuação do codificador/decodificador (unidades lineares) e L_c representa a soma das perdas internas dos nós ópticos. Os nós de transmissão e recepção criam um caminho virtual baseando-se no código e o comprimento total do enlace que é dado por:

$$d_{ij} = d_i^{tx} + d_j^{rx} \quad (6)$$

sendo d_i^{tx} é o comprimento do enlace do nó de transmissão para o acoplador em estrela e d_j^{rx} é o comprimento do enlace entre nó de recepção e o acoplador em estrela.

Percebe-se que o ruído de recepção usual σ^2 em [18] inclui o ruído térmico, o ruído de disparo e o ruído do pré-amplificador óptico. No entanto, a *Amplified Spontaneous Emission* (ASE) no pré-amplificador óptico será o principal fator limitante (adicionando-se à MAI), em comparação com o ruído térmico ao ruído de disparo no receptor [35]. Neste trabalho, a potência de ruído no receptor é representada por [61]:

$$\sigma^2 = 2n_{sp} h f (G_{amp} - 1) B_0 \quad (7)$$

sendo que n_{SP} representa o fator de emissão espontânea, tipicamente na faixa $n_{SP} \in [2;5]$, h é a constante de Planck, f representa a frequência da portadora, G_{amp} é o ganho do amplificador e B_0 representa a banda óptica. O SINR é obtido considerando-se a taxa de chip (R_C) e a taxa de bit (R_i) [61]:

$$\gamma_i = \frac{R_C}{R_i} \cdot \Gamma_i \quad (8)$$

O controle de potência nas redes ópticas pode ser expressado como um problema de otimização. Definindo-se o vetor de coluna de dimensão K da potência óptica transmitida $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]^T$, o problema do vetor de controle de potência óptica (OPC - *Optical Power Control*) consiste em encontrar o vetor de potência óptica \mathbf{p} que minimiza a função $J(\mathbf{p})$. O problema do OPC pode ser formulado como [18][19],

$$\min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} J(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} \mathbf{1}^T(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} \sum_{i=1}^K p_i \quad (9.a)$$

sujeito a $\Gamma_i \geq \Gamma^*$,

$$P_{min} \leq p_i \leq P_{max} \quad (9.b)$$

sendo que $\mathbf{1}^T = [1, \dots, 1]$ e Γ^* a CIR mínima para se obter o QoS desejado, conforme definido em (4). De fato, usando-se as notações da matriz, a eq. (4) pode ser escrita como $[\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}] \mathbf{p} \geq \mathbf{u}$, onde \mathbf{I} é a matriz identidade, \mathbf{H} representa a matriz de interferência normalizada, cujos elementos avaliados pela equação $H_{ij} = G_{ij}/G_{ii}$ para $i \neq j$ e zero para outro caso, assim $u_i = \Gamma^* \sigma^2 / G_{ii}$. Substituindo-se a inequação pela equação, a solução otimizada do vetor de potência por meio da inversão de matriz pode ser obtida:

$$\mathbf{p}^* = [\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{u} \quad (10)$$

Esse vetor de potência óptica representa o caso do equilíbrio de potência nos nós receptores; de fato, \mathbf{p}^* em (10) representa a potência ótima necessária para se atingir a CIR desejada. Incrementando-se o valor da CIR resultaria em valores de potência óptica superiores, acompanhada por uma redução na eficiência energética global.

Uma política computacionalmente intensiva de controle de potência centralizada pode ser obtida por meio da solução de inversão matricial, como mostrado na eq. (10) [35]. O

nó central retém a informação de toda rede geral física e regularmente faz a atualização acerca sobre o estabelecimento da transmissão e sobre a dinâmica de tráfego. Na verdade, essas características são o inconveniente de políticas centralizadas de controle de potência.

4.2. PSO aplicada ao controle de potência em redes PON

A implementação de políticas de controle de potência adequadas às redes ópticas com base em abordagens heurísticas, especialmente a otimização pelo algoritmo de enxame de partículas (PSO), depende do desenvolvimento de procedimentos heurísticos para a evolução do vetor \mathbf{p} , a fim de alcançar os valores de potência ótimos definidos pela função de custo na eq. (10).

Observando-se novamente a Fig. 3.4, pode-se desenvolver um algoritmo PSO aplicado ao controle de potência em redes PON, que pode ser descrito como:

- Início
 - Para cada partícula $\mathbf{p} = 1, 2, \dots, \mathcal{G}$:
 - Iniciar a posição da partícula mediante um vetor aleatório uniformemente distribuído: $\mathbf{b}_p \sim U(\mathbf{b}_{min}, \mathbf{b}_{max})$, onde \mathbf{b}_{min} e \mathbf{b}_{max} são o limite inferior do espaço de pesquisa e o limite superior do espaço de pesquisa, respectivamente.
 - Inicializar a melhor posição conhecida da partícula em sua posição inicial:

$$\mathbf{b}_p[t] = \mathbf{b}_i[t]$$

- Se $f(\mathbf{b}_g[t]) < f(\mathbf{b}_i[t])$, atualizar a melhor posição global conhecida $\mathbf{b}_g[t] \leftarrow \mathbf{b}_p[t]$;
 - Inicializar a velocidade da partícula: $\mathbf{v}_i \sim U(-|\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{min}|, |\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{min}|)$;
- Enquanto não se cumprir o critério de parada definido por um limite máximo de interações ou por uma solução satisfatória, repetir:
 - Para cada partícula $\mathbf{p} = 1, 2, \dots, \mathcal{G}$:
 - Para cada dimensão $t = 1, \dots, n$:
 - Escolher número aleatórios: $\mathbf{U}_{p1}, \mathbf{U}_{p2} \sim U(0,1)$
 - Atualizar a velocidade da partícula

$$\mathbf{v}_p[t+1] = \omega[t] \cdot \mathbf{v}_p[t] + C_1 \cdot \mathbf{U}_{p1}[t](\mathbf{b}_p^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]) + C_2 \cdot \mathbf{U}_{p2}[t](\mathbf{b}_g^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t])$$

- Atualizar a posição da partícula $\mathbf{b}_p[t + 1] = \mathbf{b}_p[t]$
- Se $f(\mathbf{b}_p[t]) < f(\mathbf{b}_i[t])$, então:
 - Atualizar a melhor posição global conhecida: $\mathbf{b}_g[t] = \mathbf{b}_i[t]$
- Se $f(\mathbf{b}_g[t]) < f(\mathbf{b}_i[t])$,
 - atualizar a melhor posição global $\mathbf{b}_g[t + 1] = f(\mathbf{b}_g[t])$
 - Devolver g como a melhor posição global encontrada.

O índice da partícula é representado por \mathcal{P} . Assim, $\mathbf{v}_i(t)$ é a velocidade da partícula \mathcal{P} em um determinado instante t . Os parâmetros ω , C_1 e C_2 ($0 \leq \omega \leq 1,2$, $0 \leq \varphi_p \leq 2$ e $0 \leq \varphi_g \leq 2$), devem ser determinados com critério pelo próprio usuário do algoritmo, pois controlam o comportamento e a eficácia do modelo da PSO, sendo determinantes para o bom rendimento do algoritmo, conforme em [66-70] e podem ser definidos por diversos cenários de otimização, [71-73]. Os valores de \mathbf{U}_{p1} e \mathbf{U}_{p2} são aleatórios, sendo obedecido ($0 \leq \mathbf{U}_{p1} \leq 1$ e $0 \leq \mathbf{U}_{p2} \leq 1$) e podem mudar a cada iteração. O valor de $\mathbf{b}_p^{best}[t]$ é a melhor solução candidata individual para a partícula i em um determinado instante t e $\mathbf{b}_g^{best}[t]$ g_d é a melhor solução candidata global no instante de tempo t .

Cada um dos três termos da equação para a nova velocidade tem um peso diferente no algoritmo da PSO. O primeiro termo, $\omega[t]$, é o componente inercial determinando o peso da inércia da velocidade anterior para o cálculo da velocidade atual, responsável por manter a partícula em movimento na mesma direção do sentido original anterior e apresenta normalmente valores entre 0,8 e 1,2 que tanto pode atenuar a inércia da partícula ou acelerá-la no mesmo sentido original [72]. Normalmente, valores menores do coeficiente de inércia aceleram a convergência da nuvem para o valor ótimo, enquanto que valores maiores do coeficiente de inércia estimulam a busca em um maior espaço de busca ou pesquisa.

O segundo termo $C_1 \cdot \mathbf{U}_{p1}[t](\mathbf{b}_p^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t])$ é chamado de componente cognitiva e refere-se à memória da partícula fazendo-a tender a voltar a pontos do espaço de busca ou pesquisa em que teve sua melhor performance individual. O coeficiente cognitivo C_1 é o coeficiente de aceleração considerando-se as influências das melhores partículas, possui valor numérico normalmente próximo a 2 e influencia o tamanho do salto que a partícula toma em diversão à melhor solução candidata (melhor vetor-posição local) $b_p^{best}[t]$.

O terceiro termo $C_2 \cdot \mathbf{U}_{p2}[t](\mathbf{b}_g^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t])$ é chamado de componente social que influencia a partícula a se deslocar a melhor posição encontrada pela nuvem até aquele momento. O coeficiente social C_2 é o coeficiente de aceleração considerando-se as influências

das melhores posições globais na determinação da velocidade seguinte e, assim como C_1 , possui valor numérico próximo a 2 e representa o tamanho do salto que a partícula toma em direção à melhor solução candidata global (melhor vetor-posição global) $\mathbf{b}_g^{best}[t]$ que a nuvem possui até aquele momento.

As matrizes diagonais $\mathbf{U}_{p1}[t]$ na componente cognitiva e $\mathbf{U}_{p2}[t]$ na componente social possuem dimensão K , têm seus elementos como variáveis aleatórias com distribuição uniforme de aproximadamente $U \in [0, 1]$ gerados pela p -ésima partícula na iteração $t = 1, 2, \dots, \mathcal{G}$. Esses componentes influenciam seus respectivos componentes a uma influência estocástica nas componentes seguintes de velocidades obtidas iteração após iteração. Essa natureza estocástica influencia a partícula a se movimentar de maneira semi-aleatória altamente influenciada pela melhor solução candidata individual da partícula e pela melhor solução global da nuvem.

A p -ésima posição de partícula na t -ésima iteração é determinada pela potência do vetor-candidato $\mathbf{b}_p[t] = [b_{p1}^t \ b_{p2}^t \ \dots \ b_{pK}^t]^T$. A posição de cada partícula é atualizada usando-se o novo vetor-velocidade para essa partícula,

$$\mathbf{b}_p[t + 1] = \mathbf{b}_p[t] + \mathbf{v}_p[t + 1], p = 1, \dots, \mathcal{P} \quad (12)$$

sendo que \mathcal{P} é o tamanho da população. Com o objetivo de evitar que as partículas se movimentem desordenadamente no espaço de busca ou pesquisa, utiliza-se uma técnica denominada fixação de velocidade que é adicionado ao modelo da PSO e tem por finalidade limitar a velocidade de cada partícula [74]. Para um espaço de busca ou pesquisa na faixa $[-\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{max}]$, uma limitação de velocidade na faixa $[-\mathbf{v}_{max}, \mathbf{v}_{max}]$ onde $\mathbf{v}_{max} = K\mathbf{b}_{max}$. O valor K representa um fator de limitação de velocidade definido pelo usuário normalmente definido como $0,1 \leq K \leq 1,0$. Em muitas tarefas de otimização, o espaço de busca ou pesquisa não é centrado em zero e nesse caso a faixa definida $[-\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{max}]$ não é adequada. Caso o espaço de busca ou pesquisa seja definido por $[-\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{max}]$, define-se como $\mathbf{v}_{max} = K(\mathbf{b}_{max} - \mathbf{b}_{min})/2$.

A seguinte equação de objetivo único é utilizada neste trabalho com o anseio de se obter o vetor de controle de potência ótima [35]:

$$\text{maximizar } J(\mathbf{p}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathcal{F}_k^{th} \left(1 - \frac{p_k}{P_{max}} \right) \quad (13)$$

sujeito a $\gamma_k \geq \gamma_k^*$,

$$0 < p_k^l \leq P_{max},$$

$$R^l = R_{min}^l \quad \forall k \in K_l, \quad \forall l = 1, 2, \dots, L$$

sendo que L é o número de diferentes grupos de taxa de informação permitidas no sistema, e K_l é o número do usuário no l -ésimo grupo de taxa com taxa mínima dada por R_{min}^l . A função limiar em (13) é simplesmente definida como:

$$\mathcal{F}_k^{th} = \begin{cases} 1, & \gamma_k \geq \gamma^* \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (14)$$

onde o SNIR para o k -ésimo usuário, γ_k , é dado por (8). O termo $1 - \frac{p_k}{P_{max}}$ dá credibilidade para essas soluções com potência mínima em detrimento de outros usando altos níveis de potência [18].

O algoritmo PSO consiste na aplicação repetida da atualização de velocidade e posição (12). Utilizando-se da teoria apresentada, pode-se elaborar um pseudocódigo para o problema de alocação de potência para o PSO com um objetivo comum é apresentado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 - Algoritmo PSO contínuo para o problema de alocação de potência

Entradas: $\mathcal{P}, \mathcal{G}, \omega, C_1, C_2, V_{max}, R_{min}$; **Saída:** \mathbf{p}^*

início

1. Inicializa a população em $t = 0$;

$$\mathbf{B}[0] \sim U[P_{min}; P_{max}]$$

$$\mathbf{b}_p^{best}[0] = \mathbf{b}_p[0] \text{ and } \mathbf{b}_g^{best}[0] = \mathbf{p}_{max};$$

$$\mathbf{v}_p[0] = 0: \text{ velocidade inicial nula;}$$

2. enquanto $t \leq \mathcal{G}$

- a. calcular $J(\mathbf{b}_p[t]), \forall \mathbf{b}_p[t] \in \mathbf{B}[t]$, usando (12);

- b. atualizar a velocidade $\mathbf{v}_p[t], p = 1, \dots, \mathcal{P}$, relacionada a (13);

- c. atualizar as melhores posições:

para $p = 1, \dots, \mathcal{P}$

se $J(\mathbf{b}_p[t]) < J(\mathbf{b}_p^{best}[t]) \& R_p[t] \geq R_{\min}$,

$\mathbf{b}_p^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p[t]$

senão $\mathbf{b}_p^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p^{best}[t]$

fim

se $\exists \mathbf{b}_p[t] \mid [J(\mathbf{b}_p[t]) < J(\mathbf{b}_g^{best}[t])] \& R_p[t] \geq R_{\min} \& [J(\mathbf{b}_p[t]) \leq J(\mathbf{b}'_p[t]), \forall p' \neq p]$

$\mathbf{b}_g^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p[t]$

senão $\mathbf{b}_g^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_g^{best}[t]$

d. Desenvolve para uma nova população de partículas $\mathbf{B}[t+1]$, utilizando (12);

e. Selecciona $t = t + 1$.

fim

3. $\mathbf{p}^* = \mathbf{b}_g^{best}[G]$.

Fim

\mathcal{P} : tamanho da população.

$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_p, \dots, \mathbf{b}_{\mathcal{P}}]$ matriz da população de partículas de dimensão $K \times \mathcal{P}$.

G : número máximo de iterações do enxame.

\mathbf{p}_{\max} : vetor máximo de potência considerando a taxa de cada terminal.

R_{\min} : mínima taxa de dados comum a todos os usuários

A qualidade da solução atingida por qualquer processo de alocação de recurso em uma iteração pode ser medida pelo grau de proximidade que solução ótima foi encontrada, e pode ser quantificada através da média normalizada do erro quadrado (NMSE) quando o equilíbrio é atingido. Para o problema de alocação de potência, a definição da NSME é dada por:

$$NMSE[t] = \mathbb{E} \left[\frac{\|\mathbf{p}[t] - \mathbf{p}^*\|^2}{\|\mathbf{p}^*\|^2} \right] \quad (15)$$

onde $\|\cdot\|^2$ denota a distância euclidiana ao quadrado à origem, e $\mathbb{E}[\cdot]$ a expectativa do operador.

A figura de mérito utilizada como ferramenta para verificar a convergência do algoritmo de controle de potência óptica (OPC) direcionada para a solução ótima é a taxa de convergência (CR). A CR pode ser descrita como a razão entre solução da PSO após a t -ésima

iteração dividida pela solução da PSO após a convergência total, após encontrar uma solução ótima ou se atingir o número máximo de iterações. No contexto de otimização em questão, a referência à solução ótima é dada pela solução por inversão matricial. Recordando a formulação do problema de otimização na eq. (13), o CR pode ser expresso como [18]:

$$CR[t] = 1 - \left| \frac{J[t] - J[\mathbf{p}^*]}{J[\mathbf{p}^*]} \right| \quad (16)$$

sendo que \mathbf{p}^* é o vetor de solução de potência otimizada através no procedimento de inversão matricial.

4.3. Análise de complexidade

O equilíbrio entre a eficiência energética realizável e a complexidade computacional é determinada pela comparação entre a complexidade no tempo do mecanismo proposto e a complexidade no tempo do algoritmo DBA. Essa complexidade no tempo quantifica a porção de tempo despendida para que o algoritmo executar como uma função do formato de sua entrada. O mecanismo proposto, baseado no algoritmo PSO de alocação de potência, a complexidade computacional depende do número de operações de soma e de multiplicação, assim como o número de iterações para que atingir a convergência do algoritmo. Assim, a complexidade computacional do mecanismo de eficiência energética proposto é dado por $\mathcal{O}(m^2)$, onde m é o número de ONUs por comprimento de onda em cada código; esta complexidade polinomial foi encontrada em [75]. Além disso, a complexidade temporal do algoritmo DBA para PONs WDM-TDM é tipicamente $\mathcal{O}(u \cdot \log u)$ onde u é o número total de ONUs na PON [76]. O número máximo de ONUs suportados por uma PON de longa distância é normalmente 2048.

Nesse contexto, a complexidade computacional do algoritmo proposto baseado na PSO para alocação de recursos é de menor complexidade que o algoritmo DBA. Assim, a complexidade computacional adicional introduzida não afeta substancialmente a complexidade geral da rede, bem como a performance operacional da rede. [76].

5. Análise de Desempenho dos Mecanismos de Eficiência Energética em redes PON

As redes 10GEPON possuem mecanismos de eficiência energética que têm condições de ser utilizados nas redes 10GE-(WDM/OCDM)-PON. Porém, esses esquemas de redução de potência baseados somente na camada de enlace de dados em *sleep mode* são eficientes quando a utilização da rede é baixa. Quando a utilização da rede aumenta, o auxílio da camada física é necessário [16]. Nesse contexto, o mecanismo de EE proposto é baseado no esquema de redução de potência em *sleep mode* em conjunto com a otimização da potência de transmissão do transceptor, sendo a potência transmitida otimizada pelo algoritmo de PSO [18].

5.1. Descrição dos mecanismos de eficiência baseado na alocação de recursos

No *sleep mode*, a ONU pode ser desligada quando o *slot* de transmissão atribuído pela OLT não for destinado a aquela ONU. Essa atribuição é definida pelo *Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm* (DBA) [76]. Nos modos de *fast sleeping* a diferença é basicamente a fração de tempo gasta no modo de potência reduzida [76]. Além disso, esse tempo depende de detalhes de implementação do modo de redução de potência (sinalização de controle e inteligência) e características de *hardware* (por exemplo, tempo necessário para transições de estado). Portanto, no mecanismo proposto utiliza-se do *fast sleep* ou do *cyclic sleep* onde o início do período de hibernação inicia com o final do *slot* de *upstream* atribuído na ONU [16]. Além disso, o final do período de hibernação é especificado de maneira que seja deixado um tempo de espera suficiente para o *overhead* de sincronização. Assim, a ONU tem condições de entrar e sair do estado de hibernação sem perda de tráfego ou de interferir com o *upstream* de transmissão de outras ONU [76].

A utilização do controle de potência nas redes 10GE-(WDM/OCDM)-PON é capaz de melhorar a performance da rede em dois aspectos. Em primeiro lugar, o algoritmo de controle de potência baseado em PSO é utilizado de maneira a se obter a melhor SNIR possível, já que se trata de otimização por enxame de partículas e, portanto, estabelecer a potência de transmissão mais baixa (ideal) em cada ONU, de acordo com os níveis de QoS estabelecidos. Como consequência, a eficiência energética é melhorada substancialmente como mostrado por Durand e Abrão [18]. Em segundo lugar, o controle de potência poderá ser capaz de mitigar o MAI e o efeito *near-far* gerado pela variação da potência transmitida e as ONU ativas causadas pela utilização do *sleep mode*.

Em resumo, o mecanismo proposto é baseado no esquema de economia de potência em *sleep mode* em conjunto com o algoritmo de controle de potência baseado na PSO com o objetivo de ajustar a potência ótima a ser transmitida de acordo com o ciclo da DBA. Inclusive, cada nó óptico ativo é capaz de ajustar sua respectiva potência óptica de maneira a maximizar o número de bits transmitidos com um consumo mínimo de energia.

5.2. Modelamento do consumo de potência das ONU

O consumo de potência das ONU consiste de duas partes: *i*) consumo de energia do transceptor; e *ii*) o consumo dos circuitos eletrônicos que implementam as funções da camada *Medium Access Control* (MAC). Assim, considerando-se separadamente os consumos de potência transmitidas e recebidas, o consumo de potência na *i*-ésima ONU é dado por:

$$P_{ONU_i} = P_{TX_i} + P_{RX_i} + P_{EC_i} \quad (16)$$

sendo que P_{TX_i} , P_{RX_i} e P_{EC_i} são o consumo de potência do transmissor, receptor e dos circuitos eletrônicos, respectivamente. O P_{TX_i} é calculado pela *i*-ésima ONU considerando-se as seguintes componentes [4]:

$$P_{TX_i} = P_{Driver} + \overline{V_{Laser}I_{Laser}} + L_{Mod}P_{CW} \quad (17)$$

sendo que P_{Driver} representa a quantidade de consumo de potência do *driver*, $\overline{V_{Laser}I_{Laser}} = \overline{V_{Laser}I_{Laser}}$ é a potência média do laser, L_{Mod} representa a perda óptica de excesso do modulador e P_{CW} é a potência de saída da onda contínua do laser.

O P_{RX_i} é calculado como [4]:

$$P_{RX_i} = \frac{V_{In}}{R_{In}} \left[V_{Bias} + \frac{1}{n_{eo}\mathfrak{R}} \right] + P_{Amp} \quad (18)$$

sendo que V_{In} representa a tensão gerada com a potência recebida R_{In} é a resistência de entrada, V_{Bias} representa a tensão para a ativação do fotodiodo, n_{eo} é a eficiência de conversão de potência e \mathfrak{R} é responsividade do fotodiodo. O consumo de potência do pré-amplificador óptico é dado por [4]:

$$P_{Amp} = \frac{P_{in}(G_{amp} - 1)}{\eta_{EPCE}} \quad (19)$$

sendo que P_{in} representa a potência óptica de entrada do amplificador, G_{amp} é o ganho do pré-amplificador e η_{EPCE} é a eficiência de conversão de potência do amplificador. Essa eficiência de conversão de potência do pré-amplificador inclui os circuitos de gerenciamento, os controles de temperatura e termos de bombeamento do laser.

Finalmente, o terceiro termo de consumo de potência da i -ésima ONU, o termo P_{EC_i} , pode ser calculado considerando-se os dados de consumo de potência disponibilizados pelos *datasheets* dos componentes. Nesse estudo foi utilizado o valor $P_{EC_i} = 1,2W$ para o consumo de potência dos circuitos [16][55][56].

5.3. Modelamento do consumo de Energia em *sleep mode*

A fim de avaliar o consumo de energia ONU, presume-se que sua potência P_{ONU} refere-se à energia consumida enquanto as ONU estão ativas. Assim, a energia utilizada por um nó óptico fora do *sleep mode* é dada por:

$$E = T_{DBA}P_{ONU} \quad (20)$$

sendo que T_{DBA} é o tempo do ciclo (por exemplo, o tempo entre duas transmissões/recepções advindas da mesma ONU).

Além disso, a energia utilizada pela ONU no *sleep mode* é dada por:

$$E_{ef} = (T_s + T_w)P_{ONU} + (T_{DBA} + T_s + T_w)P_{Off} \quad (21)$$

sendo que T_s representa o *time slot*, por exemplo, o tempo alocado para cada ONU para transmissão/recepção, T_w é o tempo que a ONU leva para recuperar o *clock* e sincronização dos dados ao sair do estado de hibernação ou tempo do *overhead* e P_{Off} representa a potência consumida no modo de dissipação baixa de potência, por exemplo, enquanto a ONU está em hibernação ou na condição em que está completamente desligada. A potência P_{Off} depende do consumo individual dos componentes da ONU no estado de hibernação que é influenciado pelo design interno [55]. O consumo de potência total da ONU considerando-se o mecanismo de economia no modo hibernação é dado por [16][55]:

$$P_{ef} = \rho(1 + O_r)P_{ONU} + [1 - \rho(1 + O_r)]E_r P_{ONU} \quad (22)$$

sendo que O_r é a razão do *overhead* necessário para sincronizar a ONU, ρ representa a fração de utilização da ONU e E_r é fator proporcional para estimar a capacidade ociosa como uma fração da potência ativa.

A razão de economia de energia é utilizada para se comparar a eficiência dos mecanismos de economia de energia. Essa figura de mérito pode ser expressa como:

$$\eta_{ef} = \frac{E - E_{ef}}{E} \quad (23)$$

6. Resultados numéricos

Na Tabela 6.1 são ilustrados os parâmetros principais utilizados nas simulações numéricas em dois cenários distintos. Alguns parâmetros típicos de dispositivos, componentes e equipamentos foram arbitrados.

No primeiro cenário simulado foram empregados 16 códigos PSK (*Phase Shift Keying*) com comprimento de 16 chips e intervalo de chip de 5 ps (200 Gchips), que são capazes de processar 16 códigos ópticos (OC) simultaneamente. O codificador/decodificador AWG tem perda uniforme de aproximadamente 14 dB [78]. Esse esquema com 16 slots TDM ($m = 16$) e 16 OC ($n = 16$) é capaz de suportar 256 ONUs por comprimento de onda com uma taxa de *upstream* individual igual a 10 Gbps/m. O tráfego é computado sobre uma hora de grande ocupação do meio ($\rho = 1,0$). No cenário de rede óptica considerado, os comprimentos dos enlaces das OLTs para os codificadores/decodificadores são uniformemente distribuídos sobre uma distância com raio entre 2 e 50 km. Além disso, os comprimentos dos enlaces das ONUs para os codificadores/decodificadores são também uniformemente distribuídos sobre uma distância entre 2 e 50 km. Assim, a faixa de comprimentos totais dos enlaces é [4; 50] km.

Já para o segundo cenário simulado, há uma redução de ONUs atendidas. O esquema possui 8 slots TDM ($m = 8$), mas com 8 OC ($n = 8$) capaz de suportar 64 ONUs por comprimento de onda também com uma taxa de *upstream* individual ainda igual a 10 Gbps/m.

A fim de avaliar o mecanismo de eficiência energética adequado proposto para as redes PON de próxima geração, é considerada uma relação conservadora entre economia de energia e tempo de hibernação; assim, foi utilizado o *fast sleep mode*. Os parâmetros utilizados no *fast sleep mode*, ilustrados na Tabela 6.2, foram verificados e deduzidos por Vetter em [16] e por Valcarenghi [56]. Já os parâmetros empregados na PSO ilustrados na Tabela 6.3 foram detalhados por Durand [18].

Na Fig. 6.1, observa-se o comportamento da potência transmitida em relação ao número de iterações de cada um dos 16 nós ópticos analisados separadamente. Nas condições iniciais do processo, no instante em que nenhum dos vetores tem quaisquer informações próprias ou da nuvem, a potência de todas as transmissões é máxima e próxima a 0,1 W. O avanço das iterações propicia uma redução do nível de potência necessária ao funcionamento do enlace, de acordo com a taxa de transferência de dados fixada em 10 Gbps. Esses valores de potência continuam a diminuir até atingirem valores muito próximos aos níveis ótimos (SNIR = 20 dB) em torno de 900 iterações executadas no primeiro cenário e em torno de 400 iterações para o segundo cenário.

Tabela 6.1 - Parâmetros do sistema

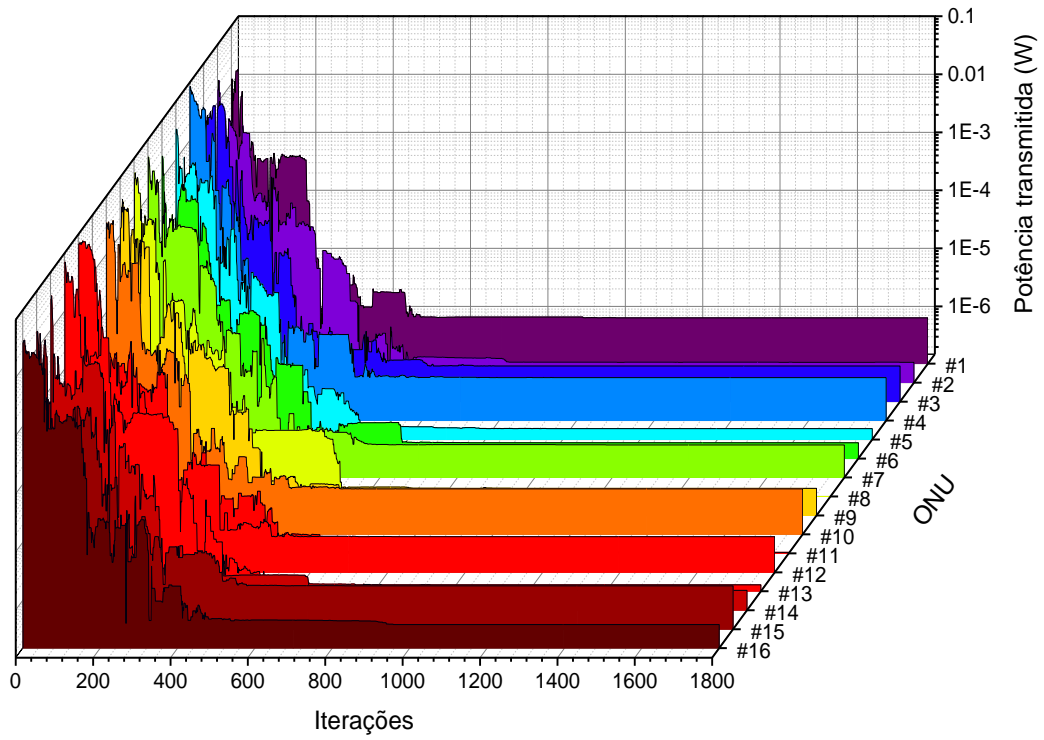
Variável	Valor
α_f – Coeficiente de Perda da Fibra	0,2 (dB/km)
d_{ij} – Comprimento do Enlace	[4: 50] km
h – Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ (J/Hz)
f – Frequência da luz	193,1 (THz)
B_o – Banda Óptica	100 (GHz)
n_{sp} – Fator de Emissão Espontânea	2
a_c – Perda do Codificador/Decodificador	14 (dB)
G_{amp} – Ganho do EDFA	20 (dB)
R_c – Taxa do Chip	200 (Gchips)
T_C – Período do Chip	5 (ps)
N – Comprimento de Código	16
R_i – Taxa de Bit Individual	10 (Gbps)
η_{EO} – Eficiência da Conversão de Potência	1 (%)
L_{mod} – Perda de Excesso Óptico	2,5 (dB)
\mathcal{R} – Responsividade do Fotodiodo	0,9 (A/W)
V_{bias} – Tensão de polarização fotodiodo	3,3 (V)
R_{in} – Resistência de Entrada	50 (Ω)
η_{EPCE} – Eficiência da Conversão de Potência do EDFA	1 (%)
P_{Driver} – Consumo de Potência do <i>Driver</i>	2 (mW)

Tabela 6.2 - Parâmetros do *sleep mode*

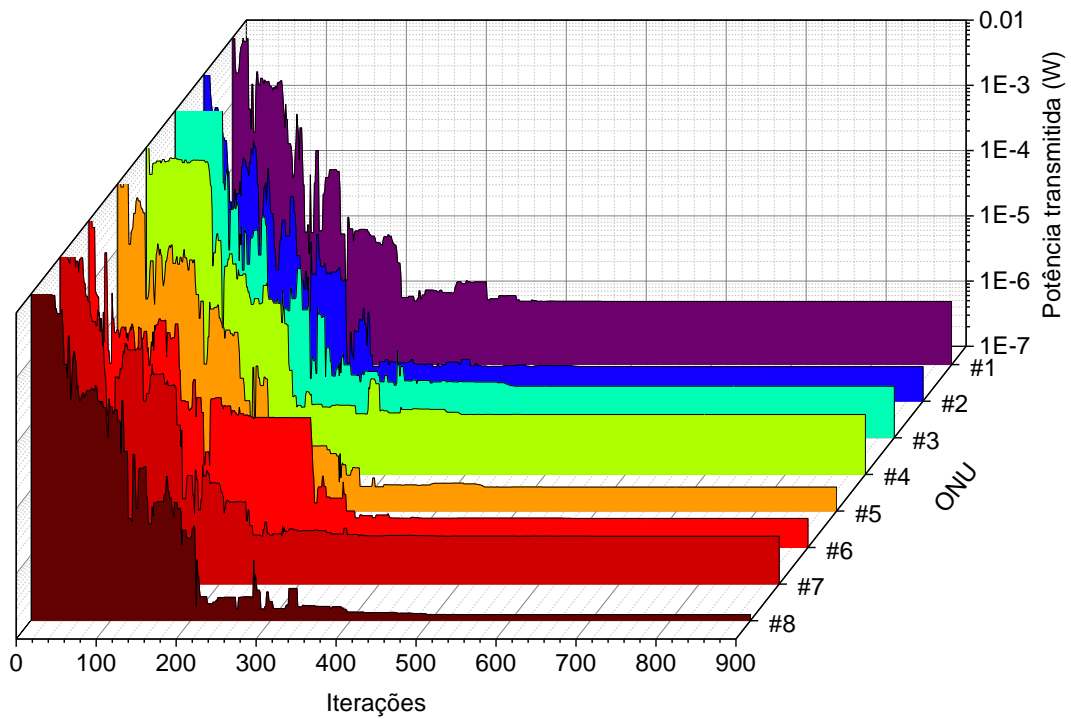
Variável	Valor
T_{DBA} – Tempo do ciclo	1 (ms)
T_s – Tempo do Slot	T_{DBA}/m
T_w – Tempo para Ressincronização	$0,125T_{DBA}$
P_{off} – Consumo de Potência da ONU em <i>sleep mode</i>	$0,33P_{ONU}$
O_r – Taxa de Overhead para sincronização	0,1
ρ – Utilização da ONU	1,0
E_r – Relação entre Potência Ociosa e Potência Total	0,33

Tabela 6.3 - Parâmetros da PSO

Variável	Valor
\mathcal{P} - Numero de partículas	$\mathcal{P} = K + 2$
C_1 – Aceleração da Partícula	1,8
C_2 – Aceleração Global	2
p_{max} – Potência Máxima	20 dBm
p_{min} – Potência Mínima	$p_{max} \times 10^{-12}$
ω - Peso Inercial	$\omega[t] = (\omega_i - \omega_f) \left(\frac{\varphi - t}{\varphi} \right)^m + \omega_f$
m – Índice Não-linear	[0,6; 1,4]
I_t – Número de iterações	1800 (primeiro cenário) 900 (segundo cenário)
ω_i – Peso da Inércia Inicial	1
ω_f – Peso da Inércia Final	0,4
V_{max} – Velocidade Máxima	$V_{max} = 0,2(p_{max} - p_{min})$
V_{min} – Velocidade Mínima	$V_{max} = -V_{min}$



(a)



(b)

Fig. 6.1 – Potência transmitida como uma função do número de iterações:
 (a) primeiro cenário; (b) segundo cenário

A Fig. 6.2 representa a taxa de economia de energia do mecanismo proposto como uma função do número de iterações considerando-se as três estratégias de economia de energia: *a)* controle de potência, onde a intensidade do sinal óptico transmitido é ajustada diretamente a partir da fonte do laser com relação com a SNIR almejada pelo algoritmo da PSO. *b)* *sleep mode*, onde as ONU entram e saem do estado de economia de potência sem perder qualquer tráfego ou interferir com a transmissão em *upstream* de outras ONU. *c)* Estudos para proposta de um mecanismo híbrido, onde o controle de potência e *sleep mode* trabalham em conjunto que é a principal contribuição desse trabalho

Pode ser observado a partir da Fig. 6.2 (a) e (b) o impacto das estratégias de controle de consumo de potência na taxa de economia de energia em ambas as simulações. A estratégia baseada apenas no controle de potência apresenta menor ganho em termos da taxa de economia de energia em ambas as simulações. Nesta estratégia, o consumo de energia é reduzido no transceptor; no entanto, o restante dos ONU mantém o mesmo consumo de energia. Além disso, a estratégia baseia-se apenas no resultado do *sleep mode* em uma taxa de economia de energia intermediária. De fato, no âmbito desta estratégia, o consumo de energia por parte dos circuitos eletrônicos e também por parte do transceptor diminuem; no entanto, quando o transceptor está ativo (“despertado”) uma parte da energia é desperdiçada, porque a energia transmitida por bit é influenciada pelos efeitos da MAI e do *near-far*. Por outro lado, a estratégia híbrida proposta com base no controle de potência heurístico e no *sleep mode* apresenta uma taxa de economia de energia mais elevada entre as estratégias analisadas. Observa-se em ambas as simulações que a vantagem da estratégia híbrida se encontra na diminuição do consumo de potência do circuito eletrônico e do transceptor, mesmo quando a ONU não está em estado de *sleep*. É possível verificar ainda em ambos os cenários que os resultados das simulações são semelhantes, porém, com uma quantidade de códigos ópticos menores, é necessário um número menor de iterações para se atingir uma taxa de economia de energia constante.

As Fig. 6.3 (a) e (b), por sua vez, mostram o consumo de energia por bit por comprimento de onda em função do número de iterações também para ambos os cenários. Os casos "sem qualquer mecanismo de economia de energia" e as mesmas três estratégias de economia de energia representados na Fig. 6.2 foram consideradas. As Fig. 6.3 (a) e (b) também demonstram o impacto dos mecanismos de economia de energia na melhoria da eficiência energética em comparação com o caso em que não há qualquer mecanismo de economia de energia. Para os mecanismos baseados no algoritmo de controle de potência baseado na PSO ("Controle de potência" e "Mecanismo proposto" na legenda), cada nó óptico ajusta a sua potência do transmissor com o objetivo de maximizar o número de bits transmitidos com o

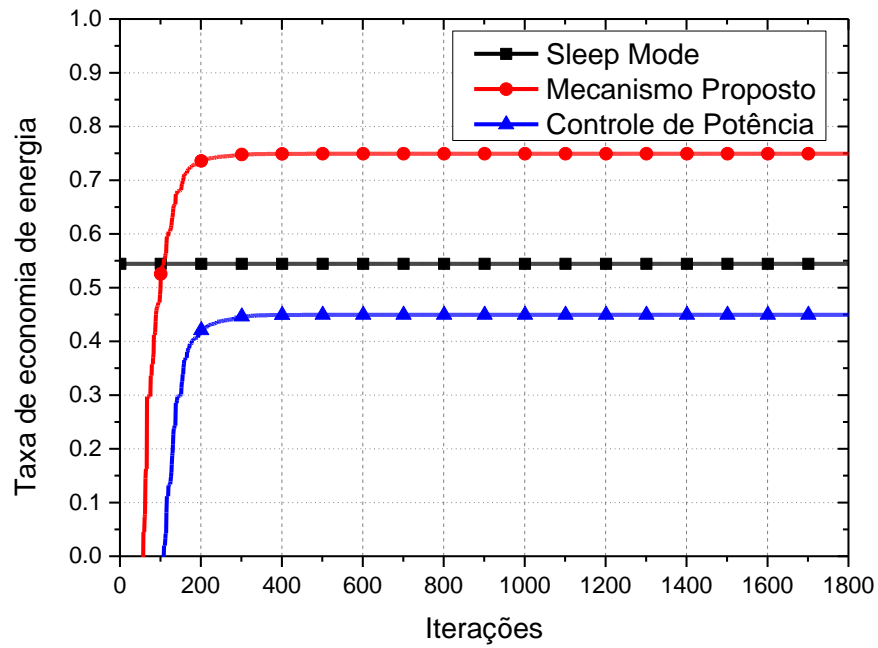
mínimo consumo de energia. Para esses casos, a energia mínima por bit é obtida quando o nó receptor atinge o SNIR desejado.

Como a SNIR é proporcional à potência individual transmitida por cada ONU, o problema de se encontrar a menor energia por bit traduz-se em encontrar a potência de transmissão ótima. Neste contexto, o algoritmo de alocação de potência da PSO é implantado com o objetivo de alcançar a SNIR desejada (ótima) e assim determinar o nível de energia mais baixo (ideal) por bit em cada nó óptico.

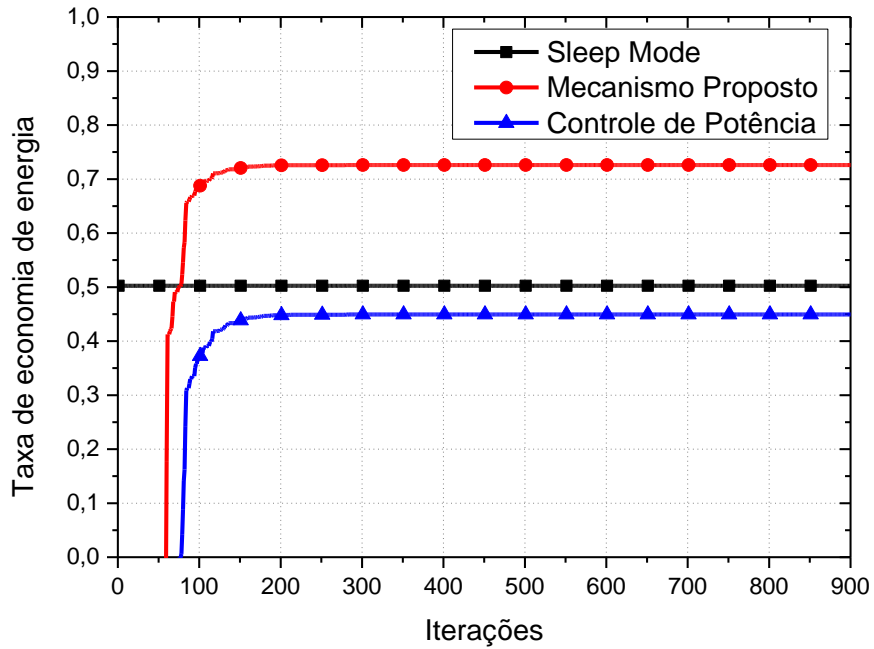
As Fig. 6.4 (a) e (b) mostram a soma das potências ótimas transmitidas para todas as ONU por comprimento de onda levando-se em conta a inversão da matriz projetada a linha na cor preta e a soma da potência de todos os nós de rede para a estratégia combinada proposta como uma função do número de iterações. Também é ilustrada a soma das potências transmitidas por comprimento de onda para o caso sem mecanismo de economia de energia.

Os resultados mostrados nas Fig. 6.4 (a) e (b) mostram que a soma das potências transmitidas obtidas com o mecanismo proposto converge para a soma das potências transmitidas obtidas via inversão de matriz pela eq. (10) $\mathbf{p}^* = [\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{u}$, mostrada no Capítulo 4, que é computacionalmente mais complexa. Observa-se que no contexto das Fig. 6.3 (a) e (b), a potência economizada advinda dos mecanismos híbridos propostos é uma ordem de grandeza superior se comparada com a metodologia sem economia de energia. Assim, a SNIR chega ao valor desejado quando as iterações aumentam para cada ONU transmitida, isto é, o nó a partir do qual a transmissão se originou. Nesta experiência numérica, a SNIR desejada para todos os nós foi considerada idêntica, e se o equilíbrio perfeito de potência pode ser antevisto, poder ser demonstrado que a SNIR máxima será limitada pelo número de ONU [16]. Portanto, o limite superior teórico da SNIR pode ser determinado pelo número de nós e pelos parâmetros de código.

As Fig. 6.5 (a) e (b) demonstram a relação de convergência para o número de iterações considerando-se a potência transmitida para todas as ONU. A variação de potência transmitida ocorre quando a ONU está em hibernação, ou seja, não há potência sendo transmitida. A variação do número de nós ativos na rede aumenta os efeitos da MAI e dos efeitos *near-far*.



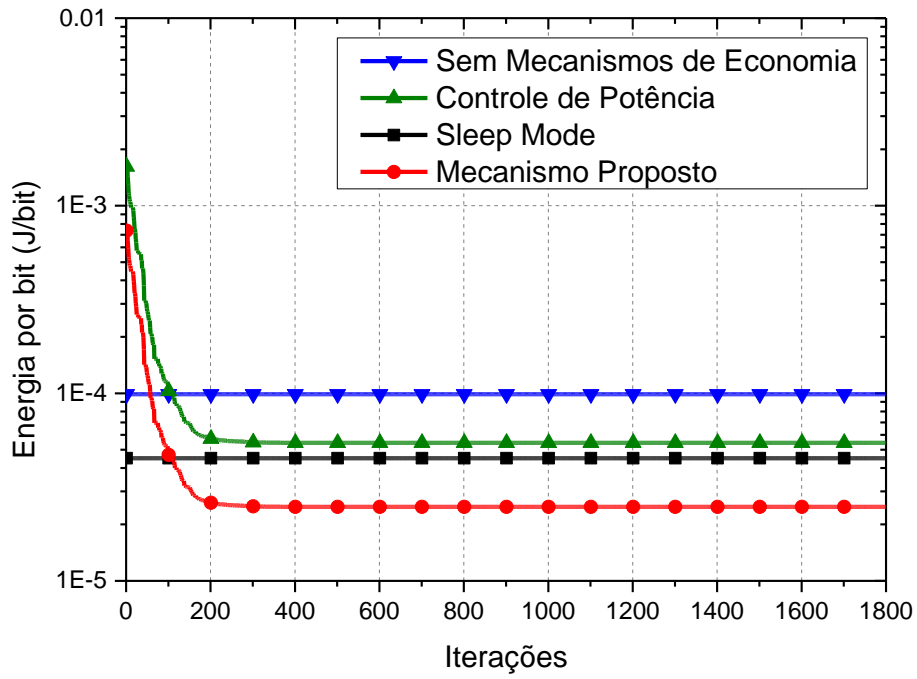
(a)



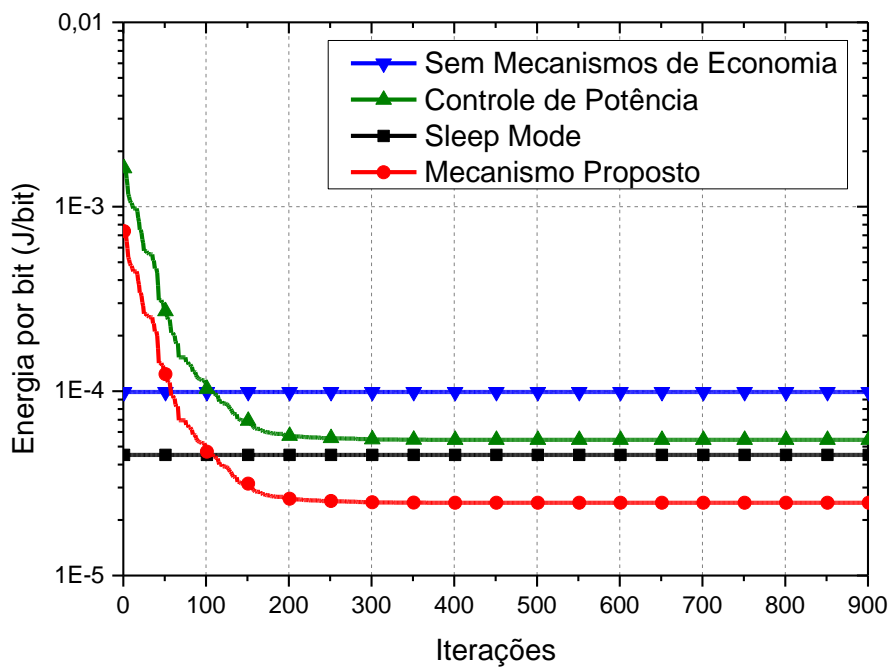
(b)

Fig. 6.2 - Taxa de economia de energia como uma função do número de iterações:

(a) primeiro cenário; (b) segundo cenário

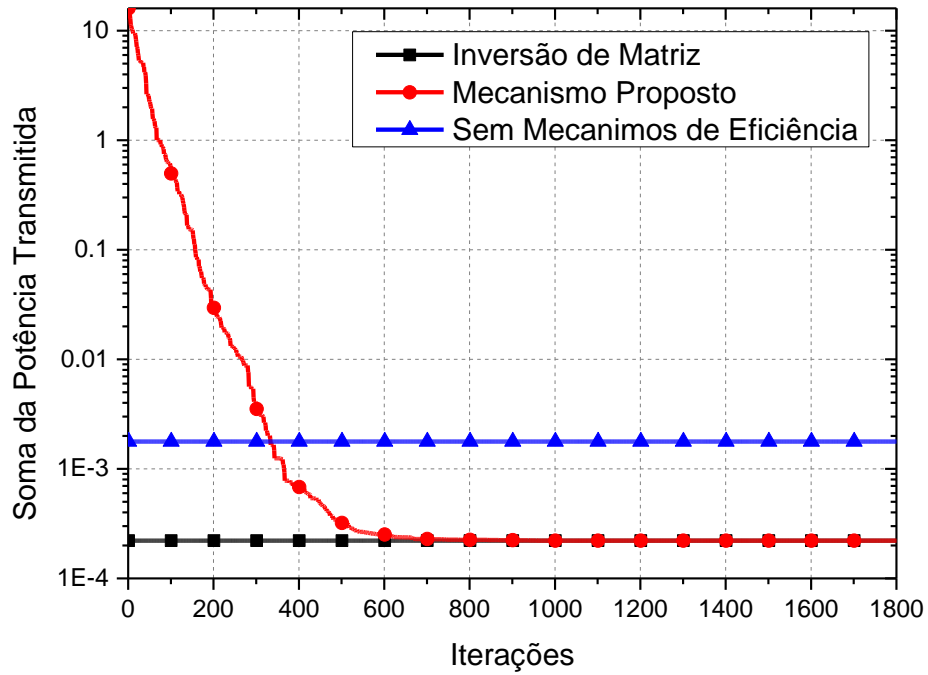


(a)

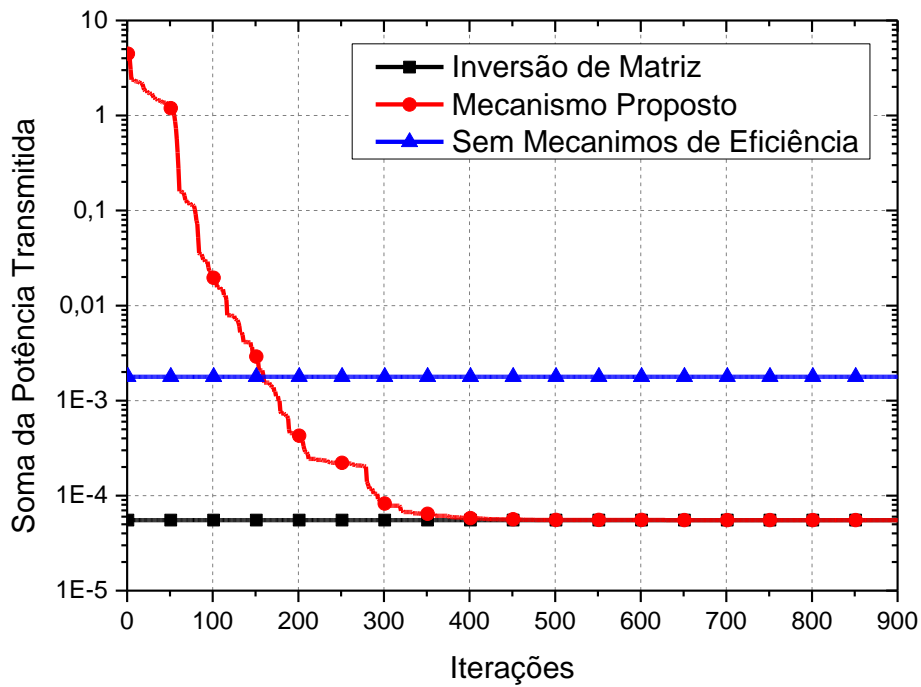


(b)

Fig. 6.3 - Energia por bit por comprimento de onda versus o número de iterações:
 (a) primeiro cenário; (b) segundo cenário



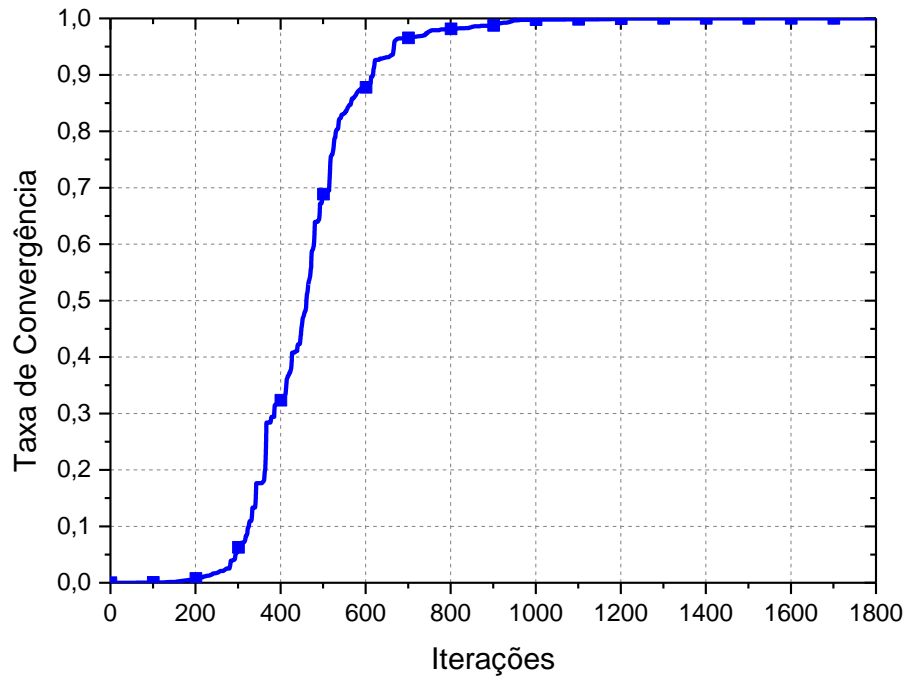
(a)



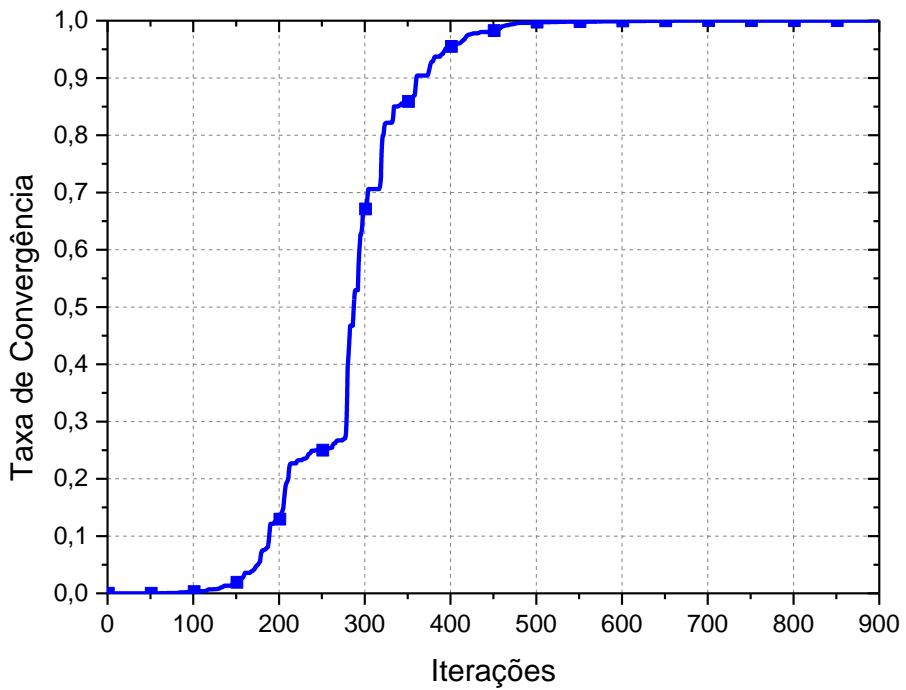
(b)

Fig. 6.4 – Potência transmitida por comprimento de onda pelo número de iterações:

(a) primeiro cenário; (b) segundo cenário



(a)



(b)

Fig. 6.5 - Taxa de convergência pelo número de iterações: (a) primeiro cenário;
(b) segundo cenário

É possível concluir, a partir das Fig. 6.5 (a) e (b), que a taxa de convergência aumenta com o aumento do número de iterações, reduzindo-se bastante no caso do segundo cenário. Além disso, a variação da potência transmitida afeta a taxa de convergência. De fato, o aumento da potência transmitida irá resultar nos valores mais baixos de taxa de convergência. Nesse caso, foi estabelecida uma taxa de convergência mínima aceitável de 0,9. Este valor vai garantir a convergência dos mecanismos combinados propostos, mesmo em caso de variação agressiva da potência transmitida [18]. Observa-se ainda a curva da taxa de convergência para a potência transmitida que a taxa máxima de convergência alcançada é de aproximadamente 0,89. Por esta razão a taxa de convergência de economia de energia do mecanismo proposto não será afetada.

7. Conclusões

O presente trabalho apresentou uma proposta de um mecanismo de eficiência energética baseado na técnica de *sleep mode* em conjunto com a PSO que executa um ajuste a potência de transmissão otimizado. A rede óptica analisada utiliza as redes 10GE-PON atuais, com a vantagem de utilizar apenas um par de codificadores/decodificadores de tecnologia de multiplexação por divisão de código óptico (OCDM), eliminando assim a presença do codificador/decodificador em cada uma das unidades de rede ópticas ativas.

O algoritmo de controle de potência baseado na PSO estabeleceu a potência mais baixa (ótima) transmitida em cada ONU, de acordo com os requisitos de QoS da rede. O objetivo foi controlar o consumo de energia da ONU de acordo com a demanda de tráfego e ajustar a sua potência de transmissão, com o intuito de se maximizar o número de bits transmitidos com um mínimo consumo de energia.

A avaliação de desempenho foi realizada baseando-se na modelagem do consumo de potência da ONU no modo ativo e no *sleep mode*, implantando-se assim o algoritmo de controle de potência de domínio contínua da PSO. A análise quantitativa dos principais resultados numéricos na Fig. 6.2 (a), com um cenário de 16 ONU por código óptico, revelaram ser possível atingir uma economia de 75% da energia com o mecanismo conjunto proposto e 55% de economia de energia com o mecanismo baseado unicamente no *sleep mode*. Já na Fig. 6.2 (b), com um cenário reduzido de 16 para 8 ONU por código óptico, verificaram-se valores de economia de 72% e 51% para os mesmos critérios.

A soma das potências ótimas transmitidas para todas as ONU por comprimento de onda mostradas nas Fig. 6.3 (a) e (b) mostram valores quantitativamente maiores no início das simulações, mas que tendem a cair rapidamente à medida em que o número de iterações aumenta, adquirindo estabilidade após aproximadamente 200 iterações em ambos os casos.

Observando-se quantitativamente os valores das potências transmitidas nas Fig. 6.4 (a) e (b), é possível verificar a convergência para os valores computacionalmente mais complexos de serem obtidos, via inversão de matriz. Além disso, essa convergência de valores das potências, vide Fig. 6.5 (a) e (b), atinge valores bem próximos da unidade bem antes do número inicialmente estimado de iterações simuladas.

Pode-se afirmar, portanto, que nos cenários simulados, houve uma melhoria substancial na economia de recursos para as PON de próxima geração. Outro ponto importante é o fato do mecanismo combinado proposto ser robusto quando a variação do número de nós ativos na rede é elevada, quando se analisa a complexidade do algoritmo proposto com a

complexidade do esquema de inversão de matrizes, ou seja, a estratégia proposta é capaz de lidar com a variação elevada de tráfego de rede.

Dada a relevância da economia de recursos energéticos nas redes PON, além da técnica do *sleep mode* aliada à PSO, existem outros métodos que também podem ser aplicados e explorados, como por exemplo: Armazenamento Dinâmico (*buffer*) [79], que faz um ordenamento de dados em *timeslots* consecutivos por meio de *buffers* e os Códigos Corretores de Erro (FEC – *Forward Error Correction*) que se baseiam em técnicas de processamento de sinais digitais, como RS (*Reed-Solomon*), BCH (*Bose, Chaudhuri & Hocquenghem*) e LDPC (*Low-Density Parity-Check*) [80], aumentando o nível e confiabilidade dos dados por meio do controle, detecção e correção de possíveis erros dentro do processo de transmissão.

Referências bibliográficas

- [1] CISCO SYSTEMS. Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2013–2018. 2014. White paper. Disponível em <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/Cloud_Index_White_Paper.pdf> Acesso em: 15 out 2015.
- [2] TZANAKAKI, A. et al, “Dimensioning the Future Pan-European Optical Network With Energy Efficiency Considerations,” *J. Lightw. Technol.* vol. 3 , no. 4, pp. 272 – 280, abr 2011.
- [3] BALIGA, J.; Hinton K.; and Tucker, R. S.; “Energy Consumption of the Internet,” *Optical Internet, 2007 and the 2007 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology. Joint International Conference on COIN-ACOFT 2007, Melbourne, Australia*, pp. 1–3, jun 2007.
- [4] TUCKER, Rodney S.; “Green Optical Communications - Part I: Energy Limitations in Transport,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 245 – 260, mar-abr 2011.
- [5] VIZCAÍNO, J. et al.; “Cost Evaluation for Flexible-Grid Optical Networks,” in *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 358 – 363, dez 2012.
- [6] VIZCAÍNO, J.; Yea, Y.; and Monroy, I. “Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks,” *Computer Networks*,” vol. 56, no. 2, pp. 2400–2419, jul 2012.
- [7] VACONDIO, F. et al, “Real-Time Elastic Coherent Muxponder Enabling Energy Proportional Optical Transport,” *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, pp. 1-3, mar 2013.
- [8] SONG, H.; Kim, B.W.; and Mukherjee, B.; “Long-reach optical access networks: a survey of research challenges, demonstrations, and bandwidth assignment mechanisms,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*; vol. 12, n. 1, pp. 112–123, jan-abr 2010.
- [9] WONG, E.; “Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies,” *J. Lightw. Technol.*; vol. 30, no. 4, pp. 597 – 608, fev 2012.
- [10] BINDHAIQ, S. et al; “Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2),” *Optical Switching and Networking*, vol. 15, pp. 53–66, jan 2015.
- [11] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; IEEE 802.3ah-2004 - IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks. 2004. Disponível em <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3ah-2004.html>> Acesso em 15 out 2015.
- [12] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR, ITU-T. G.984.1: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics. 2008. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>>. Acesso em 15 out 2015.

- [13] DE ANDRADEA et al; “Passive optical network (PON) supported networking,” *Optical Switching and Networking*, vol. 14, pp. 1–10, ago 2014.
- [14] KODAMA, T. K. et al; “Scaling the system capacity and reach of a 10G-TDM-OCDM-PON system without an en/decoder at an ONU,” *J. Opt. Commun. Netw.*; vol. 5, no. 2, pp. 134–143, fev 2013.
- [15] YOSHIMA, S.; Tanaka, Y.; and Kataoka, N.; Wada, N.; Nakagawa, J.; Kitayama, K.; “Full-duplex, extended-reach 10G-TDM-OCDM-PON system without En/decoder at ONU,” *J. Lightw. Technol.*; vol. 31, no. 1, pp. 43–49, jan 2013.
- [16] VETTER, P. et al; “Energy-Efficiency Improvements for Optical Access,” *IEEE Commun. Mag.* pp. 136 – 144, abr 2014.
- [17] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;. IEEE SA - 1904.1-2013 - IEEE Standard for Service Interoperability in Ethernet Passive Optical Networks (SIEPON). Disponível em <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1904.1-2013.html>>. Acesso em 15 out 2015.
- [18] DURAND, F.; and Abrão, T.; “Energy-Efficient Power Allocation for WDM/OCDM Networks With Particle Swarm Optimization,” *J. Opt. Commun. Netw.*; vol. 5, no. 5, pp. 512–523, maio 2013.
- [19] TANG, M.; Long C.; and Guan, X.; “Nonconvex Optimization for Power Control in Wireless CDMA Networks,” *Wireless Personal Communications*,” vol. 58, n. 4, pp. 851-865, jun 2011.
- [20] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR, ITU-T. G.983.1: Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON). 2005. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.1/en>>. Acesso em 17 out 2015.
- [21] KITAYAMA, K.; “Optical Code Division Multiple Access: A Practical Perspective,” Universidade de Osaka, Cambridge University Press, Japão, jun 2014.
- [22] KANI, J. “Power Saving Techniques and Mechanisms for Optical Access Networks Systems,” *J. Lightw. Technol.*; vol. 31, no. 4, pp. 563–570, fev 2013.
- [23] KANI, J.; and Suzuki, K.; “Standardization of next-generation 10G-PON systems,” *NTT Technol. J.*; vol. 21, no.9, pp. 90-93. Japão. 2009.
- [24] AHSAN, Md. S. et al; “Migration to the next generation optical access networks using hybrid WDM/TDM-PON,” *Journal of Networks*, Vol. 6, no. 1, pp. 18–25, jan 2011.
- [25] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; IEEE SA - 802.3av-2009: IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks. 2009. Disponível em <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3av-2009.html>> Acesso em 22 out 2015.
- [26] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR, ITU-T. G.987: 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms. 2010. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1/en>>. Acesso em 22 out 2015.

- [27] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR, ITU-T. G.989.1: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1/en>>. Acesso em 22 out 2015.
- [28] BINDHAIQ, S. et al; “Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2),” *Optical Switching and Networking*, vol. 15, jan 2015, pp. 53–66,
- [29] DURAND, F. R.; “Contribuições ao estudo de redes ópticas híbridas wdm/ocdm,” Ph.D. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, dez 2007.
- [30] TAKAI, H.; and Yamauchi, O.; Optical fiber cable and wiring techniques for fiber to the home (FTTH), *Opt. Fiber Technol.* 15(4), pp. 380–387. 2009.
- [31] INFINERA CORPORATION, Infinera DTM™ Switched WDM System, “It carries 6.4 trillion bits per second. Better yet, it’s all plug and play,” Sunnyvale, CA, EUA. 2013. Disponível em <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2015/07/Infinera_DTN_Brochure.pdf>. Acesso em 29.10.2015.
- [32] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR, ITU-T. G.964.1 : Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>>. Acesso em 22 out 2015.
- [33] ZHOU, X. et al; “Theoretical investigation of fiber Raman amplifier with dynamic gain control,” *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, OFC2001*, Optical Society of America, mar 2001.
- [34] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR, ITU-T. G.964.2 : Spectral grids for WDM applications: CWDM frequency grid, Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2/en>>. Acesso em 22 out 2015.
- [35] TARHUNI, N. et al; “Power Control of Optical CDMA Star Networks,” *Optics Communications*, vol. 259, pp. 655 – 664, mar 2006.
- [36] CINCOTTI, G.; Wada, N.; and Kitayama, K.; “Characterization of a full encoder/decoder in the AWG configuration for code-based photonic routers. Part I: Modelling and design,” *J. Lightwave Technol.*; vol. 24, no. 1, pp. 103–112, jan 2006.
- [37] ZACCARIN, D.; and Kavegard, M.; “An optical CDMA system based on spectral amplitude encoding of an LED,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*; vol. 4, no. 4, pp. 479–482, abr 1993.
- [38] HASSAN, A.; Hershey, J.; and Riza, N.; “Spatial optical CDMA,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*; vol. 13, no. 3, pp. 609–613, abr 1995.
- [39] PRUCNAL, P.; Santoro, M.; and Fan, T.; “Spread spectrum fiber-optic local area network using optical processing,” *Electron. Lett.*; vol. 4, no. 5, pp. 547–554, maio 1986.
- [40] DURAND, F. R.; “Contribuições ao estudo de redes ópticas híbridas wdm/ocdm,” Ph.D. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, dez 2007.
- [41] STOK, A.; and Sargent, E.; “Lighting the local area: Optical code-division multiple access and quality of service provisioning,” *IEEE Network*, pp. 42–46, dez 2000.

- [42] TAMURA, S.; Nakano, S.; and Okazaki, K.; “Optical code-multiplex transmission by gold sequences,” *Journal of Lightwave Technology*, pp 121 – 127, Universidade of Osaka, Osaka, Japão, fev 1985.
- [43] SANKARAN, G.C.; “ONU Buffer Elimination for Power Savings in Passive Optical Networks,” *Indian Inst. of Technol. Madras, 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Chennai, India, 2011.*
- [44] PICKAVET, M. et al; “Worldwide energy needs for ICT: the rise of power-aware networking,” *International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS’08)* , Bombaim, India, dez 2008.
- [45] LEISCHING, P.; and M. Pickavet, “Energy footprint of ICT: Forecasts and network solutions,” *OFC/NFOEC’09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions, San Diego, CA, EUA, mar 2009.*
- [46] DOS SANTOS FILHO, R. V. B.; “Análise de sistemas cdma ópticos,” *Tese de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.*
- [47] GROBE, K. et al.; “Cost and Energy Consumption Analysis of Advanced WDM-PONs,” *IEEE Commun. Mag.*; vol. 49, no. 2, pp. 25–32. fev 2011.
- [48] KENNEDY, J.; and Eberhart, R.C.; “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, USA, pp. 1942–1948, nov-dez 1995.*
- [49] EVERS, G.; “An Automatic Regrouping Mechanism to Deal with Stagnation in Particle Swarm Optimization”. *Tese de Mestrado. The University of Texas - Pan American, Department of Electrical Engineering. 2009.*
- [50] MEISSNER, M.; Schmuker, M.; and Schneider, G.; "Optimized Particle Swarm Optimization (OPSO) and its application to artificial neural network training". *BMC Bioinformatics 7:125, dez 2006.*
- [51] PEDERSEN, M.E.H.; “Tuning & Simplifying Heuristical Optimization,” *Tese de PHD, University of Southampton, School of Engineering Sciences, Computational Engineering and Design Group, 2010.*
- [52] PEDERSEN, M.E.H.; and Chipperfield, A.J.; "Simplifying particle swarm optimization," *Applied Soft Computing 10 (2), Vol. 10, no. 2. pp. 618–628, mar 2010.*
- [53] CLERK, Maurice. Chapter 3: First Formulations. In: _____. *Particle Swarm Optimization. ITSE. França. 2006.*
- [54] PARSOPOULOS, K.; and Vrahatis, M.; "Particle swarm optimization method in multiobjective problems". *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing (SAC). pp. 603–607. mar 2002.*
- [55] EUROPEAN COMMISSION, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport - Renewable Energy Unit “Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment,” Version 4.1, jan 2013.
- [56] VALCARENGHI, L. et al, “Energy Efficiency in Passive Optical Networks: Where, When, and How?,” *IEEE Network*, vol. 5, no. 6, pp. 61 – 68, nov-dez 2012.

- [57] ZIELINSKI, K. et al; "Optimization of Power Allocation for Interference Cancellation With Particle Swarm Optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 1, pp. 128 – 150, fev 2009.
- [58] PAN, Y.; and Pavel, L.; "OSNR Game Optimization with Link Capacity Constraints in General Topology WDM Networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 11, Part A, pp. 1-15, jan 2014.
- [59] DE MARQUES PAULA, M.; Durand, F.; and Abrão, T.; "WDM/OCDM Energy-Efficient Networks Based on Heuristic Ant Colony Optimization," *IEEE System Journal*, in Press, pp. 1-12, ago 2014.
- [60] INATY, E. et al; "A fair QoS-based resource allocation scheme for a time-slotted optical OV-CDMA packet network: a unified approach," *J. Lightwave Technol.*; vol. 26, no. 21, pp. 1–10, jan 2009.
- [61] ZHU, Q.; and Pavel, L.; "Enabling differentiated services using generalized power control model in optical networks, *IEEE Trans. Commun.*; vol. 57, no. 9, pp. 2570–2575, set 2009.
- [62] ELKAMCHOUCI, H.; Elragal, H.; and Makar, M.; "Power control in CDMA system using particle swarm optimization," in *24th National Radio Science Conference*, Cairo, pp. 1–8, mar 2007.
- [63] JINNO, M. et al; "Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies," *IEEE Commun. Mag.*; vol. 47, no. 11, pp. 66-73, nov 2009.
- [64] SHI, Y.; and Eberhart, R.C.; "Parameter selection in particle swarm optimization". *Proceedings of Evolutionary Programming VII (EP98)*. pp. 591–600, dez 2005.
- [65] EBERHART, R.C.; and Shi, Y.; "Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization". *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation 1*, vol. 1, pp. 84–88, 2000.
- [66] CARLISLE, A.; and Dozier, G.; "An Off-The-Shelf PSO" (PDF). *Proceedings of the Particle Swarm Optimization Workshop*. pp. 1–6, 2001.
- [67] VAN DEN BERGH, F.; *An Analysis of Particle Swarm Optimizers*, tese de PHD, University of Pretoria, Faculty of Natural and Agricultural Science, Pretoria, South Africa, 2001.
- [68] CLERC, M.; and Kennedy, J.; "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (1): 58–73, 2002.
- [69] TRELEA, I.C.; "The Particle Swarm Optimization Algorithm: convergence analysis and parameter selection". *Information Processing Letters*, vol 85, no. 6, pp. 317–325, mar 2003.
- [70] BRATTON, D.; and Blackwell, T.; "A Simplified Recombinant PSO". *Journal of Artificial Evolution and Applications*. 2008.
- [71] LUO, Y. et al.; "Energy-efficient next generation passive optical network supported access networking," *Optical Switching and Networking*, vol. 14, no. 1, pp. 43–52, ago 2014.

- [72]EBERTHART, R. C.; and Shi. Y.; “Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization,” *Evolucionary Programmong VII*, vol. 1447, pp. 611-616, San Diego, CA, dez 2005.
- [73]GUDISZ V. G.; and Venayagamoorthy G.K.; “Comparison of particle swarm optimization and backpropagation as training algorithms for meural networks,” *IEE Swarm Intelligence Symposium 2003 (SIS 2003)*, Indianápolis, Indiana, EUA, p. 110-117, abr 2003.
- [74]YANG, X.S.; “Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms”. Luniver Press. ISBN 978-1-905986-10-1, 2008.
- [75]SAMPAIO, L. et al; 2011. Hybrid heuristic-waterfilling game theory approach in MC-CDMA resource allocation. *Applied Soft Computing* 12:1902–1912, jul 2012.
- [76]SIVAKUMAR, A.; Sankaran, G. C.; and Sivalingam, K. M. “Performance analysis of ONU wavelength grouping schemes for efficient scheduling in long reach-PONs,” *Optical Switching and Networking* 10(4):465–474, 2013.
- [77]BYUN, H-J.; Nho, J-M.; Lim, J-T.; “Dynamic bandwidth allocation algorithm in Ethernet passive optical networks,” *Electronics Letters* , vol.39, no. 13, jun 2003.
- [78]BRÈS, Camille-S.; Prucnal, and Paul R.; “Code-Empowered Lightwave Networks,” *J. Lightw. Technol.* , vol. 25, n. 10, pp. 2911 – 2921, out 2007.
- [79]HOOD, D.; Trojer, and E. Appendix I: FEC and HEC in G-PON, in *Gigabit-Capable Passive Optical Networks*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. (2012).
- [80]LIN, S. and Costello, D.; “Error Control Coding”, 2nd ed. Pearson Prentice Hall, 2004.