



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ CLEYTON DA SILVA

**PROJETO EFICIENTE DE REDES ÓPTICAS RESILIENTES DO TIPO OTN SOBRE
DWDM**

Recife

2020

JOSÉ CLEYTON DA SILVA

**PROJETO EFICIENTE DE REDES ÓPTICAS RESILIENTES DO TIPO OTN SOBRE
DWDM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Comunicações.

Orientador: Prof^o Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho.

Coorientador: Prof^o Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586p Silva, José Cleyton da.
Projeto eficiente de redes ópticas resilientes do tipo OTN sobre DWDM /
José Cleyton da Silva. - 2020.
85 f.; il., tab., abr., sigl. E símb.

Orientador: Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho.
Coorientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Redes ópticas. 3. OTN. 4. DWDM.
5. Resiliência. 6. Algoritmos evolucionários. 7. Metaheurísticas.
I. Bastos Filho, Carmelo José Albanez (Orientador). II. Martins Filho,
Joaquim Ferreira (Coorientador). III. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022-31

JOSÉ CLEYTON DA SILVA

**“PROJETO EFICIENTE DE REDES ÓPTICAS RESILIENTES
DO TIPO OTN SOBRE DWDM”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Comunicações.

Aprovada em: 23/12/2020

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho
(Orientador e Examinador Interno)
Universidade de Pernambuco

Profº. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho (Coorientador e Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Danilo Ricardo Barbosa de Araújo (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profº. Dr. Alexandre Magno Andrade Maciel (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Profº. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto (Examinador Externo)
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico ao meu avô José Severino (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por todo esforço que fizeram para sempre manter a minha educação e a das minhas irmãs como prioridade.

Ao meu orientador prof. Carmelo José Albanez Bastos Filho e ao meu co-orientador Joaquim Ferreira Martins Filho pela oportunidade, orientação, compreensão e confiança durante todos esses anos de trabalho.

A todos os professores e alunos que compõem o grupo de pesquisa em redes ópticas da UFPE, por todas as discussões coerentes e engrandecedoras que são realizadas durante as reuniões de pesquisa e projetos.

Aos meus amigos, amigas e familiares que sempre estiveram ao meu lado para dar incentivo e conselhos sempre que necessitei.

Finalmente, gostaria de agradecer à FACEPE e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPE pelos apoios financeiros fornecidos durante todo o período de pesquisa e em especial a todos os colaboradores que fazem parte da parceria entre a UFPE e a Padtec pela oportunidade de aplicar de forma prática os conhecimentos gerados por este trabalho.

Muitíssimo obrigado a todos!

RESUMO

Nos últimos anos, a demanda por serviços de telecomunicações de alta qualidade vem crescendo bastante devido ao aumento do número de aplicações na Internet, como streaming de vídeo, televisão de alta definição, redes sociais, transferência de arquivos, entre outros. Atualmente, a tecnologia mais indicada para suprir as altas taxas de transmissão requeridas são as redes ópticas. Com a expansão do mercado de comunicações ópticas, os negócios relacionados a essa indústria passaram a atrair mais investimentos em inovação para esta área. As redes ópticas de transporte (Optical Transport Network - OTN) chegaram ao mercado de comunicações trazendo benefícios econômicos e operacionais de virtualização para a rede óptica. Essa tecnologia funciona como uma camada superior à rede DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) que permite uma utilização mais eficiente dos recursos. A comutação OTN desacopla os clientes das interfaces de linha DWDM, garantido que os enlaces DWDM estejam funcionando da forma mais eficiente possível, evitando assim, o desperdício de banda de transmissão. Esse conceito é levado a diante em uma rede de computadores OTN, permitindo que o tráfego seja agregado em nós intermediários e direcionado para rotas que estão sendo subutilizadas. O planejamento de redes OTN sobre DWDM é um problema complexo, pois envolve uma nova estrutura de equipamentos e arquitetura lógica. Esse problema tem despertado o interesse da academia e da indústria em desenvolver soluções de planejamento que reduzam o custo dos projetos. Esta Tese propõe duas estratégias de planejamento de redes OTN sobre DWDM de forma que o custo com interfaces de linha seja minimizado e que os requisitos de resiliência sejam totalmente atendidos. A primeira proposta utiliza uma abordagem heurística para a resolução do problema. A segunda proposta, que é a proposta central desta Tese, faz uso de um algoritmo evolucionário multiobjetivo para buscar uma solução que otimize o projeto considerando variáveis de decisão conflitantes, avaliando o número de interfaces OTN utilizadas e a taxa de insucesso na restauração mediante falhas. Os experimentos realizados neste trabalho mostraram que a proposta principal desta tese, quando avaliada em diversos cenários, obteve melhores resultados em relação a quantidade de interfaces alocadas quando comparada com o algoritmo heurístico desenvolvido com o mesmo objetivo.

Palavras-chave: redes ópticas, OTN, DWDM, resiliência, algoritmos evolucionários, metaheurísticas.

ABSTRACT

In recent years, the demand for high-quality telecommunications services has grown considerably due to the increase in the number of applications on the Internet, such as video streaming, high-definition television, social networks, file transfer, among others. Currently, the most suitable technology to supply the high transmission rates required is optical networks. With the expansion of the optical communications market, businesses related to this industry started to attract more innovation investments in this area. Optical Transport Network (OTN) arrived in the communications market bringing economic and operational benefits of virtualization to the optical network. This technology works as a superior layer to the DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) network that allows more efficient use of resources. OTN switching decouples customers from DWDM line interfaces, ensuring that DWDM links work as efficiently as possible, thus avoiding wasted transmission bandwidth. This concept is carried out on a network of OTN switches, allowing traffic to be aggregated at intermediate nodes and directed to routes that are being underutilized. Planning OTN networks over DWDM is a complex problem, as it involves a whole new equipment structure and logical architecture. This problem has aroused academia and industry's interest in developing planning heuristics that reduce the cost of projects. This Thesis proposes two strategies for planning OTN networks over DWDM so that the cost with line interfaces is minimized and that resilience requirements are met. The first proposal uses a heuristic approach to solve the problem. The second proposal, which is the central proposal of this Thesis, uses a multi-objective evolutionary algorithm to seek a solution that optimizes the project considering conflicting decision variables, evaluating the number of OTN interfaces used and the failure rate in the restoration due to failures. The experiments carried out in this work showed that the main proposal of this Thesis, when evaluated in several scenarios, obtained better results concerning the number of interfaces allocated compared with heuristic algorithms developed with the same objective.

Keywords: optical networks, OTN, DWDM, resilience, evolutionary algorithms, metaheuristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fibra danificada em decorrência de acidente em construção civil. (a) e Cabo submarino de fibra óptica sendo atacado por tubarão. (b)	18
Figura 2 – Representação gráfica do modelo de rede multicamadas OTN sobre DWDM considerado neste trabalho	22
Figura 3 – Exemplo de topologia de rede óptica de primeira geração	25
Figura 4 – Exemplo de topologia de rede óptica de segunda geração	26
Figura 5 – Exemplo de topologia de rede óptica de terceira geração	28
Figura 6 – OTS comercial com suporte a 12 placas de linha. Extraído de LIGHTPAD	31
Figura 7 – Exemplo de um TE-Link conectando a interface OTN A e a interface OTN B	32
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo heurístico OTN-PASRIN	43
Figura 9 – Topologia 1: quatro nós OTN e sete <i>linkbundles</i>	44
Figura 10 – Topologia 2: 16 nós OTN e 32 <i>linkbundles</i>	46
Figura 11 – Comparação do número de interfaces em função do número de serviços para o OTN-PASRIN e o Algoritmo Exaustivo: todos os serviços são do tipo 1+R (a), todos os serviços são do tipo 1+1+R (b) e todos os tipos de serviços alternados (c)	49
Figura 12 – Representação em <i>boxplot</i> da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max que relaciona o número de serviços (todos serviços são do tipo 1+R) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima ...	50
Figura 13 – Representação em <i>boxplot</i> da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max que relaciona o número de serviços (todos serviços são do tipo 1+1+R) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima ...	51
Figura 14 – Representação em <i>boxplot</i> da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max que relaciona o número de serviços (todos os	

	tipos de serviços alternados) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima ...	52
Figura 15 –	Número de interfaces embarcadas por pelos algoritmos OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max considerando a topologia 2, serviços do tipo 1+R e um total de 240 serviços	53
Figura 16 –	Exemplo de problema com dois objetivos: Taxa de insucesso na recuperação da rede x Quantidade de equipamentos	55
Figura 17 –	Pseudocódigo – NSGAll	56
Figura 18 –	Exemplo do mecanismo de seleção utilizado pelo NSGAll	58
Figura 19 –	Fluxograma do algoritmo proposto	60
Figura 20 –	Exemplo com cenários de falhas duplas geradas a partir de uma topologia simples	63
Figura 21 –	Exemplo de topologia OTN representada como indivíduo do algoritmo evolucionário	65
Figura 22 –	Exemplo de transformação da estrutura do indivíduo para a configuração de rede utilizada para avaliação na ferramenta de planejamento	66
Figura 23 –	Comparação do número de interfaces em função do número de serviços para o OTN-PASRIN, OTN-PASRIN-Max, algoritmo Exaustivo e algoritmo Evolucionário: todos os serviços são do tipo 1+R (a), todos os serviços são do tipo 1+1+R (b) e todos os tipos de serviços alternados (c)	72
Figura 24 –	Gráfico de convergência para a topologia 1	72
Figura 25 –	Gráfico de convergência para a topologia 2	73
Figura 26 –	Análise do tempo de execução do algoritmo evolucionário em função da quantidade de serviços	73
Figura 27 –	Análise do tempo de execução considerando a inserção de soluções iniciais	74
Figura 28 –	Representação em <i>boxplot</i> da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e algoritmo evolucionário que relaciona o número de serviços (todos os serviços são do tipo 1+R) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima ...	74

Figura 29 – Representação em *boxplot* da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e algoritmo evolucionário que relaciona o número de serviços (todos os serviços são do tipo 1+1+R) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima ... 75

Figura 30 – Representação em *boxplot* da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e algoritmo evolucionário que relaciona o número de serviços (todos os tipos de serviços alternados) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima ... 76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Algoritmo 1	41
Quadro 2 –	Algoritmo 2	42
Quadro 3 –	Algoritmo 3	42
Quadro 4 –	Algoritmo 4	43
Quadro 5 –	Algoritmo 5	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de trabalhos relacionados.....	37
Tabela 2 – Matriz de tráfego para a topologia 1	45
Tabela 3 – Matriz de tráfego de serviços utilizados no cenário da Figura 15. Cada célula da tabela representa o número de serviços solicitados (1+R) entre cada par de nós da rede	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGC	Controle Automático de Ganho (Automatic Gain Control)
APD	Fotodiodo de avalanche. (Avalanche photodiode)
CAPEX	Despesas de Capital (Capital Expenditure)
CD	Distância de aglomeração. (Crowding Distance)
DP-QPSK	Chaveamento em fase e quadratura em dupla polarização (Dual Polarization Quadrature Phase Shifting Keying)
DSF	Fibra de Dispersão Deslocada (Dispersion Shifted Fiber)
DWDM	Multiplexação por divisão de comprimento de onda denso (Dense Wavelength Division Multiplexing)
EDFA	Amplificador a fibra dopada com Érbio (Erbium Doped Fiber Amplifier)
ILP	Programação Linear Inteira. (Integer Linear Programming)
MMF	Fibra multi-modo. (Multi Mode Fiber)
NG-OTN	Rede óptica de transporte de última geração. (Next Generation Optical Transport Network)
ODU	Unidade de dados de canal óptico. (Optical Channel Data Unit)
OPEX	Despesas Operacionais. (Operational Expenditure)
OTN	Rede óptica de transporte. (Optical Transport Network)
OTS	Chave de transporte óptico. (Optical Transport Switches)
OEO	Óptico-Elétrico-Óptico (OPTICAL-ELECTRICAL-OPTICAL)
OOK	Chaveamento Liga/Desliga. (On-Off Keying)
ROADM	Multiplexador óptico reconfigurável add/drop. (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)
SSMF	Fibra mono-modo padrão. (Standard Single Mode Fiber)
TIRF	Taxa de Insucesso na Restauração de Falhas
TDM	Multiplexação por divisão de tempo. (Time division multiplexing)

LISTA DE SÍMBOLOS

Mb/s	Mega bits por segundo [10 ⁶ b/s] (Mega bits per second)
Gb/s	Giga bits por segundo [10 ⁹ b/s] (Giga bits per second)
dB/km	Decibel por Quilômetros (Decibel per Kilometer)
km	Quilômetros [10 ³ m] (Kilometers)
nm	Nanômetros [10 ⁻⁹ m] (Nanometers)
Tb/s	Tera bits por segundo [10 ¹² b/s] (Tera bits per second)
μm	Micrômetros [10 ⁻⁶ m]
R	Rede Óptica
L	Enlace Óptico
N	Nó DWDM
O	Nó OTN
Lb	Linkbundle
I	Interface de linha da camada OTN
Te	Te-Link
IMax	número máximo de interfaces permitidas em cada linkbundle da rede
NI	Número de interfaces total da solução do algoritmo evolucionário
TIRF	Taxa de Insucesso na Restauração de Falhas
IR	Insucessos na restauração
TTR	Total de tentativas de Restauração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	19
1.2	Definição do problema	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Objetivo geral	21
1.3.2	Objetivos específicos	22
1.4	Descrição dos capítulos	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Redes DWDM	24
2.1.1	Primeira geração	24
2.1.2	Segunda geração	26
2.1.3	Terceira geração	27
2.1.4	Componentes de uma rede DWDM	28
2.2	Redes de Transporte Óptico (OTN)	30
2.2.1	Equipamentos e estruturas lógicas da Camada OTN	30
2.3	Características de tráfego e mecanismos de resiliência	32
2.4	Planejamento de redes ópticas como problema multiobjectivo	34
3	TRABALHOS RELACIONADOS	36
4	ALGORITMO HEURÍSTICO – OTN-PASRIN	39
4.1	OTN-PASRIN-Max e OTN-PASRIN	40
4.2	Arranjo experimental	41
4.3	Complexidade dos algoritmos	46
4.3.1	OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max	47
4.3.2	Algoritmo Exaustivo	47
4.4	Resultados dos experimentos	47
4.4.1	Resultados para a Topologia 1	47
4.4.2	Resultados para a Topologia 2	48
5	ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO PARA O PROJETO DE REDES ÓPTICAS RESILIENTES DO TIPO OTN SOBRE DWDM	54
5.1	Conceitos básicos da Otimização Multiobjetiva	54
5.2	NSGAI	55
5.3	Descrição da proposta	58
5.4	Ferramenta de planejamento	62

5.5	Analisador de falhas	63
5.6	Modelagem e configurações para o Algoritmo Evolucionário	64
5.6.1	Modelagem do indivíduo	64
5.6.2	Inicialização dos indivíduos e da população	65
5.6.3	Alocação das interfaces de rede para avaliação	65
5.6.4	Avaliação da Função Objetivo	66
5.7	Arranjo experimental	68
5.7.1	Parâmetros do Algoritmo Evolucionário	69
5.7.2	Complexidade do Algoritmo Evolucionário	69
5.8	Resultados dos experimentos	69
5.8.1	Resultados para a Topologia 1	69
5.8.2	Resultados para a Topologia 2	70
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
6.1	Conclusões e resultados	77
6.2	Publicações relacionadas	78
6.3	Trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

A demanda por serviços de telecomunicações de alta qualidade vem crescendo bastante nos últimos anos devido ao aumento do número de aplicações na internet, como *streaming* de vídeo, televisão de alta definição, redes sociais, transferência de arquivos, entre outros. Atualmente, a tecnologia mais indicada para suprir as altas taxas de transmissão requeridas são as redes ópticas (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). Com essa expansão do mercado de redes ópticas, os negócios relacionados a essa indústria passaram a atrair mais investimentos em inovação na área (OSA INDUSTRY DEVELOPMENT ASSOCIATES, 2018).

Um paradigma adotado pela comunidade para redes de transporte é o padrão OTN (*Optical Transport Network* - OTN) definido pela recomendação ITU-T G.872 (ITU-T, 2019). Essas redes chegaram ao mercado de comunicações trazendo benefícios econômicos e operacionais de virtualização. Essa tecnologia funciona como uma camada superior à rede DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) que permite uma utilização mais eficiente dos recursos da camada óptica. A comutação OTN desacopla os clientes das interfaces de linha, garantido que os enlaces estejam funcionando da forma mais eficiente possível, evitando assim, o desperdício de banda de transmissão. Esse conceito é levado adiante em uma rede de *Switches* OTN, permitindo que o tráfego seja agregado em nós intermediários e direcionado para rotas que estão sendo subutilizadas (SCHMITT, 2012).

A otimização de sistemas utilizando meta-heurísticas é uma aplicação conhecida e utilizada para solucionar problemas complexos do mundo real. Os algoritmos evolutivos se encaixam nesse conjunto de ferramentas que, através de iterações e combinações de possíveis soluções simuladas, conseguem obter resultados satisfatórios para aplicações práticas. Já existem na literatura algumas aplicações de algoritmos evolucionários para o planejamento de redes ópticas DWDM (ARAÚJO, 2015), inclusive, considerando mais do que um único objetivo conflitante. Outros trabalhos também fazem uso de algoritmos evolucionários multiobjetivos para o planejamento da camada OTN, porém algumas características ligadas à resiliência da rede (capacidade da rede continuar em operação diante de adversidades) não foram abordadas no processo de planejamento (MONIZ et al., 2019).

Um problema comum em aplicações práticas de redes ópticas são as falhas nos enlaces. Essas falhas podem ocorrer por vários fatores, desde falha humana

(como pode ser visto no acidente com escavadeira na Figura 1(a)) até tragédias naturais (como o ataque de tubarão mostrado na Figura 1(b)). Uma falha em algum enlace da rede pode acarretar em perda de receita aos clientes e pode resultar em multas para as prestadoras de serviços de telecomunicações. Para contornar esses problemas, mecanismos de resiliência são adicionados no projeto da rede. A resiliência em redes ópticas é a capacidade que a rede possui de continuar em operação mesmo com a ocorrência de falhas (ZHOU; SUBRAMANIAM, 2000). As principais técnicas para prover resiliência em redes ópticas envolvem a utilização dos mecanismos de proteção e restauração (ASTHANA; SINGH, 2004). No mecanismo de proteção são alocados recursos redundantes para que, caso haja uma falha, a conexão seja mantida utilizando os equipamentos reservados (RAMAMURTHY; MUKHERJEE, 1999b). Já no mecanismo de restauração, o processo de recuperação é feito a partir de recursos remanescentes. Após a falha, um algoritmo de restauração é disparado para encontrar uma rota válida que seja capaz de retornar o serviço ao seu pleno funcionamento (RAMAMURTHY; MUKHERJEE, 1999a). Durante o planejamento de uma rede é possível realizar simulações de falhas para garantir que a mesma é tolerante a um determinado cenário. Outra abordagem que pode ser adotada para realizar essa análise é utilizar estimadores baseados em inteligência computacional (LIRA et al., 2019).

Figura 1 – (a) Fibra danificada em decorrência de acidente em construção civil. (b) Cabo submarino de fibra óptica sendo atacado por tubarão.



Fonte: <http://www.chinacablesbuy.com/what-can-do-damages-to-the-fiber-cables.html>. Acesso em setembro de 2020.

Nas Seções a seguir são apresentadas em mais detalhes as motivações, a definição do problema, os objetivos e a organização dos demais capítulos.

1.1 Motivação

O crescimento da demanda por taxas de transmissão mais altas fez com que as redes de telecomunicações se tornassem mais disseminadas com passar do tempo (ZYSKIND; SRIVASTAVA, 2011). Em paralelo a esse crescimento, o valor recebido por bit transmitido vem caindo ao mesmo tempo que a demanda de novos tipos de serviços deve ser provisionada de forma rápida. Para acompanhar essa tendência, um dos grandes desafios da área de telecomunicações é prover maneiras de projetar redes de forma eficiente no que diz respeito à redução de custos *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure*(OpEX), que estão relacionados com os custos de implantação e operação, respectivamente.

As atuais composições das redes ópticas de transporte estão mudando de estruturas ponto a ponto para topologias em malha, com diferentes granularidades de comutação, várias classes de serviços de sobrevivência e com suporte à diversos formatos de modulação. Essa evolução é possível graças ao surgimento de novas tecnológias de comutação em redes ópticas como os ROADMs (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers*) (PERRIN, 2010), equipamentos que dão suporte a comutação multicamadas, o que inclui o ODU (*Optical Channel Data Unit*) e pacotes (GLINGENER, 2011). Essas tecnológias incorporaram mais dinamismo e flexibilidade às redes de transporte, além de um aumento de capacidade de forma bem menos custosa, permitindo assim, um grande crescimento na capacidade das conexões de acesso, redes metropolitanas e de longa distância a taxas elevadas (INDEX, 2013). Essas redes são denominadas na literatura como *Next Generation Optical Transport Networks* (NG-OTN)(EIRA et al., 2016).

Se por um lado essas tecnológias proporcionam melhorias relacionadas ao aproveitamento dos recursos da rede, por outro lado, a complexidade de planejamento aumenta bastante, pois é inserida uma nova camada que representa configurações de dispositivos e várias estruturas lógicas. Em uma rede óptica com uma camada OTN, por exemplo, a quantidade de configurações possíveis depende diretamente do seu tamanho, ou seja, quanto maior (em termos de quantidade de nós e enlaces) e mais conectada for a rede, maior serão as possibilidades de planejamento. Problemas que envolvem combinações de várias variáveis, dependendo da magnitude do problema, podem demandar um longo tempo para chegar na melhor solução possível. Em alguns casos, como o planejamento de uma rede malhada com mais de 30 nós e

múltiplas conexões, o tempo computacional empregado para testar todas as possibilidades de configurações pode superar os níveis aceitáveis. Nessas situações são adotadas heurísticas e meta-heurísticas que são capazes de encontrar em tempo hábil uma solução aplicável (que não necessariamente é a solução ótima).

O planejamento de redes ópticas OTN é um problema prático e vem sendo alvo de estudos para aplicações diretas no mercado. Como nesses casos existem, em geral, pelo menos dois objetivos conflitantes, a aplicação de algoritmos multiobjetivos se faz necessária para se obter resultados coerentes com a problemática. Estudos já utilizam, por exemplo, aplicação de algoritmos evolucionários multiobjetivos para planejamento da camada física de redes do mundo real baseados em dados socioeconômicos da região (Dupleix; Araújo; Bastos-Filho, 2016). Nesta Tese de doutorado a estratégia de planejamento foi voltada ao dimensionamento de recursos de rede de tal forma que a camada OTN possua custo com equipamentos minimizados, porém, mantendo a capacidade total de restauração definida nas premissas de projeto.

1.2 Definição do problema

O problema trabalhado nesta Tese consiste em realizar o planejamento da camada de rede OTN sobre uma rede DWDM de forma que os mecanismos de resiliência (proteção e restauração) configurados nas premissas do projeto da rede sejam totalmente atendidos. Considerando uma rede R , que possui N nós e L enlaces ópticos, o conjunto formado por L e N é considerado a camada DWDM da rede. Cada nó N pode possuir zero ou mais nós O associados a ele. Os nós O são as estações da camada OTN. Cada possibilidade de conexão entre dois nós O é chamada de L_b (*linkbundle*) que, internamente, é associada à um conjunto de fibras ópticas da camada DWDM. Cada nó O da camada OTN pode comportar zero ou mais interfaces I (interface de linha da camada OTN). Cada L_b da camada OTN pode comportar zero ou mais estruturas T_e (Te-Links) que consistem em conexões entre uma interface I de origem e outra interfaces I de destino. As conexões T_e possibilitam o embarque dos serviços e estão associadas a um canal da camada DWDM. A rede R deverá embarcar um conjunto de serviços estáticos S que serão fornecidos previamente. Cada serviço S possui uma classe de serviço (que define o tipo de resiliência adotada), uma referência ao nó O de origem e uma referência ao no O de destino. Para que um

serviço S seja embarcado se faz necessário que sejam alocados um conjunto de Tejs com capacidade para comportá-lo. Caso o serviço possua mecanismos de proteção e restauração, os mesmos também deverão ser totalmente satisfeitos. Ao final do planejamento, existirá uma quantidade de interfaces I alocadas em cada estação OTN O. Uma solução considerada eficiente é aquela que possui uma quantidade mínima de interfaces I alocadas na rede e que atenda a todos as configurações de resiliência definidas pelos tipos de cada serviço S. Os mecanismos de resiliência considerados no problema são a proteção e a restauração dos serviços. Uma representação gráfica do modelo de rede multicamadas considerado neste trabalho é apresentada na Figura 2. Por exemplo, na figura mencionada temos o nó OTN O2 associado ao nó DWDM N 2. Este mesmo nó OTN O2 está conectado a outro nó OTN O3 por meio do *linkbundle* Lb3.

Baseado no problema apresentado foi levantada a seguinte hipótese: um algoritmo evolucionário multiobjetivo é capaz de realizar o dimensionamento de uma quantidade mínima de interfaces OTN e com máxima resiliência.

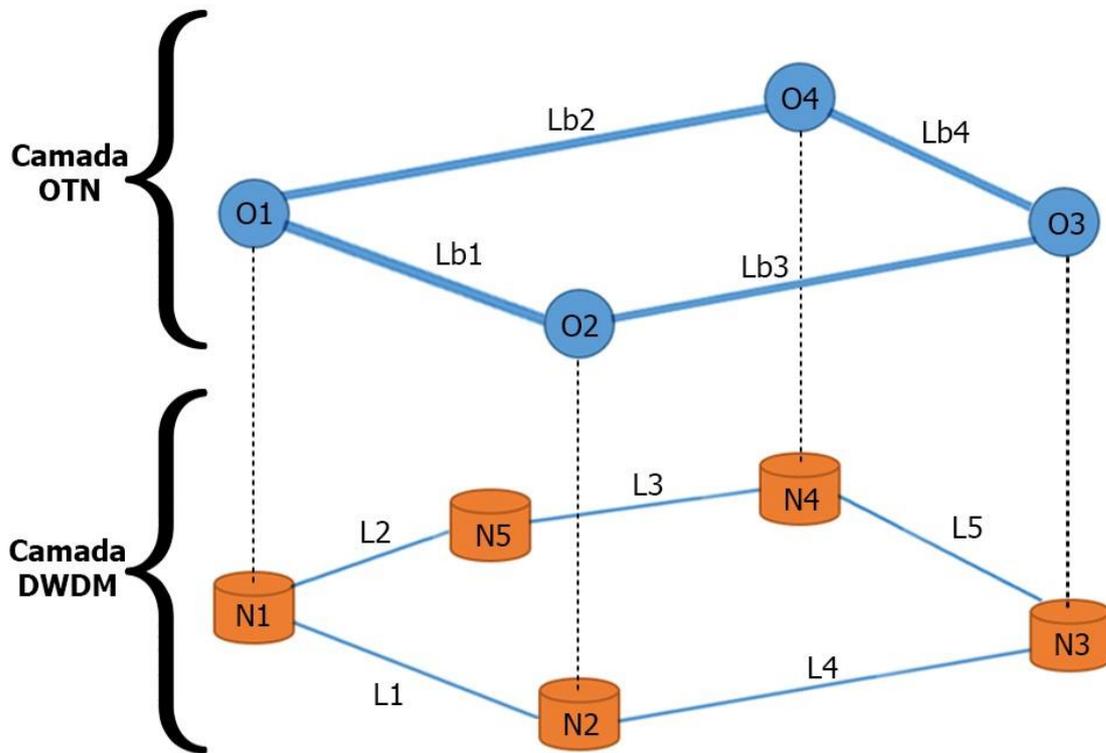
1.3 Objetivos

Baseado no contexto apresentado, esta Seção define o objetivo geral e os objetivos específicos para esta Tese.

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um algoritmo de planejamento de rede baseados em heurística e/ou metaheurística capazes de realizar o dimensionamento da camada OTN sobre DWDM com quantidade mínima de interfaces de forma que os requisitos de resiliência dos serviços sejam totalmente atendidos.

Figura 2 – Representação gráfica do modelo de rede multicamadas OTN sobre DWDM considerado neste trabalho.



Fonte: O autor, 2020.

1.3.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, alguns objetivos específicos foram definidos. Esses objetivos são enumerados abaixo:

1. Propor uma modelagem do problema para o ambiente de simulação;
2. Propor abordagens heurísticas para servirem de base comparativa;
3. Propor uma versão customizada do algoritmo evolucionário NSGAI (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) voltada para o problema abordado nesta Tese;
4. Publicar os resultados obtidos em conferências e revistas.

1.4 Descrição dos capítulos

Esta Tese está organizada em seis capítulos, em que o primeiro é esta

Introdução. O restante do trabalho está organizado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica.

No Capítulo 3 são apresentados os trabalhos relacionados.

No Capítulo 4 são apresentadas duas técnicas baseadas em heurísticas para solucionar o problema atacado nesta Tese, o OTN-PASRIN e o OTN-PASRIN-Max, com destaque para o OTN-PASRIN, que consegue obter soluções mais eficientes.

No Capítulo 5 é apresentada uma abordagem que utiliza um algoritmo evolucionário para o projeto de redes ópticas resilientes do tipo OTN sobre DWDM (principal proposta desta Tese).

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo está organizado em duas Seções. A Seção 2.1 apresenta uma visão geral sobre redes DWDM, onde são abordadas as gerações de redes ópticas ao longo do tempo e os principais equipamentos utilizados. A Seção 2.2 aborda as redes de transporte óptico (OTN), os principais dispositivos e as suas estruturas lógicas. A Seção 2.3 apresenta as características de tráfego e os principais mecanismos de resiliência. Por último, na Seção 2.4, é apresentada uma visão geral sobre planejamento de redes ópticas OTN.

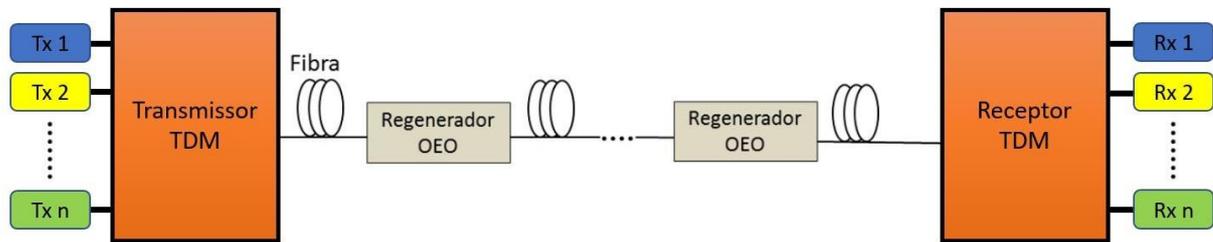
2.1 Redes DWDM

As redes ópticas, como as conhecemos, são resultados de uma constante evolução da tecnologia de comunicações ópticas ao longo do tempo. Essa evolução pode ser dividida em gerações que podem ser distinguidas de acordo com as principais tecnologias de transmissão/recepção, topologias de rede, processo de multiplexação da comunicação e a regeneração de sinais que se destacaram ao longo do tempo (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). Essas gerações de redes ópticas serão abordadas a seguir.

2.1.1 Primeira geração

Na década de 1980 surgiu a primeira geração de redes ópticas. Basicamente, nessa geração de redes, houve a substituição dos cabos de cobre pela fibra óptica. Com isso, surgiram as redes de topologia ponto-a-ponto fixa, onde não havia roteamento de tributários ao longo do percurso. Nessas redes era utilizado um enlace de fibra óptica para conectar dois nós da rede e o sinal era amplificado ao longo do caminho fazendo uso de regeneradores OEO (óptico-eletrônico- óptico) que possuíam a capacidade de regenerar um único sinal óptico levando em consideração uma única taxa de modulação (regeneração transparente). Na Figura 3 é apresentado um exemplo de topologia de primeira geração.

Figura 3 – Exemplo de topologia de rede óptica de primeira geração.



Fonte: O autor, 2020.

Na primeira geração, os transmissores utilizavam modulação OOK (*On-Off Keying*) com moduladores Mach-Zehnder ou por meio de modulação direta nos lasers. Fotodetectores semicondutores PIN e fotodetectores de efeito avalanche (APD) foram os tipos de receptores mais utilizados nessa geração. O tipo de multiplexação mais utilizado nessa geração de redes ópticas foi o TDM (*time division multiplexing*) (AGRAWAL, 2010), onde era possível transmitir vários sinais independentes, porém cada um em uma janela de tempo específica de tamanho fixo (síncrona) ou variável (assíncrona).

Nesses primeiros sistemas de comunicações ópticas as taxas de transmissão eram limitadas a 100 Mb/s por conta da dispersão modal das fibras multi-modo (MMF). Com a introdução das fibras mono-modo padrão (SSMF) (YAMADA; MACHIDA; KIMURA, 1981) essa limitação foi superada. A utilização das fibras SSMF combinadas com lasers semicondutores estáveis em temperatura ambiente possibilitaram a implementação de sistemas de até 1,7 Gb/s ao longo de 50 km (JACOBS, 1995).

Com a evolução no processo de produção das fibras ópticas, o efeito da atenuação foi reduzido para valores menores que 0,25 dB/km na região de 1,55 μm . Acompanhando as melhorias das fibras, também começaram a surgir lasers semicondutores baseados em InGaAsP que operavam em temperatura ambiente. Entretanto, ainda existia um problema que limitava o aumento da capacidade dos sistemas ópticos, a dispersão cromática. A solução desse problema surgiu com a implementação e uso de fibras com dispersão descolada (DSF). A utilização dessas tecnologias combinadas, ao longo da década de 1990, permitiu um aumento de capacidade dos sistemas ópticos para até 40 Gb/s (BREUER et al., 1998).

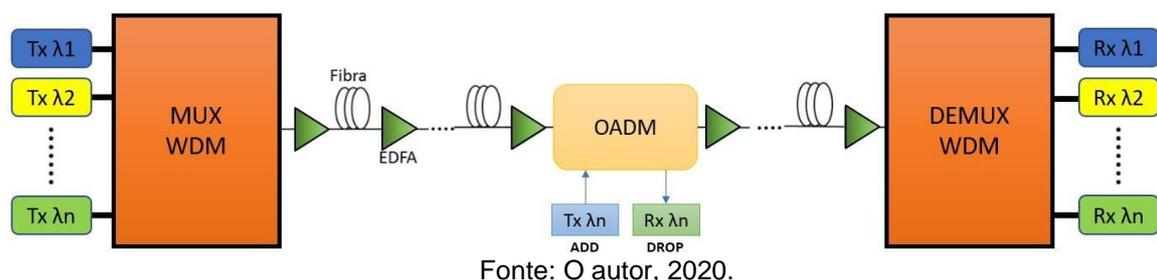
Outro grande obstáculo que ia de encontro com o aumento da taxa e alcance dos sistemas ópticos era a necessidade do uso de muitos regeneradores OEO. O problema principal era que cada amplificador era projetado para operar em uma

determinada taxa e com um formato de modulação específico, com isso, qualquer alteração em um desses parâmetros resultaria na troca de todos os regeneradores instalados. Este problema foi resolvido com o desenvolvimento de amplificadores EDFAs, que são dispositivos transparentes ao comprimento de onda, formato de modulação e taxa dos sinais transmitidos, capaz de substituir os regeneradores elétricos. A utilização desses amplificadores viabilizou o surgimento da tecnologia WDM (*wavelength division multiplexing*), que permitia que vários canais pudessem ser transmitidos/regenerados de forma simultânea sem necessidade de conversão para o domínio elétrico, dando início, na década de 1990, a segunda geração das redes ópticas.

2.1.2 Segunda geração

A segunda geração de redes ópticas estendeu-se do início da década de 1990 até a metade da década de 2000. Durante este período, a transmissão passou a ser ponto-a-multiponto com roteamento fixo e fazendo uso de módulos de adição e remoção óptico, o OADM (*Optical Add Drop Multiplexer*), estratégia de multiplexação WDM, modulações OOK/DPSK/DQPSK, amplificadores EDFA e detecção direta/balanceda de até 40Gb/s. A Figura 4 mostra uma topologia característica da segunda geração dos sistemas ópticos.

Figura 4 – Exemplo de topologia de rede óptica de segunda geração.



A evolução dos transmissores utilizados nas redes ópticas de segunda geração permitiu que os mesmos atingissem taxa de transmissão/eficiência espectral de 10 a 40 Gb/s por canal utilizando formatos de modulação como DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) ou DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*). Nessa geração, os receptores mais utilizados eram compostos por decodificadores

diferenciais em conjunto com fotodetectores semicondutores para detecção do sinal.

A característica das redes de segunda geração que mais afetou a capacidade dos sistemas ópticos foi a introdução da multiplexação WDM, que é uma tecnologia capaz de multiplexar diferentes comprimentos de onda em uma única fibra óptica. Utilizando essa técnica foi possível aumentar exponencialmente a capacidade dos sistemas ópticos apenas separando por espectro as portadoras de forma que não haja interferências entre os canais adjacentes.

O que possibilitou a implementação dos sistemas WDM foi a utilização do EDFA, que possui a capacidade de amplificar toda a banda C (1530nm a 1565nm) de forma transparente ao formato de modulação, o que reduziu de forma drástica os custos com regeneradores elétricos. A partir do estabelecimento dessas tecnologias, deu-se início a uma revolução nas redes ópticas, o que resultou na duplicação da capacidade transmitida a cada 6 meses. As taxas de comunicação subiram de 10Gb/s até 10Tb/s entre as décadas de 1990 e 2000.

No início da década de 2000, o aumento das taxas de transmissão era relacionado ao aumento do número de canais que poderiam ser utilizados. Os primeiros sistemas ópticos fizeram uso da região do espectro óptico da banda C, pois é a região com menor atenuação nas fibras SSMF e também por ser a região em que os EDFAs operam. Com o aumento da demanda, outras regiões do espectro passaram a ser exploradas com o intuito de expandir a capacidade das redes ópticas. Para que o sistema pudesse operar em outras regiões do espectro, foram iniciadas novas pesquisas que resultaram no desenvolvimento de amplificadores como o Raman (BROMAGE, 2004) e os baseados em fibra dopada com elementos terra rara além do érbio (BASTOS-FILHO, 2005).

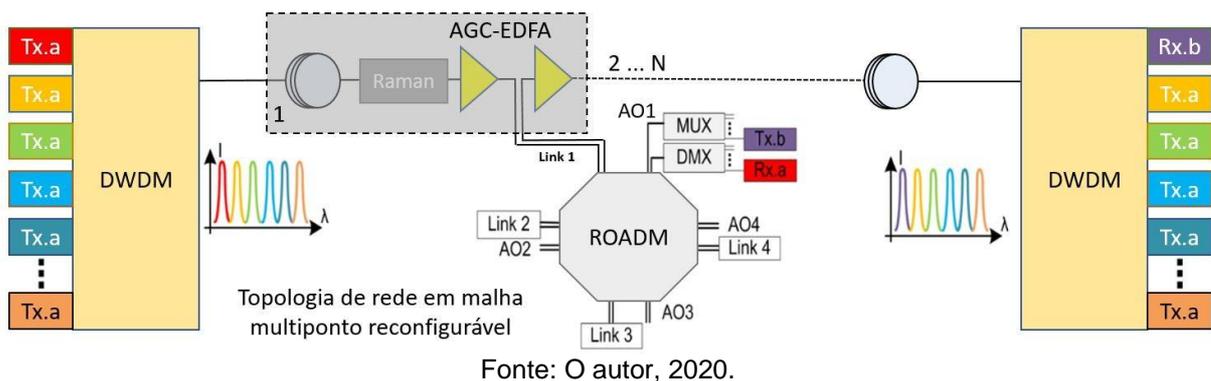
Com o contínuo aumento da demanda por banda, estratégias mais eficientes para o aproveitamento do espectro começaram a ser desenvolvidas. Com isso, surgiram novos formatos avançados de modulação juntamente com o conceito de redes WDM densas (DWDM). Além disso, para atender aos requisitos de uma gerência eficiente, começaram a ser desenvolvidos elementos capazes de realizar multiplexação com adição e remoção de canais reconfiguráveis (ROADM).

2.1.3 Terceira geração

A terceira geração dos sistemas de comunicações ópticas surgiu a partir da

metade da década de 2000. Essa geração de redes apresentou a maior evolução em relação à eficiência espectral da fibra devido a aplicação das tecnologias DWDM em conjunto com os formatos avançados de modulação e recepção coerente. Foram implementados transmissores capazes de utilizar modulação avançada de fase e quadratura em dupla polarização (DP-QPSK), receptores com detecção coerente e processamento digital de sinais para compensar efeitos não lineares. Os sistemas passaram a trabalhar com roteamento reconfigurável (ROADM) com dependência de cor/direção/contenção e como grade fixa (espaçamento entre canais de 50 ou 100 GHz). A amplificação passou a ser feita utilizando EDFAs com controle automático de ganho (AGC) e amplificadores Raman com bombeio fixo. Na Figura 5 é apresentado um exemplo de topologia de terceira geração.

Figura 5 – Exemplo de topologia de rede óptica de terceira geração.



2.1.4 Componentes de uma rede DWDM

A tecnologia de redes ópticas DWDM exige a utilização de alguns dispositivos essenciais. Esses dispositivos podem ser instalados tanto nas estações/nós da rede quanto ao longo do enlace. Alguns dos dispositivos mais comuns são as fibras ópticas, os transmissores ópticos, os multiplexadores ópticos, os amplificadores ópticos e os comutadores ópticos (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). Uma breve descrição de cada um desses dispositivos será dada a seguir.

- a. **Fibra Óptica:** é o meio pelo qual o sinal óptico é transmitido pela rede. É um filamento de material transparente e possui uma estrutura básica comum a maioria das fibras. Possui um núcleo constituído de um material com índice de refração maior do que o da casca. Essa característica cria um efeito de

"reflexão interna total" no interior da fibra, fazendo com que o núcleo sirva como meio de passagem do sinal. Além do revestimento interno, existe também uma capa de proteção que cobre toda a estrutura. Fibras ópticas possuem uma largura de banda disponível muito maior do que os meios de comunicação convencionais baseados em fios de cobre ou rádio frequência e não sofrem com os efeitos causados pelo eletromagnetismo. Entretanto apresentam alguns efeitos negativos característicos desse tipo de tecnologia, como o FWM (*Four-wave mixing*) e a dispersão cromática (efeitos que podem ser minimizados utilizando amplificadores ópticos e compensadores de dispersão).

- b. **Transmissores ópticos:** nos sistemas de comunicações ópticas, os transmissores são dispositivos à base de material semicondutor capazes de converter o sinal elétrico em sinal óptico. Algumas vantagens apresentadas na utilização de dispositivos baseados em semicondutores são: alta eficiência, boa confiabilidade, tamanho compacto e área de emissão compatível com as dimensões do núcleo das fibras disponíveis no mercado (SINGH, 1995). Em comunicações ópticas, os LASERs (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) são utilizados como transmissores ópticos.
- c. **Multiplexadores ópticos:** um dos elementos fundamentais para a utilização da tecnologia WDM são os multiplexadores ópticos. Eles possuem a função de combinar sinais de várias fontes com diferentes comprimentos de onda em uma única fibra (multiplexador). Para que o sinal seja recuperado é necessário utilizar um módulo que faça o processo inverso, ou seja, separe os diversos sinais que foram combinados em canais independentes (demultiplexador).
- d. **Amplificadores ópticos:** com o decorrer do tempo, a luz propagada na transmissão em redes ópticas sofre um efeito de atenuação. Essa perda de potência do sinal pode ser tão alta que torna o sinal impossível de ser reconhecido pelo receptor. Duas soluções para este problema é a utilização de amplificadores ou regeneradores. Os regeneradores convertem o sinal do domínio óptico para o elétrico antes de uma degradação que interfira na recepção e depois o converte novamente para o domínio óptico. Já os amplificadores são dispositivos que podem amplificar o sinal sem precisar convertê-lo para o domínio elétrico. Os amplificadores mais utilizados são os amplificadores Raman (RFA - *Raman Fiber Amplifiers*) e o EDFA (*Erbium*

Dopped Fiber Amplifier).

- e. **Comutadores ópticos:** os comutadores ópticos possuem a fundamental função de realizar o chaveamento de um sinal sem a necessidade de conversão para o domínio elétrico. Este dispositivo possibilita o estabelecimento do *lightpath* (conjunto formado por rota e um comprimento de onda) desde um nó de origem até um nó de destino sem a necessidade de conversão OEO. O OXC (*Optical cross connects*) é o dispositivo usado para realizar o chaveamento em nó da rede.

2.2 Redes de Transporte Óptico (OTN)

Esta seção apresenta uma visão geral sobre as características do planejamento das OTN, assim como os principais equipamentos e estruturas lógicas que devem ser considerados no problema de planejamento.

2.2.1 Equipamentos e estruturas lógicas da Camada OTN

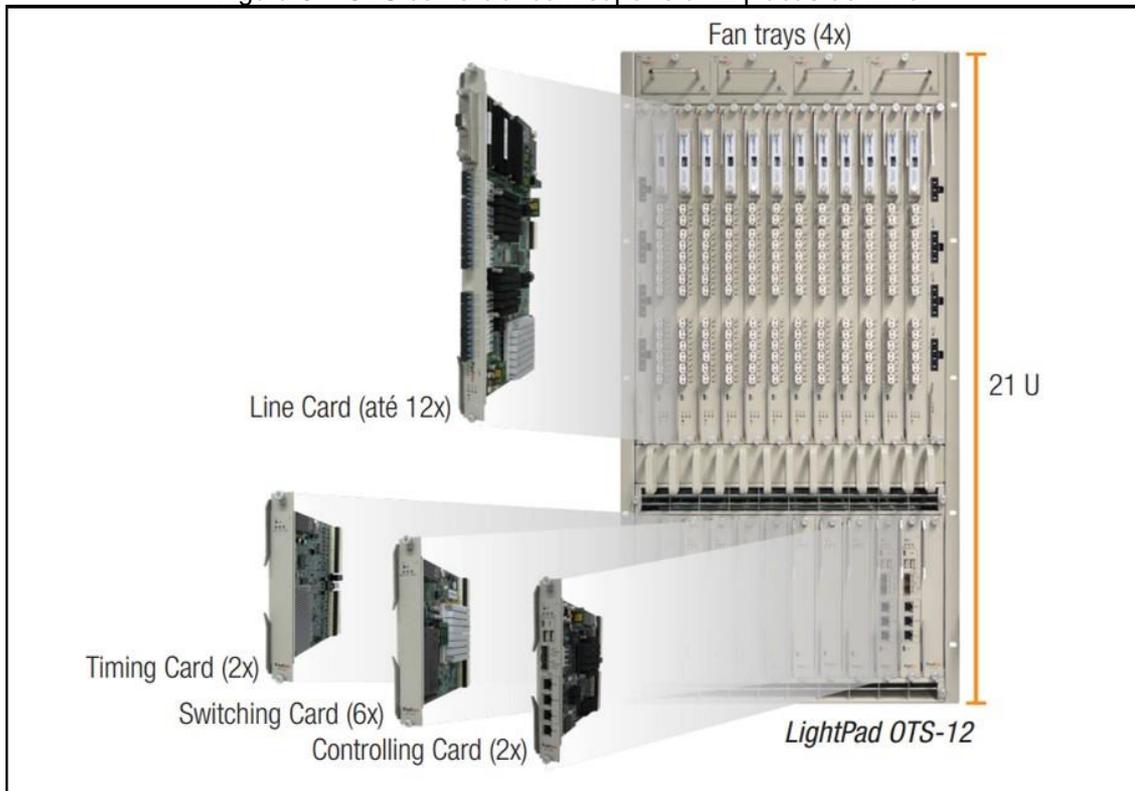
A OTN introduzem um novo conjunto de equipamentos e estruturas lógicas que devem ser consideradas no planejamento dessa camada de rede. Um dos principais equipamentos que são produzidos para a utilização desta tecnologia são as placas de linha, que são dispositivos compostos por interfaces OTN (definidas na recomendação ITU G.709 (ITU-T, 2020)) que são utilizadas para fazer a conexão entre a camada OTN e a camada óptica. Essas interfaces podem ser configuradas tanto na função cliente como na função de interfaces de rede, possuem capacidade de 10Gb/s, 100Gb/s, 200Gb/s ou 400Gb/s (LIGHTPAD, 2018a; LIGHTPAD, 2018 b; LIGHTPAD, 2018c) e a quantidade de cada tipo pode variar dependendo do modelo de placa. Essas placas são instaladas em bastidores específicos que são chamados de OTSs (*Optical Transport Switches*). A Figura 6 mostra um OTS utilizado comercialmente com suporte a 12 placas de linha.

A quantidade de placas suportadas por esses bastidores também depende do modelo disponível. O CAPEX do projeto da camada OTN baseia-se quase que integralmente na quantidade de interfaces utilizadas para compor o projeto. Logo, quanto menor for o número de interfaces utilizadas, mais barato será o custo total da rede OTN.

Para o planejamento das OTN, algumas estruturas lógicas devem ser consideradas. Os principais elementos são o nó OTN, o TE-Link/Trecho OTN, o *Linkbundle* e o LSP OTN/Caminho OTN. A seguir, esses elementos são definidos:

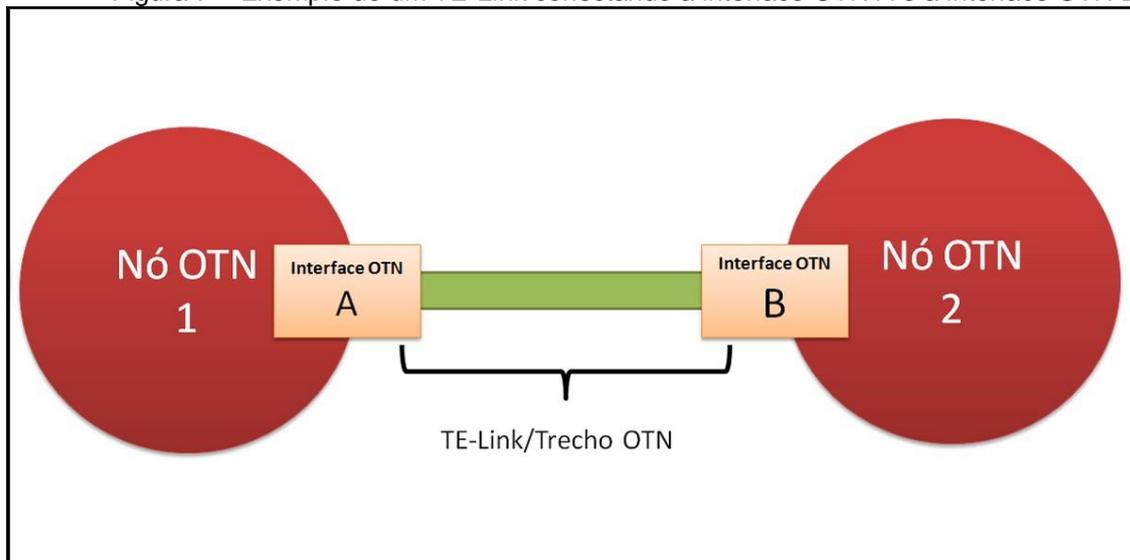
- a. **Nó OTN:** é a representação lógica do OTN *Switch* (OTS) e sempre está associado a um nó da camada óptica.
- b. **TE-Link/Trecho OTN:** conexão lógica estabelecida entre duas interfaces OTN. Na Figura 7 é mostrado um exemplo de estrutura de TE-Link que vai da interface OTN A até a interface OTN B. No trecho entre as interfaces OTN A e OTN B, o sinal permanece na camada óptica, podendo ser usados *transponders* regeneradores interligando dois OTN *Switches* se necessário.

Figura 6 – OTS comercial com suporte a 12 placas de linha.



Fonte: LIGHTPAD, 2018d.

Figura 7 – Exemplo de um TE-Link conectando a interface OTN A e a interface OTN B.



Fonte: O autor, 2020.

- c. **Linkbundle:** Conjunto de TE-links entre dois OTN *switches*. Na qual cada TE-Link está associado a um LSP na camada DWDM. A quantidade de TE-links pode variar de 0 à n (onde n é a quantidade máxima de canais).
- d. **LSP OTN/Caminho OTN:** O LSP OTN consiste do conjunto de *Linkbundles*, seus TE-links e *Tributary Slots* associados para atender o serviço OTN.

2.3 Características de tráfego e mecanismos de resiliência

Existem várias características que determinam o funcionamento da parte lógica da rede, dentre essas características está o tipo de tráfego utilizado. Uma rede óptica pode ter três tipos de tráfegos conhecidos: estático, incremental e dinâmico (ZANG et al., 2000). No tráfego estático, todos os serviços já são conhecidos previamente, ou seja, sabe-se de antemão todas as características dos serviços, incluindo suas origens e destinos. No caso de um tráfego incremental, os serviços não são conhecidos de forma prévia, porém, à medida que as requisições chegam na rede, os serviços são estabelecidos e permanecem na estrutura do sistema de forma fixa. Por último, para o caso no qual o tráfego é classificado como dinâmico, os serviços não são conhecidos previamente e possuem um tempo determinado para permanecerem alocados na rede.

Outra característica bastante importante nas redes ópticas são os mecanismos de resiliência. Esses mecanismos devem permitir, caso seja possível,

que o sistema continue funcionando mesmo em caso de falhas. Como a demanda neste tipo de rede é bastante alta, uma falha de poucos minutos pode significar a interrupção de um grande volume de dados. Por esse motivo, a utilização de mecanismos de sobrevivência é indispensável para a administração de uma rede óptica. Em telecomunicações, resiliência é a capacidade que um sistema tem de se manter funcionando de forma confiável e com um nível de serviço aceitável, mesmo com a interferência de eventos que possam causar falhas na transmissão de dados (falhas humanas, ataques maliciosos ao sistema e desastres naturais) (ZHOU; SUBRAMANIAM, 2000). Em redes ópticas, existem basicamente dois mecanismos de sobrevivência. Um deles é chamado de restauração (esquema reativo) e o outro é conhecido como proteção (esquema pró-ativo) (MUKHERJEE, 2005, 2006; SONG, ZHANG, MUKHERJEE, 2008).

Na restauração, o algoritmo tenta restabelecer a chamada no momento em que ocorre a falha. Nesse tipo de esquema, existe uma melhor eficiência em relação à utilização dos recursos da rede, visto que são requisitados apenas no instante da falha (OU; MUKHERJEE, 2005). Já o mecanismo de proteção reserva, previamente, recursos da rede para serem utilizados em caso de falhas. Esses recursos são atribuídos a rotas alternativas e disjuntas da rota principal, que garantirão a recuperação das chamadas em eventuais falhas. Esquemas de proteção tem como característica o rápido restabelecimento das conexões (OU; MUKHERJEE, 2005).

A depender da prioridade e características do serviço, pode-se classificá-lo em algumas categorias. Uma forma de classificação é determinada pelo nível de resiliência à falhas que os serviços devem possuir. As categorias consideradas neste trabalho são: 1+0, 1+1, 1+R e 1+1+R. Essas categorias são definidas a seguir:

- a. 1+0: categoria de serviço no qual é estabelecida apenas uma rota para atender a demanda, sem nenhum mecanismo de proteção ou restauração adicional. Neste caso, se ocorrer alguma falha no caminho óptico, a conexão não será restabelecida;
- b. 1+1: um serviço que está classificado nessa categoria deve trabalhar com duas rotas de forma simultânea, ou seja, deve possuir uma rota principal e uma rota redundante para que o serviço possa continuar funcionando caso o caminho principal falhe. É uma solução cara pois exige a alocação de recursos extra de forma dedicada;
- c. 1+R: este tipo de serviço possui uma única rota para atender a demanda

solicitada, porém, caso haja falhas, um algoritmo de roteamento para restauração é ativado. Este algoritmo realiza um processo que tenta encontrar uma nova rota na rede utilizando apenas os recursos remanescentes, ou seja, a rota de restauração pode variar de acordo com o estado da rede. Esta solução é mais barata, porém existe a possibilidade de, por falta de recursos, o serviço não consiga ser restaurado. Além disso, o tempo para recuperação do serviço é maior;

- d. 1+1+R: nesse caso, temos um tipo mais completo de proteção. Um serviço classificado nessa categoria além de possuir uma rota de proteção com recursos extra previamente alocados, ainda possui a capacidade de restauração, casos exista falhas nas rotas. É um serviço bem mais caro quando comparado com os anteriores.

Todas as categorias mencionadas podem coexistir em um mesmo projeto e o custo para cada serviço pode variar de acordo com o nível de resiliência entregue.

2.4 Planejamento de redes ópticas como problema multiobjectivo

O projeto de redes ópticas é um problema de engenharia no qual o principal desafio é tentar responder qual a melhor maneira de se implementar as redes ópticas que consigam atender as demandas atuais da sociedade. O objetivo principal em um projeto de rede quase sempre é a otimização da relação custo-desempenho, ou seja, diminuir as despesas com equipamentos, manutenção e melhorar o desempenho da rede. Os principais custos em uma rede óptica são os gastos com a instalação e compra de dispositivos, que pode ser chamados de CapEx (*Capital Expenditure*) e os investimentos que dizem respeito à operação e manutenção da rede (como por exemplo os gastos com energia elétrica para manter a rede funcionando). Esse custo operacional também pode ser chamado de OpEx (*Operational Expenditure*) (SYGLETOS; TOMKOS; LEUTHOLD, 2008). O desempenho da rede pode ser medido de acordo com vários parâmetros, porém o mais comum entre eles é a medição do número de chamadas efetivamente realizadas com sucesso na rede (o que inclui garantir a implementação dos mecanismos de resiliência pré-estabelecidos). Na prática, o desempenho e o custo da rede são objetivos conflitantes, pois, normalmente, quando se investe em dispositivos para a melhoria do desempenho, o

investimento total no projeto, aumenta. Quando se faz um planejamento de redes ópticas, podem existir soluções com alto custo e alto desempenho e soluções com baixo custo e baixo desempenho. Dentre todos esses, também podem existir todo um conjunto de soluções que melhor relacionam o custo-desempenho. Essas soluções intermediárias são ditas soluções não dominadas. Todas essas soluções não dominadas são igualmente boas, ou seja, normalmente, não se pode afirmar que uma é superior a outra. Por esse motivo, a busca nesse tipo de problema resulta em um conjunto de soluções possíveis que otimizem a relação custo-desempenho. Para realizar a otimização de sistemas com essas características, pode-se utilizar algoritmos de otimização multiobjetivos.

Os algoritmos evolucionários têm obtido sucesso na busca por soluções de problemas de otimização com restrições e vários paradigmas como Algoritmos Genéticos, Evolução Diferencial, Algoritmos de Enxames e Programação Genética já foram propostos (EIBEN; SMITH, 2015; SHI; EBERHART, 1999; KARABOGA, 2005). Porém, os problemas do mundo real (como o planejamento de redes ópticas) geralmente apresentam outros desafios como muitos objetivos conflitantes que precisam ser otimizados ao mesmo tempo. Outro ponto é que em problemas reais, o trabalho de avaliar uma solução pode ser bastante custoso do ponto de vista de tempo computacional.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos relacionados ao estudo da tecnologia OTN sobre redes ópticas DWDM. Foram selecionados estudos que destacassem as características da tecnologia OTN sobre DWDM e/ou apresentassem alguma abordagem de planejamento de redes utilizando esta tecnologia. Para a busca dos trabalhos foi utilizada a string: "*otn over dwdm planning*".

Em seu trabalho, Bertolini et al. (BERTOLINI et al., 2012) analisaram o impacto da introdução de uma camada OTN sobre DWDM e redes ópticas operando com canais de 100 Gb/s. Os autores analisaram os benefícios de custo e eficiência proporcionados pelo uso de uma estratégia multicamadas. Os autores demonstraram que a tecnologia OTN melhora significativamente o custo e performance em redes de 100 Gb/s.

No estudo apresentado por Katib et al. (KATIB; MEDHI, 2012), foi proposta uma estratégia de planejamento multicamadas para otimizar a capacidade da rede. Eles propuseram um algoritmo heurístico para resolver o problema de planejamento em redes em malha de grande porte. Finalmente, eles forneceram um estudo numérico detalhado que considera vários valores de parâmetros de custo para cada camada da rede.

Morais et al. (MORAIS; PEDRO; PINTO, 2015) forneceram uma visão geral sobre estudos relacionados ao desenvolvimento de ferramentas para o planejamento de redes ópticas de transporte multicamadas. Eles abordaram três trabalhos. O primeiro (MORAIS et al., 2010) está relacionado a geração dos links da rede utilizando algoritmos genéticos. Este trabalho considera a implementação de uma rede resiliente que faz uso de mecanismos de proteção. O segundo estudo (MORAIS et al., 2013) apresenta um método de seleção de arquiteturas de nós com o objetivo de otimizar os custos de projeto considerando restrições de hardware. Esta segunda proposta faz uso de estatística e regras simples para solucionar o problema. O último trabalho (MORAIS et al., 2015) apresenta um método de planejamento para redes já implementadas que necessitam de expansão.

No trabalho de Tese de Siqueira (SIQUEIRA, 2015), foi utilizada uma ferramenta implementada em Java chamada Network Planner. Esta ferramenta, integrada a um sistema de plano de controle real, tem a capacidade de obter informações sobre topologias de rede como lista de estações, cabos ópticos

interligando as estações, lista de comprimentos de onda que interligam os equipamentos da camada superior (roteadores, *Switches* OTN, etc), matriz de demandas e estratégia de sobrevivência para cada demanda. A ferramenta também permite a simulação de redes inexistentes para verificar situações onde há falhas nos links da rede (análise de falhas), por exemplo.

Em seu estudo, Santos et al. (SANTOS; EIRA; PIRES, 2017) propuseram um algoritmo heurístico para solucionar o roteamento e agregação considerando a tecnologia OTN sobre redes DWDM flexíveis. Os autores proporam um algoritmo iterativo baseado no conceito de grafo auxiliar. Inicialmente, o algoritmo encontra uma solução aproximada e, em seguida, aplica uma melhoria de forma iterativa sobre a solução inicial. Os autores avaliaram o algoritmo em vários cenários de rede, com diferentes distribuições de tráfego e diferentes formatos de modulação. Neste trabalho não foram tratadas questões relacionadas à resiliência da rede.

Tabela 1 – Tabela de trabalhos relacionados

Autor	Ano	Multicamadas	Heurística	Metaheurística	ILP	Proteção e Restauração
Bertolini	2012	Sim	Não	Não	Não	Não
Katib	2012	Sim	Sim	Não	Não	Não
Morais	2015	Sim	Sim	Não	Não	Não
Siqueira	2015	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Santos	2017	Sim	Sim	Não	Não	Não
Moniz	2019	Sim	Não	Sim	Não	Não
Oliveira	2020	Sim	Não	Não	Sim	Não

Fonte: O autor, 2020..

Em (MONIZ et al., 2019), foi apresentada uma abordagem evolucionária multiobjetiva de roteamento de serviços em uma rede de transporte óptico (OTN) de modo que os principais recursos que impactam no CapEx (interfaces de linha e switches de transporte óptico) sejam minimizados. O problema multiobjectivo foi customizado para selecionar os nós da rede mais econômicos para adicionar os switches OTN e ao mesmo tempo procura manter a minimização das interfaces de linha. Para resolver o problema de planejamento multiobjetivo, diferentes estratégias foram consideradas para produzir a frente de Pareto de soluções não dominadas, utilizando o Algoritmo Genético de Classificação Não-dominada (NSGA-II). Essas estratégias se diferenciam em como as soluções de mutação e crossover são geradas:

aleatoriamente ou com conhecimento prévio. A qualidade das soluções obtidas com ambas as estratégias após um número fixo de gerações foi comparada. Os resultados mostraram que ao incorporar conhecimento prévio ao algoritmo genético a qualidade das soluções melhorou. Além disso, a implementação baseada em conhecimento prévio apresenta, em média, um aumento de 59% na taxa de hipervolume quando comparado ao algoritmo evolutivo puramente aleatório para o mesmo número de gerações.

Oliveira, Sousa e Vieira (OLIVEIRA; SOUSA; VIEIRA, 2020a; OLIVEIRA; SOUSA; VIEIRA, 2020b), propuseram o uso de métodos de otimização para resolver o problema de Programação Linear Inteira (ILP) para o planejamento de OTN considerando a minimização de custos. No entanto, o trabalho não considera os mecanismos de restauração e proteção em eventuais falhas nos links da rede.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais características de cada trabalho analisado individualmente. Pode-se observar que nenhum dos trabalhos encontrados propôs uma abordagem multiobjetiva que tivesse como requisito a implementação dos mecanismos de proteção e restauração simultaneamente. Tendo em vista este cenário, esta Tese propõe uma abordagem nestes moldes para solucionar o problema de forma eficiente.

4 ALGORITMO HEURÍSTICO – OTN-PASRIN

O planejamento de redes ópticas é um problema que apresenta alta complexidade e, conseqüentemente, pode demandar um tempo computacional alto para ser solucionado. Uma forma de resolver este tipo de problema é utilizando algoritmos heurísticos. Um algoritmo heurístico possui a capacidade de encontrar uma solução aproximada (que em alguns casos pode chegar a ser a solução ótima) e apresenta uma complexidade computacional menor quando comparado com um método tradicional combinatório (SUCUPIRA, 2004).

Para solucionar o problema considerado nesta Tese, Xavier et al. (XAVIER et al., 2020), propuseram algoritmos heurísticos para o dimensionamento de interfaces OTN de rede considerando resiliência total. No trabalho foram apresentados dois algoritmos, o OTN-PASRIN- Max e o OTN-PASRIN (*OTN Planning Algorithm for Sharing Restoration Interfaces*). O OTN- PASRIN-Max oferece uma solução robusta que implementa todos os requisitos de planejamento, mas a heurística não garante uma solução que implante o mínimo de recursos. A segunda versão, que foi a principal proposta do trabalho, se chama OTN-PASRIN e entrega uma solução que, simultaneamente maximiza a resiliência e minimiza a quantidade de recursos utilizados por meio do melhor reaproveitamento das interfaces durante a restauração, o que acarreta redução no custo final do projeto. As propostas foram comparadas em dois cenários: uma rede pequena com 4 nós OTN e uma rede maior composta por 16 nós na camada OTN. No primeiro cenário o OTN-PASRIN foi comparado com uma abordagem exaustiva, que encontra a solução ótima, e os resultados foram bem próximos considerando as mesmas condições de tráfego. Já no segundo cenário, a comparação foi feita entre o OTN-PASRIN-Max e o OTN-PASRIN, pois uma abordagem exaustiva se torna inviável em cenários maiores. Os resultados para o segundo cenário mostraram que a solução encontrada pelo OTN-PASRIN conseguiu economizar aproximadamente 20% da quantidade de interfaces encontradas na solução da outra abordagem, o OTN-PASRIN-Max.

Neste Capítulo serão apresentados de forma detalhada os algoritmos heurísticos OTN- PASRIN-Max e OTN-PASRIN, e os resultados obtidos nos cenários avaliados.

4.1 OTN-PASRIN-Max e OTN-PASRIN

O principal objetivo do planejamento OTN é fornecer uma solução eficiente (com o menor número de interfaces possível e atendendo todo os critérios de resiliência) para a alocação de interfaces na camada OTN. O objetivo é implementar todos os serviços solicitados no projeto com o menor custo possível, ou seja, usando o mínimo de interfaces OTN possível. Além disso, a solução deve garantir que os mecanismos de resiliência atribuídos a cada serviço sejam contemplados. O algoritmo heurístico denominado *OTN Planning Algorithm for Sharing Restoration Interfaces* (OTN-PASRIN) é capaz de realizar este planejamento considerando diversos tipos de serviços e com foco no mecanismo de restauração, entretanto, o mecanismo de proteção também é atendido no processo de planejamento. Uma das etapas algoritmo OTN- PASRIN é realizar uma análise geral de falhas que permite o uso mais eficiente das interfaces OTN e garante que os serviços sejam resistentes a falhas simples e duplas na rede.

A Figura 8 apresenta um fluxograma do algoritmo OTN-PASRIN. As entradas do processo são a rede (que é composta pela topologia DWDM e OTN com todos os seus dispositivos associados) e o conjunto de serviços que deverão ser embarcados. Na primeira etapa do algoritmo são alocadas as interfaces OTN destinadas a embarcar as rotas de trabalho e proteção. Nesta fase o mecanismo de restauração não é considerado. Essa primeira etapa é descrita no pseudocódigo do Algoritmo 1 da linha 1 à linha 15. O OTN-PASRIN utiliza um algoritmo de Dijkstra de duas etapas para encontrar as rotas de trabalho e de proteção (XAVIER, 2016). O Dijkstra de duas etapas é utilizado por ter a capacidade de encontrar rotas disjuntas entre um par origem- destino. Após a implementação de todos os serviços, é realizada a análise de falhas (linha 16 do Algoritmo 1). Esta análise é realizada para determinar quantas interfaces adicionais serão necessárias para que a rede tenha a capacidade de restaurar os serviços que pararem de funcionar em decorrência do cenário de falhas analisado. Nesta etapa, são gerados todos os eventos de falhas duplas executando as combinações possíveis de falhas de links físicos dois a dois. Uma lista de todos os possíveis eventos de falhas duplas é criada e o algoritmo a processa, sequencialmente. Após isso, o algoritmo encontra as rotas de restauração para os serviços afetados pelo evento de falha e aloca interfaces OTN extras caso não seja possível reutilizar alguma interface já disponível para restauração. Essas interfaces

extras permanecem na rede e são consideradas na análise dos outros eventos de falhas duplas, possibilitando assim o reaproveitamento das mesmas.

Para fins de comparação, também foi proposta uma outra abordagem chamada OTN- PASRIN-Max. Nessa outra estratégia, o algoritmo inicia a análise assumindo que cada nó OTN possui um número ilimitado de interfaces OTN instaladas. Então, ele analisa cada evento de falhas duplas k individualmente e armazena o número de interfaces l utilizadas em cada *linkbundle* l para cada evento k . Ao fim do processo, este algoritmo implementa a quantidade máxima de interfaces utilizadas em cada *linkbundle* da rede, considerando todos os eventos de falha juntos.

4.2 Arranjo experimental

Os experimentos realizados com os algoritmos OTN PASRIN e OTN-PASRIN-Max foram executados por meio de uma ferramenta de simulação de redes desenvolvida em linguagem de programação Java. Esta ferramenta possui vários outros recursos relacionados ao planejamento de redes, como: análise de efeitos da camada física, algoritmos de alocação de dispositivos ópticos, algoritmos de roteamento, análise de capacidade de sobrevivência, etc.

Quadro 1 – Algoritmo 1

Algoritmo 1: OTN-PASRIN.

Input: rede OTN: R, Serviços: S

```

1 foreach serviço em S do
2   Crie um R' a partir de R;
3   Remova de R' todos os linkbundles com taxa incompatível com o serviço;
4   Remova de R' todos os linkbundles sem comprimentos de onda disponíveis;
5   if o serviço é do tipo 1+0 ou 1+R then
6     Encontre a rota de linkbundles(rota de trabalho) menos custosa utilizando o
       algoritmo de Dijkstra;
7     Implemente a rota de trabalho utilizando o Algoritmo 2;
8   else
9     Encontre a rota de linkbundles(rota de trabalho) menos custosa utilizando o
       algoritmo de Dijkstra;
10    Remova (temporariamente) da rede R' todos os linkbundles que compõem a rota
       de trabalho;
11    Encontre a rota de linkbundles(rota de proteção) menos custosa utilizando o
       algoritmo de Dijkstra;
12    Implemente a rota de trabalho utilizando o Algoritmo 2;
13    Implemente a rota de proteção utilizando o Algoritmo 2;
14  end
15 end
16 Utilize o Algoritmo 3 para realizar o processo de análise de falhas e embarcar os
   recursos de restauração;

```

Fonte: O autor, 2020.

Quadro 2 – Algoritmo 2

Algoritmo 2: Implementar Serviço.

Input: Rota: Ro, Serviço: S

```

1 foreach linkbundle lb da rota Ro do
2   if há um link virtual com capacidade disponível em lb then
3     Implemente o serviço no link virtual disponível e reserve os recursos;
4   else
5     Crie um novo link virtual associado a lb;
6     Implemente o serviço no link virtual criado e reserve os recursos;
7   end
8 end

```

Fonte: O autor, 2020.

Quadro 3 – Algoritmo 3

Algoritmo 3: Analisador de Falhas.

Input: rede OTN: R, Serviços: S

```

1 Gere uma lista F com todos os eventos de falhas;
2 foreach evento de falhas em F do
3   foreach serviço em S do
4     if o serviço foi afetado pela falha e o tipo do serviço é 1+R ou 1+1+R then
5       Crie uma R' a partir da rede R;
6       Remova os links com falha da rede R';
7       Remova da rede R' todos os linkbundles com taxa incompatível;
8       Remova da rede R' todos os linkbundles que não possuam comprimentos de
          onda disponíveis;
9       if o serviço é do tipo 1+R then
10        Encontre a rota de linkbundles(rota de restauração) menos custosa
          utilizando o algoritmo de Dijkstra;
11        Implemente a rota de restauração utilizando o Algoritmo 4 para adicionar
          recursos, se for necessário;
12      else if o serviço é do tipo 1+1+R then
13        if a rota de trabalho e proteção foram afetadas pelo evento de falhas
          then
14          Encontre a rota de linkbundles(rota de restauração de trabalho)
          menos custosa utilizando o algoritmo de Dijkstra;
15          Remova (temporariamente) da rede R' todos os linkbundles da rota
          de restauração de trabalho;
16          Encontre a rota de linkbundles(rota de restauração de proteção)
          menos custosa utilizando o algoritmo de Dijkstra;
17          Implemente a rota de restauração de trabalho utilizando o
          Algoritmo 4 para adicionar recursos, se for necessário;
18          Implemente a rota de restauração de proteção utilizando o
          Algoritmo 4 para adicionar recursos, se for necessário;
19        else
20          Encontre a rota de linkbundles(rota de restauração para rota afetada)
          menos custosa utilizando o algoritmo de Dijkstra;
21          Implemente a rota de restauração para a rota afetada utilizando o
          Algoritmo 4 para adicionar recursos, se for necessário;
22        end
23      end
24    end
25  end
26 end

```

Fonte: O autor, 2020.

Quadro 4 – Algoritmo 4

Algoritmo 4: Implementar Restauração de Serviço.**Input:** Rota: Ro, Serviço: S

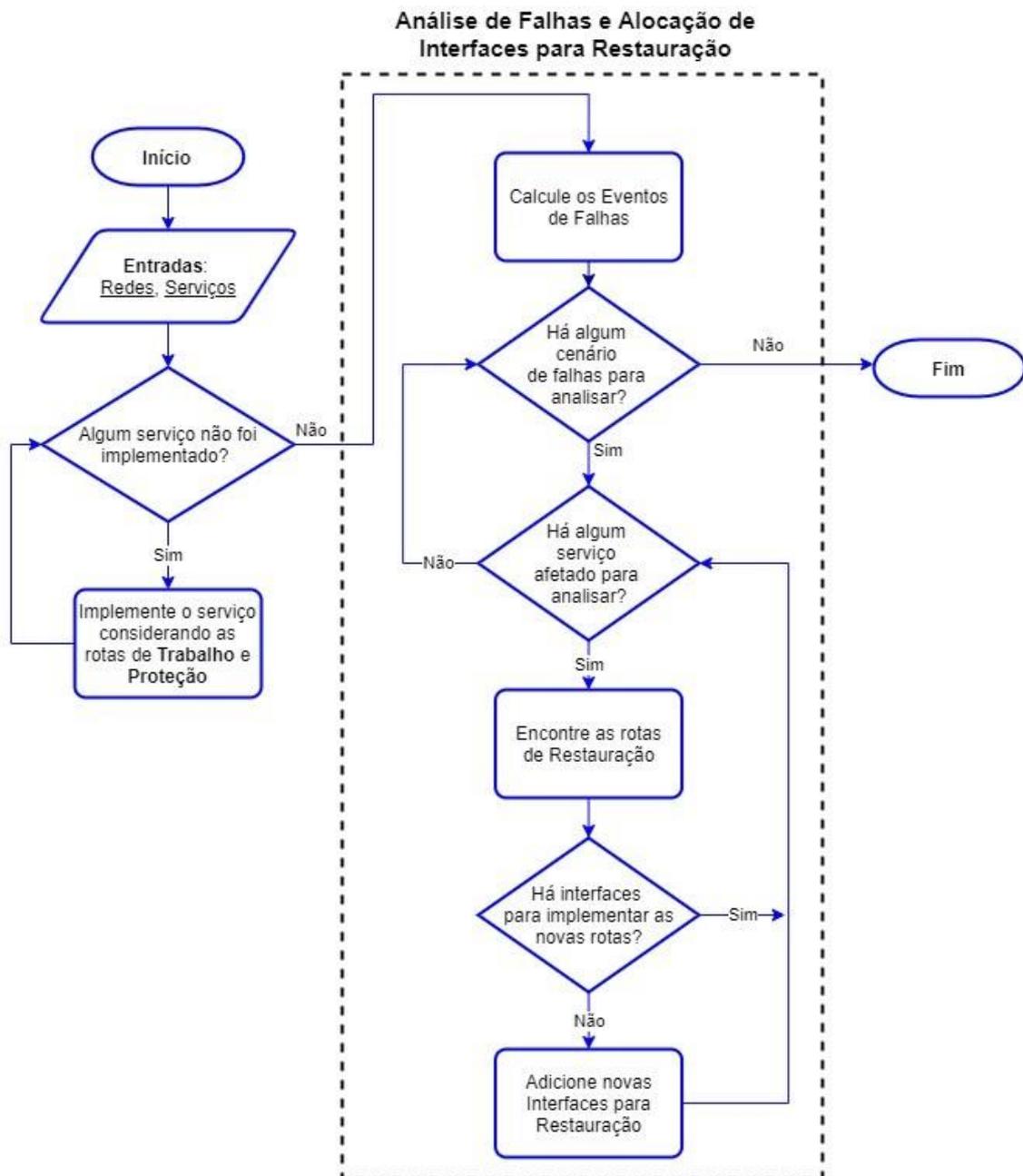
```

1 foreach linkbundle lb presente em Ro do
2   if não há um link virtual com capacidade disponível em lb then
3     | Crie um novo link virtual associado a lb;
4   end
5 end

```

Fonte: O autor, 2020.

Figura 8 – Fluxograma do algoritmo heurístico OTN-PASRIN



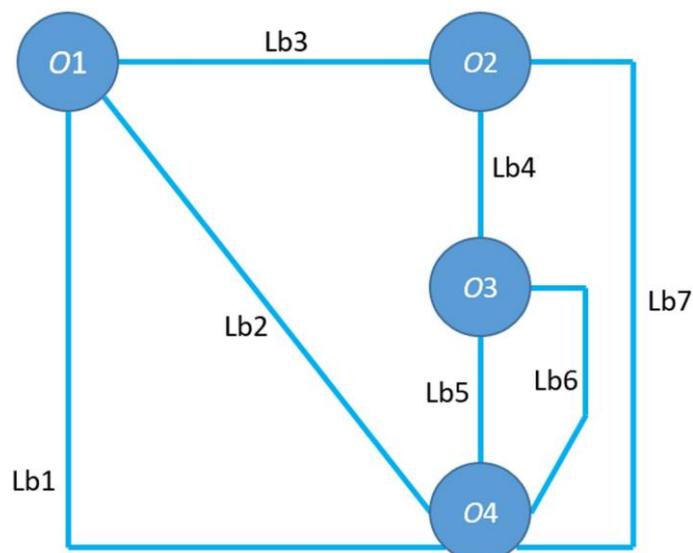
Fonte: O autor, 2020.

O trabalho assume que todos os *lightpaths* têm qualidade de transmissão suficiente na camada física para suportar as taxas de transmissão desejadas. A métrica utilizada na função custo para o algoritmo de Dijkstra foi o número de saltos, pois é um fator que influencia diretamente na quantidade de interfaces utilizadas. Todos os serviços foram definidos previamente, indicando os seus tipos, estações OTN de origem/destino e as suas taxas de transmissão. Foi definido para todos os *linkbundles* criados uma estação OTN de origem, uma estação OTN de destino, um conjunto de links óticos, a sua taxa de transmissão, o seu estado atual (funcionando/desativado) e o número máximo de links virtuais que podem ser utilizados (limitados pelo número de canais). No trabalho foi definido 80 comprimentos de onda por fibra e foi definida a quantidade de uma estação OTN por nó DWDM.

O primeiro experimento utiliza a topologia OTN de rede apresentada na Figura 9. Essa rede possui quatro estações OTN e sete *linkbundles*. Essa rede mais simples foi escolhida para realizar a validação dos resultados e fazer a comparação dos resultados com uma solução de busca exaustiva. Foram considerados três casos de teste (CT) com n número de serviços.

Os experimentos realizados utilizaram o número de serviços n variando de quatro a oito. No CT-1, todos os serviços eram do tipo 1+R. No CT-2, todos os serviços eram do tipo 1+1+R. E por último, no CT-3, foram combinados os quatro tipos de serviços, com o objetivo de avaliar o desempenho em um cenário híbrido (e do mundo real). Devido à quantidade limitada de possibilidades de serviços, foram utilizados serviços predefinidos para teste nesses cenários.

Figura 9 – Topologia 1: quatro nós OTN e sete linkbundles.



Fonte: O autor, 2020.

Os serviços que foram utilizados são apresentados na Tabela 2. Se o par origem-destino possuísse alguma restrição física para implementar algum tipo de serviço (um nó que possui grau um não consegue implementar serviços 1 + 1, por exemplo), foi considerado que o serviço foi implementado se o algoritmo foi capaz de embarcar o número máximo de rotas permitidas para aquele par. Foi utilizado um pequeno número de serviços neste caso para permitir uma comparação com a abordagem exaustiva.

Tabela 2 – Matriz de tráfego para a topologia 1

Serviço	Origem	Destino	Tipo dos Serviços (CT-1/CT-2/CT-2)		
1	O1	O4	1+R	1+1+R	1+0
2	O2	O4	1+R	1+1+R	1+1
3	O1	O3	1+R	1+1+R	1+R
4	O2	O3	1+R	1+1+R	1+1+R
5	O1	O2	1+R	1+1+R	1+0
6	O3	O4	1+R	1+1+R	1+1
7	O1	O4	1+R	1+1+R	1+R
8	O2	O4	1+R	1+1+R	1+1+R

Fonte: O autor, 2020.

Foi realizado um teste considerando todas as possibilidades para esses cenários mais simples (teste exaustivo) para comparar os resultados do algoritmo OTN-PASRIN com a melhor solução geral. Nesse caso, foi avaliada cada configuração de rede possível, considerando que cada *linkbundle* poderia ter de zero a no máximo dez interfaces. O pseudocódigo da busca exaustiva é apresentado no Algoritmo 5.

Quadro 5 – Algoritmo 5

Algoritmo 5: Algoritmo Exaustivo

Input: rede OTN: R, Serviços: S

- 1 Gere uma lista P com todas as possibilidades de configurações;
 - 2 **foreach** *configuração em P* **do**
 - 3 **foreach** *serviço em S* **do**
 - 4 Encontrar e implementar as rotas de trabalho e proteção, caso existam;
 - 5 Executar o analisador de falhas para implementar a restauração;
 - 6 Registrar o número de interfaces e se o planejamento foi bem-sucedido;
 - 7 **end**
 - 8 **end**
-

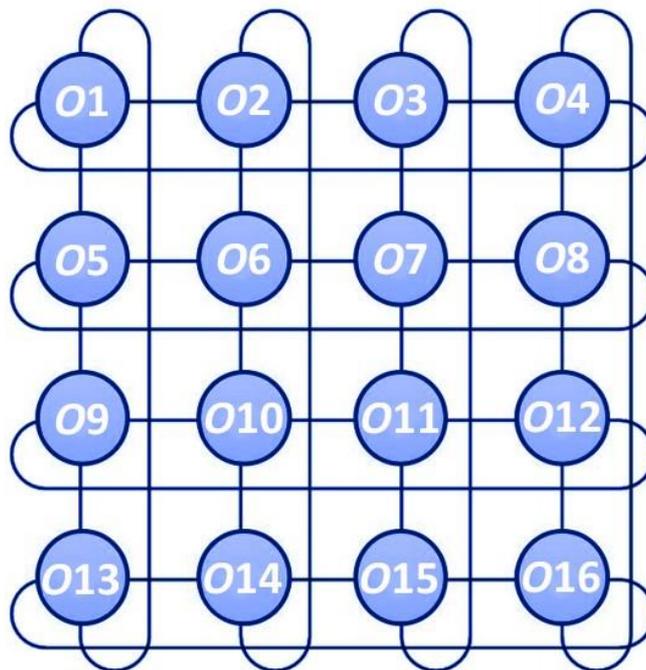
Fonte: O autor, 2020.

Para o segundo experimento, foi considerado o cenário de simulação de rede

apresentado na Figura 10. Esta topologia de rede é composta por 16 nós OTN e 32 *linkbundles*. Esta topologia foi utilizada porque permite que todos os serviços sejam implementados independente da estação OTN de origem e destino escolhidas. Por conta da quantidade elevada de *linkbundles*, se torna impraticável realizar um teste exaustivo para encontrar a solução global mínima. Por esse motivo, os resultados do OTN-PASRIN foram comparados com os resultados obtidos pelo OTN-PASRIN- Max. Para este cenário, também foram considerados os três casos de teste mencionados para a topologia 1.

Foram avaliadas três variáveis para cada caso de teste: o número de interfaces, a ocupação média dos *linkbundles* (número médio de interfaces OTN utilizadas na configuração da rede) e a ocupação máxima dos *linkbundles* (maior número de interfaces OTN utilizadas na configuração da rede). Neste cenário, os serviços foram gerados de forma pseudo-aleatória e foram realizadas 30 execuções de cada caso.

Figura 10 – Topologia 2: 16 nós OTN e 32 *linkbundles*.



Fonte: O autor, 2020.

4.3 Complexidade dos algoritmos

Para a análise da complexidade computacional dos algoritmos deve-se

considerar as seguintes variáveis: o número de estações OTN na rede (R), o número de links físicos na topologia física (L), o número de serviços a serem embarcados na rede (S), o número de *linkbundles* na rede (LB) e o número máximo de interfaces permitidas em cada *linkbundle* da rede (I_{Max}).

4.3.1 OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max

Os algoritmos OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max possuem a mesma complexidade computacional que é dada por $O[S(2R^2) + (L^2)(S)(2R^2)]$. Essa análise considera o pior caso onde todos os serviços são da classe $1 + 1 + R$. O primeiro termo $S(2R^2)$ representa a execução do algoritmo de Dijkstra de dois passos (utilizado para encontrar as rotas de trabalho e proteção) para cada serviço S . Já o segundo termo $(L^2)(S)(2R^2)$ representa o analisador de falhas que verifica se algum serviço S foi afetado por uma falha dupla (L^2) e se ele precisa de uma rota de restauração ($2R^2$, menor caminho de dois passos).

4.3.2 Algoritmo Exaustivo

Há $I_{Max} + 1$ (incluindo a possibilidade de ser zero) opções possíveis para instalação de interfaces em um determinado *linkbundle*. É correto concluir que o algoritmo exaustivo é executado $(I_{Max} + 1)^{LB}$ vezes. Por exemplo, no cenário apresentado na Figura 9, dado $L_B = 7$ e $I_{Max} = 6$, o algoritmo exaustivo verificaria 6^7 configurações diferentes de alocação de interfaces OTN na rede para encontrar a solução menos custosa. Para cada execução, um algoritmo com a mesma complexidade de tempo do OTN-PASRIN é executado. Assim, a complexidade de tempo do algoritmo exaustivo é dada por: $O\{[(I_{Max} + 1)^{LB}][S(2R^2) + (L^2)(S)(2R^2)]\}$.

4.4 Resultados dos experimentos

Nesta Seção são apresentados os resultados dos experimentos realizados utilizando a topologia 1 e 2.

4.4.1 Resultados para a Topologia 1

A Figura 11 mostra a comparação do número de interfaces em função do número de serviços encontrados pelo OTN-PASRIN e o algoritmo exaustivo para a topologia 1, para os três cenários considerados, caso 1 (a), caso 2 (b) e caso 3 (c). Eles mostram que quando o número de serviços aumenta, uma quantidade maior de interfaces OTN se faz necessária. Na Figura 11 (a) e (c), pode-se observar que ambos os algoritmos analisados obtiveram o mesmo resultados. É importante ressaltar que, nesses casos, o OTN-PASRIN e o algoritmo exaustivo não só alcançaram o mesmo número total de interfaces, mas também encontraram as mesmas soluções, ou seja, o mesmo número de interfaces em cada *linkbundle*. A Figura 11 (b) mostra que o algoritmo exaustivo obteve melhores resultados quando comparado com o OTN-PASRIN. Isso ocorre porque o algoritmo exaustivo testa todas as possibilidades de configurações, encontrando sempre o mínimo global. Como é um algoritmo heurístico, o OTN-PASRIN não garante a solução ótima em nenhum caso, entretanto pode encontrá-la em alguns casos, como os casos (a) e (c) da Figura 11. Mesmo não sendo a melhor solução global, o resultado encontrado em (b) seria uma boa solução para o problema.

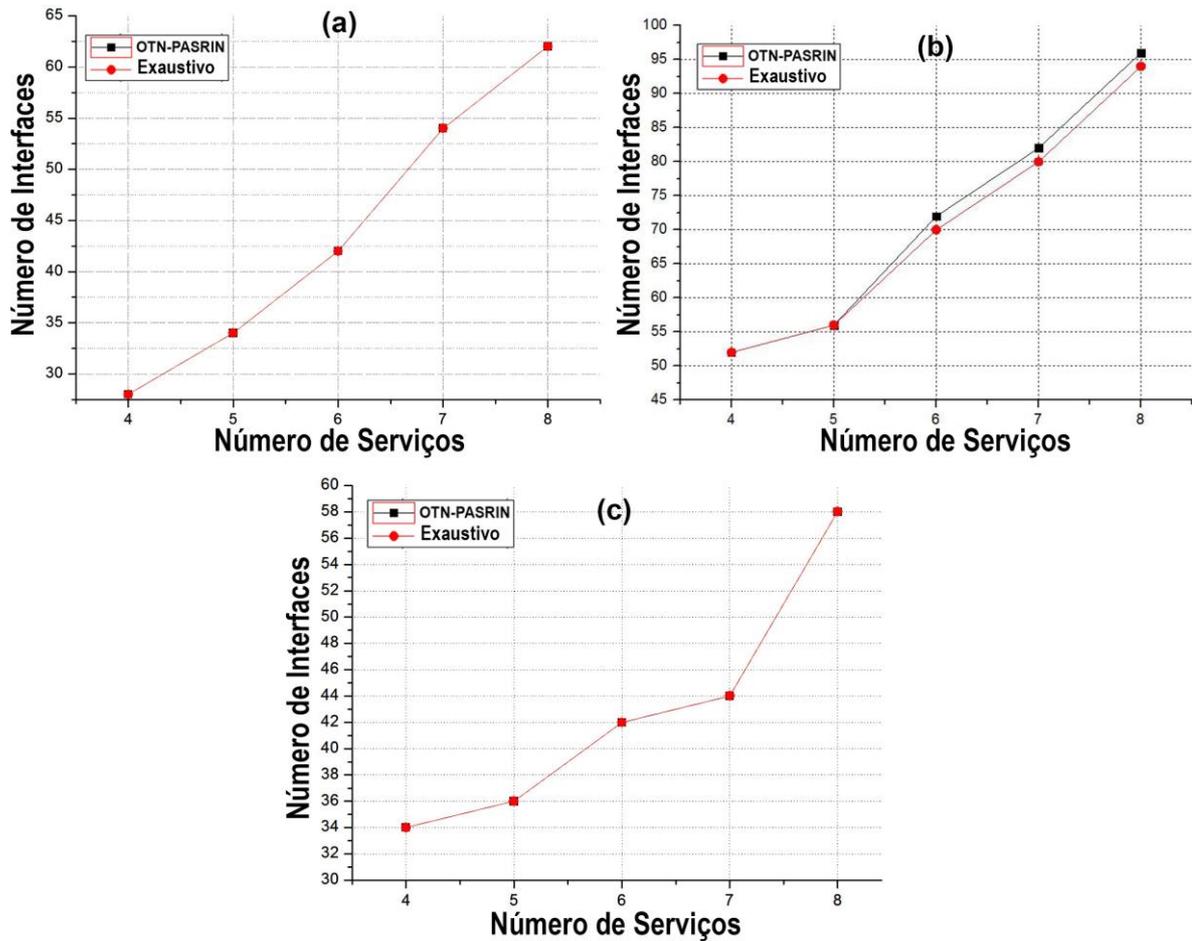
4.4.2 Resultados para a Topologia 2

As Figuras 12, 13 e 14 apresentam os resultados dos experimentos com a topologia 2 em termos de *box-plots* para os casos de teste 1, 2 e 3, respectivamente. Os *boxplots* foram usados pois neste cenários são consideradas 30 execuções independentes com diferentes matrizes de tráfego para cada variável testada e neste tipo de situação o interesse deve ser no comportamento estatístico do algoritmo. Os resultados mostram que, em todos os casos estudados, o algoritmo OTN-PASRIN superou o algoritmo OTN-PASRIN-Max, que pode ser utilizado para encontrar soluções de *upperbound*. Isso ocorre porque o OTN-PASRIN faz melhor uso do recurso de reaproveitamento de interfaces sempre que é possível durante a restauração.

Adicionalmente, foi feita uma análise de como o OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max alocam as interfaces OTN nos *linkbundles* da rede. A Figura 15 mostra o número de interfaces em função dos *linkbundles* da rede. Os números x-y no eixo x do gráfico representam o par de nós OTN conectados pelos *linkbundles* em questão. Esse gráfico de barra foi obtido a partir da topologia 2, que possui 32 *linkbundles* e

considera o padrão de tráfego referenciado como caso 1 na Tabela 2 com um total de 240 serviços a serem embarcados na rede. A Tabela 3 mostra como esses 240 serviços são distribuídos entre cada par de nós da rede.

Figura 11 – Comparação do número de interfaces em função do número de serviços para o OTN-PASRIN e o Algoritmo Exaustivo: todos os serviços são do tipo 1+R (a), todos os serviços são do tipo 1+1+R (b) e todos os tipos de serviços alternados (c).



Fonte: O autor, 2020.

Pode-se observar que na Figura 15 o número de interfaces embarcadas pelo algoritmo OTN-PASRIN é menor do que a quantidade sugerida pela solução do OTN-PASRIN-Max em cada *linkbundle* da rede. Isso significa que, no caso investigado, a estratégia adotada pelo OTN-PASRIN não só embarca um total menor de interfaces que o OTN-PASRIN-Max, mas o comportamento também é verificado quando se compara cada *linkbundle* individualmente.

Figura 12 – Representação em *boxplot* da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max que relaciona o número de serviços (todos serviços são do tipo 1+R) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima.

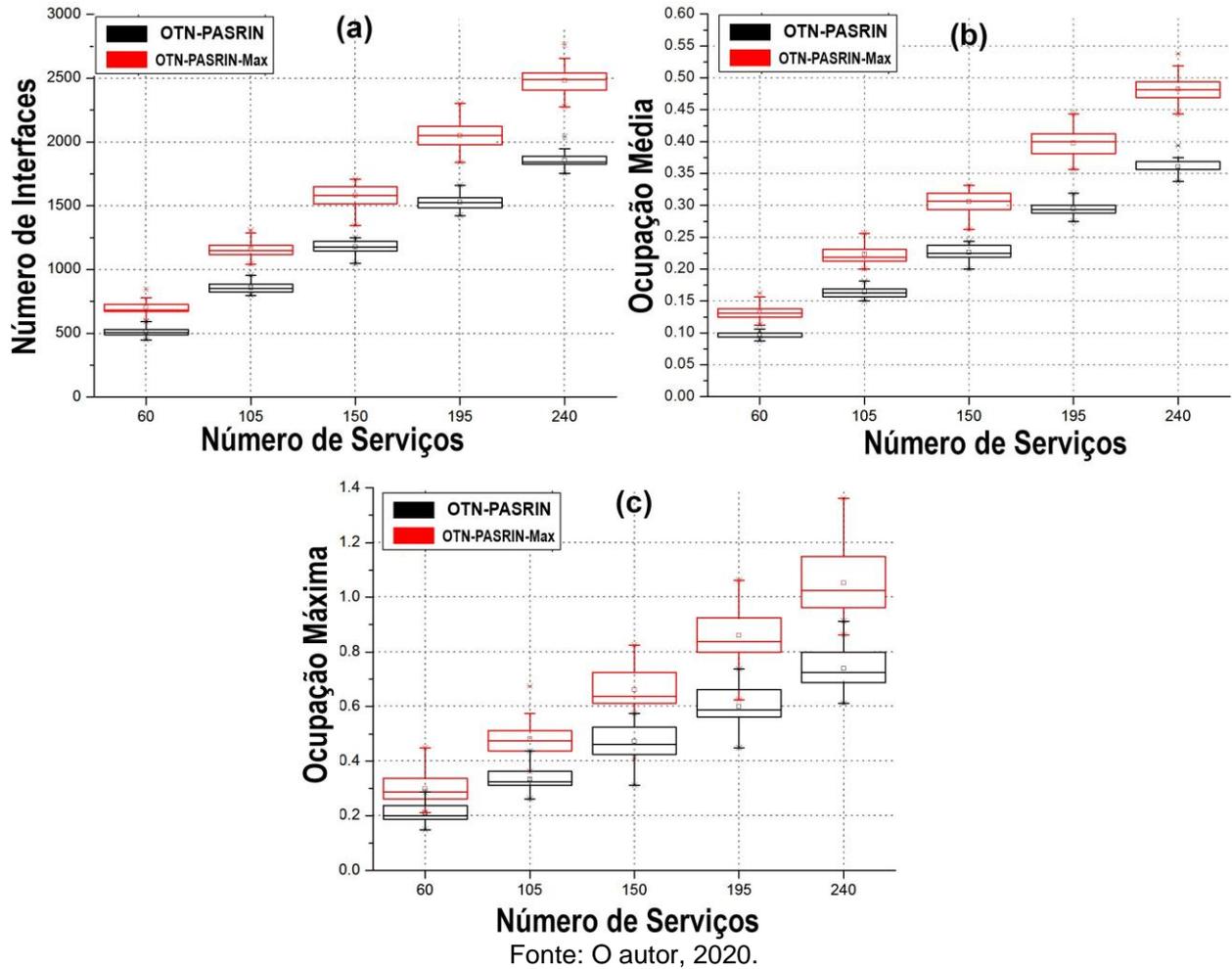
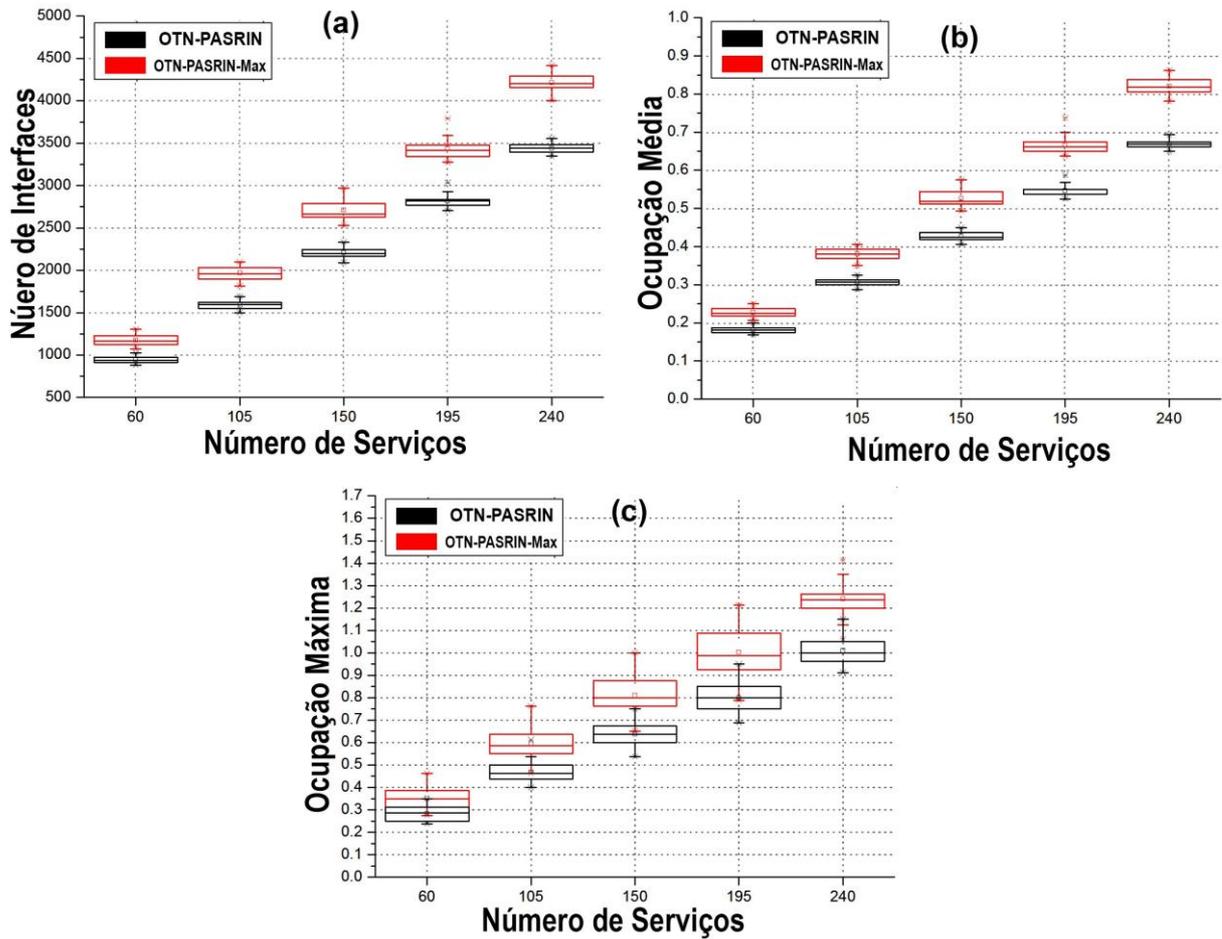
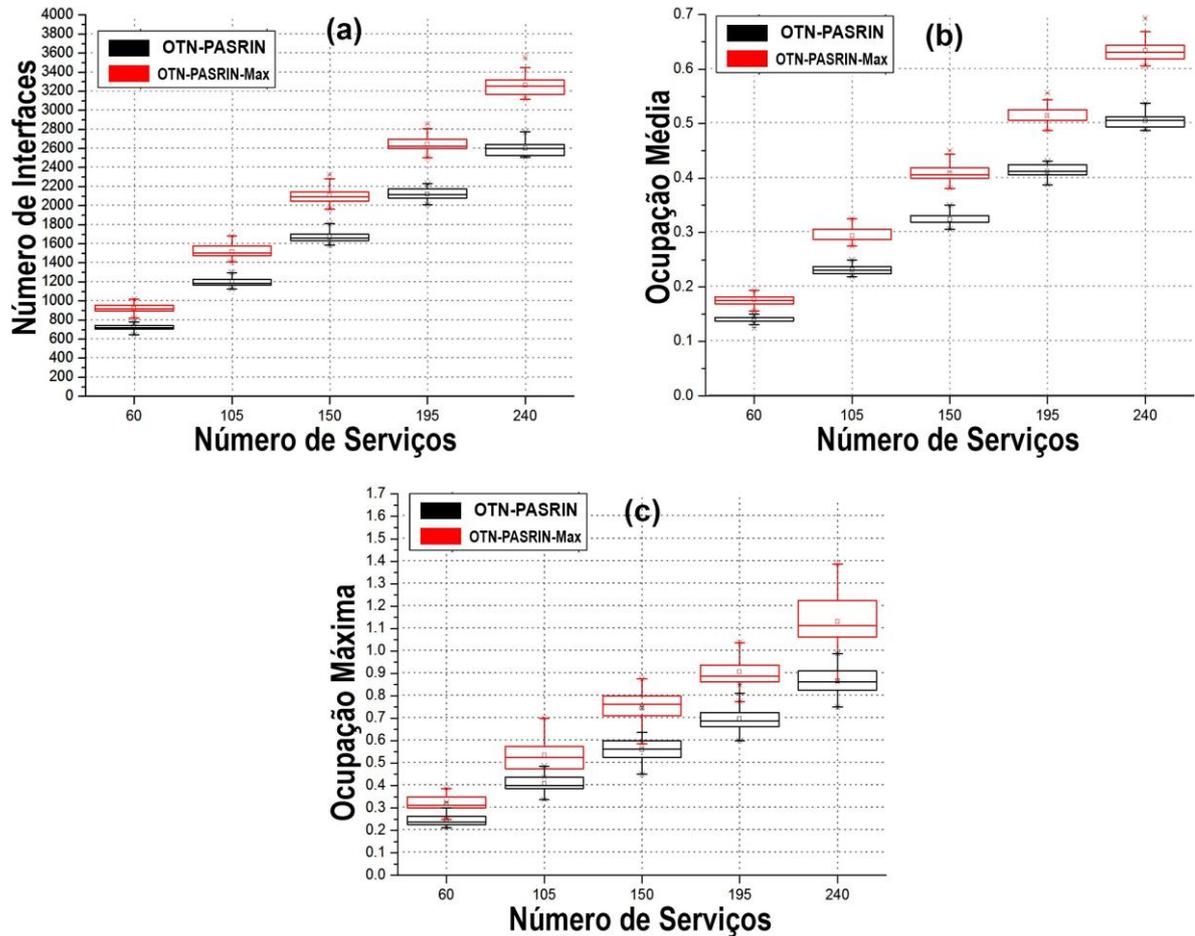


Figura 13 – Representação em *boxplot* da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max que relaciona o número de serviços (todos serviços são do tipo 1+1+R) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima.



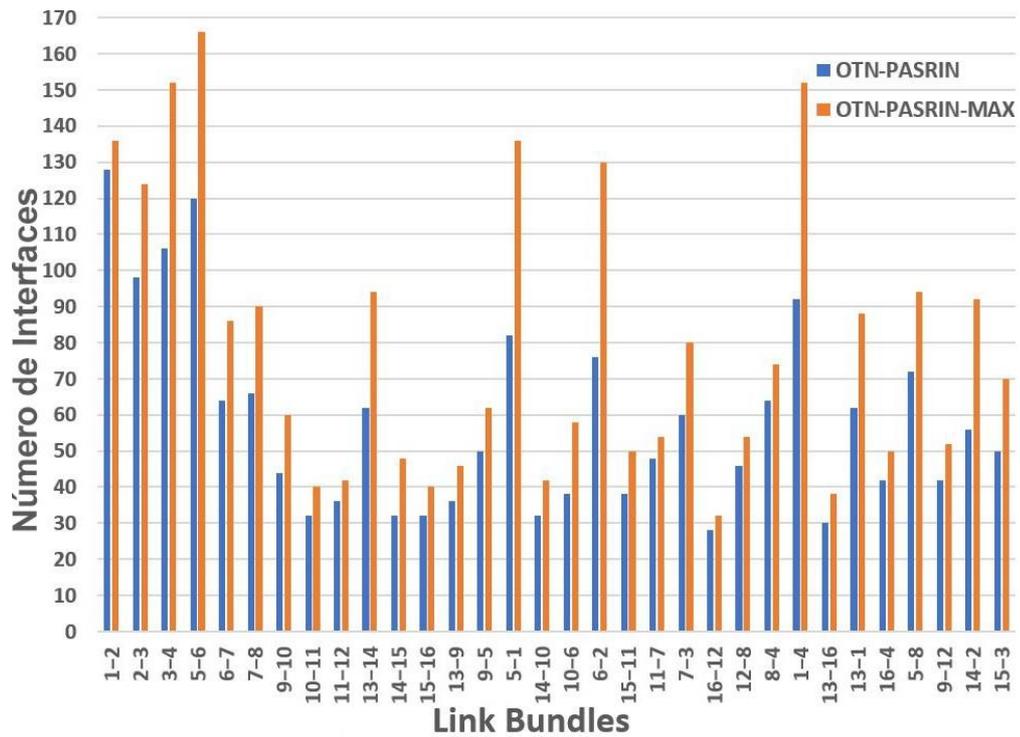
Fonte: O autor, 2020.

Figura 14 – Representação em *boxplot* da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max que relaciona o número de serviços (todos os tipos de serviços alternados) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 15 – Número de interfaces embarcadas por pelos algoritmos OTN-PASRIN e OTN- PASRIN-



Max considerando a topologia 2, serviços do tipo 1+R e um total de 240 serviços.

Fonte: O autor, 2020.

Tabela 3 – Matriz de tráfego de serviços utilizados no cenário da Figura 15. Cada célula da tabela representa o número de serviços solicitados (1+R) entre cada par de nós da rede.

Nós		Matriz de Tráfego															
		Destino															
OTN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Origem	1	0	1	1	0	1	1	2	1	1	2	0	1	4	0	2	0
	2	1	0	1	1	2	1	0	1	0	2	0	1	1	0	1	1
	3	1	1	0	1	2	0	1	3	1	0	1	0	1	0	0	1
	4	1	2	0	0	1	0	1	2	0	1	0	0	1	0	0	1
	5	2	1	2	2	0	0	2	2	1	1	1	1	2	0	1	0
	6	1	0	1	1	1	0	1	1	0	2	0	1	1	1	2	0
	7	0	2	1	0	3	0	0	1	1	0	1	1	2	3	0	1
	8	1	3	1	2	1	3	2	0	2	0	3	3	1	1	2	0
	9	2	1	4	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	2
	10	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	1
	11	0	1	1	3	2	1	1	0	1	0	0	2	1	0	1	1
	12	1	1	0	0	1	1	3	1	0	1	0	0	0	1	1	2
	13	2	2	1	0	2	1	0	0	2	0	1	1	0	3	0	1
	14	3	1	2	1	3	0	0	1	3	2	0	0	1	0	0	1
	15	1	4	1	1	2	1	0	1	1	2	0	1	0	0	0	5
	16	1	2	1	2	0	1	2	0	1	0	1	0	0	0	1	0

Fonte: O autor, 2020.

5 ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO PARA O PROJETO DE REDES ÓPTICAS RESILIENTES DO TIPO OTN SOBRE DWDM

Neste capítulo é apresentada a proposta principal desta Tese. Na Seção 5.1 são apresentados alguns conceitos básicos sobre otimização multiobjetivos. Na Seção 5.2 é apresentada uma visão geral sobre o algoritmo NSGAI. Na Seção 5.3 é apresentada a descrição da proposta principal da Tese. Na Seção 5.4 é apresentada uma visão geral sobre a ferramenta que foi utilizada como ambiente para as simulações realizadas neste trabalho. Na Seção 5.5 é apresentado o funcionamento básico do módulo de análise de falhas. Na Seção 5.6 é descrita a modelagem e configurações para o algoritmo evolucionário. Na Seção 5.7 é apresentado o arranjo experimental. E por último, na Seção 5.8, são apresentados os resultados dos experimentos realizados com o algoritmo evolucionário.

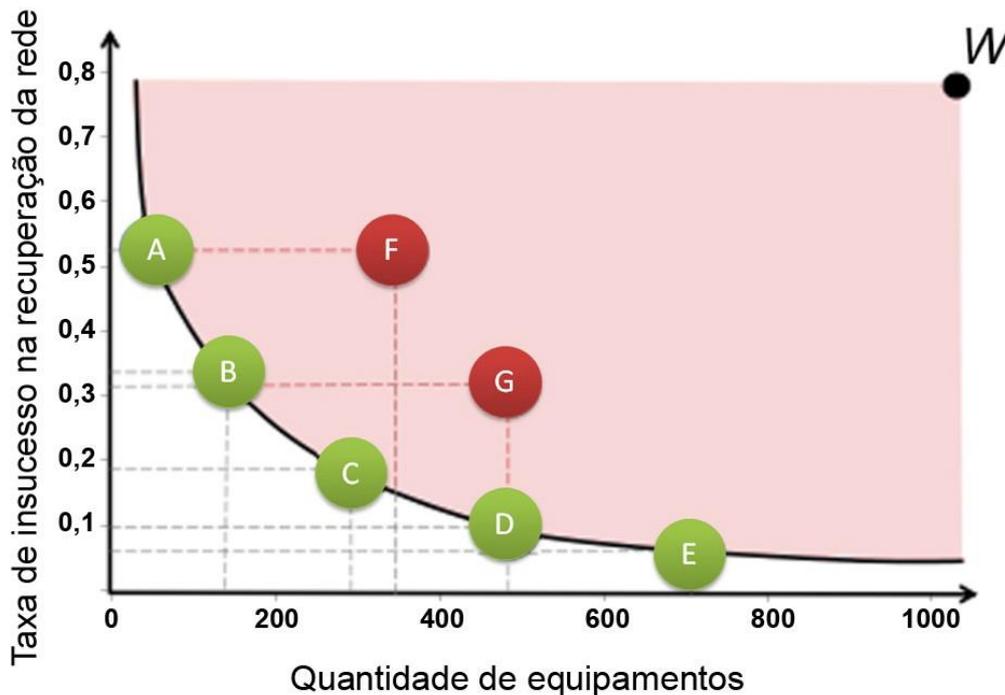
5.1 Conceitos básicos da Otimização Multiobjetiva

Em um problema no qual o objetivo é otimizar uma única variável, a solução se dá através da busca de um vetor de variáveis de decisão $\hat{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ em um espaço de decisão Ω que, dependendo do problema, minimiza ou maximiza o valor de uma variável independente ou função objetivo y . Para este tipo de problema, existe pelo menos um \hat{x} que apresenta o melhor valor para y e que é considerado a solução ótima do problema.

Porém, na maioria dos problemas do mundo real existem objetivos conflitantes que devem ser considerados de forma simultânea. Por exemplo, o custo total de uma rede pode ser diminuído caso o projeto utilize uma quantidade menor de equipamentos. Porém, ao realizar essa redução, a chance da rede não se recuperar de uma eventual falha, aumenta. Para este problema em questão, o vetor de variáveis de decisão poderia ser o conjunto de equipamentos utilizados no projeto e os objetivos conflitantes seriam a taxa de insucesso na recuperação da rede e o custo total do projeto. No gráfico apresentado na Figura 16, são mostradas algumas possíveis soluções para o problema. Os conjuntos de equipamentos representados por { A, B, C, D e E} representam melhores candidatas de soluções do que os conjuntos de equipamentos representados por { F e G}, isso ocorre porque as soluções do primeiro grupo oferecem vantagens em um ou mais objetivos quando comparadas com as

soluções do segundo grupo. Entretanto, as soluções { A, B, C, D e E} forem comparadas entre si, não é possível determinar qual solução é melhor. No conceito de Pareto (COELLO et al., 2007), pode-se afirmar que as soluções { A, B, C, D e E} dominam as soluções { F e G}. Utilizando ainda o exemplo da Figura 16, pode-se dizer que as soluções B e G não são dominadas entre si, pois cada uma tem vantagem em um dos objetivos, por outro lado, quando se compara a solução C com a solução G, pode-se perceber que C possui vantagem em ambos os objetivos, nesse caso, pode-se afirmar que C domina G. O conjunto de soluções não dominadas (nesse caso, { A, B, C, D e E}) é conhecido como **frente de Pareto**.

Figura 16 – Exemplo de problema com dois objetivos: Taxa de insucesso na recuperação da rede x Quantidade de equipamentos.



Fonte: O autor, 2020.

A definição de solução ótima em problemas que possuem duas ou mais funções objetivos é diferente da classificação em problemas com um objetivo único. Neste caso, a meta é encontrar a melhor frente de Pareto possível e escolher a solução que melhor relaciona os objetivos de acordo com a necessidades de projeto.

5.2 NSGAI

O algoritmo NSGAI (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) foi proposto

em 2002 por (DEB et al., 2002). Este algoritmo é uma meta-heurística que se adéqua muito bem a problemas multiobjetivos combinatoriais do mundo real, principalmente se são considerados dois objetivos (COELLO et al., 2007). Deb et al. propuseram uma outra versão desse algoritmo conhecido como NSGAIII (DEB; JAIN, 2013), que tem como finalidade atender a problemas com quatro ou mais objetivos conflitantes (esses problemas são conhecidos na literatura como *many objectives*). Para o estudo realizado neste trabalho o NSGAI foi adotado como meta-heurística base para a validação da proposta.

O algoritmo em questão foi escolhido com base em um estudo realizado por Araujo et al. (ARAÚJO et al., 2011b) onde foram feitas comparações entre várias meta-heurísticas, como: PESAI, MODE, NSGAI, SPEA2 e PAES. Os resultados das comparações mostraram que o SPEA2 e o NSGAI oferecem as melhores soluções e que a diferença entre eles não é significativa. Além desse comparativo, outro estudo sobre projeto de redes ópticas utilizando meta-heurísticas fez uso do NSGAI e demonstrou que a qualidade das soluções está mais ligada às adaptações nos operadores genéticos para o problema atacado do que à meta-heurística utilizada (ARAÚJO et al., 2011a).

Figura 17 – Pseudocódigo - NSGAI.

PSEUDOCÓDIGO - O Algoritmo NSGAI.

```

1: procedimento NSGAI
2:   Crie uma população inicial POP
3:   para  $i \leftarrow 0; i < I_{max}; i++$  faça
4:     para  $s \leftarrow 0; s < P; s \leftarrow s + 2$  faça
5:       Selecione dois pais,  $P_1$  e  $P_2$ 
6:       Execute cruzamento entre  $P_1, P_2$  e gere os descendentes  $D_1$  e  $D_2$ 
7:       Faça mutação com  $D_1$  e  $D_2$ 
8:       Avalie  $D_1$  e  $D_2$  e inclua no conjunto de descendentes DESC
9:     fim para
10:    Crie um conjunto UNIAO a partir de POP e DESC
11:    Separe as frentes de Pareto usando o conceito de dominância
12:    Crie um conjunto vazio POP
13:    enquanto o tamanho de POP < P faça
14:      Ordene as soluções da frente de Pareto por CD
15:      para cada solução no conjunto ordenado faça
16:        se comprimento de POP < P então
17:          Inclua a solução no conjunto POP
18:        fim se
19:      fim para
20:      Analise a próxima frente de Pareto
21:    fim enquanto
22:  fim para
23: fim procedimento

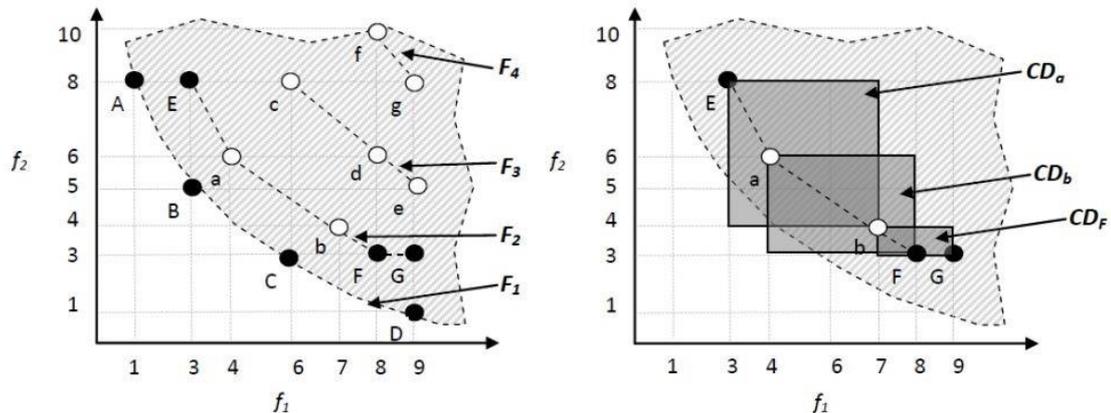
```

Fonte: Araújo, 2015.

A Figura 17 mostra o pseudocódigo do algoritmo básico para o NSGAI. Para

exemplificar, considere uma execução do algoritmo NSGAI com população de tamanho $N=7$ e com as soluções que estão apresentadas na Figura 18 (a). Na Figura 18 (a), as soluções brancas correspondem à geração anterior, já as soluções pretas representam as soluções da geração atual. Ou seja, o algoritmo NSGAI utiliza um conjunto de tamanho $2N$ obtido a partir da junção dos indivíduos da geração anterior e da atual. Este conjunto é classificado em frentes de Pareto, onde é atribuído o valor 1 aos indivíduos não dominados, 2 às soluções da próxima frente de Pareto e assim sucessivamente. Dessa forma, a classificação geral se dá em obter os indivíduos que possuem os menores valores. O passo mencionado é ilustrado pelas indicações $\{F1, \dots, F4\}$ na Figura 18 (a). Após ser classificado, o conjunto é truncado para retornar ao tamanho original da população, que nesse caso seria $N=7$. Em casos onde o truncamento precise descartar indivíduos de uma mesma frente de Pareto, é utilizada uma estimativa de densidade que usa o método CD - *Crowding Distance* como critério de descarte. A medida CD é dada pelo tamanho do cubóide formado pelas soluções adjacentes à solução analisada. O valor da CD é inversamente proporcional à densidade da região que a solução está inserida, ou seja, CD alta significa que a solução está contida em uma região de baixa densidade, já se a CD for baixa, a região possui maior densidade. No exemplo ilustrado pela Figura 18, foram encontradas 9 soluções realizando a soma dos dois primeiros Pareto ($F1$ e $F2$). Neste caso, é necessário eliminar duas soluções da frente $F2$. Para se manter o máximo de espalhamento em cada frente de Pareto, o método CD atribui densidade máxima às soluções mais afastadas, ou seja, as soluções E e G já são levadas para próxima geração. Para finalizar o processo de seleção, se faz necessário decidir entre as soluções restantes (a, b e F). Conforme ilustrado na Figura 18(b), a solução a apresentou o maior valor de CD. Por esse motivo, ela é selecionada para permanecer na próxima geração.

Figura 18 – Exemplo do mecanismo de seleção utilizado pelo NSGAI



(a) Classificação de soluções não-dominadas utilizada pelo NSGAI. (b) Avaliação de *crowding distance* de soluções que estão na mesma frente de Pareto.

Fonte: O autor, 2020.

Para averiguar a qualidade das soluções retornadas pelos algoritmos de otimização multiobjetivos se faz necessário a utilização de algumas métricas de avaliação. Muitas métricas com essa finalidade já foram propostas na literatura (SCHOTT, 1995; ZITZLER, 1999; KNOWLES; CORNE, 2002; COELLO et al., 2007). Para a análise de convergência do algoritmo proposto nesta Tese foi utilizada a métrica do Hypervolume (ZITZLER, 1999). Essa medida é um indicador híbrido que mede de forma simultânea a diversidade e a capacidade de convergência das soluções.

5.3 Descrição da proposta

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma estratégia de projeto eficiente para redes ópticas OTN sobre DWDM fazendo uso de algoritmos evolucionários multiobjetivos. O algoritmo deverá minimizar duas variáveis: a quantidade de interfaces OTN alocadas para atender todos os serviços e a taxa de insucesso nas restaurações (medida que quantifica as tentativas de restauração que não obtiveram êxito). Na Figura 19, é apresentado um fluxograma que representa o escopo geral do algoritmo proposto por este trabalho. O modelo apresentado no fluxograma segue as seguintes etapas: inicialmente são apresentadas ao planejador as premissas de projeto, que constam com as características e configurações esperadas no projeto final. Após isso, são feitos dois processos, o de encontrar uma solução mínima

(*Lowerbound*) e uma solução máxima (*Upperbound*). O (*Lowerbound*) é definido como uma solução que possui uma quantidade de interfaces suficientes para atender todos os serviços sem considerar recursos para proteção e restauração, já o (*Upperbound*) é uma solução que possui uma quantidade de interfaces suficiente para atender todos os requisitos de resiliência, porém não considera o compartilhamento de interfaces na restauração, resultando em uma solução não ótima, na maioria dos casos. Essas duas soluções servem como limitadores e também podem ser inseridas na população inicial do algoritmo evolucionário para guiar o processo de convergência. Após esses processos, é iniciada a população do algoritmo evolucionário e o algoritmo entra no *loop* principal. Dentro desse *loop* são feitos respectivamente, seleção dos pais, cruzamento, mutação, avaliação dos indivíduos e o ranqueamento e seleção de novos indivíduos para próxima geração. Esse processo permanece em *loop* até atingir ao critério de parada. Ao ser finalizado, será selecionada a solução da frente de Pareto que melhor se adequar ao perfil do projeto desejado.

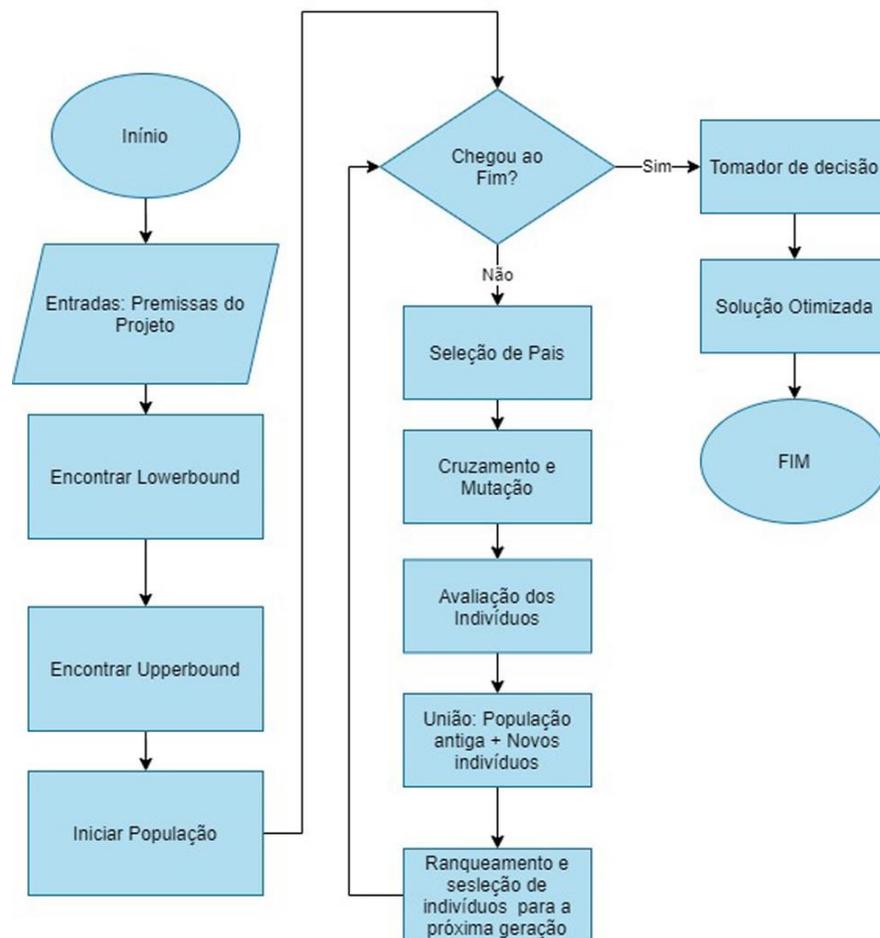
Nos itens a seguir serão feitas algumas observações sobre cada etapa do algoritmo que representa a estratégia proposta.

a. Lowerbound e Upperbound

Os dois blocos presentes na Figura 19 nomeados como Encontrar *Lowerbound* e Encontrar *Upperbound* são executados para buscar soluções iniciais para o problema que serão utilizadas como sementes na população inicial e também como limitadores do espaço de decisão do algoritmo. A solução *Lowerbound* representa uma configuração com uma quantidade de interfaces suficiente para embarcar os serviços de trabalho e proteção, porém não considera interfaces com função de restauração. Já a solução *Upperbound* representa uma configuração onde a quantidade de recursos é suficiente para suprir qualquer problema na rede, porém é uma solução cara e, provavelmente, não é a solução ótima. O algoritmo evolucionário multiobjetivo tem a missão de encontrar uma solução intermediária entre o *Lowerbound* e o *Upperbound* que consiga suprir as necessidades do projeto das OTN.

b. Inicialização da população

Figura 19 – Fluxograma do algoritmo proposto.



Fonte: O autor, 2020.

A inicialização dos indivíduos em um algoritmo evolucionário é de grande importância para o processo de convergência. Pensando nisso, a proposta deste trabalho utiliza informações iniciais extraídas das soluções de *Lowerbound* e *Upperbound*. Essas soluções, além de servirem como limitadores para o espaço de decisão, também são inseridas na população inicial visando acelerar o processo de convergência do algoritmo.

c. Seleção de pais

O processo de seleção é importante para que se possa selecionar indivíduos que, ao serem cruzados, gerem diversidade à população diminuindo as chances do algoritmo ficar preso em mínimos locais. Nesta Tese foi utilizado o operador de torneio binário (BACK, 1996) para realizar o procedimento de seleção dos pais.

d. Cruzamento e mutação

Os operadores de cruzamento e mutação são importantes para a geração de novos indivíduos com carga genética modificada. O operador de cruzamento é responsável por realizar a combinação dos genes dos pais selecionados e dar origem a novos indivíduos que carreguem características de ambos os pais. Já o operador de mutação serve para gerar diversidade alterando alguns genes dos indivíduos de acordo com alguma regra pré- definida. Neste trabalho, foi utilizado um operador aritmético (JIANG; FAN, 2015) para o processo de cruzamento e um operador gaussiano (HINTERDING, 1995) para o processo de mutação de indivíduos. Esses operadores foram selecionados por obterem bons resultados em testes empíricos realizados com a abordagem proposta nesta Tese.

e. Avaliação dos indivíduos

O processo de avaliação dos indivíduos é fundamental para o ranqueamento da população. Para esta proposta, a avaliação se dá através de algumas etapas: alocação da rede, roteamento dos serviços de trabalho e proteção (caso tenha) e análise geral de falhas. Na alocação de rede, os genes dos indivíduos são transformados em interfaces OTN. Essas interfaces são instaladas em uma estrutura de rede que pode ser utilizada pela ferramenta de simulação. Após a preparação da rede, é realizado o processo de roteamento, que visa embarcar os serviços de trabalho e proteção exigidos nas premissas de projeto. Por último, é realizada uma análise geral de falhas para verificar se a configuração de rede proposta pela solução consegue resistir ao conjunto de falhas exigido nas premissas. Ao final desse processo, os valores dos objetivos para essa solução são registrados.

f. União, ranqueamento e seleção de indivíduos

Nos três últimos blocos do *loop* principal, são realizados os processos de união, ranqueamento e seleção de indivíduos. No primeiro processo, é gerado um conjunto união composto pela população antiga e pelos nova indivíduos criados. Esse conjunto tem o dobro do tamanho inicial da população. Após isso, é realizado o processo de ranqueamento das soluções, onde as mesmas

são divididas em frentes de Pareto de acordo com os critérios de dominância. As soluções das frete de Pareto são ordenadas por *crowding distance* e adicionadas a população. Por último, é realizado o truncamento da população onde serão selecionados os indivíduos que farão parte da próxima geração da população.

g. Critério de parada

Visto que a execução dos algoritmos evolucionários pode demandar bastante tempo computacional, definir um bom critério de parada é fundamental. Nesta proposta, a otimização chegará ao fim quando a quantidade máxima de iterações for atingida e for verificada a estagnação do hypervolume. O resultado será um conjunto de soluções não dominadas e a escolha será realizada de acordo com as necessidades do projeto.

5.4 Ferramenta de planejamento

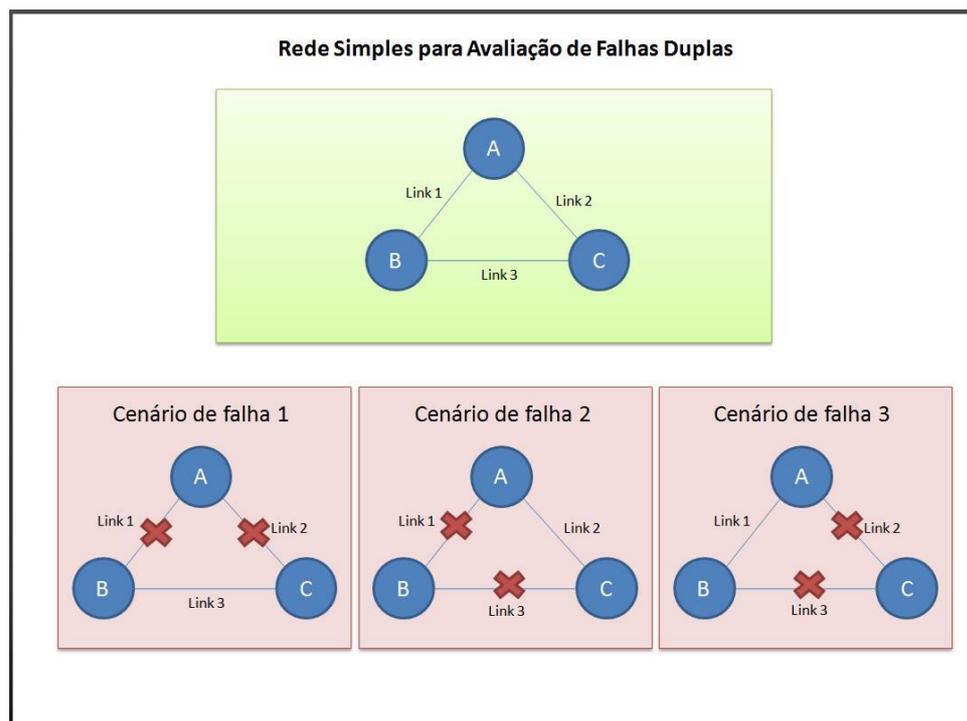
Este trabalho envolve a utilização de uma ferramenta de planejamento de redes ópticas proveniente de uma parceria entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a Padtec S.A., uma empresa do setor privado atuante no desenvolvimento de equipamentos e prestação de serviços no mercado de comunicações ópticas. Dentre as principais funcionalidades desta ferramenta estão: algoritmo RWA com suporte a agregação e proteção, módulo para avaliação de camada física, restauração óptica, análise de falhas, alocação de regeneradores, etc. Recentemente foi adicionado um módulo de planejamento para a camada OTN que utiliza o OTN-PASRIN, citado no Capítulo 4, para encontrar uma solução válida que minimize os recursos utilizados na rede e atenda todos os requisitos presentes nas premissas do projeto. A ferramenta foi utilizada para a implementação e simulação da proposta principal desta Tese. A contribuição que será feita com este trabalho em relação a essa ferramenta é a adição de um módulo de planejamento baseado em meta-heurística que resolva o problema e forneça soluções melhores ou iguais as apresentadas pelo algoritmo OTN-PASRIN.

5.5 Analisador de falhas

Um dos principais desafios enfrentados na operação e planejamento de redes ópticas é oferecer uma rede que consiga ser tolerante a falhas nos equipamentos e nos enlaces de fibra óptica. Vários serviços podem ser comprometidos caso ocorra alguma falha em algum enlace da rede. Os principais agentes causadores de falhas em redes ópticas são o erro humano, a falha em equipamentos e as catástrofes (FREITAS et al., 2011). Além de comprometer a comunicação, uma falha na rede também representa prejuízos para os usuários e para as operadoras (que são obrigadas a garantir a disponibilidade definida no contrato pelo SLA - *Service-level agreement*).

A fim de verificar a capacidade de recuperação da rede caso ocorram falhas um módulo de análise de falhas foi implementado. Esse módulo tem a capacidade de analisar a taxa de recuperação da rede para situações onde ocorram falhas simples ou duplas nos enlaces. Os eventos de falhas são gerados por meio de combinações e compreendem todas as possibilidades para a topologia analisada. A Figura 20 apresenta exemplos de cenários de falhas gerados a partir de uma topologia simples configurada para suportar falhas duplas.

Figura 20 – Exemplo com cenários de falhas duplas geradas a partir de uma topologia simples.



Fonte: O autor, 2020.

Dependendo do tamanho da rede, a execução desse módulo pode se tornar bastante custosa. No processo de planejamento, esse módulo é executado após o embarque dos serviços de trabalho e proteção (caso haja necessidade). Após a análise de falhas, o módulo retorna o valor da taxa de insucesso na restauração. Essa taxa, juntamente com a quantidade de interfaces utilizadas na configuração de redes, são as métricas de desempenho avaliadas no algoritmo multiobjetivo proposto nesse trabalho.

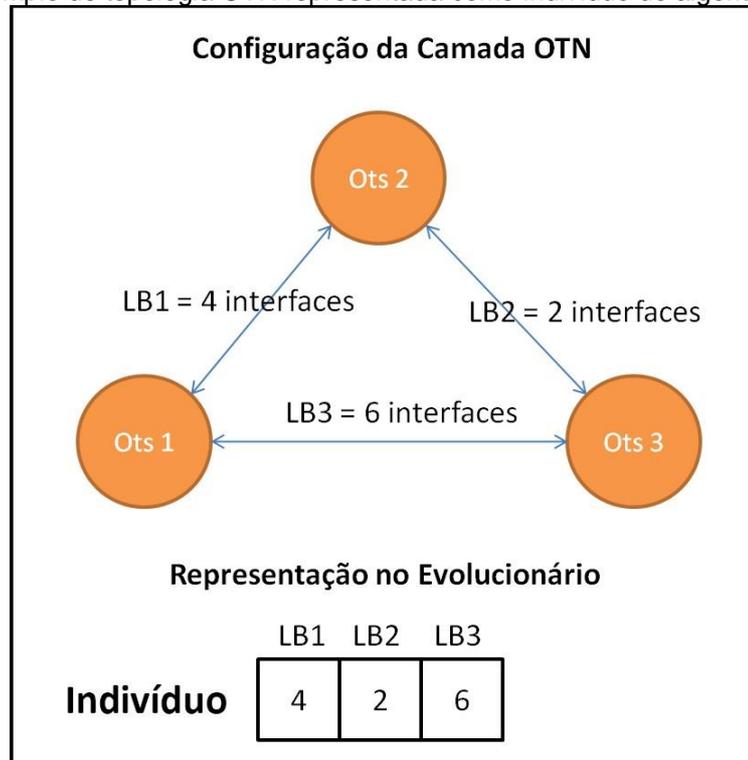
5.6 Modelagem e configurações para o Algoritmo Evolucionário

O algoritmo utilizado nessa pesquisa para a otimização do planejamento OTN é uma versão customizada do NSGAI. Como citado anteriormente, ele é um algoritmo evolucionário multiobjetivo que aplica o conceito de dominância. Nessa subseção é abordada a modelagem dos indivíduos e as configurações do algoritmo.

5.6.1 Modelagem do indivíduo

Para solucionar o problema definido nesta Tese, cada indivíduo simulado representa a configuração de uma rede no que diz respeito às suas interfaces OTN. Mais especificamente, cada gene do indivíduo representa a quantidade de interfaces de rede atreladas a um *linkbundle* da camada OTN. No caso, se a topologia OTN da rede possuir 3 *linkbundles*, o indivíduo será representado por um vetor de inteiros com 3 posições. A Figura 21, mostra uma topologia de rede para a camada OTN e sua respectiva representação como indivíduo do algoritmo evolucionário.

Figura 21 – Exemplo de topologia OTN representada como indivíduo do algoritmo evolucionário.



Fonte: O autor, 2020.

5.6.2 Inicialização dos indivíduos e da população

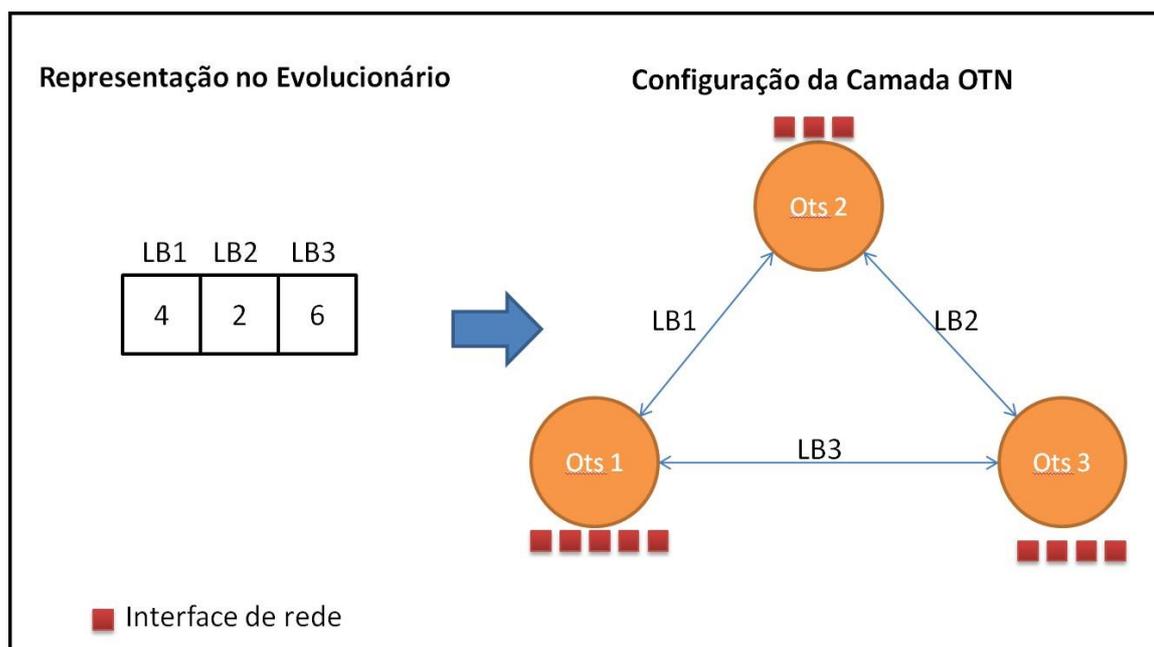
A inicialização e atualização dos indivíduos devem respeitar algumas regras, como por exemplo, manter o padrão de números pares não negativos para os valores dos genes. Esse padrão se faz necessário para manter a coerência com o modelo real dos *linkbundles* no qual as interfaces são alocadas em pares. Outra regra que deve ser respeitada são os limites de máximo e mínimo que são definidos através das soluções de *Lowerbound* e *Upperbound*. Além disso, para guiar a inicialização, é utilizado uma quantidade total de interfaces iniciais que são distribuídas de forma aleatória nos genes do indivíduo. Esse valor inicial é obtido a partir de uma configuração válida de rede obtida através do algoritmo heurístico OTN-PASRIN.

Para auxiliar na geração da população inicial, são inseridos dois indivíduos no conjunto, um que representa uma solução básica que não compreende a capacidade de restauração (*Lowerbound*) e uma solução não otimizada, porém que atende todos os requisitos de projeto incluindo a restauração (*Upperbound*).

5.6.3 Alocação das interfaces de rede para avaliação

Para que o indivíduo seja analisado pelo avaliador da ferramenta se faz necessário uma transformação da representação de genes para a estrutura de rede (camada OTN). Como as interfaces, de fato, ficam alocadas fisicamente nos OTS's, precisa-se aplicar uma estratégia de conversão para que as mesmas sejam definidas corretamente. Tomando como exemplo a configuração do indivíduo da Figura 21, as 4 interfaces associadas ao *linkbundle* LB1 seriam atribuídas ao OTS 1 e ao OTS 2, que são seus OTS's de origem e destino. Nesse caso, duas interfaces seriam alocadas em cada um desses OTS's. O mesmo é feito com os outros *linkbundles* até que todas as interfaces associadas a eles sejam de fato alocadas na estrutura dos OTS's corretamente. A Figura 22 apresenta um exemplo de transformação do modelo de indivíduo utilizado no algoritmo evolucionário para a configuração de rede utilizada no avaliador da ferramenta (os quadrados vermelhos representam as interfaces de rede que serão configuradas nos OTS's associados). Com esse procedimento finalizado, a rede está pronta para passar pelo processo de avaliação.

Figura 22 – Exemplo de transformação da estrutura do indivíduo para a configuração de rede utilizada para avaliação na ferramenta de planejamento.



Fonte: O autor, 2020.

5.6.4 Avaliação da Função Objetivo

A avaliação do indivíduo é realizada para se obter os valores das duas variáveis que devem ser otimizadas pelo algoritmo evolucionário. Para o modelo proposto, essas variáveis são: quantidade de interfaces utilizadas e a TIRF (Taxa de Insucesso na Restauração de Falhas). A primeira variável é extraída facilmente realizando o somatório de todas os valores dos genes do indivíduo, como é mostrado na Equação (1).

$$NI = \sum_{i=0}^N gene_i, \quad (1)$$

Em que NI representa o número total de interfaces de rede e $gene_i$ representa o índice i do vetor de inteiros que modela o indivíduo. Esse valor é o custo mais representativo para a implantação de uma rede OTN, por esse motivo, é importante minimizá-lo.

A segunda variável, a TIRF, demanda um custo computacional maior para ser extraída. Isso se deve ao fato de ser necessário realizar uma análise de falhas geral por indivíduo. Ao final da execução do analisador de falhas é possível saber quantas restaurações não puderam ser realizadas e a taxa é computada dividindo a quantidade total de insucessos pela quantidade de tentativas de restauração. A Equação (2) representa o cálculo da taxa de insucesso na restauração de falhas.

$$TIRF = \frac{IR}{TTR}, \quad (2)$$

Em que TIRF é a Taxa de Insucesso na Restauração de Falhas, IR é a quantidade de insucessos na restauração e TTR é o total de tentativas de restauração (FREITAS; MARTINS-FILHO; BASTOS-FILHO, 2015).

5.7 Arranjo experimental

Para os experimentos realizados com o algoritmo evolucionário foram definidos cenários e condições similares aos utilizados para os testes do OTN-PASRIN. Foi assumido que a camada física fornece qualidade suficiente para suportar as taxas utilizadas, a métrica utilizada nos algoritmos de menor caminho foi o número de saltos (*hops*) e todas as entradas foram definidas ou geradas previamente.

O primeiro experimento utiliza a rede de quatro nós apresentada na Figura 9. A premissa para a utilização deste cenário foi realizar a comparação do algoritmo evolucionário com algumas abordagens heurísticas (OTN-PASRIN e OTN-PASRIN-Max) e com a solução ótima obtida através de uma estratégia exaustiva. A estratégia exaustiva foi aplicada utilizando o Algoritmo 5 mencionado no Capítulo 4. Foram considerados três casos de testes com número fixo de serviços com a quantidade variando de quatro a oito. No caso de teste 1 (CT-1), todos os serviços são do tipo 1+R, no caso de teste 2 (CT-2) todos os serviços são do tipo 1+1+R e no caso de teste 3 (CT-3), são utilizados todos os tipos de serviços considerados nesta Tese (1+0, 1+1, 1+R e 1+1+R). Todos os serviços utilizados nestes cenários foram predefinidos devido a quantidade limitada de possibilidades. Os serviços utilizados foram os mesmos presentes na Tabela 2. Para este caso, serviços que possuíam limitações físicas que impossibilitavam a sua implementação foram considerados embarcados quando o algoritmo foi capaz de encontrar o máximo de rotas permitidas para o par origem-destino.

Para o segundo cenário, foi considerada a mesma rede com topologia toroidal (16 nós OTN e 32 *linkbundles*) utilizada nos experimentos com o OTN-PASRIN. A topologia pode ser observada na Figura 10. Como já citado no Capítulo 4, para este caso, é impraticável realizar um teste exaustivo, por esse motivo foram comparados apenas os algoritmos OTN-PASRIN e o algoritmo evolucionário. Para este conjunto de experimentos foram considerados os mesmos casos de testes (CT-1, CT-2 e CT-3), porém os serviços foram gerados de forma pseudo-aleatória para cada execução. Foram realizadas um total de 30 execuções para cada caso de teste e as variáveis analisadas foram o número de interfaces, a ocupação média dos *linkbundles* (número médio de interfaces OTN utilizadas na configuração da rede) e a ocupação máxima dos *linkbundles* (maior número de interfaces OTN utilizadas na configuração da rede). Além disso, uma análise do tempo de execução foi realizada considerando 30

execuções em um cenário com a quantidade de serviços variando de trinta a noventa. Todos os serviços avaliados eram do tipo 1+R e os seus pares origem-destino foram gerados de forma pseudoaleatória. Nas mesmas condições, foi avaliada a influência no tempo de execução quando se é feita a inserção de possíveis soluções na população inicial. Neste último experimento foi utilizado um valor fixo de 75 serviços do tipo 1+R.

5.7.1 Parâmetros do Algoritmo Evolucionário

Os parâmetros para o algoritmo evolucionário foram obtidos de forma empírica através de experimentação prévia em cada uma das topologias testadas. Na versão atual do algoritmo evolucionário não existem mecanismos adaptativos para a definição desses parâmetros de forma automática.

Para o cenário onde foi utilizada a rede de 4 nós, o tamanho da população foi definido em 20 indivíduos, já para o cenário com a rede toroidal, foram utilizados 30 indivíduos. Para ambos os casos a variação para definir a estagnação do hypervolume foi de 3%, a taxa de cruzamento foi definida como 30% e a taxa de mutação utilizada foi de 5%.

5.7.2 Complexidade do Algoritmo Evolucionário

A complexidade do algoritmo multiobjetivo utilizado é definido em (DEB et al., 2002) como sendo $O(GMN^2)$, em que G é o número de gerações, M é o número de objetivos e N é o tamanho da população. Visto que a complexidade de avaliação de cada indivíduo é similar a de um planejamento realizado pelo algoritmo heurístico OTN-PASRIN, a complexidade da abordagem proposta nesta Tese é dada por $O\{GMN^2[S(2R^2) + (L^2)(S)(2R^2)]\}$.

5.8 Resultado dos experimentos

Nesta Seção são apresentados os resultados dos experimentos realizados utilizando a topologia 1 e 2.

5.8.1 Resultados para a Topologia 1

A Figura 23 apresenta uma comparação entre os algoritmos OTN-PASRIN, OTN- PASRIN-Max, o algoritmo exaustivo e o algoritmo evolucionário em termos de quantidade de interfaces em função quantidade de serviços para a topologia 1 considerando os três casos de teste: caso 1 (a), caso 2 (b) e caso 3 (c). Pode-se observar que para todos os casos o algoritmo OTN-PASRIN-Max obteve uma maior quantidade de interfaces OTN resultantes. Esse resultado já era esperado, visto que esse algoritmo realiza uma abordagem em que não se tem como objetivo o reaproveitamento de interfaces de restauração, diferente do OTN-PASRIN.

Para os casos observados na Figura 23 (a) e (c), todos os algoritmos, com exceção do OTN-PASRIN-Max, obtiveram resultados iguais em relação a quantidade e distribuição das interfaces OTN em cada *linkbundle*. No caso 2, apresentado na Figura 23 (b), o algoritmo OTN- PASRIN obteve resultados mais custosos para os testes realizados com 6, 7 e 8 serviços quando comparado com a abordagem exaustiva e com o algoritmo evolucionário. Isso ocorre pelo fato do OTN-PASRIN ser uma abordagem heurística onde a ordem das rotas e serviços alocados podem influenciar diretamente no resultado. Neste mesmo caso, o algoritmo evolucionário conseguiu encontrar a mesma solução apresentada pelo algoritmo exaustivo (solução ótima para o cenário). Isso ocorreu pelo fato do algoritmo evolucionário realizar uma busca por diversas possibilidades de configurações de interfaces OTN já instaladas, fazendo com que o roteamento optasse apenas por caminhos onde existem recursos. Vale salientar que mesmo realizando uma busca mais robusta, o algoritmo evolucionário não garante a solução ótima, podendo ficar preso em ótimos locais.

Na Figura 24 é apresentado o gráfico de convergência do algoritmo evolucionário para a topologia 1. Pode-se notar que a quantidade de iterações necessárias para se chegar à solução final é pequena, o que pode indicar que para problemas mais simples não seja necessário utilizar uma abordagem desse nível.

5.8.2 Resultados para a Topologia 2

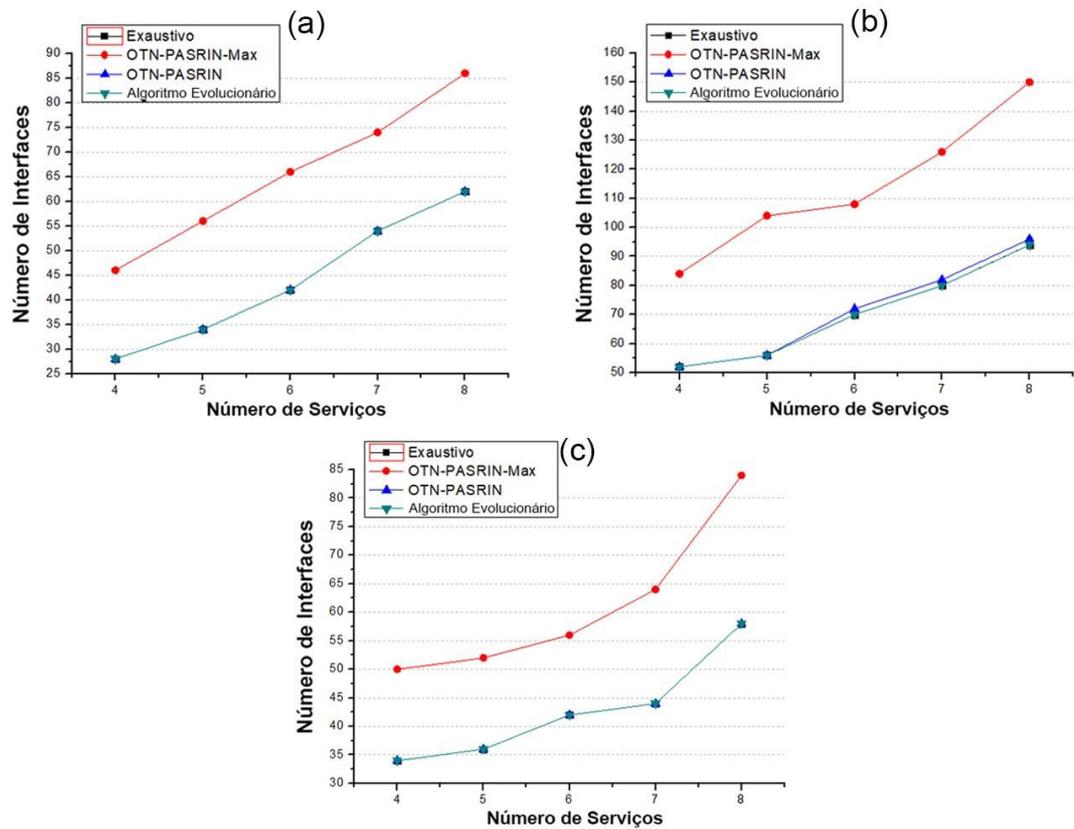
A Figura 25 apresenta o gráfico de convergência do algoritmo evolucionário para uma das execuções para a topologia 2. Podemos observar que para este cenário o algoritmo demanda uma quantidade maior de gerações para convergir quando comparado com os experimentos realizados com a topologia 1. Isso pode ocorrer

devido ao aumento da dimensionalidade do problema e também em decorrência do aumento da quantidade de serviços a serem embarcados.

Na Figura 26 é apresentada uma análise do tempo de execução do algoritmo evolucionário em função da quantidade de serviços apresentados. Pode-se perceber que o tempo para convergir tem uma tendência de aumento linear à medida que se aumenta a quantidade de serviços a serem implementados. Outra análise do tempo de execução foi feita comparando o comportamento do algoritmo quando a sua inicialização conta com a inserção de indivíduos que contam com possíveis soluções para o problema (sementes). Essa análise mostrou que ao inserir essas soluções na população inicial o algoritmo convergiu mais rapidamente. Esse comparativo é apresentado na Figura 27.

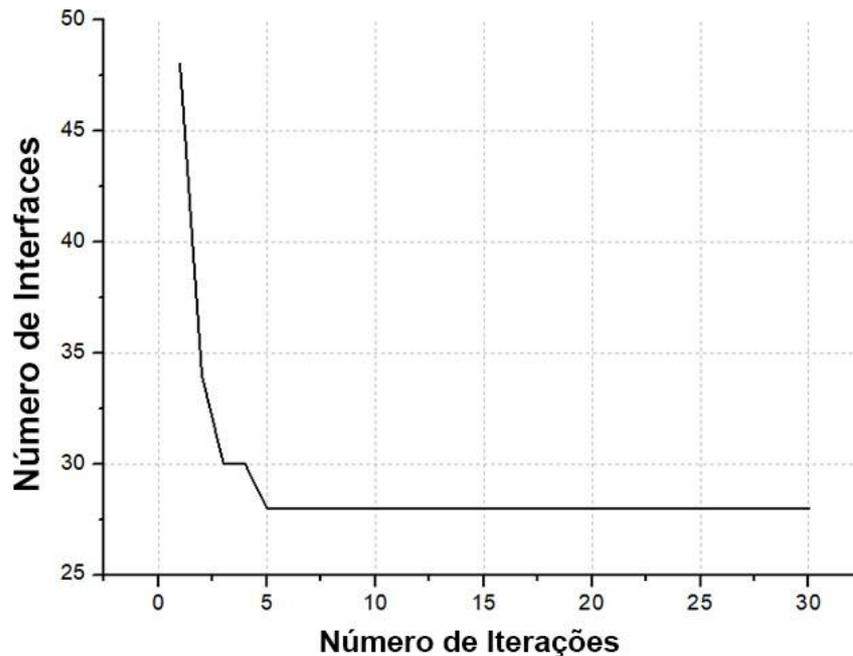
As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os resultados obtidos com a topologia 2 para os casos de teste CT-1, CT-2 e CT-3, respectivamente. Para cada caso de teste foram executadas 30 simulações independentes com os dois algoritmos, o OTN-PASRIN e o algoritmo evolucionário. Vale lembrar que em cada execução o mesmo conjunto de serviços gerados foram apresentados para os algoritmos a serem comparados. Os *boxplots* mostram que, para todos os casos analisados, o algoritmo evolucionário conseguiu uma redução na quantidade de interfaces OTN utilizadas. A redução média da quantidade de interfaces para os casos de teste CT-1, CT-2 e CT-3 foram de aproximadamente 13%, 7% e 6%, respectivamente, o que representa uma quantidade significativa quanto tratamos de um equipamento de alto custo no projeto. As variáveis de ocupação média e ocupação máxima também acompanharam essa redução.

Figura 23 – Comparação do número de interfaces em função do número de serviços para o OTN-PASRIN, OTN-PASRIN-Max, algoritmo Exaustivo e algoritmo Evolucionário: todos os serviços são do tipo 1+R (a), todos os serviços são do tipo 1+1+R (b) e todos os tipos de serviços alternados (c).



Fonte: O autor, 2020.

Figura 24 – Gráfico de convergência para a topologia 1.



Fonte: O autor, 2020.

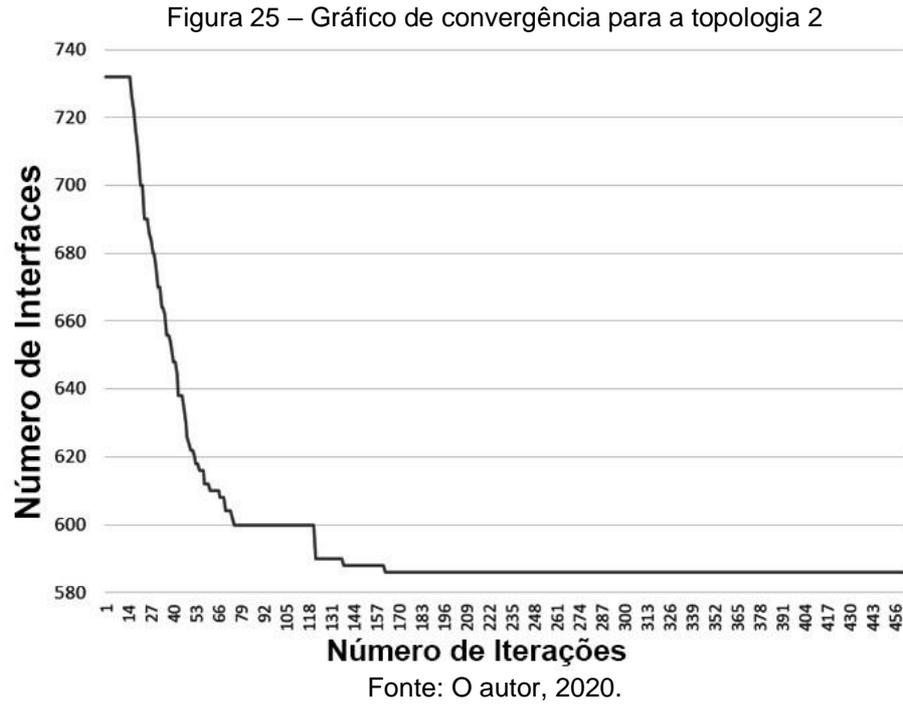


Figura 26 – Análise do tempo de execução do algoritmo evolucionário em função da quantidade de serviços.

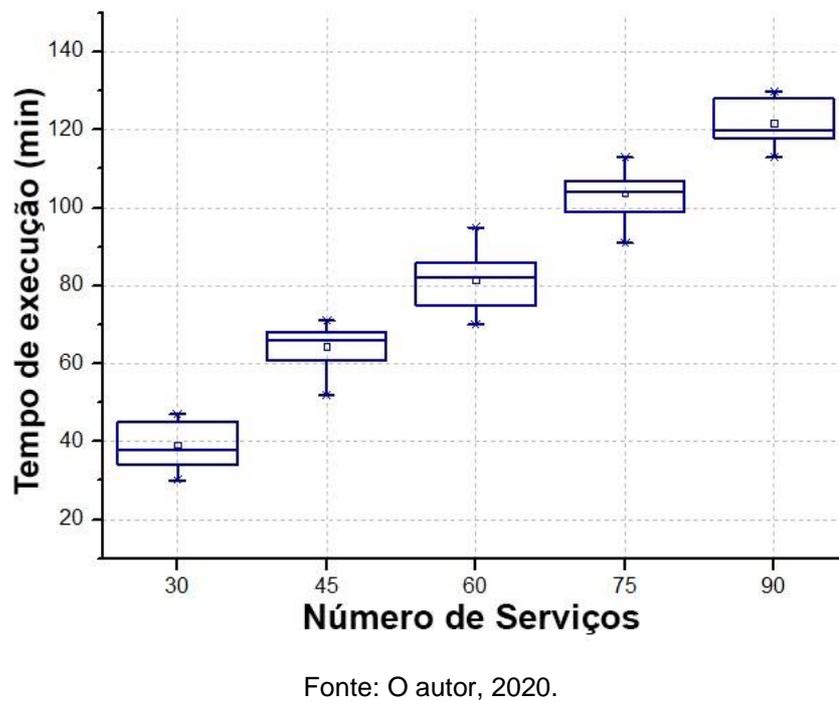
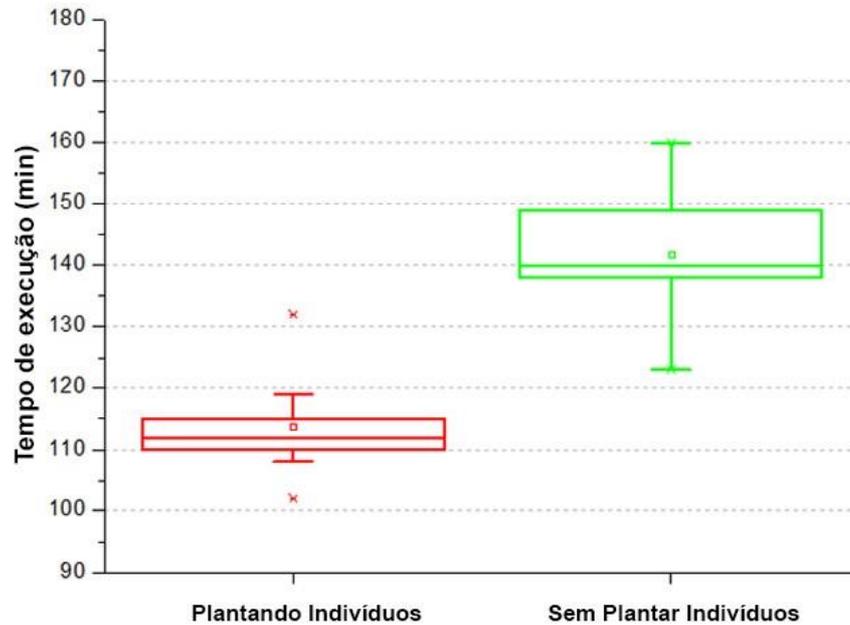
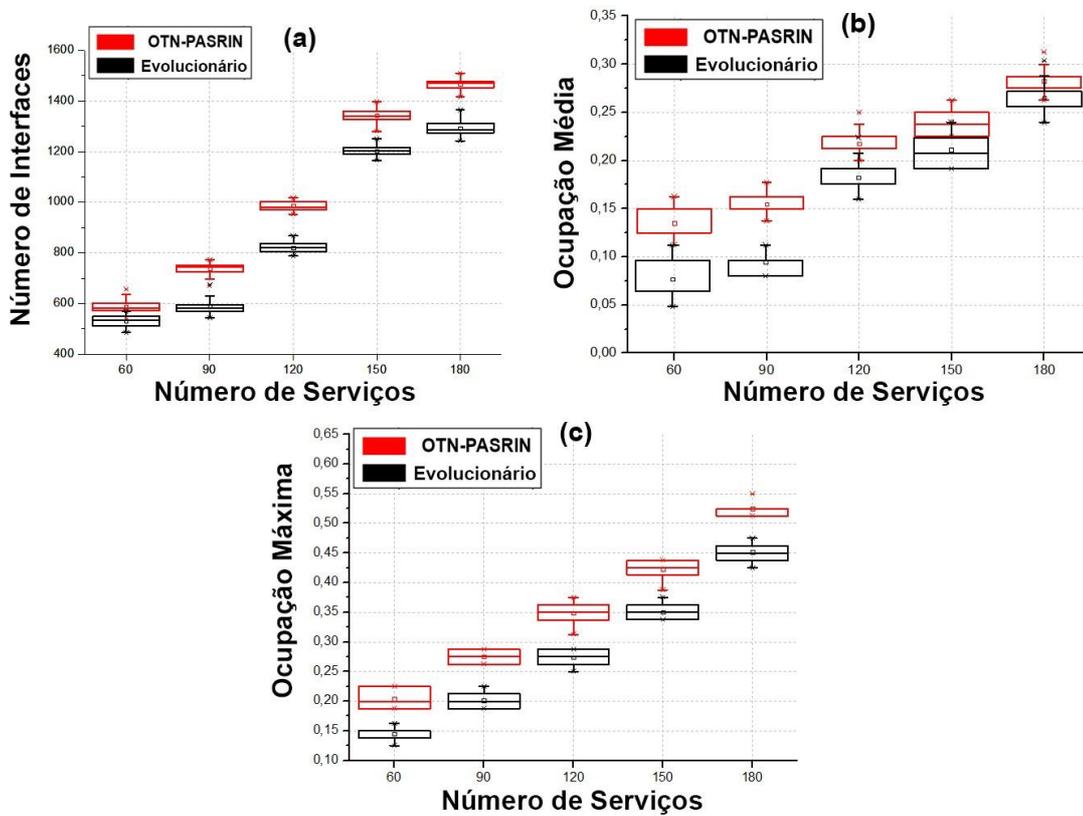


Figura 27 – Análise do tempo de execução considerando a inserção de soluções iniciais.



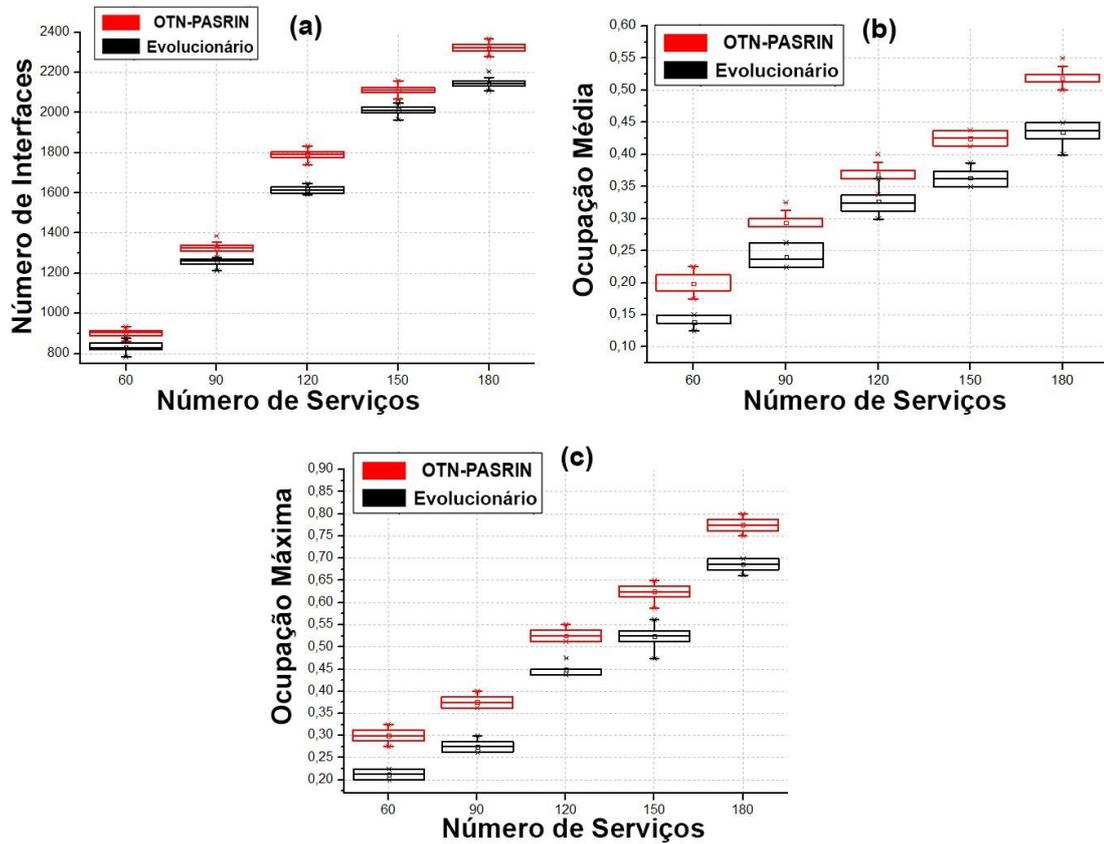
Fonte: O autor, 2020.

Figura 28 – Representação em *boxplot* da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e algoritmo evolucionário que relaciona o número de serviços (todos os serviços são do tipo 1+R) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima.



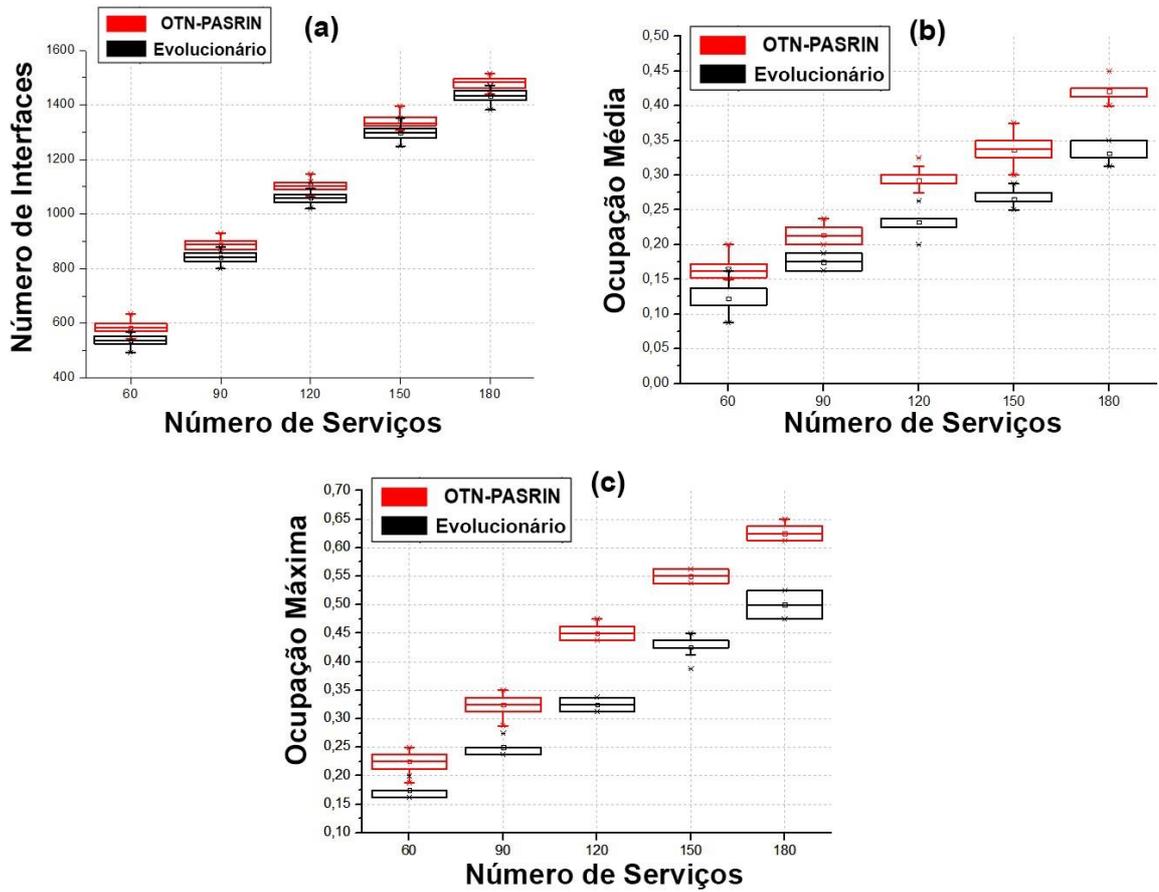
Fonte: O autor, 2020.

Figura 29 – Representação em *boxplot* da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e algoritmo evolucionário que relaciona o número de serviços (todos os serviços são do tipo 1+1+R) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 30 – Representação em *boxplot* da análise estatística de 30 execuções diferentes dos algoritmos OTN-PASRIN e algoritmo evolucionário que relaciona o número de serviços (todos os tipos de serviços alternados) em função: (a) do número de interfaces, (b) da ocupação média e (c) da ocupação máxima.



Fonte: O autor, 2020.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este Capítulo apresenta as conclusões acerca dos resultados obtidos através dos estudos realizados nesta Tese, as publicações relacionadas e uma lista de possíveis trabalhos futuros derivados dessa pesquisa. Na Seção 6.1 são apresentadas as conclusões sobre as abordagens proposta neste trabalho e sobre os resultados obtidos. Na Seção 6.2 são apresentadas as publicações relacionadas ao trabalho desenvolvido no período de produção da Tese. E por último, na Seção 6.3 são listados os trabalhos futuros.

6.1 Conclusões dos resultados

Nesta Tese são propostas algumas abordagens para resolver o problema de planejamento eficiente das OTN sobre DWDM. Foram utilizadas estratégias heurísticas e meta-heurísticas para lidar com o problema de forma a reduzir o custo de implantação da rede mantendo o desempenho exigido nas premissas de projeto. A proposta principal fez uso de uma abordagem multiobjetiva que levou em consideração a resiliência da rede (quantificada pela variável TIRF) e o custo dos dispositivos (representado pela quantidade das interfaces de interfaces OTN necessárias para a implementação do projeto).

Por se tratar de um problema classificado como NP-difícil, os trabalhos relacionados a esta Tese também propuseram algumas soluções heurísticas e meta-heurísticas. Entretanto, as propostas relacionadas não levam em consideração a garantia de resiliência total na rede e a utilização de meta-heurísticas de forma simultânea. A combinação dessa característica pode levar a resultados subótimos com uma redução considerável no custo do projeto como é demonstrado nos estudos realizados nesta Tese.

A fim de obter soluções heurísticas para o problema foram elaborados dois algoritmos. No Capítulo 3 são apresentados os algoritmos OTN-PASRIN-Max e OTN-PASRIN. O algoritmo OTN-PASRIN-Max é uma solução heurística para o problema abordado nesta Tese que obtêm uma solução factível, porém faz uso de uma grande quantidade de recursos, o que eleva o custo total da rede. Já o OTN-PASRIN, é uma versão do planejador heurístico que fomenta a reutilização das interfaces OTN de restauração em cenários de falhas distintos. Essa estratégia de reutilização de

interfaces de restauração promoveu um melhor uso dos recursos e, em consequência, uma redução no custo final da rede.

Esta Tese levantou a hipótese de que algoritmos evolucionários aplicados ao planejamento das OTN sobre DWDM podem realizar o dimensionamento de uma quantidade mínima de interfaces OTN mantendo a máxima resiliência sugerida para o projeto. Foi proposto uma versão customizada do algoritmo multiobjectivo NSGAI com uma modelagem voltada ao problema tratado nesta Tese. Na proposta foram elaboradas as estratégias de modelagem dos equipamentos, a estratégia de inicialização e a escolha dos operadores de cruzamento e mutação. Os experimentos realizados com essa proposta demonstraram que mesmo em cenários reduzidos, como a topologia 1, o algoritmo pode obter resultados melhores do que uma abordagem heurística. Essa diferença é mais relevante em cenários mais complexos, como na topologia 2, onde as opções de configurações aumentam de forma considerável. Embora o algoritmo evolucionário demande um tempo muito maior do que um algoritmo heurístico, para o problema em questão é totalmente aceitável utilizá-lo, visto que estamos tratando de um planejamento de redes com tráfego estático.

As abordagens propostas nesta Tese contribuem com um cenário que cresce constantemente e que desperta cada vez mais o interesse da indústria. Os algoritmos desenvolvidos com esse estudo farão parte do conjunto de soluções oferecidas por uma ferramenta de planejamento de redes ópticas fruto de uma parceria entre a empresa Padtec e a UFPE. Além disso, o estudo ao longo do período de produção deste trabalho resultou em publicações que serão descritas na próxima Seção.

6.2 Publicações relacionadas

Durante o período de desenvolvimento desta Tese foram publicados três artigos em conferência, um artigo em periódico está em processo de publicação e um outro artigo está em preparação. A lista a seguir apresenta com mais detalhes todos os trabalhos produzidos:

- a. **PUBLICADO:** FIGUEIROA, E. O. ; LIMA, E. A. O. ; BASTOS-FILHO, C. J. A. ; DA SILVA, J. C. ; XAVIER, A. V. S. ; ARAUJO, D. R. B. . *A routing algorithm based on fuzzy logics for elastic optical networks*. In: 2017 IEEE 18th

- International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), 2017, Campinas. 2017 IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), 2017.p.1.
- b. **PUBLICADO:** SILVA, J. C.; BASTOS-FILHO, C. J. A. ; COUTO, Isabella S. ; XAVIER, A. V. S. ; FIGUEROA, E. O. ; ARAUJO, D. R. B. ; MARTINS FILHO, J. F. . Uma Abordagem de Otimização Para o Algoritmo de Roteamento Utilizando Lógica Nebulosa. In: XXXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 2018, Campina Grande, PB. Anais do SBrT 2018, 2018. v. 1. p. 1-5.
- c. **PUBLICADO:** SILVA, J. C.; BASTOS-FILHO, C. J. A. ; ALMEIDA JUNIOR, R. C. A.; CHAVES, D. A. R. ; ARAUJO, D. R. B. ; XAVIER, A. V. S. ; MARTINS FILHO, J. F. . OTN Network Planning Over DWDM Using Computational Intelligence.. In: 21st International Conference on Transparent Optical Networks ICTON 2019, 2019, Angers. 21st International Conference on Transparent Optical Networks ICTON 2019, 2019. v. 1. p. 1-4.
- d. **ACEITO:** XAVIER, A. V. S. ; SILVA, J. C. ; MARTINS FILHO, J. F. ; BASTOS-FILHO, C. J. A. ; CHAVES, D. A. R. ; ALMEIDA JUNIOR, R. C. A. ; ARAUJO, D. R. B. ; MARTINS, J. A. . *Heuristic Planning Algorithm for Sharing Restoration Interfaces in OTN Over DWDM Networks. Optical Fiber Technology*, 2020.
5. **PREPARAÇÃO:** SILVA, J. C.; BASTOS-FILHO, C. J. A. ; ALMEIDA JUNIOR, R. C. A. ; CHAVES, D. A. R. ; ARAUJO, D. R. B. ; XAVIER, A. V. S. ; MARTINS FILHO, J. F. *Efficient Design of Resilient OTN Over DWDM Optical Networks.*

6.3 Trabalhos futuros

Nesta seção serão listadas algumas propostas de trabalhos futuros para a continuidade dos estudos realizados nesta Tese. A lista de sugestões está apresentada abaixo:

1. Estudo comparativo utilizando diversas abordagens multiobjetivas para o planejamento das OTN sobre DWDM resilientes.
2. Estudo relacionado a calibração dos parâmetros do algoritmo multiobjetivo utilizado.

3. Estudo relacionado ao desenvolvimento de operadores adaptativos sensíveis à variação de topologias.
4. Uma abordagem baseada em análise estatística ou *machine learning* para a estimação de TIRF.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

ARAÚJO, D. R. et al. An efficient multi-objective evolutionary optimizer to design all-optical networks considering physical impairments and capex. In: **IEEE**. 2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. [S.l.], 2011. p. 76–81.

_____. A performance comparison of multi-objective optimization evolutionary algorithms for all-optical networks design. In: **IEEE**. 2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision-Making (MDCM). [S.l.], 2011. p. 89–96.

ARAÚJO, D. R. B. d. Planejamento de redes ópticas usando inteligência computacional e ciência das redes. Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

_____. Planejamento de Redes Ópticas Usando Inteligência Computacional e Ciência das Redes. Tese (Doutorado) — Federal University of Pernambuco - Brazil, 2015.

ASTHANA, R.; SINGH, Y. N. Protection and restoration in optical networks. **IETE journal of research**, Taylor & Francis, v. 50, n. 5, p. 319–329, 2004.

BACK, T. **Evolutionary algorithms in theory and practice**: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms. [S.l.]: Oxford university press, 1996.

BASTOS-FILHO, C. J. A. Amplificadores ópticos para sistemas de Comunicação multicanais de alta Capacidade. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2005.

BERTOLINI, M. et al. Benefits of otn switching introduction in 100gb/s optical transport networks. In: **IEEE**. OFC/NFOEC. [S.l.], 2012. p. 1–3.

BREUER, D. et al. Unrepeated 40-gb/s rz single-channel transmission at 1.55 μm using various fiber types. *IEEE Photonics Technology Letters*, **IEEE**, v. 10, n. 6, p. 822–824, 1998.

BROMAGE, J. Raman amplification for fiber communications systems. *Journal of Lightwave Technology*, **IEEE**, v. 22, n. 1, p. 79–93, 2004.

COELLO, C. A. C. et al. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. [S.l.]: Springer, 2007. v. 5.

DEB, K.; JAIN, H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference- point-based nondominated sorting approach, part i: solving problems with box constraints. *IEEE transactions on evolutionary computation*, **IEEE**, v. 18, n. 4, p. 577–601, 2013.

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

DUPLEIX, V.; ARAÚJO, D. R. B.; BASTOS-FILHO, C. J. A. Designing the optical network of haiti using a multi-objective evolutionary approach. In: **2016 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to evolutionary computing**. [S.l.]: Springer, 2015.

EIRA, A. et al. Hardware reuse policies for fixed and flexible next-generation optical transport network architectures in multi-period scenarios. In: **IEEE. 2016 21st European Conference on Networks and Optical Communications (NOC)**. [S.l.], 2016. p. 129–134.

FREITAS, R. et al. A novel restoration algorithm based on optical signal to noise ratio for transparent optical networks. In: **Telecommunications Brazilian Symposium (SBrT 2011)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5.

FREITAS, R. C.; MARTINS-FILHO, J. F.; BASTOS-FILHO, C. J. A. **Redes ópticas: estratégias de sobrevivência a falhas**. [S.l.]: Manaus: UEA Edições, 2015. ISBN 9788578833381.

GLINGENER, C. Optical networking trends and evolution. In: **OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. Optical Fiber Communication Conference**. [S.l.], 2011. p. OThAA1.

HINTERDING, R. Gaussian mutation and self-adaption for numeric genetic algorithms. In: **Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1, p. 384–.

INDEX, C. V. N. Forecast and methodology, 2012–2017. **White paper**, v. 29, 2013.

ITU-T. Recommendation ITU-T G.872 - **Architecture of optical transport networks**. [S.l.]: February, 2019.

ITU-T. Recommendation ITU-T G.709 - **Interfaces for the optical transport network**. [S.l.]: June, 2020.

JACOBS, I. Lightwave system development: looking back and ahead. **Optics and Photonics News, Optical Society of America**, v. 6, n. 2, p. 19, 1995

JIANG, D.; FAN, Z. **The algorithm for algorithms: an evolutionary algorithm based on automatic designing of genetic operators**. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2015, 2015.

KARABOGA, D. **An idea based on honey bee swarm for numerical optimization**. [S.l.], 2005.

KATIB, I.; MEDHI, D. Ip/mppls-over-otn-over-dwdm multilayer networks: an integrated

three-layer capacity optimization model, a heuristic, and a study. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, IEEE, v. 9, n. 3, p. 240–253, 2012.

KNOWLES, J.; CORNE, D. On metrics for comparing nondominated sets. **Congress Evolutionary Computation (CEC'02)**, Piscataway, NJ, USA, 12–17 May, vol. 1. [S.I.]: IEEE, 2002.

LIGHTPAD i6400G-Line Cards 100G. Disponível em: <<http://www.padtec.com.br/wp-content/uploads/2018/10/DST100G1116V1PT.pdf>>. Accessed:19-11-20>.

_____. i6400G-Line Cards 10G. Disponível em: <<http://www.padtec.com.br/wp-content/uploads/2018/10/DST10G1015V1PT.pdf>>. Accessed:19-11-20>.

_____. i6400G-Line Cards 200G. Disponível em: <<http://www.padtec.com.br/wp-content/uploads/2018/10/DST200G0818V1PT.B.pdf>>. Accessed:19-11-20>.

_____. OTS. Disponível em: <<http://www.padtec.com.br/wp-content/uploads/2018/10/DSOTS120518V1PT-1.pdf>>. Accessed:19-11-20>.

LIRA, C. et al. Redes neurais artificiais para predição de tolerância a falhas em redes Ópticas. In: **Anais do XVI Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 377–388. ISSN 0000-0000. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/eniac/article/view/9299>>.

MONIZ, D. et al. **Multi-objective framework for cost-effective otn switch placement using nsga-ii with embedded domain knowledge**. Applied Soft Computing, Elsevier, v. 83, p. 105608, 2019.

MORAIS, R. et al. Genetic algorithm for the topological design of survivable optical transport networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, IEEE, v. 3, n. 1, p. 17–26, 2010.

MORAIS, R. M. et al. Impact of node architecture in the power consumption and footprint requirements of optical transport networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, IEEE, v. 5, n. 5, p. 421–436, 2013.

_____. Impact of grooming architecture of transport nodes in line interface count for multi-period planning. In: **IEEE**. 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). [S.I.], 2015. p. 1–3.

MORAIS, R. M.; PEDRO, J.; PINTO, A. N. Planning and dimensioning of multilayer optical transport networks. In: **IEEE**. 2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). [S.I.], 2015. p. 1–5.

MUKHERJEE, B. **Optical WDM networks**. [S.I.]: Springer Science & Business Media, 2006.

OLIVEIRA, B. Q. de; SOUSA, M. A. de; VIEIRA, F. H. T. Firefly algorithm based optimization model for planning of optical transport networks. **Advances in Electrical and Computer Engineering, Stefan cel Mare University of Suceava**, v. 20, n. 2, p. 55–64, 2020.

OLIVEIRA, B. Q. de; SOUSA, M. A. de; VIEIRA, F. H. T. A hybrid firefly-genetic algorithm for planning of optical transport networks. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 35, n. 1, p. 243–255, 2020.

OSA INDUSTRY DEVELOPMENT ASSOCIATES. OSA **Industry Development Associates, Lighting the path to a brighter future**, OSA. 2018. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/6FD8916A-FF7A-647E-DE8796783F3EC79B_421900/OIDA-2018-2.pdf. Accessed:7-11-20>.

OU, C. S.; MUKHERJEE, B. **Survivable optical WDM networks**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005.

PERRIN, S. **The need for next-generation roadm networks**. Heavy Reading, September, 2010.

RAMAMURTHY, S.; MUKHERJEE, B. Survivable wdm mesh networks. ii. restoration. In: **IEEE. 1999 IEEE International Conference on Communications** (Cat. No. 99CH36311). [S.l.], 1999. v. 3, p. 2023–2030.

RAMAMURTHY, S.; MUKHERJEE, B. Survivable wdm mesh networks. part i- protection. In: **IEEE. IEEE INFOCOM'99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now** (Cat. No. 99CH36320). [S.l.], 1999. v. 2, p. 744–751.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. **Optical networks: a practical perspective**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009.

SANTOS, J. R.; EIRA, A.; PIRES, J. A heuristic algorithm for designing otn over flexible-grid dwdm networks. **Journal of Communications**, v. 12, n. 9, 2017.

SCHMITT, A. **Integrated otn switching virtualizes optical networks**. Infonetics research white paper, 2012.

SCHOTT, J. R. **Csdl-t-1251 fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization**. 1995.

SHI, Y.; EBERHART, R. C. Empirical study of particle swarm optimization. In: **IEEE. Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99** (Cat. No. 99TH8406). [S.l.], 1999. v. 3, p. 1945–1950.

SINGH, J. **Semiconductor optoelectronics: physics and technology**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1995.

SIQUEIRA, M. **Software-Defined Optical Transport Networks with Virtualization Support and Policy-Based Autonomous Operation**. Tese (Doutorado) — Unicamp - Brazil, 2015.

SONG, L.; ZHANG, J.; MUKHERJEE, B. A comprehensive study on backup-bandwidth

reprovisioning after network-state updates in survivable telecom mesh networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, IEEE, v. 16, n. 6, p. 1366–1377, 2008.

SUCUPIRA, I. R. **Métodos heurísticos genéricos**: metaheurísticas e hiper-heurísticas. USP: São Paulo, p. 32, 2004.

SYGLETOS, S.; TOMKOS, I.; LEUTHOLD, J. Technological challenges on the road toward transparent networking. **Journal of Optical Networking**, Optical Society of America, v. 7, n. 4, p. 321–350, 2008.

XAVIER, A. V. S. Routing and dedicated protection on optical networks using computational intelligence. Tese (Doutorado) — Federal University of Pernambuco - Brazil, 2016.

XAVIER, A. V. S. et al. **Heuristic Planning Algorithm for Sharing Restoration Interfaces in OTN Over DWDM Networks**. [S.l.]: OFT: Optical Fiber Technology, 2020.

YAMADA, J.; MACHIDA, S.; KIMURA, T. 2 gbit/s optical transmission experiments at 1.3 μ m with 44 km single-mode fibre. Electronics Letters, **IET**, v. 17, n. 13, p. 479–480, 1981.

ZANG, H. et al. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength- routed optical wdm networks. **Optical networks magazine**, v. 1, n. 1, p. 47–60, 2000.

ZHOU, D.; SUBRAMANIAM, S. Survivability in optical networks. **IEEE network**, IEEE, v. 14, n. 6, p. 16–23, 2000.

ZITZLER, E. Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications. [S.l.]: **Citeseer**, 1999. v. 63. Citado na página 49.

ZYSKIND, J.; SRIVASTAVA, A. **Optically amplified wdm networks**. Academic press, 2011.