

David Moscon Inácio Silva

Algoritmos Evolutivos Aplicados em Projetos de Redes Ópticas Passivas

Brasil

23 de Agosto de 2019

David Moscon Inácio Silva

Algoritmos Evolutivos Aplicados em Projetos de Redes Ópticas Passivas

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

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Departamento de Engenharia Elétrica

Programa de Pós-Graduação

Orientador: Helder Roberto de Oliveira Rocha

Coorientador: Jair Adriano Lima Silva

Brasil

23 de Agosto de 2019

David Moscon Inácio Silva

Algoritmos Evolutivos Aplicados
em Projetos de Redes Ópticas Passivas/ David Moscon Inácio Silva. – Brasil, 23 de
Agosto de 2019-

83 p. : il. (some colors.) ; 30 cm.

Orientador: Helder Roberto de Oliveira Rocha

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Departamento de Engenharia Elétrica

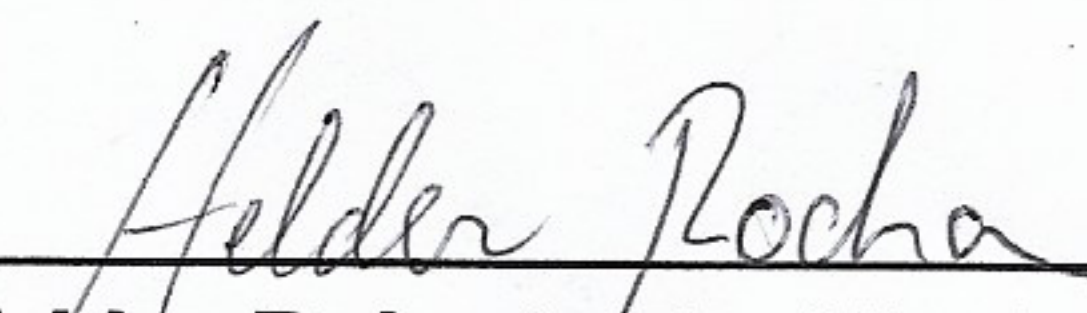
Programa de Pós-Graduação, 23 de Agosto de 2019.

1. Redes Ópticas. 2. PON. 2. Algoritmos Evolutivos. I. Helder R. de O. Rocha.
II. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). III. Programa de Pós Graduação
em Engenharia Elétrica. IV. Algoritmos Evolutivos Aplicados em Projetos de Redes
Ópticas Passivas

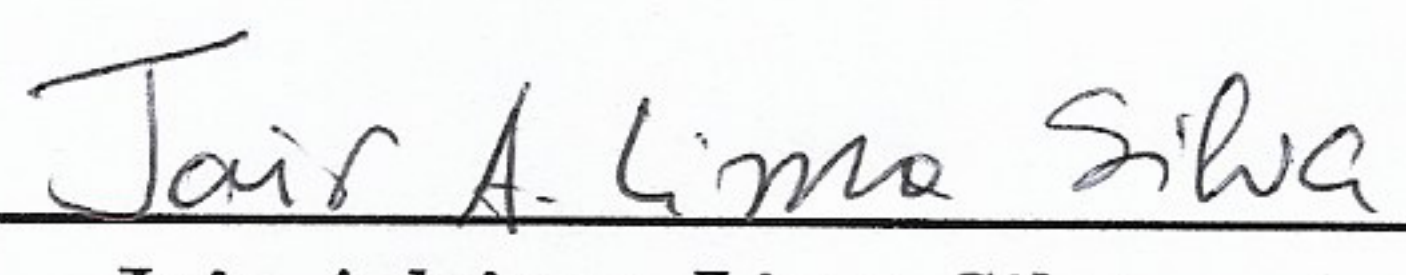
David Moscon Inácio Silva

Algoritmos Evolutivos Aplicados em Projetos de Redes Ópticas Passivas

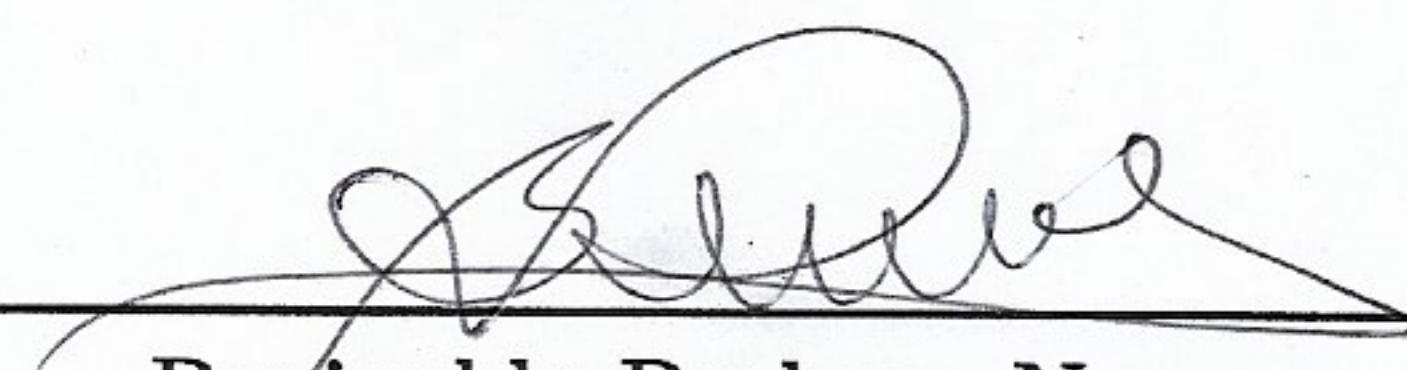
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.



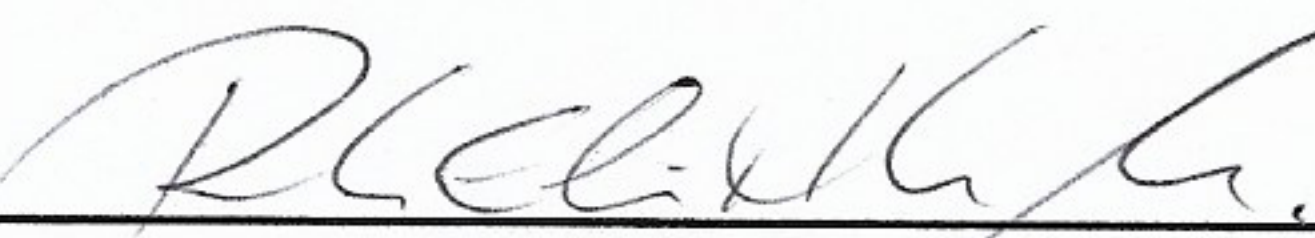
Helder Roberto de Oliveira Rocha
Orientador



Jair Adriano Lima Silva
Coorientador



Reginaldo Barbosa Nunes
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador Externo



Renato Elias Nunes de Moraes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

Brasil

23 de Agosto de 2019

Aos meus pais, referências em todos os aspectos de minha vida.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me guiar a cada passo do caminho de minha vida e sempre me proporcionar forças para superar as dificuldades encontradas durante a trajetória.

Aos meus pais Jorge David e Elina Maria, pelo apoio incondicional, sempre ao meu lado em todas as decisões por mim tomadas.

À minha irmã Lara, por ser um exemplo como pessoa e de determinação na busca dos objetivos almejados.

À minha namorada Gabriela Fernanda pela paciência, apoio e sempre me impulsionar em busca de algo melhor.

Agradecimentos a todos os professores do PPGE (Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica), em especial ao meu orientador, Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha, e coorientador, Dr. Jair Adriano Lima Silva, pelos ensinamentos, direcionamentos, paciência e pela oportunidade de realização desse mestrado, à quem hoje possuo admiração e respeito.

Aos colegas e amigos do LabTel (Laboratório de Telecomunicações) da Universidade Federal do Espírito Santo, em especial ao Felipe e Wesley, que estavam sempre à disposição nos momentos em que necessitei de ajuda.

À FAPES (Fundação de Amparo à pesquisa e Inovação do Espírito Santo) pela bolsa de estudos a mim concedida durante o tempo deste trabalho. Agradecimentos também ao amparo fornecido pela FAPES no âmbito do projeto Núcleo de Estudos em Tecnologias Emergentes para 5G (NEsT-5G), SIAFEM nº 84343338.

Resumo

A crescente demanda por serviços de banda larga tem exigido das operadoras de telecomunicações responsabilidades não somente referentes à conexões de altas velocidades em áreas metropolitanas, mas também relativos à interligações com regiões de menores áreas, de forma a atender aos diversos tipos de serviços de diferentes usuários. Soluções que utilizam a fibra óptica têm ocupado uma parcela cada vez maior no mercado das telecomunicações, já que as tecnologias que as empregam proveem conexões eficientes e com taxas extremamente elevadas.

Redes metropolitanas baseadas em fibras ópticas podem ter dezenas de quilômetros de extensão, podendo possuir incontáveis ramificações para atender toda a malha. Uma rede desse tipo, além de possuir um difícil planejamento, demanda um trabalho exaustivo na descoberta das configurações que otimizam a distribuição dos divisores de potência ópticos, de forma a reduzir custos e atender a maior quantidade de clientes possível.

Com base nesses argumentos, apresenta-se nesse trabalho uma metodologia de alocação de divisores de potência ópticos em redes ópticas passivas, em um planejamento que considera, entre outros, os custos dos terminais de linha OLTs (*Optical Line Terminals*), das unidades de rede óptica ONUs (*Optical Network Units*) e dos próprios divisores de potência. Para tal, foram propostas metaheurísticas baseadas nos algoritmos Genéticos (AG), pelo qual no caso aqui apresentado foi chamado de algoritmo genético modificado (AGM) devido as mudanças feitas especificamente para esse problema, e diferencial evolutivo (DE), em um planejamento feito a partir da malha de baixa tensão presente na cidade, tendo os postes como pontos de fixação dos dispositivos.

Resultados de simulação numérica demonstraram que, independentemente da quantidade de ONUs, para o planejamento de uma rede ópticas passivas PON (Passive Optical Network) em uma região metropolitana simétrica (área planejada), o AGM proposto necessita de um custo de implementação 5% maior do que um modelo de alocação semi-empírica de alocação de divisores de potência, usado como referência. No entanto, para regiões metropolitanas não planejadas (não simétricas) o AGM proposto apresentou uma melhoria em torno de 2% para todas as dimensões de rede, dados esses obtidos devido ao comportamento linear de crescimento de custo dos sistemas.

Palavras-Chave: Planejamento de redes, redes ópticas passivas, metaheurísticas, algoritmo Genético, algoritmo diferencial evolutivo.

Abstract

The growing demand for broadband services has required telecommunications operators not only to be responsible for high-speed connections in metropolitan areas but also for interconnections with smaller areas to serve the different types of services of different users. Solutions that use fiber optics have occupied an increasing portion in the telecommunications market, since the technologies that use them provide efficient connections and with extremely high rates.

Metropolitan networks based on fiber optics may be tens of kilometers in length and may have countless branches to serve the entire network. Such a network, in addition to being difficult to plan, requires extensive work in discovering the configurations that optimize the distribution of optical splitters, to reduce costs and serve as many customers as possible.

Based on these arguments, this paper presents a methodology for the allocation of optical splitters in passive optical networks, in a planning that considers, among other things, the costs of the Optical Line Terminal (OLT - *Optical Line Terminal* of the optical network units (ONU - *Optical Network Unit*) and of the splitter themselves. For this, metaheuristics were proposed based on Genetic algorithms (AG), for which in the case presented here was named a modified genetic algorithm (AGM) due to the changes made specifically for this problem, and evolutionary differential (DE), in a from the low voltage grid present in the city, having the poles as fixation points of the devices.

Numerical simulation results showed that, regardless of the number of ONUs, for the planning of a PON network in a symmetrical metropolitan area (planned area), the proposed AGM needs a 5% implementation cost higher than an semi-empirical allocation model of optical splitters, used as a reference. However, for unplanned (non-symmetric) metropolitan regions the proposed AGM showed an improvement of around 2% for all network dimensions, data obtained because of the linear behavior of cost growth.

Keywords: Passive Optical Networks, Metaheuristics, Genetic Algorithm, Differential Evolution Algorithm, Network Plannig.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução da demanda de dispositivos por usuário. Retirado de (Evans 2011).	16
Figura 2 – Evolução e previsão de desenvolvimento da tecnologia PON ao longo dos anos.	17
Figura 3 – Modelo do divisor óptico com 4 saídas.	22
Figura 4 – Topologia para redes PON no tipo a) anel, b) barra e c) árvore	24
Figura 5 – Configuração de rede GPON (ITU 2008)	26
Figura 6 – a) Grafo conexo e b) Grafo desconexo	30
Figura 7 – a) Digrafo simples e b) Multigrafo direcionado	30
Figura 8 – Exemplo de funcionamento do algoritmo de Dijkstra.	33
Figura 9 – Modelos de topologia FTTx.	35
Figura 10 – Regiões planejadas na cidade de Vitória - ES.	36
Figura 11 – Regiões não planejadas na cidade de Vitória - ES.	36
Figura 12 – Modelo representativo da cidade com 500 ou 40 metros entre posições de divisores e ONUs/ONTs	37
Figura 13 – Modelo de funcionamento do método roleta	44
Figura 14 – Modelo de distribuição randômica de Poisson	45
Figura 15 – Cruzamento trocando as posições ímpares	46
Figura 16 – Cruzamento por compatibilidade de trechos	46
Figura 17 – Mutação aleatória	47
Figura 18 – Mutação para posições vizinhas	47
Figura 19 – Fluxograma do AGM proposto.	48
Figura 20 – Exemplo de funcionamento do AGM	49
Figura 21 – Mutação no modelo DE	51
Figura 22 – Cruzamento no modelo DE	51
Figura 23 – Fluxograma DE	52
Figura 24 – Grafo com 49 nós e arestas sem pesos	55
Figura 25 – Regiões metropolitanas criadas como modelos de referência.	57
Figura 26 – Curvas de otimização do AGM e DE para 64 ONUs com simetria e arestas de 500 m	58
Figura 27 – Curvas de otimização do AGM e DE para 256 ONUs	59
Figura 28 – Curvas de otimização do AGM e DE para 400 ONUs	60
Figura 29 – Curvas de otimização do AGM e DE para 676 ONUs	62
Figura 30 – Curvas de otimização do AGM e DE para 1024 ONUs	63
Figura 31 – Curvas de otimização do AGM e DE para 1600 ONUs	64
Figura 32 – Curva de tendência para região metropolitana com 500 metros nas arestas.	65
Figura 33 – Curva de tendência para região metropolitana com 40 metros nas arestas.	65

Figura 34 – Curva de tendência do tempo de processamento para regiões metropoli- tanas simétricas.	66
Figura 35 – Região metropolitana com 256 ONUs gerada pelo AGM	68
Figura 36 – Região metropolitana com 256 ONUs gerada pelo DE	69
Figura 37 – Região metropolitana com 256 ONUs gerada como parâmetro de referência.	70
Figura 38 – Comparação de distribuição física entre a) grafo simétrico de arestas variadas e b) grafo planar aleatório de arestas variadas.	71
Figura 39 – Curva de otimização do AGM para 1600 ONUs em grafo simétrico.	72
Figura 40 – Curva de tendência de custo para região metropolitana com grafo planar simétrico.	73
Figura 41 – Curva de tendência de custo para região metropolitana com grafo planar aleatório.	74
Figura 42 – Grafo ponderado contendo as posições do melhor resultado de projeto feito pelo AGM para 16 ONUs, que são representadas pela coloração verde, o divisor óptico pela cor vermelha e a OLT na cor azul.	76

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características principais - APON	25
Tabela 2 – Características principais - EPON	26
Tabela 3 – Características principais - GPON	27
Tabela 4 – Características principais - NG-PON	27
Tabela 5 – Características principais - NG-PON2	28
Tabela 6 – Parâmetros dos Divisores Ópticos e Fibra Ótica	39
Tabela 7 – Parâmetros de funcionamento do AGM	53
Tabela 8 – Parâmetros de funcionamento do DE	54
Tabela 9 – Dimensões das regiões metropolitanas	54
Tabela 10 – Resultados dos 6 modelos de referências para grafos com 64 ONUs . .	56
Tabela 11 – Resultados dos 6 modelos de referências para grafos com 256 ONUs . .	56
Tabela 12 – Resultados para 64 ONUs para regiões simétricas com as arestas de 500 m	58
Tabela 13 – Resultados para 256 ONUs	59
Tabela 14 – Resultados para 400 ONUs	60
Tabela 15 – Resultados para 676 ONUs	61
Tabela 16 – Resultados para 1024 ONUs	62
Tabela 17 – Resultados para 1600 ONUs	63
Tabela 18 – Quantidade de divisores e sobras de saídas de divisores	66
Tabela 19 – Quantidade de divisores e sobras de saídas de divisores para o caso dos grafos simétricos.	72
Tabela 20 – Modelo de projeto realizado manualmente no grafo de arestas variadas com 16 e 64 e 256 ONUs para ser utilizado de comparação dos resultados. .	73
Tabela 21 – Resultados gerados pelo AGM e pelo modelo de referência para redes aleatórias de arestas variadas.	74

Lista de abreviaturas e siglas

i e j representam as linhas e colunas da matriz metropolitana

P_{ij} é uma posição qualquer na matriz

D_{sc} é distância do caminho do divisor ao cliente

C_{fo} é o custo da fibra ótica

K é o divisor óptico utilizado

C_K é o custo do divisor óptico utilizado

PSA_{ij} é a posição de divisor ativo na matriz metropolitana

PSP_{ij} é a posição de divisor possível na matriz metropolitana

PCA_{ij} é a posição de cliente ativo na matriz metropolitana

PCP_{ij} é a posição de cliente possível na matriz metropolitana

PER_{MAX} é a perda máxima permitida

$PERIN_K$ é a perda de inserção do divisor óptico utilizado

$PERD_{sc}$ é a perda pela distância do caminho do divisor ao cliente

PEN_K é a penalização pelas sobras de saídas do divisor óptico utilizado

PEN_{PER} é a penalização caso ultrapasse a perda máxima de sinal

CR_{PON} é o custo da rede PON

TDM - Time Division Multiplexing

ATM - Asynchronous Transfer Mode

DSL - Digital Subscriber Line

IP - Internet Protocol

APON - PON with Asynchronous Transfer Mode

GPON - Gigabit Passive Optical Network

NG-PON - New Generation - Passive Optical Networks

NG-PON2 - New Generation - Passive Optical Networks 2

XGS-PON - 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network

OFDM-PON - Orthogonal Frequency Division Multiplexing-PON

TWDM-PON - Time and Wavelength Division Multiplexed PON

WDM-PON - Wavelength Division Multiplexing PON

Ultra Dense WDM PON - Ultra Dense WDM PON

FTTN - Fiber To The Node

FTTC - Fiber To The Curb

FTTH - Fiber to the Home

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Breve Histórico das Redes Ópticas Passivas	15
1.2	Motivação	18
1.3	Trabalhos Relacionados	18
1.4	Objetivo Geral	19
1.5	Objetivos Específicos	19
1.6	Metodologia	20
1.7	Estrutura da Dissertação	20
1.8	Principais Contribuições	21
2	REDES ÓPTICAS PASSIVAS	22
2.1	Arquitetura de Redes Ópticas	23
2.1.1	A Tecnologia Precursora APON	25
2.1.2	Adoção do Protocolo Ethernet em Redes EPON	25
2.1.3	Transmissão de Serviços <i>triple play</i> via GPON	26
2.1.4	Alcançando os 10 Gb/s Através do Padrão XGS-PON	27
2.1.5	Próxima Geração de Redes Ópticas Passivas NG-PON2	27
3	TEORIA DE GRAFOS	29
3.1	Representação de Grafos via Matriz de Adjacência	31
3.2	Aplicação do Algoritmo de Dijkstra nos Grafos	31
4	DESCRIÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	34
4.1	FTTx: Fiber-To-The-X	34
4.2	Representação da Região Metropolitana	34
4.3	Formulação do Problema	37
4.4	A Função Aptidão Proposta	40
5	METAHEURÍSTICAS PROPOSTAS PARA O PLANEJAMENTO DE REDES PON	42
5.1	Parâmetros de Entrada e Saída Aplicados nas Metaheurísticas	42
5.2	O Algoritmo Genético Modificado Proposto	43
5.2.1	Distribuição Randomica de Poisson	44
5.2.2	Cruzamento	45
5.2.3	Mutação	46
5.3	O Algoritmo Diferencial Evolutivo Proposto	50

5.3.1	Mutação	50
5.3.2	Cruzamento	51
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
6.1	Modelos de Referência para a Comparação de Resultados	55
6.2	Resultados para Sistemas de arestas de 500 m Usando as Metaheurísticas Propostas	58
6.3	Resultados para Sistemas de arestas de 40 m Usando as Metaheurísticas Propostas	61
6.4	Evolução do Custo do Projeto com o Crescimento da Rede	64
6.5	Projetos de Redes em Grafos de Arestas Variadas e Grafos Planares Aleatórios	71
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	79

1 Introdução

O avanço das tecnologias de redes de comunicação de dados tem contribuído para o aumento da demanda de tráfego de dados e também para o crescimento da quantidade de usuários a serem atendidos por essas redes (Filgueiras e Pessoa 2016), (Pereira 2008). As primeiras implementações de redes ópticas passivas (PON - *Passive Optical Network*) ocorridas na década de 1990 prometeram uma revolução no que tange a aspectos relacionados à quantidades de usuários e à taxa de transmissão elevadas.

Em 2001, o Brasil possuía aproximadamente 130.000 quilômetros de fibra óptica em funcionamento. Com os avanços da tecnologia PON, e da fibra óptica propriamente dita, eram necessários investimentos para aumentar a rede existente. Houve então, nesse período, um investimento em torno de 4,2 bilhões de dólares na ampliação da rede para 335.000 quilômetros até 2005, incrementando na confiabilidade e estabilidade da rede. (Ferreira 2003)

O investimento na infraestrutura foi de suma importância para a evolução da tecnologia da informação no país. Com a tecnologia disponível no início da década de 1990, a velocidade de conexão era de 600 Mbps, havendo um salto já no início da década de 2000 para taxas de 2.4 Gbps devido ao avanço das tecnologias em redes PON.

1.1 Breve Histórico das Redes Ópticas Passivas

Além de elevadas taxas de transferência, largura de banda larga, dispositivos conectados e redução de custos, os sistemas de comunicação modernos também têm demandado modelos de transmissão de dados que melhor se adaptam ao perfil de cada usuário (Harboe e Souza 2013). Embora limitada pelo desenvolvimento da tecnologia, o consumo de dados por usuário tem crescido ao longo dos anos, demandando taxas de transmissão cada vez maiores. Isso pode facilmente ser observado pelo fato de aproximadamente 64% da população brasileira estar conectada à internet (Pinheiro 2017), (IBGE 2016), (Kramer e Pesavento 2002). O aumento da quantidade de dispositivos conectados por usuário pode ser observado na Figura 1, o que tem exigido das companhias de telecomunicações vultuosos investimentos em redes baseados em fibras ópticas, proporcionando uma melhor qualidade de serviço e maiores taxas de transferência.

Aliada às elevadas perdas que limitam o alcance dos enlaces, as redes convencionais sem fio, bem como as baseadas em cabos metálicos, possuem a necessidade da presença de pontos de suprimento de energia dos dispositivos necessários para o funcionamento destas redes.

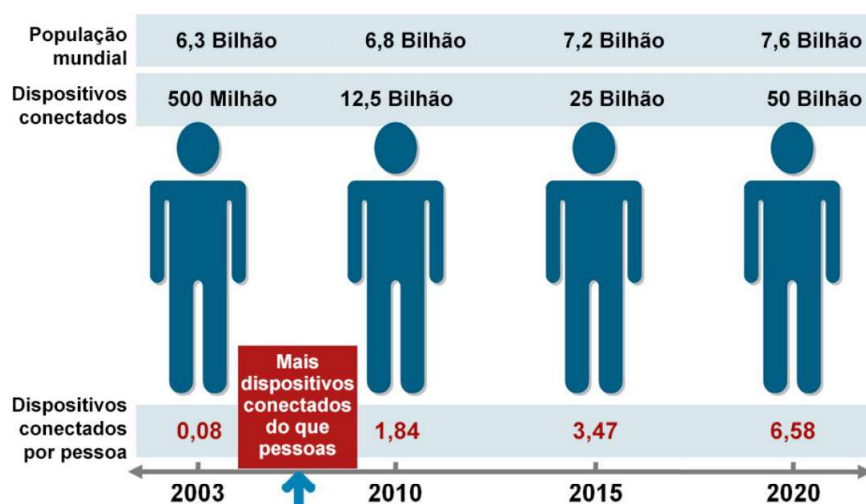


Figura 1 – Evolução da demanda de dispositivos por usuário. Retirado de (Evans 2011).

Em contraposição, apresentam-se as redes ópticas passivas com demanda de energia elétrica apenas no terminal de linha óptica (*Optical Line Terminal* - OLT) e no terminal de rede óptica (*Optical Network Unit* - ONU) (Harboe e Souza 2013), (Picin O. J. Gimenez 2015). O fato das redes PON apresentarem como vantagens as altas taxas de transmissão, a baixa atenuação e conseqüentemente maiores comprimentos de enlaces, maior confiabilidade e segurança, torna a substituição das redes convencionais por PONs inevitável (Picin O. J. Gimenez 2015), (Kokangul e Ari 2011).

Redes PON utilizam fibras ópticas para a propagação de sinais obtidos da modulação de lasers em distâncias que alcançam dezenas de quilômetros, sem a necessidade de amplificação (Shinohara 2005), (Kim 2003). A instalações dos dispositivos conectados nas redes PON precisam de alimentação elétrica apenas na OLT e nas ONUs (Coura, Silva e Segatto 2009), (Nunes et al. 2016).

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

Com a evolução constante dessas tecnologias, foram sendo criadas opções de tecnologias que concorriam para ser a base para o funcionamento da próxima geração, onde foram nomeadas de nova geração de redes ópticas passivas (*New Generation - Passive Optical Networks* - NG-PON) e nova geração de redes ópticas passivas 2 (*New Generation -*

Passive Optical Networks 2 - NG-PON2). Com as tecnologias da geração NG-PON, representando os períodos de aproximadamente 2006 à 2012, foi possível alcançar uma taxa de aproximadamente 10 Gbps (ITU 2008). Na geração NG-PON2 a pretensão é alcançar de 40 à 160 Gbps até o ano de 2022, suprimindo uma demanda até 256 usuários simultâneos em uma única rede PON (ITU 2013), (ITU 2018), (ITU 2015).

A representação cronológica da Figura 2 mostra a evolução da tecnologia PON ao longo dos anos com base nos padrões técnicos de cada tecnologia, mostrando a cada período os avanços nas taxas de transmissão, divisão óptica máxima em cada rede PON e distância entre OLT e ONUs (Lee, Sorin e Kim 2006), (Xinsheng 2012), (Salgado, Zhao e Inovação 2014), (ITU 2000), (ITU 2003), (ITU 2008).

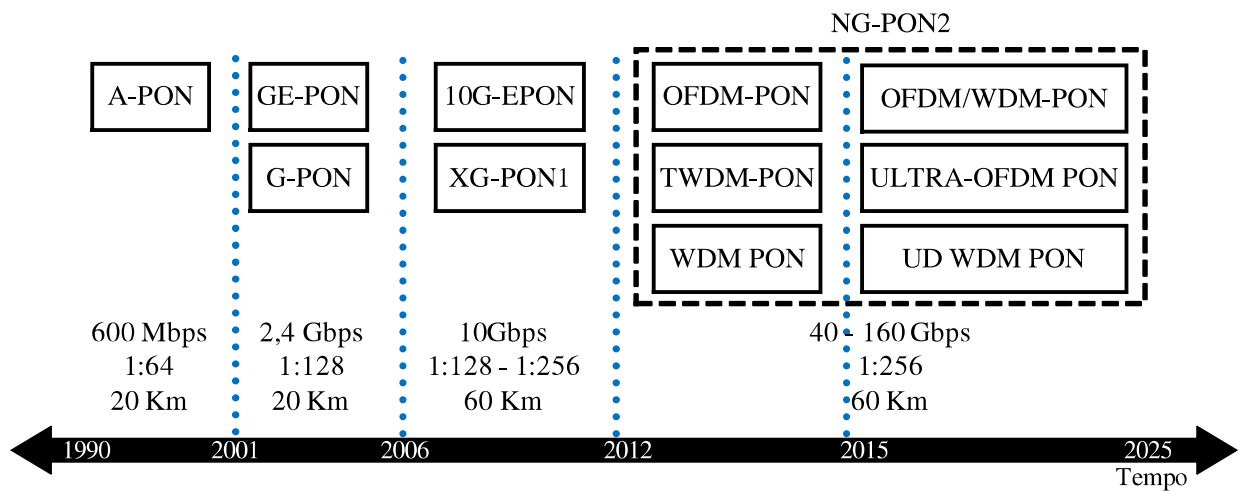


Figura 2 – Evolução e previsão de desenvolvimento da tecnologia PON ao longo dos anos.

Enquanto que nas redes A-PON, E-PON e G-PON houve a evolução dos esquemas de multiplexação por divisão de tempo (*Time Division Multiplexing* - TDM) para o modo de transferência assíncrona (*Asynchronous Transfer Mode* - ATM), técnicas de modulação por divisão de frequências ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM) e multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM) foram sugeridas na NG-PON2 visando aumentar as taxas de transferências mediante o uso mais eficiente do espectro, o aumento da largura de banda e o aumento da quantidade de usuários simultaneamente atendidos por uma OLTs. A partir de 2015 alguns estudos sugeriram uma combinação das técnicas OFDM/WDM na NG-PON2, visando também aumentar o alcance das redes, sugerindo assim o denominado *long-reach* PON (ITU 2015), (ITU 2018), (ITU 2013).

Para diversas soluções tecnológicas baseadas em fibras ópticas, existe a necessidade do planejamento dessas redes, o que normalmente é custoso e trabalhoso, haja vista os elevados valores de potência exigidos devido à grande quantidade de ONUs (ou clientes) e consequentemente de divisores de potência. É neste contexto que surge a necessidade de

melhorar o projeto destas redes, principalmente aquelas que possuem inúmeras configurações possíveis para um mesmo conjunto de clientes. Configurações estas que dependem da região metropolitana, bem como dos limites de distância, potência óptica, quantidade de divisores de potência óptica e a quantidade de clientes atendidas pela OLT ([Villalba 2009](#)), ([ITU 2008](#)).

1.2 Motivação

O custo de implementação de Redes PON ainda é elevado quando comparado com as redes cabeadas convencionais ([Takeuti 2005](#)), ([Harboe e Souza 2013](#)). Por esse motivo, como em qualquer planejamento de rede, deve-se propor um projeto que visa a implementação de uma rede PON com custo reduzido, ao mesmo tempo que atenda uma maior quantidade de usuários possível.

Existem várias possibilidades de automatizar e otimizar os recursos de redes PON, as quais envolvem conceitos de programação linear, heurísticas, metaheurísticas, entre outros ([Villalba 2009](#)), ([Meza et al. 2013](#)), ([Eira, Pedro e Pires 2012](#)), ([Jaumard e Chowdhury 2011](#)). No entanto, o fato dos modelos que utilizam metaheurísticas serem limitados nos quesitos tempo de processamento e principalmente tamanho do sistema a ser projetado (quantidade de clientes a serem atendidos), propõe-se neste trabalho um algoritmo Genético modificado (AGM) para reduzir o custo de implementação de uma rede PON usando a infraestrutura da rede de distribuição de energia elétrica compartilhada, ao mesmo tempo em que reduz o tempo computacional para alcançar tal objetivo.

1.3 Trabalhos Relacionados

Alguns trabalhos de pesquisas sobre este tema podem ser encontrados na Literatura. Em ([Meza et al. 2013](#)), os autores desenvolveram um modelo matemático para otimização de redes ópticas obtendo a melhor solução para 16 ONUs. Em ([Takeuti 2005](#)) fez-se uma análise com ênfase em um comparativo entre as tecnologias APON, GPON e EPON, acompanhado de uma estimativa de custos da rede baseada em informações de companhias de telecomunicações.

Em ([Junior 2018](#)) é relatado um estudo de viabilidade técnica e econômica sobre redes PON para fornecedores de acesso à internet, com um projeto que pode atender até 128 ONU's, enquanto que em ([Eira, Pedro e Pires 2012](#)) foi descrito um modelo de computação linear capaz de projetar redes ópticas de estágio único e múltiplos estágios, obtendo resultados para sistemas com até 1000 ONUs. Um esquema de otimização através de heurísticas usadas para alocar até 64 ONUs foi proposto em ([Jaumard e Chowdhury 2011](#)), enquanto

que em (Villalba 2009) foi apresentado uma solução do problema baseado em algoritmo Genético.

Um dos problemas das soluções encontradas na Literatura está relacionado às pequenas dimensões das regiões metropolitanas e os tempos computacionais necessários para obtenção de resultados. Dentre os principais trabalhos realizados nesse tipo de pesquisa, o trabalho descrito em (Villalba 2009) foi escolhido como principal referência, por apresentar parâmetros utilizados para a geração de resultados em uma região metropolitana com 128 ONUs.

Esta pesquisa se utiliza também das ideias utilizadas para solucionar os problemas propostos pelos trabalhos relacionados. Cada autor dos trabalhos mencionados utilizou diferentes métodos de solução (diferentes metaheurísticas ou modos de limitar os parâmetros da rede para o programa), assim como diferentes modelos e dimensão de rede. Assim sendo, os modelos de solução dos problemas dessa pesquisa se inspirou nos métodos utilizados pelos trabalhos aqui apresentados que melhor se encaixavam e que poderiam ser alterados para os modelos aqui propostos.

1.4 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral propor uma solução para o problema de alocação de divisores ópticos passivos, em projetos de redes ópticas passivas, que utilizam como base de infraestrutura, a rede de baixa tensão presente nas regiões metropolitanas, para com isso construir uma rede PON de custo reduzido. Para isso foram considerados os aspectos construtivos e limitações de redes desse tipo, como a limitação de distância do sinal transmitido, limite de divisões ópticas permitidas para manter a qualidade do sinal e dentre outros aspectos construtivos de redes desse tipo.

1.5 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- modelar matematicamente uma região metropolitana com suas peculiaridades, usando a teoria de grafos, para a designar uma representação fidedigna de uma região real;
- implementar estratégias que consideram as limitações e interferências características de redes ópticas, garantindo assim a comunicação com todos os usuários;
- formular matematicamente o problema de otimização do planejamento de infraestrutura da rede PON e
- minimizar o custo de implementação da rede através de metaheurísticas.

1.6 Metodologia

O planejamento de redes PON requer uma série de parâmetros de controle como quantidade de equipamentos conectados e alcance máximo dado pela perda de sinal ao longo do enlace, garantindo uma boa qualidade de sinal no ponto de entrega para o usuário. Pesquisas anteriores como as realizadas em (Meza et al. 2013), (Takeuti 2005), (Junior 2018), (Eira, Pedro e Pires 2012), (Jaumard e Chowdhury 2011), (Villalba 2009) tem suas pesquisas pautadas em projetos de redes PON com diversas dimensões e complexidade de rede, pelos quais algumas soluções apresentadas pelos mesmos inspiraram algumas adaptações para problemas encontrados no processo de criação dos programas desse trabalho de pesquisa.

Esse projeto de pesquisa possui natureza quantitativa pois a partir de métricas levantadas de forma numérica através de algoritmos que procuram compreender tendências, apontando assim preferências por caminhos que produzam redes ótimas do ponto de vista financeiro. Em relação aos objetivos da pesquisa, pode classifica-la como exploratória devido à sua característica intuitiva e hipotética, pois realiza o planejamento de uma rede PON com diversas soluções possíveis, sendo que a partir destas os algoritmos realizam as otimizações.

Para o planejamento de uma rede PON é necessário a identificação e explicação dos problemas que afetam um planejamento bem feito, sendo então adequada a classificação em uma pesquisa explicativa, pelo empirismo associado ao estudo de caso em uma região metropolitana. Para tanto, os seguintes procedimentos foram utilizados:

- pesquisa bibliográfica em livros, artigos científicos publicados em congressos e revistas científicas, visando a revisão do estado da arte;
- estudos acerca de modelos computacionais de otimização já existentes na literatura para embasamento dos problemas que essa pesquisa buscou solucionar;
- elaboração de redes com dimensões metropolitanas reais apropriadas para o problema estudado, através da utilização da teoria de grafos;
- implementação de algoritmos capazes de buscar soluções de planejamento de redes ópticas de forma eficiente, minimizando o custo de implementação das redes.

1.7 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em 7 Capítulos. O Capítulo 2 apresenta os conceitos básico referentes à tecnologia PON, enquanto que os conceitos básicos envolvidos na teoria de grafos empregado neste trabalho são descritos no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta a descrição e a formulação do problema estudado. O embasamento teórico sobre

as metaheurísticas escolhidas para solucionar o problema é descrito no Capítulo 5. Análise dos resultados obtidos via simulação numérica e as conclusões pertinentes são apresentados nos Capítulos 6 e 7, respectivamente.

1.8 Principais Contribuições

A partir deste estudo foi desenvolvido uma ferramenta de planejamento de redes PON, com principal enfoque na infraestrutura física do projeto, onde foi possível projetar de forma ótima sistemas com grandes quantidades de ONUs em redes complexas. Além disso, a investigação científica desenvolvida permitiu a publicação de 3 artigos em congressos/conferências nacionais e internacionais, quais sejam:

- David M. I. Silva, Helder R. O. Rocha, Felipe T. Monteiro, Jardel T. Flores, Jair A. L. Silva, Marcelo E. V. Segatto, "**Planejamento de Redes Ópticas Passivas Usando Algoritmos Evolutivos**", Em VIII Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCON), Salvador - BA, 2018.
- David M. I. Silva, Helder R. O. Rocha, Felipe T. Monteiro, Jardel T. Flores, Jair A. L. Silva, Marcelo E. V. Segatto, "**Planejamento de Redes Ópticas Passivas em uma Infra-estrutura de Rede de Distribuição de Energia Elétrica Compartilhada**", Em *13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, São Paulo - SP, 2018.
- Alinne P. Oliveira, Helder R. O. Rocha, David M. I. Silva, Marcelo E. V. Segatto, Jair A. L. Silva "**Alocação de Repetidoras de Sinal para Comunicação Resiliente em Redes Elétricas MT**", Em *13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, São Paulo - SP, 2018.

2 Redes Ópticas Passivas

Redes PON são chamadas de redes passivas porque os dispositivos utilizados no enlace óptico são passivos, isto é, não necessitam de alimentação elétrica. Dispositivos ativos são permitidos apenas nas extremidades da rede, ou seja, nas OLTs e nas ONUs. Os divisores ópticos (*splitters*) são os elementos passivos, que conforme ilustrado na Figura 3 dividem a potência do sinal óptico para os diversos usuários da rede PON, para a comunicação no sentido *downstream*. No sentido inverso da comunicação (*upstream*), este é denominado *combiner* pois combina os sinais ópticos em um único a ser transmitido até a OLT (Nunes et al. 2016).

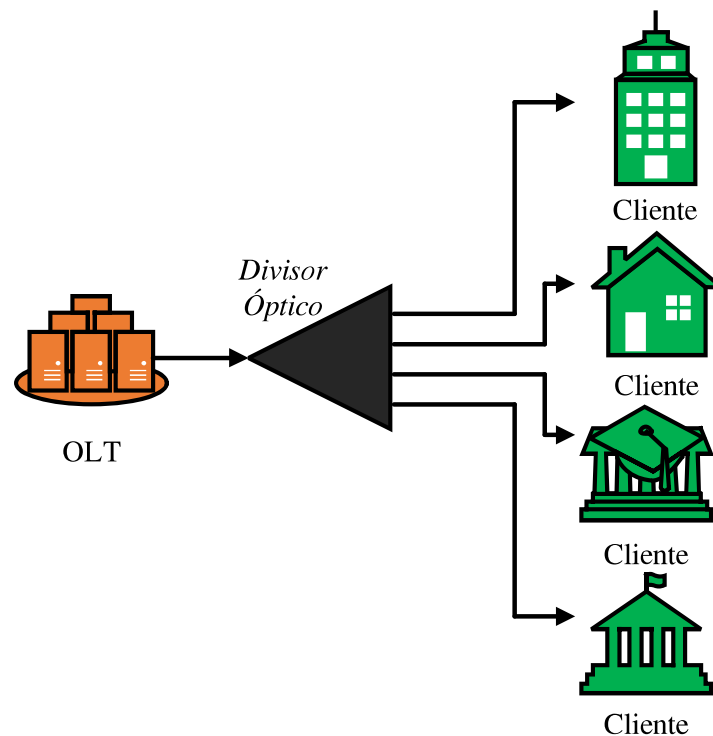


Figura 3 – Modelo do divisor óptico com 4 saídas.

A central de dados onde se concentra todo o tráfego de dados da rede óptica é a OLT, e a ONU o usuário final, ou seja, quem demanda o tráfego de dados da OLT. Pode-se também aplicar uma rede PON com as ONUs atuando como concentradores, onde ao invés de levar o sinal por fibra até o usuário final, será transmitido o sinal via fibra à um terminal (bloco residencial, universidade, hospital, etc), sendo que no trecho final, que neste caso estende-se da ONU ao usuário, o enlace é estabelecido via outro meio de comunicação (Keiser 2008).

2.1 Arquitetura de Redes Ópticas

Nos dias atuais, existe um massivo uso de cabos metálicos para transmissão de sinal, e o uso intenso de cabos metálicos é algo compreensível devido à facilidade de aquisição e instalação. Porém, devido à potencialidades da fibra óptica; tais como baixa atenuação, vasta largura de banda e inexistência de interferência eletromagnética; e o custo de fabricação que está atingindo valores praticáveis no mercado, a implementação de redes PON vem ganhando espaço, sendo questão de tempo para ocorrer a substituição dos cabos metálicos para serviços *triple play* (tráfego de voz, dados e vídeo) (Marin 2009).

Redes PON normalmente são projetadas como redes de médio a grande porte no quesito quantidade de usuários atendidos, e isso se dá devido a baixa atenuação do sinal e a capacidade de atender uma alta quantidade de usuários simultaneamente. A disposição dos elementos de uma rede influencia em seu desempenho futuro, sendo em qualidade do sinal ou número de usuários atendidos, além de desempenhar um importante papel nos custos de instalação, manutenção e gerenciamento da rede, por isso a importância do planejamento de redes PON de acordo com a aplicação prevista (Ruan et al. 2015).

Os tipos de topologias devem ser implementadas pelo projetista de acordo com o tipo de aplicação desejada, onde dentre elas, pode-se mencionar as topologias em anel, em árvore e em barra, conforme ilustrado na Figura 4.

A Figura 4.a) mostra que a topologia de rede em anel possui uma configuração em que o sinal sai da OLT e se propaga por dois enlaces diferentes, sendo que as ONUs se localizam ao longo do enlace. Nesta topologia, as ONUs também podem se comportar como divisores ópticos ativos caso o sinal se divida para um segundo ramo da rede. Uma rede desse tipo é usualmente utilizada em aplicações que não podem perder a comunicação, já que um dos pontos positivos de uma rede em anel é a redundância da rede onde, caso ocorra um acidente ou a necessidade de manutenção em um trecho da rede, a comunicação não é perdida.

A topologia em barra ou barramento ilustrada na Figura 4.b) conecta suas ONUs através de um barramento principal, onde ao longo da linha são distribuídos divisores para atender os ramos laterais da rede até chegar ao usuário final. Essa topologia é muito usada para aplicações em modelos fibra até a calçada (*Fiber To The Curb* - FTTC), onde existem gabinetes de distribuição que levam o sinal do gabinete ao usuário final através de outros meios, como cabo coaxial ou par metálico.

Observa-se pela Figura 4.c) que, na topologia em árvore, o sinal é transmitido da OLT até às ONUs, perpassando por divisores ópticos passivos espalhados pela rede. Durante a propagação na fibra podem ser utilizados divisores para dividir um enlace em vários, sendo esta técnica conhecida na Literatura como cascadeamento de divisores. Se no enlace existir

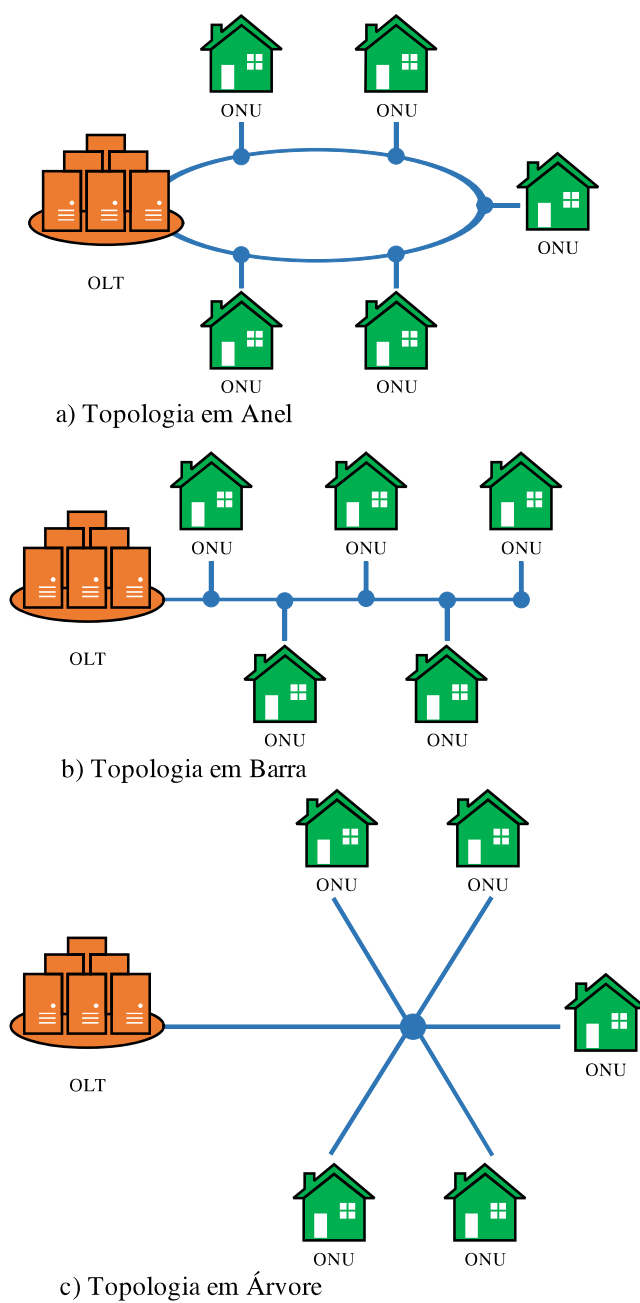


Figura 4 – Topologia para redes PON no tipo a) anel, b) barra e c) árvore

apenas um divisor, a topologia é conhecida como topologia de estágio único (Villalba 2009).

Em alguns trechos da rede podem ser colocados dois segmentos de fibra comportando-se como um segmento principal e um de *backup*, dependendo da aplicação que está sendo atribuída para aquele trecho. Este artifício é muito aplicado no trecho inicial da rede, onde se concentra toda a distribuição de sinal, e caso tenha algum problema ou necessidade de manutenção, a inexistência do enlace de *backup* faz com que toda a rede seja desligada. As maiores vantagens desse tipo de topologia é a distância em que as divisões ópticas podem ser realizadas, o que torna a rede bastante adaptativa para ONUs próximas e distantes da OLT, otimizando assim o custo.

2.1.1 A Tecnologia Precursora APON

As redes APON foram propostas para, entre outros, ajudar na unificação das linhas digitais de assinante (*Digital Subscriber Line* - DSL) (ITU 2000). Dentre os desafios enfrentados no início das redes PON, esteve a adoção do protocolo de transferência assíncrona (*Asynchronous Transfer Mode* - ATM) na multiplexação TDM já consolidada. Com isso, cada bloco de dados pôde ser transmitido em qualquer ordem, sendo do receptor a responsabilidade de juntar os blocos na ordem correta para a decodificação da informação.

A Tabela 1 ilustra as principais características do padrão, com especial ênfase à quantidade de divisões dos OLTs e para o esquema de codificação de linha NRZ (*Non Return-to-Zero*) utilizado.

Tabela 1 – Características principais - APON

Data da padronização	Padrão	Código de linha	Tecnologia de Acesso	Divisão máxima	Alcance máximo	Protocolo base
1998	ITU-T G983.x	NRZ	TDMA	1:64	20 km	ATM

2.1.2 Adoção do Protocolo Ethernet em Redes EPON

A rede óptica passiva baseada no protocolo Ethernet (a EPON) surgiu devido à baixa largura de banda, à alta complexidade e ao custo elevado da tecnologia APON. O rápido desenvolvimento do protocolo levou à substituição do ATM usado no APON, levando a EPON a alcançar taxas na ordem de Gbps (Bonilla, Moschim e Barbosa 2009). Além disso, umas das principais diferenças entre redes APON e EPON está no tratamento dado à transmissão dos pacotes, com redes APON possuindo transmissão de pacotes com até 53 bytes e a EPON com pacotes de tamanhos variáveis com até 1518 bytes (Keiser 2008), (Hajduczenia, Silva e Monteiro 2006).

A Tabela 2 ilustra as principais características do padrão, com destaque à redução no alcance máximo e na redução da quantidade máxima de divisões do sinal da OLT, além

da migração para o protocolo *Ethernet*.

Tabela 2 – Características principais - EPON

Data da padronização	Padrão	Código de linha	Tecnologia de Acesso	Divisão máxima	Alcance máximo	Protocolo base
2004	IEEE 802.3ah	8B/10B	TDMA	1:32	10 km	Ethernet

2.1.3 Transmissão de Serviços *triple play* via GPON

As redes GPON podem alcançar taxas de transmissão na ordem de alguns Gbps, sendo a confiabilidade de sinal e a possibilidade de transmissão *triple play* por uma única fibra, os principais destaques. Em relação à velocidade de transmissão, redes GPON podem alcançar os 2,4 Gbps para *download*, podendo ser atribuída uma capacidade de 1,2 Gbps ou 2,4 Gbps para *upload*, sendo o mais comum a combinação de 2.4 Gbps para *download* e 1.2 Gbps de *upload*.

A Figura 5 mostra uma topologia típica de rede GPON, onde está representado a interface de nó de serviço (*Service Node Interface* - SNI) que se localiza na OLT, a multiplexação WDM e transmissão do sinal para um canal onde ocorre a adição de interferências de qualquer elemento de rede (*Network Element* - NE). Após o sinal ser distribuído pelos divisores, ocorre a demultiplexação do sinal chegando ao usuário pela interface de rede do usuário (*User Network Interface* - UNI) (ITU 2008), (ITU 2003), (Roland 2012), (Bonilla, Moschim e Barbosa 2009), (Fornari 2015).

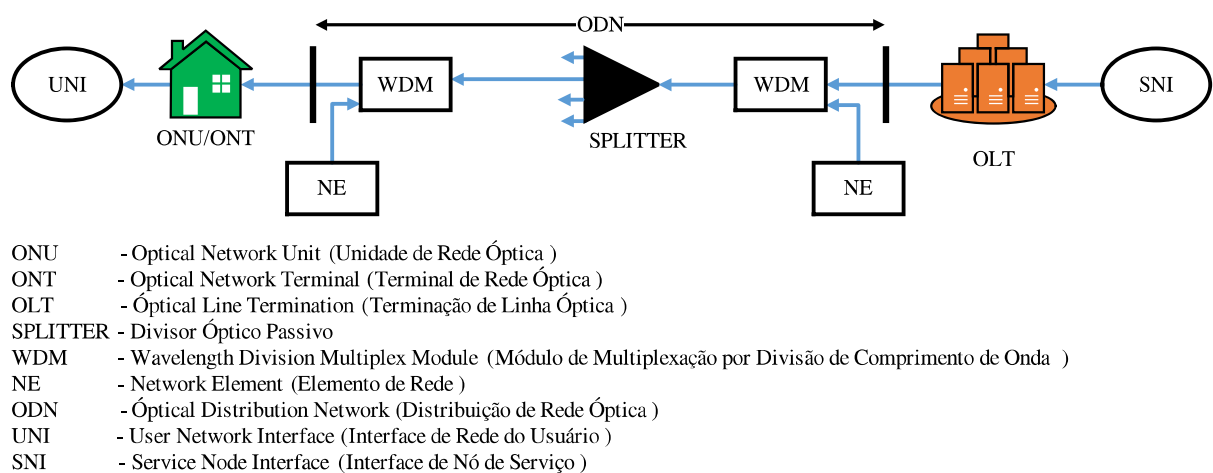


Figura 5 – Configuração de rede GPON (ITU 2008)

A Tabela 3 ilustra as principais características do padrão, com ênfase para a máxima capacidade de divisão, que evoluiu para 128 usuários simultâneos em uma distância máxima de 20 km.

Tabela 3 – Características principais - GPON

Data da padronização	Padrão	Código de linha	Tecnologia de Acesso	Divisão máxima	Alcance máximo	Protocolo base
2003	ITU-T G984.x	NRZ	TDMA	1:64 (Expansão para 1:128)	20 km	ATM

2.1.4 Alcançando os 10 Gb/s Através do Padrão XGS-PON

As redes PON com 10 Gb/s de capacidade simétrica (*10-Gigabit-capable symmetric passive optical network* - XGS-PON) são uma evolução da tecnologia XG-PON, onde a simetria mencionada se dá pelo fato das velocidades de *download* e *upload* serem iguais. Apesar de tudo, a operação de uma rede XGS-PON se dá nos mesmos comprimentos de onda das existentes XG-PON e GPON (ITU 2008), (ITU 2012).

As tecnologias adotadas nesta geração conduziram à denominação redes PON de próxima geração (*Next-Generation Passive Optical Network* - NG-PON). A Tabela 4 mostra as principais características destas redes. Além da capacidade de divisão máxima para 256 usuários o alcance almejado foi de 40 km. Convém ressaltar que diversas são as propostas de modelo de camada física para estas redes na época tidas como as soluções do futuro (Gorshe e Mandin 2009), (Banerjee et al. 2005), (ITU 2012).

Tabela 4 – Características principais - NG-PON

Data da padronização	Padrão	Divisão máxima	Alcance máximo
2016	ITU-T G9807.1	1:64 (Expansão para 1:128 à 1:256)	40 - 60 km

2.1.5 Próxima Geração de Redes Ópticas Passivas NG-PON2

As redes de próxima geração evoluíram para a NG-PON2 mediante a implementação de um conjunto de tecnologias ainda em desenvolvimento, as quais visam essencialmente suprir a demanda por taxa e distância. Existem promessas de redes com taxa de transmissão que podem variar entre 40 e 160 Gbps em distâncias que podem superar os 80 km, com alocação dinâmica de banda de acordo com o cliente e a aplicação desejada (Bonilla, Moschim e Barbosa 2009), (Fornari 2015).

Entre as tecnologias desenvolvidas para a NG-PON2 encontra-se a multiplexação por divisão de frequências ortogonais em PON (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*-PON - OFDM-PON), a multiplexação por divisão de tempo e comprimento de onda em PON (*Time and Wavelength Division Multiplexed* PON - TWDM-PON), multiplexação por divisão de

comprimento de onda em PON (*Wavelength Division Multiplexing* PON - WDM-PON), bem como uma combinação das mesmas nas modalidades OFDM/WDM-PON, ULTRA-OFDM PON e WDM-PON ultradenso (*Ultra Dense WDM-PON*) (Nunes et al. 2016), (ITU 2012), (ITU 2013), (ITU 2015), (ITU 2018).

Convém ressaltar que a possibilidade de migração da NG-PON para a tecnologia NG-PON2 deve ocorrer sem a necessidade de investimentos em infraestrutura, podendo assim investir apenas na ampliação da mesma (ITU 2018). A Tabela 5 representa os fatores que o NG-PON2 se propõe a atingir até 2025, com ênfase para uma divisão de sinal máxima de 256 usuários com uma distância de 60 km entre OLT e ONUs.

Tabela 5 – Características principais - NG-PON2

Data da padronização	Padrão	Divisão máxima	Alcance máximo
2013	ITU-T G989.1	1:256	60 km

3 Teoria de Grafos

A teoria de grafos é a parte da matemática que estuda a estrutura que relaciona dois conjuntos, os vértices e as arestas. Vértices são pontos de interesse dentro do grafo, representando algum elemento de partida como uma OLT ou um elemento final como uma ONU. Já as arestas representam o meio físico de comunicação entre os nós, podendo este possuir pesos, onde o peso pode representar, por exemplo, distâncias (Szwarcfiter 2018), (Bondy, Murty et al. 1976). Para a problemática investigada neste trabalho, o problema de alocação de divisores consiste em, dado uma rede com OLTs, ONUs e divisores passivos, encontrar uma rede de custo mínimo através do melhor posicionamento dos divisores passivos na rede, garantindo que as limitações desse tipo sejam obedecidas, se mostrando como um problema de otimização combinatória, como mostrado nas pesquisas de (Costa 2019), (Fernandes 2019) e (Silva 2012). O problema aqui descrito é equivalente ao problema da Árvore de Steiner, onde a partir de um grafo direcionado, com arestas de valores positivos, pretende-se interconectar um conjunto de nós afim de obter uma árvore de custo mínimo, sendo esse um problema conhecido como NP-Difícil (Garey e Johnson 1977), (Fernandes 2019).

Dentre as classificações de grafos, destacam-se os grafos simples, pseudografo, digrafo e multidigrafo, destaque esse dado para limitar as possibilidades de definição de um grafo ao problema aqui proposto. Dentro das classificações acima mencionados pode-se designar um grafo como sendo direcionado, significando que existe um sentido de comunicação entre os nós, e conexo, onde o grafo não possui um ou mais nós sem comunicação com os demais (Prestes 2016), (Szwarcfiter 2018), (Bondy, Murty et al. 1976).

O primeiro e mais famoso problema sobre a teoria dos grafos, que teve seu início a partir dos trabalhos de L. Euler, G. Kirchhoff e A. Cayley, foi o problema das pontes de Königsberg, proposto por Euler em 1736. Na cidade que nomeia o problema, Königsberg, haviam sete pontes sobre um rio que eram as ligações com a ilha de Kneiphof, na antiga Prússia, onde o problema consistia em um indivíduo sair de um local e atravessar cada ponte uma única vez e terminar seu trajeto no mesmo ponto de onde começou, o que se mostrou não ser possível ao final do estudo (Prestes 2016).

A teoria de grafos pode ser aplicada em uma infinidade de problemas, em diversas áreas da engenharia, física, química e até em áreas não relacionadas diretamente a problemas matemáticos, como um fluxo de funcionamento de uma fábrica, que ao ser representada dessa maneira pode se tornar mais intuitiva e compreensível, sem que todos precisem saber profundamente do processo ou produto como um todo.

Uma das principais contribuições dos estudos com grafos está relacionada aos problemas mais difíceis da computação, nomeadamente aqueles associados à classe de problemas NP-Completo. Alguns exemplos de problemas NP-completos podem ser encontrados no Problema do Caixeiro Viajante (PCV), semelhante ao proposto por Euler, que consiste em determinar o menor caminho que um vendedor deve percorrer passando por um caminho apenas uma única vez, levando o vendedor a realizar a menor trajetória. Isto pode ser encontrado também em um dos 21 problemas de Richard Karp, tais como o problema da mochila, que consiste em colocar a maior quantidade de objetos dentro de uma mochila, dentre uma variedade de objetos com pesos e volumes diferentes, obedecendo o tamanho e a quantidade de pesos que a mochila suporta (Feofiloff, Kohayakawa e Wakabayashi 2011).

Os modelos de grafos podem ser observados na Figura 6, onde estão representados grafos conexos e desconexos, e na Figura 7 que mostra um digrafo simples e multigrafo direcionado. Vale ressaltar que na solução do problema aqui proposto, optou-se por trabalhar com grafos conexos e direcionados.

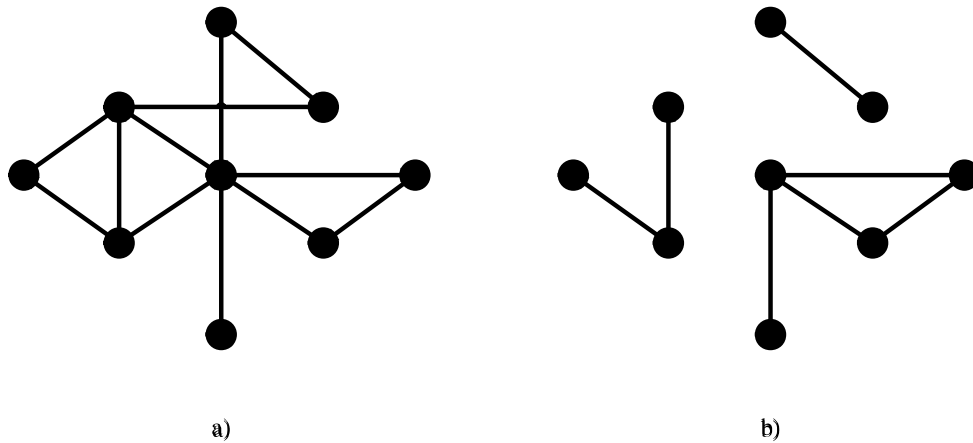


Figura 6 – a) Grafo conexo e b) Grafo desconexo

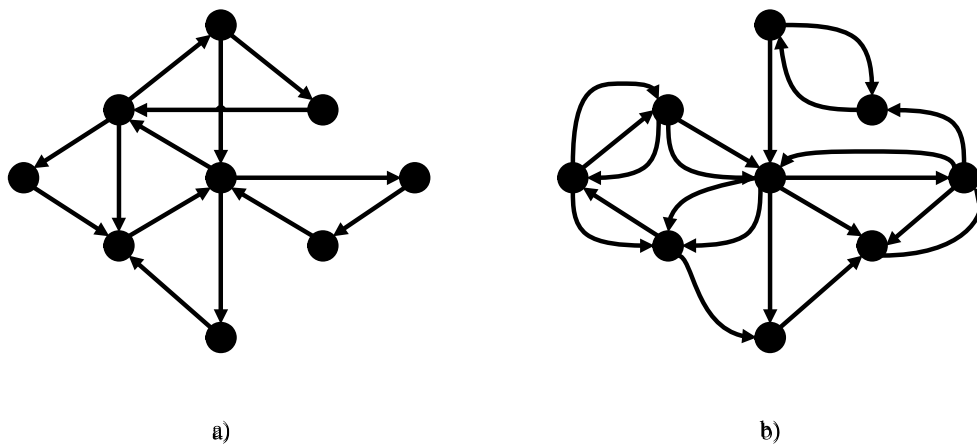


Figura 7 – a) Digrafo simples e b) Multigrafo direcionado

3.1 Representação de Grafos via Matriz de Adjacência

A representação a partir de uma matriz de adjacência é uma das possíveis de um grafo. Uma matriz de adjacência relaciona os vértices de um grafo a partir do valor da posição em uma matriz, com a qual a matriz mostra a relação de um vértice com todos os demais, atribuindo-se valores em cada posição, como mostra a equação (3.1)

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ se vértice } i \text{ está conectado ao vértice } j, \\ 0, \text{ se vértice } i \text{ não está conectado ao vértice } j. \end{cases} \quad (3.1)$$

A partir das condições apresentadas na equação (3.1) monta-se uma matriz de adjacência de dimensão 5×5 , significando um grafo de 5 nós com uma quantidade de arestas dependente da quantidade de valores não zero de cada linha, conforme ilustra a matriz

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Com a matriz de adjacência criada, pode-se gerar um grafo com arestas unitárias. A partir de uma matriz de distâncias, cada posição da matriz de adjacência ganha uma grandeza associado ao peso de cada aresta, tornando-se assim um grafo ponderado. A matriz de adjacência associada com a matriz distância é então representada por

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 32 & 0 & 47 & 0 \\ 32 & 0 & 38 & 0 & 40 \\ 0 & 38 & 0 & 0 & 43 \\ 47 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 43 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

3.2 Aplicação do Algoritmo de Dijkstra nos Grafos

A partir do grafo criado, existem inúmeras opções de caminhos que podem ser utilizados entre dois vértices (nós), porém, como um dos objetivos desse trabalho é o de realizar um planejamento de redes PON com o menor custo, é correto afirmar que o menor caminho entre dois nós representa o enlace mais barato dentre as demais opções. Para a realização da função de menor caminho entre dois nós (OLT ao divisor e divisor à ONU), utilizou-se o algoritmo de Dijkstra (Dijkstra 1959), (Cormen et al. 2009), (Cruz 2016).

Para a utilização da rotina implementada, o usuário deve indicar o grafo que será utilizado, juntamente com os nós que devem estar interconectados. A rotina tem como retorno ao usuário o comprimento do menor caminho entre os nós pesquisados e os nós que representam esse menor percurso. A rotina também pode ser aplicada comparando um nó com um conjunto de nós, retornando qual nó está mais próximo do nó pretendido, ferramenta essa que foi bastante útil na aplicação desse trabalho, já que sempre terão diversos divisores ópticos disponíveis para atender uma ONU. Assim sendo, o funcionamento do algoritmo de Dijkstra pode ser representada através do seguinte conjunto de procedimentos:

Algoritmo Dijkstra (G, s, t)

- i. Inicialização: Inicia o grafo e seleciona o nó inicial (G, s)
 - ii. Distância de s para $s = 0$, todas os outros nós não visitados é atribuído o valor infinito.
 - iii. Cria matriz de nós não visitados.
 - iv. Para o nó atual, calcule todas as distâncias em relação a todos os vizinhos ligados por arestas.
 - v. Some a distância do nó atual com a distância encontrada para alcançar o próximo nó, em seguida compare com o valor anteriormente atribuído ao nó, prevalecendo o de menor valor.
 - vi. Após finalizar o passo anterior para todos os vizinhos do nó analisado, essas posições são excluídas da matriz de nós ainda não visitados, onde nós já visitados não serão analisados novamente dentre o mesmo par de nós.
 - vii. Após visitar toda a vizinhança de nós, caso um dos nós vizinhos seja o nó destino pretendido (t) é selecionado o de menor valor para alcançá-lo. Fim do programa.
 - viii. Caso ainda não tenha alcançado o nó destino, é selecionado o nó com menor distância e retorna ao passo [iv.](#).
-
-

Um exemplo do funcionamento do algoritmo de Dijkstra pode ser observado na Figura 8, onde pretende-se obter o menor caminho entre os nós B e F apresentados na coloração verde. Os nós e arestas ainda não analisadas possuem coloração preta, além dos nós apresentarem o valor infinito. As arestas tracejadas da cor azul destacam os caminhos possíveis para vizinhos, por sua vez representados pelos nós azuis que possuem um valor

não infinito. Quando as arestas produzem caminhos onde a soma é maior que o valor já presente no nó, representando um caminho maior que o já alcançado para aquele nó, é atribuído a cor vermelha e a aresta é representada de forma pontilhada pela mesma cor, e caso a distância seja menor que já representada no nó, é atribuído um novo valor ao nó representando um novo melhor caminho, com a aresta permanecendo azul, porém com a seta cheia. Os nós já analisados em relação aos seus vizinhos também são representados pela coloração vermelha caso não representem o melhor caminho e ao final de encontrar o menor caminho, as arestas que apresentam esse caminho são apresentadas pela cor verde.

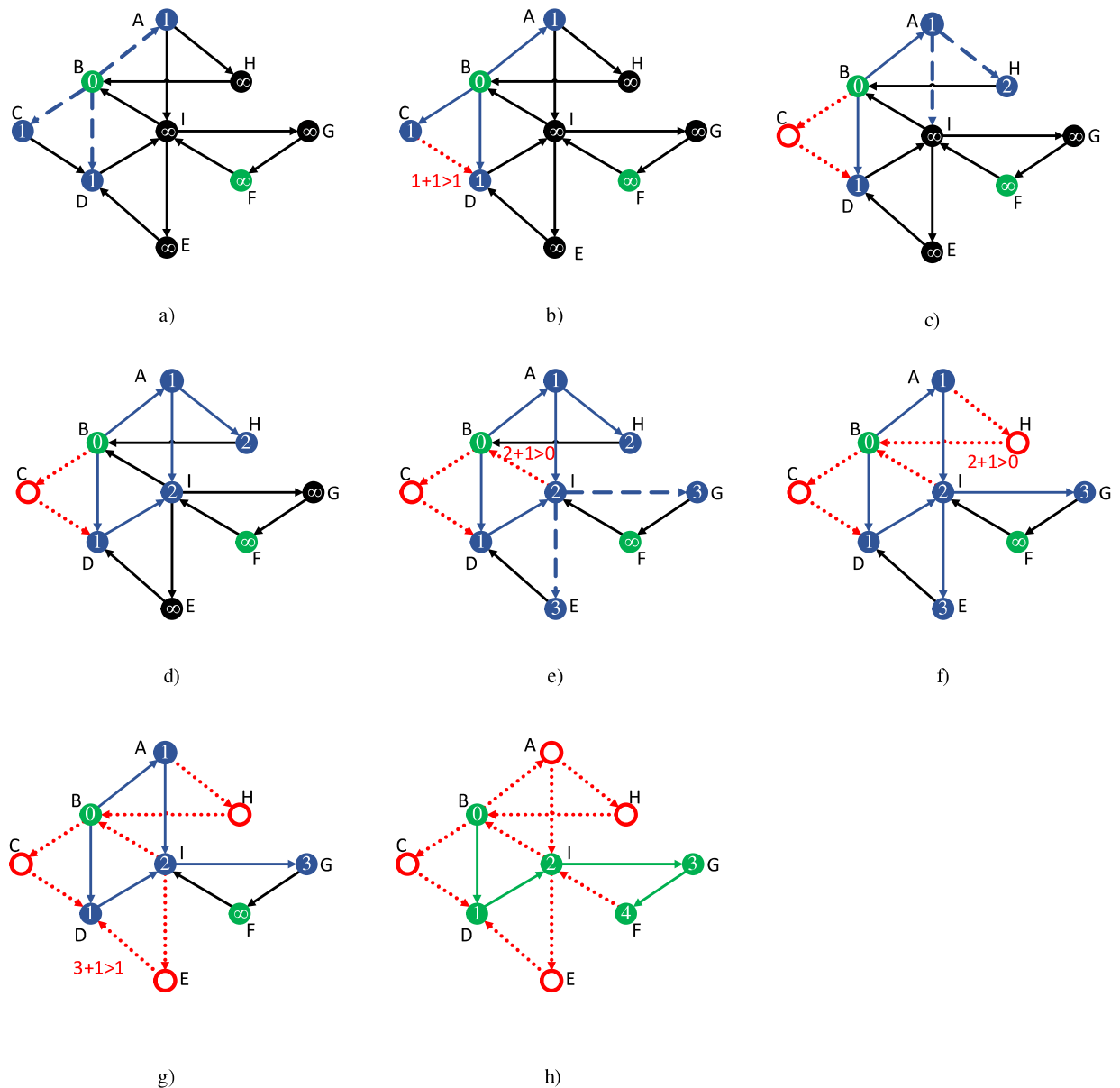


Figura 8 – Exemplo de funcionamento do algoritmo de Dijkstra.

4 Descrição e Formulação do Problema

4.1 FTTx: Fiber-To-The-X

Nos dias atuais o que existe mais difundido no Brasil é a fibra até o nó (*Fiber To The Node* - FTTN) ou FTTC, que é um enlace de fibra que vem da central de dados até a rua da aplicação final, terminando com uma distância maior que 300 metros para FTTN e menor que 300 metros para o caso de FTTC, e o restante do trajeto até o usuário final é concluído via outros meios de comunicação, como cabo coaxial, par trançado ou rede sem fio (Lee, Sorin e Kim 2006).

Esse tipo de enlace possui uma melhora considerável em relação à puramente de cabos metálicos, porém essa última parte composta de cabos metálicos implica em uma significativa redução de taxa em relação a fibra até o prédio (*Fiber to the Building* - FTTB) ou ao enlace puramente óptico chamado de fibra até em casa (*Fiber to the Home* - FTTH), devido as perdas e interferências, além do fato que atualmente já caiu em desuso a implementação de qualquer outro modelo que não o FTTH. A Figura 9 apresenta os modelos FTTx com suas distâncias, onde na representação dos modelos FTTN e FTTC o ONU se encontra antes dos usuários finais (o restante do trajeto é realizado por outros meios que não via fibra óptica), e nos modelos FTTB e FTTH os usuários finais são as ONUs.

FTTH é a mais recente tecnologia de alta velocidade de acesso a internet através da conexão de um ponto de dados central até um usuário final totalmente óptico. Dentre as diversas aplicações, pode-se mencionar as residenciais, empresariais e universitárias, fazendo um *link* óptico para cada usuário (Keiser 2006).

4.2 Representação da Região Metropolitana

Foram propostos diversos tamanhos de rede para comprovar os algoritmos propostos para esse problema, onde estão representados em forma de grafos no programa. Os grafos utilizados como testes foram desenvolvidos exclusivamente também para essa pesquisa, criando grafos de acordo com a quantidade de clientes que se deseja atender, porém esses clientes foram distribuídos de forma diferente de acordo com a região metropolitana que pretende-se realizar o planejamento.

Primeiramente foram utilizadas regiões quadradas, que representam regiões planejadas ideais e por fim foram produzidas regiões metropolitanas aleatórias através de grafos planares, representando assim as regiões mais comumente encontradas, regiões não planejadas. Nas

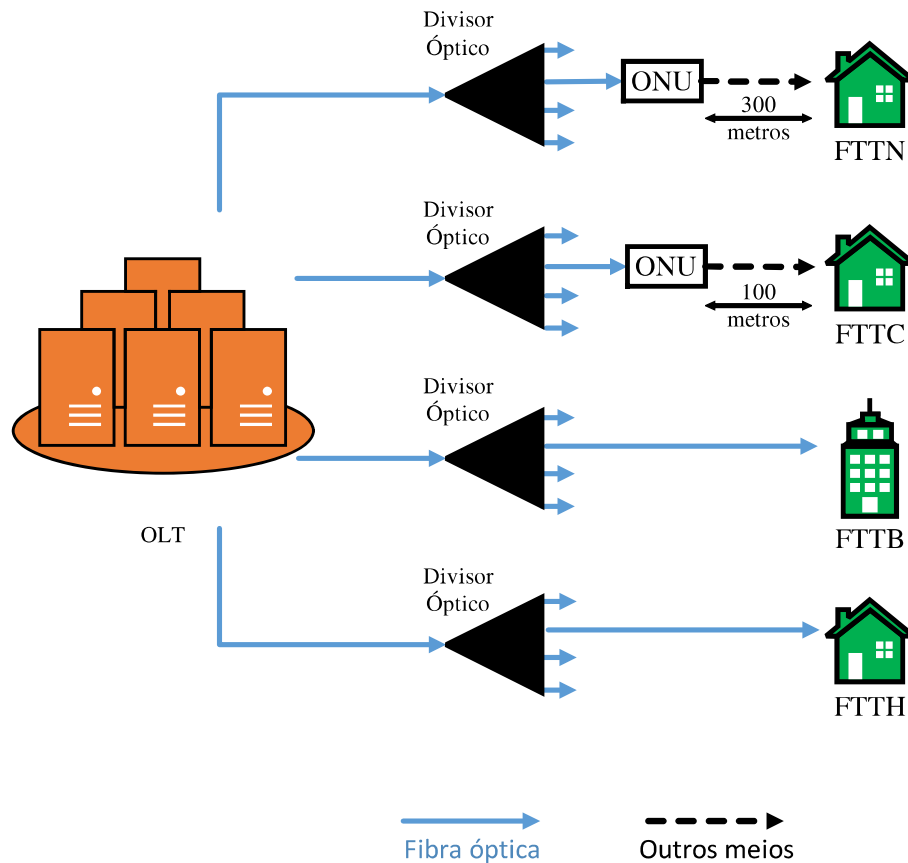


Figura 9 – Modelos de topologia FTTx.

Figuras 10 e 11 pode ser observado a distribuição física das ruas, e por consequência a rede de distribuição elétrica, das regiões metropolitanas de algumas localidades da cidade de Vitória - ES, figuras essas que foram obtidas com a utilização do *Google Maps*. Na Figura 10 estão representadas regiões planejadas da capital, onde percebe-se formatos simétricos das ruas porém com algumas irregularidades. Já na Figura 11 mostra regiões não planejadas, possuindo um formato aleatório que será representado pelos grafos planares aleatórios.

Em uma região metropolitana, normalmente a distância entre postes é de aproximadamente 40 metros (ABNT 2005), (CEMIG 2014), (AMPLA 2012), (ELETROBRAS 2011), (ENERGISA 2009), enquanto que uma rede óptica tem um alcance de algumas dezenas de quilômetros a depender do *link* óptico (Bonilla et al. 2008), (Dias et al. 2017), (Roland 2012). Sendo assim, nos primeiros testes foram considerados que os postes (nós) disponíveis para alocação dos divisores estão espaçados 500 metros para os casos de 64, 256 e 400 clientes (ONUs).

Um dos principais motivos dessa atribuição de distância nos testes de menor capacidade se dá pelo fato que, com uma distância padrão de 40 metros, os divisores ópticos em uma extremidade do grafo conseguiriam atender um cliente na outra extremidade. Contudo, o

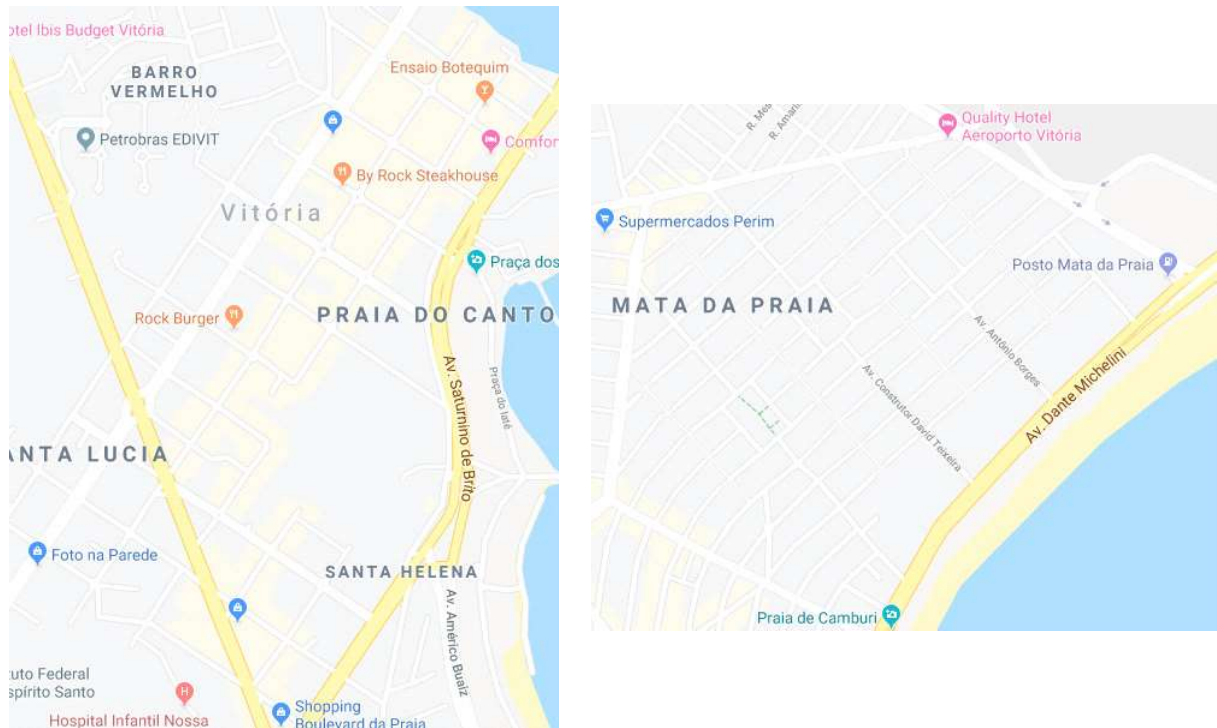


Figura 10 – Regiões planejadas na cidade de Vitória - ES.



Figura 11 – Regiões não planejadas na cidade de Vitória - ES.

principal fator que levou a essa escolha foi devido ao baixo número de clientes, o que não faz muito sentido fazer um planejamento de uma rede com poucos clientes tão próximos. Já para redes de maiores dimensões, com 676, 1024 e 1600 ONUs, irá se manter a possibilidade de alocação dos divisores com o padrão de 40 metros, onde os dois modelos podem ser observados na Figura 12. Após as simulações das regiões descritas anteriormente, foram realizados os planejamentos dessas regiões metropolitanas planejada e não planejadas utilizando 16, 64, 256, 676 e 1600 ONUs, com as arestas dos grafos variando de 30 a 50 metros. A utilização de redes menores com arestas variando de 30 a 50 metros foi necessária

para uma linearização e extrapolação desses resultados com o intuito de comparação de todos os resultados.

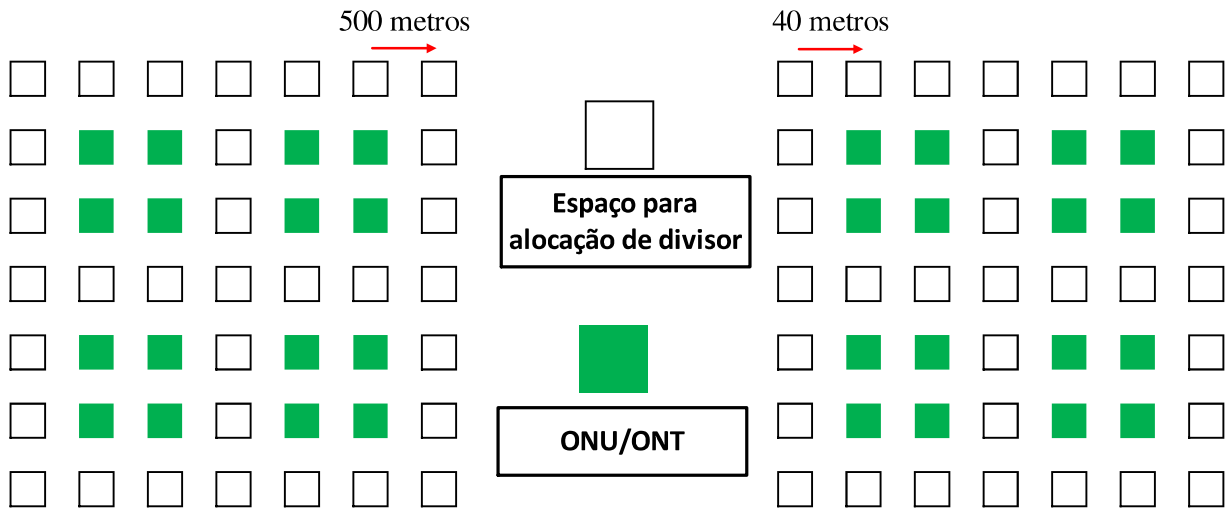


Figura 12 – Modelo representativo da cidade com 500 ou 40 metros entre posições de divisores e ONUs/ONTs

Dois padrões FTTX serão utilizados nesse estudo, os que consideram distâncias de 500 metros representam projetos de redes PON FTTN e as com distâncias de 40 metros ou as que variam entre 30 e 50 metros representam projetos de redes PON FTTH. Para os projetos de redes FTTN, as regiões metropolitanas com 64, 256 e 400 ONUs se distribuem por uma área de aproximadamente 42, 156 e 240 quilômetros quadrados, respectivamente. Já para os projetos de redes PON FTTH com arestas fixas em 40 metros, com 676, 1024 e 1600 ONUs ocupam uma área de, respectivamente, 2, 5, 4, 6 e 8 quilômetros quadrados. Para os projetos de regiões metropolitanas de arestas variadas, estimar uma área para essas redes é algo complexo, com isso, não serão quantificadas.

4.3 Formulação do Problema

Com o objetivo de reduzir os custos de implantação de uma rede metropolitana a partir da localização das OLTs e das melhores posições dos divisores ópticos, considere-se uma quantidade de ONUs pré-definidas. De acordo com a norma da ITU-T G.984.1, ITU-T G.989, ITU-T G.987 (ITU 2008), (ITU 2018), (ITU 2012), para evitar perda de qualidade de sinal, foi usado um máximo de 128 divisões de sinal para as OLTs, o que demanda pelo menos 13 OLTs para o maior caso, 1600 ONUs. Assume-se também uma região metropolitana com nós (clientes ou divisores ópticos) adjacentes espaçados em torno de 40 metros ou 500 metros (ITU 2008), (ITU 2018), (ITU 2012), (Coura, Silva e Segatto 2009). A padronização de redes PON limita a quantidade de clientes por divisor óptico em 64 e estabelece um limite de 20 km na distância entre a OLT e o cliente, para garantir a qualidade na comunicação (IEEE Sept. 7 2004), (Nunes et al. 2016), (Furukawa 2018).

O modelo tem como base a utilização de uma infra-estrutura de rede elétrica compartilhada em uma região metropolitana. Cada poste da rede de distribuição representa um nó do grafo (vide Figura 12) que pode ser utilizado como local de instalação de um divisor óptico, obedecendo-se as limitações ópticas supracitadas (Furukawa 2018), (ABNT 2005), (CEMIG 2014), (AMPLA 2012), (ELETROBRAS 2011), (ENERGISA 2009).

A atenuação é o problema de maior relevância de um projeto desta natureza, possuindo parâmetros variáveis e fixos. As atenuações fixas são as causadas por conectores existentes em cada dispositivo da rede, enquanto que as perdas variáveis ocorrem devido ao comprimento dos enlaces de fibra e devido às perdas causadas por cada tipo ¹ de divisor óptico. As perdas fixas são iguais para todos os tipos de divisores ópticos adicionados ao sistema, pois o cascadeamento de divisores não foram considerados nesse problema (Meza et al. 2013), (Eira, Pedro e Pires 2012), (Lin, Lin e Ho 2012), (Zhang et al. 2012).

Ressalta-se que o custo associado a um divisor óptico individual está associado à quantidade de divisões ópticas contidos no dispositivo, que pode ser 1 : 2, 1 : 4, ..., 1 : 64. Se a potência do sinal na entrada do fotodetector de um cliente estiver abaixo de sua sensibilidade, uma penalização em forma de custo é atribuída no projeto de forma que esse enlace se torne inviável.

O modelo aqui proposto implementa uma rede PON que se distribui utilizando a infraestrutura da rede elétrica de uma região metropolitana, ou seja, os pontos onde serão possíveis alocar um divisor óptico são na realidade pontos onde existem postes de distribuição de energia elétrica e os caminhos utilizados para comunicação são as conexões existente entre os postes, que são as linhas de distribuição aérea, mas também pode ser comparado de forma análoga com um sistema de distribuição subterrânea, com suas devidas peculiaridades.

O custo de alocação de um divisor óptico em uma determinada posição é calculado a partir da rotina *shortestpath* presente na biblioteca do MATLAB, que utiliza o grafo onde considera-se os comprimentos das arestas associadas a região utilizada, bem como uma atenuação da fibra na ordem dos 0,20 dB/Km no comprimento de onda de operação $\lambda = 1550$ nm (Furukawa 2018). Os parâmetros e os custos dos divisores ópticos estão descritos na Tabela 6.

¹ Entende-se por tipo de divisor óptico a classificação dada pela quantidade de divisões ópticas do dispositivo.

Tabela 6 – Parâmetros dos Divisores Ópticos e Fibra Ótica

Tipo de Divisor	Perda de Inserção	Valor Unitário	Custo da Fibra Ótica
1/2	3,7 dB	\$ 50,00	\$ 600,00/Km
1/4	7,3 dB	\$ 75,00	\$ 600,00/Km
1/8	10,5 dB	\$ 100,00	\$ 600,00/Km
1/16	13,7 dB	\$ 125,00	\$ 600,00/Km
1/32	17,1 dB	\$ 150,00	\$ 600,00/Km
1/64	20,5 dB	\$ 175,00	\$ 600,00/Km

Para otimizar os recursos na implementação de uma rede PON foram utilizados as seguintes variáveis na modelagem matemática:

- i e j representam as linhas e colunas da matriz metropolitana;
- P_{ij} é uma posição qualquer na matriz;
- D_{sc} é distância do caminho do divisor ao cliente;
- C_{fo} é o custo da fibra ótica;
- K é o divisor óptico utilizado;
- C_K é o custo do divisor óptico utilizado;
- PSA_{ij} é a posição de divisor ativo na matriz metropolitana;
- PSP_{ij} é a posição de divisor possível na matriz metropolitana;
- PCA_{ij} é a posição de cliente ativo na matriz metropolitana;
- PCP_{ij} é a posição de cliente possível na matriz metropolitana;
- PER_{MAX} é a perda máxima permitida;
- $PERIN_K$ é a perda de inserção do divisor óptico utilizado;
- $PERD_{sc}$ é a perda pela distância do caminho do divisor ao cliente;
- PEN_K é a penalização pelas sobras de saídas do divisor óptico utilizado;
- PEN_{PER} é a penalização caso ultrapasse a perda máxima de sinal;
- CR_{PON} é o custo da rede PON.

O problema de alocação ótima de divisores ópticos em uma rede PON assume a seguinte formulação:

$$\text{Min. } CR_{PON} = \sum_{PCA_{ij} \in PSA_{ij}} (D_{sc} * C_{fo} + C_K), \quad (4.1)$$

s.a:

$$\sum_{P_{ij} \in PSA_{ij}} (PSA_{ij} * K) \geq \sum_{PCA_{ij} \in PSA_{ij}} PCA_{ij}, \forall K \in PSA_{ij} \quad (4.2)$$

$$PSA_{ij} \neq PCP_{ij} \quad (4.3)$$

$$K \leq \sum_{PCA_{ij} \in PSA_{ij}} PCA_{ij}, \forall K \in PSA_{ij} \quad (4.4)$$

$$D_{sc} \neq PCP_{ij} \quad (4.5)$$

$$K \in \{2, 4, 8, 16, 32, 64\}, \forall K \in (P_{ij} \neq PCP_{ij}) \quad (4.6)$$

$$PCP_{ij} \in \{0, -1\}, \forall PCP_{ij} \in (P_{ij} \neq PCP_{ij}) \quad (4.7)$$

A equação (4.1) busca minimizar os custos dos divisores ópticos e da fibra ótica para conectar todos os clientes a rede PON. A restrição (4.2) define que o somatório da quantidade de saídas dos divisores ópticos deve ser maior ou igual à quantidade de clientes, garantindo assim o atendimento a todos os clientes. A restrição (4.3) informa que um divisor óptico não pode ser alocado em uma posição de cliente. A restrição (4.4) limita a quantidade de usuários que um divisor óptico pode atender na quantidade de saídas do divisor. O item (4.5) restringe o caminho percorrido pela conexão divisor/cliente a apenas posições possíveis para isso. Os itens (4.6) e (4.7) mostram que o algoritmo considera números decimais e quais os valores podem ser atribuídos para as posições de divisores e clientes, respectivamente.

4.4 A Função Aptidão Proposta

A função aptidão tem como objetivo a avaliação das soluções candidatas geradas pelo otimizador, e nesta trabalho é assim formulada:

$$FA = CR_{PON} + PEN_{sk} + PEN_{PER} \quad (4.8)$$

$$PEN_{sk} = K_{sk} - \sum_{PCA_{ij} \in PSA_{ij}} (PCA_{ij}), \forall K_{sk} \in PSA_{ij} \quad (4.9)$$

$$PEN_{PER} = PER_{MAX} - PERIN_{sk} - PERD_{sc}, \quad (4.10)$$

onde

$$\forall sk \in PSA_{ij}, \forall sc \in D_{sc}, \forall D_{sc} \in PSA_{ij}.$$

As equações (4.9) e (4.10) representam as penalizações oriundas da subutilização do divisor e da ultrapassagem do limite de perda máxima do sinal, respectivamente.

Todo o equacionamento foi demonstrado a partir da comunicação entre divisores ópticos e ONUs, porém as mesmas equações são aplicadas entre a comunicação das OLTs e divisores ópticos, com suas devidas peculiaridades. As diferenças básicas para os dois casos são ao invés da utilização do limite de ONUs dos divisores ópticos é utilizado o limite de ONUs para uma OLT, que são 128, além de continuar obedecendo os limites de perdas na comunicação, que sempre consideram o caminho percorrido via fibra óptica da OLT, passando pelo divisor óptico e continuando até o usuário final.

5 Metaheurísticas Propostas para o Planejamento de Redes PON

Os algoritmos metaheurísticos foram desenvolvidos com a finalidade de resolver problemas de otimização combinatória, com alto nível de complexidade, como problemas NP-Completo, onde problemas desse tipo já foram utilizados em aplicações semelhantes à desta pesquisa, como mostrado em (Costa 2019), (Fernandes 2019) e (Silva 2012). Uma metaheurística tem como objetivo percorrer espaços de busca à procura de soluções o mais próximas possível da ótima, juntamente com um tempo computacional razoável.

Este trabalho conta com a ajuda de duas metaheurísticas para buscar a solução do problema apresentado, o algoritmo Genético (AG), pelo qual foram feitas alterações em alguns processos do algoritmo que serão melhor apresentadas na seção 5.2 e também do algoritmo diferencial evolutivo (DE) que terá seus parâmetros apresentados na seção 5.3.

Dentre as inúmeras metaheurísticas disponíveis para solução desse problema, como colônia de formigas e enxame de partículas, foram escolhidos o AG e o DE por serem metaheurísticas que alcançam soluções ótimas globais com um baixo tempo computacional, além da simplicidade de programação e adequação para solução do problema pretendido.

5.1 Parâmetros de Entrada e Saída Aplicados nas Metaheurísticas

Como parâmetros de entrada dos algoritmos foram utilizados o grafo que representa a região metropolitana, ou seja, a estrutura física da rede, além dos nós desse grafo que representam os usuários (ONUs) e os custos básicos para a implementação da rede, que são os custos de fibra por quilômetro, custo do divisor óptico de acordo com a quantidade de divisões, custo dos conectores e custo da OLT. O grafo que representa a região metropolitana também possui a informação de quais nós possuem comunicação e suas respectivas distâncias entre os mesmos.

A saída após o processo iterativo das metaheurísticas é o custo da rede e um grafo, onde agora o mesmo está preenchido também com as posições dos divisores ópticos. O caminho realizado pela fibra na comunicação entre OLT, divisores ópticos e ONUs é dado por algumas matrizes com esse trajeto, mostrando qual OLT abastece cada divisor óptico (caso possua mais de uma OLT) e qual divisor abastece cada ONU, assim como a distância de cada trecho percorrido.

5.2 O Algoritmo Genético Modificado Proposto

Inspirada na teoria da evolução das espécies de Charles Darwin, onde um grupo de indivíduos passa por diversos processos naturais, colocando à prova a capacidade dos mesmos se adaptarem frente as condições impostas, foi criada a metaheurística AG. (Goldberg e Holland 1988).

No processo natural de evolução existem processos de cruzamento e mutação. Com o processo de cruzamento dois indivíduos transmitem sua carga genética para gerações futuras, porém nem todos os indivíduos o conseguem, apenas os indivíduos mais aptos, ou pelo menos em muito maior quantidade que os menos aptos. Comparando com a natureza é fácil comprovar esse fenômeno ao se observar, por exemplo, que pássaros com cores mais vividas são mais aptos a ser escolhidos por fêmeas para reprodução.

Enquanto o processo de cruzamento é algo influenciado por uma característica de cada espécie, como beleza, força e tamanho, o processo de mutação é definido pelo ambiente que o indivíduo habita. Utilizando o exemplo de pássaros novamente, o formato do bico de um pássaro é diretamente relacionado com o tipo de alimento disponível para esse animal no ambiente nativo.

Através desses processos, após serem observados por muitas gerações, poderá ser notado a extinção de algumas características e o aparecimento de novas para a população como um todo, gerando assim indivíduos cada vez mais aptos ao decorrer do processo evolutivo. São exatamente essas características que um processo de otimização procura, uma forma adaptável de buscar o melhor resultado para um problema, onde o indivíduo a ser otimizado poderá ser o gerenciamento de demanda de energia elétrica de uma residência ou a geração do menor custo na implementação de recursos em uma rede PON (Villalba 2009), (Oliveira 2017), (Takeuti 2005), (Junior 2018).

O processo de seleção dos indivíduos que participarão do cruzamento e mutação se dá pelo método roleta (Goldberg e Holland 1988). Esse método consiste, primeiramente, em ranquear os indivíduos de acordo com o grau de aptidão dos mesmos, organizando em um vetor do mais para o menos apto, onde para o caso estudado nessa pesquisa a aptidão é o custo de projeto.

Após os indivíduos ranqueados é montada uma roleta, representada na Figura 13, onde os melhores indivíduos ocupam uma parcela maior que os piores, de forma proporcional, para uma maior probabilidade de seleção dos indivíduos mais aptos. Também está representada na Figura 13 uma simplificação do vetor indivíduo, onde possui valores 0 para posições que não estão alocados divisores, e os valores 2, 4, 8, 16, 32 e 64 que representam os tamanhos dos divisores alocados naquela posição.

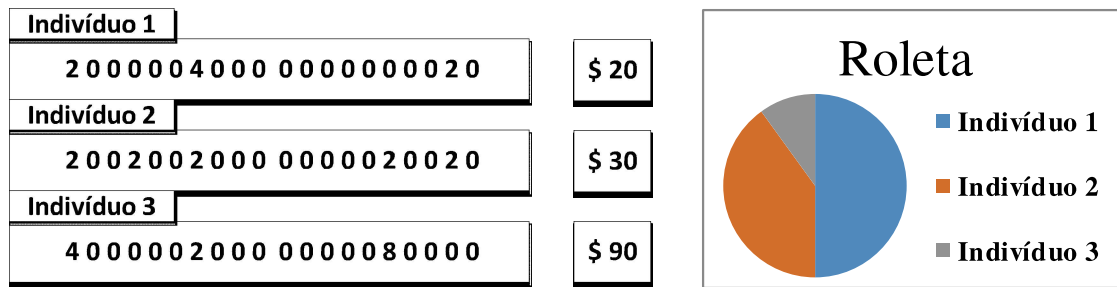


Figura 13 – Modelo de funcionamento do método roleta

Na elaboração do AG para solução do problema de alocação de divisores aqui apresentado, foi decidido chamar a metaheurística de Algoritmo Genético Modificado (AGM), devido as muitas alterações em relação ao algoritmo base, como o processo de cruzamento e mutação, que foram alterados para obter uma melhor eficácia para esse problema, além da utilização de dois modelos de cruzamento e mutação em conjunto.

5.2.1 Distribuição Randomica de Poisson

Inicialmente foi feito uma geração de indivíduos com a posição e o tamanho dos divisores ópticos de forma aleatória. No caso da utilização de 6 tipos de divisores, existe a probabilidade de aproximadamente 16,6% para cada divisor ser selecionado para uma dada posição.

Após a análise de dezenas de simulações com várias dimensões de regiões metropolitanas, foi percebido que os melhores indivíduos tinham uma maior quantidade de divisores com menor capacidade (2 saídas, 4 saídas) do que os de maior capacidade (32 saídas, 64 saídas). O que é coerente, dado que um divisor de 64 saídas produz muitos enlaces de maior comprimento, quando divisores menores costumam produzir enlaces de menor comprimento. Divisores de alta capacidade como os de 64 saídas se mostram mais eficazes para um grupo de ONUs próximos uns dos outros e distantes da OLT, já que uma única fibra percorrerá o trecho até o divisor, produzindo assim um melhor custo do que a alocação de vários divisores menores para o atendimento desses usuários.

Decidiu-se então produzir uma geração inicial que selecione os divisores pela distribuição randômica de poisson. A geração randômica de poisson possui sua distribuição apresentada na Figura 14, onde pode-se perceber que existe um pico na curva, que é onde existe uma maior probabilidade de seleção e o quanto mais a curva se distancia do pico, menor a probabilidade daquele valor ser selecionado, (Miller e Childers 2012). Vale ressaltar que em momento algum esse processo remove a chance de algum divisor ser selecionado ou impõe o uso de apenas um tamanho de divisor.

A curva de poisson tem um alcance mínimo e máximo devido ao tamanho de divisores

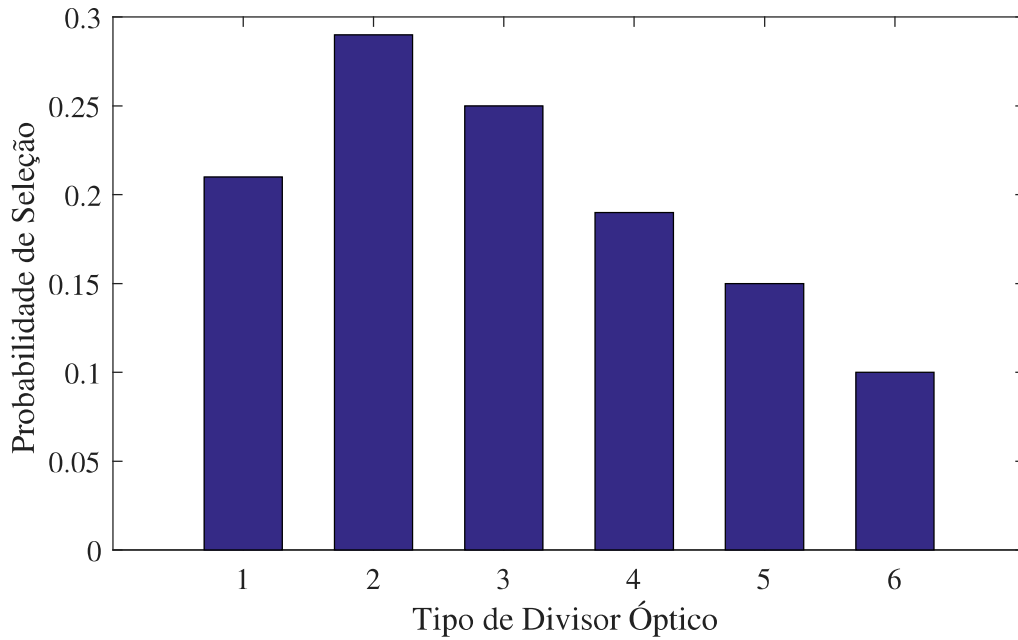


Figura 14 – Modelo de distribuição randômica de Poisson

utilizados, sendo assim, a curva varia entre os valores de 1 a 6, representando os tamanhos dos divisores, que pode ser apresentado pela seguinte equação:

$$K = 2^x, \quad (5.1)$$

onde K representa o tamanho do divisor, e x assume os valores inteiros de 1 a 6.

A Figura 14 mostra que a maior probabilidade de seleção está centralizado entre a posição de número 2 e 3, representando respectivamente o divisor de 4 e 8 saídas. Ao ser gerado um valor fora dos inteiros de 1 a 6 o mesmo é normalizado para 1 caso sejam atribuídos valores menores, e 6 caso maiores. Para arredondamentos entre os valores de 1 a 6 foram utilizados o modelo de arredondamento comumente utilizado, ou seja, valores menores que 0,5 vão para o inteiro inferior e os maiores ou iguais vão para o inteiro superior.

5.2.2 Cruzamento

Foram formulados dois processos de cruzamento para a obtenção do indivíduo ótimo, onde o primeiro aqui apresentado consiste na troca de genes (posições da matriz ou nós do grafo que representam posições que podem ou não possuir divisores na região metropolitana) pares ou ímpares de dois indivíduos selecionados pela roleta, gerando dois novos indivíduos através da troca dos genes pares ou ímpares. A Figura 15 apresenta o procedimento de cruzamento usando a troca dos genes ímpares.

O segundo processo de cruzamento é realizado também ao selecionar dois indivíduos pela roleta. Os dois indivíduos passam por um processo de compatibilidade de trechos, onde

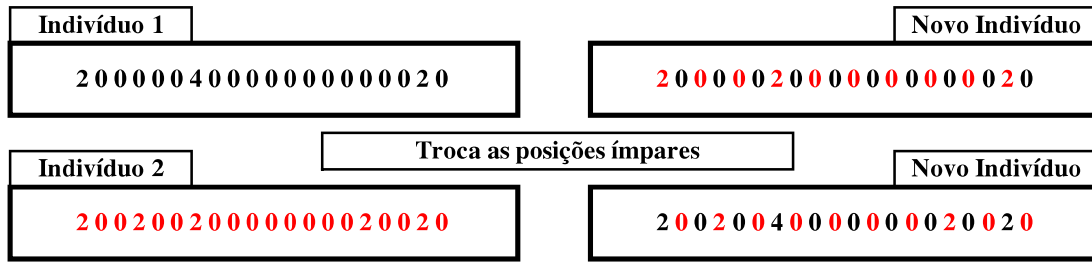


Figura 15 – Cruzamento trocando as posições ímpares

cada vetor é percorrido e ao achar um ponto de compatibilidade mútua o cruzamento é efetuado. A compatibilidade buscada é em relação a quantidade total de saídas dos divisores até aquele ponto, o cruzamento por compatibilidade de trechos pode ser observado na Figura 16.

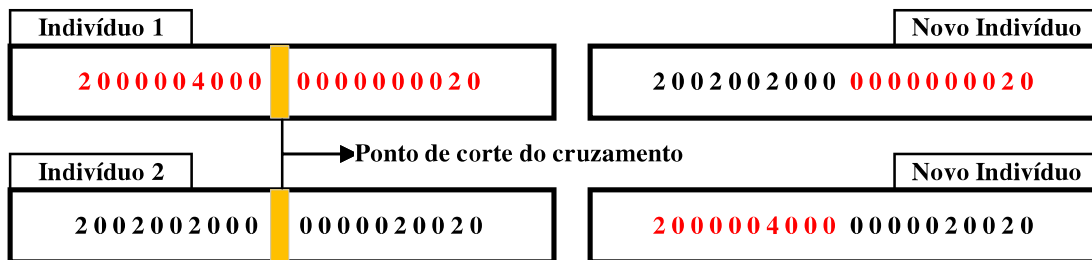


Figura 16 – Cruzamento por compatibilidade de trechos

5.2.3 Mutação

O processo de mutação, assim como o cruzamento, também conta com dois modelos, com o intuito de criar uma maior variabilidade genética e maior aleatoriedade na busca das soluções. Inicialmente é escolhido um indivíduo para sofrer a mutação e a quantidade de pontos no gene do mesmo que sofrerão mutação, em seguida é definida qual modelo de mutação será utilizado.

A primeira opção é a mutação de posição aleatória, onde o ponto selecionado será trocado por outro aleatório dentre os disponíveis no vetor. O outro processo de mutação é feito com a troca de posição com um vizinho do ponto inicialmente selecionado, dentre os vizinhos disponíveis para a operação. A mutação aleatória e por vizinhos estão representadas nas Figuras 17 e 18, respectivamente. O primeiro modelo de mutação adiciona aleatoriedade na distribuição dos divisores e o segundo modelo tende a caminhar para uma solução melhor através de seus vizinhos, aproximando o divisor dos usuários atendidos pelo mesmo, além de aprimorar o AGM na busca por ótimos locais.

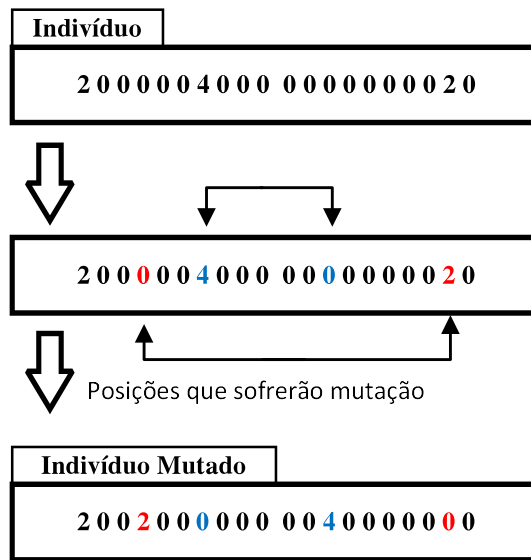


Figura 17 – Mutação aleatória

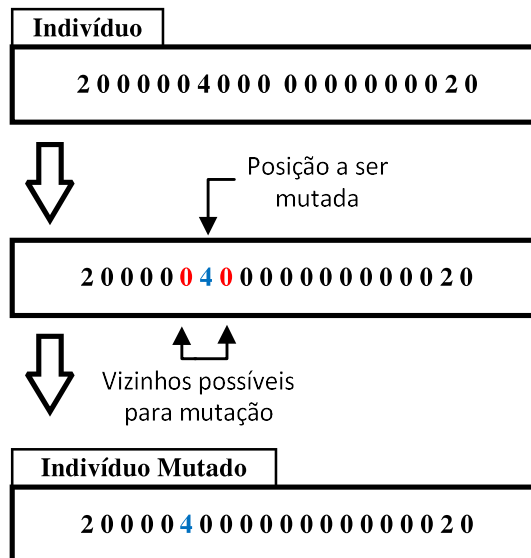


Figura 18 – Mutação para posições vizinhas

Um fluxograma do AGM está representado na Figura 19, e a Figura 20 mostra um exemplo do funcionamento do AGM, onde os dois mostram as etapas do processo evolutivo anteriormente explicadas de forma mais fluida.

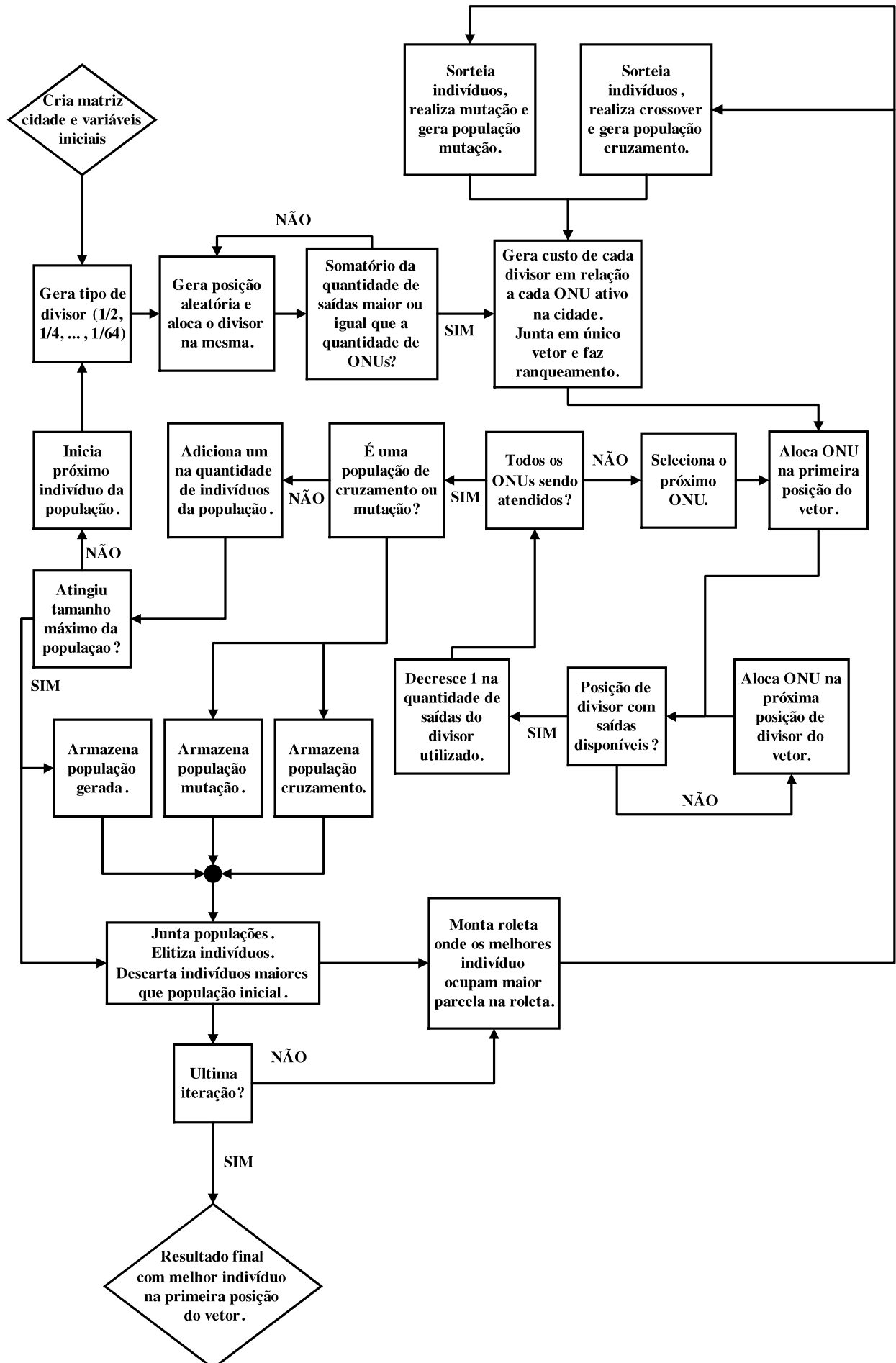


Figura 19 – Fluxograma do AGM proposto.

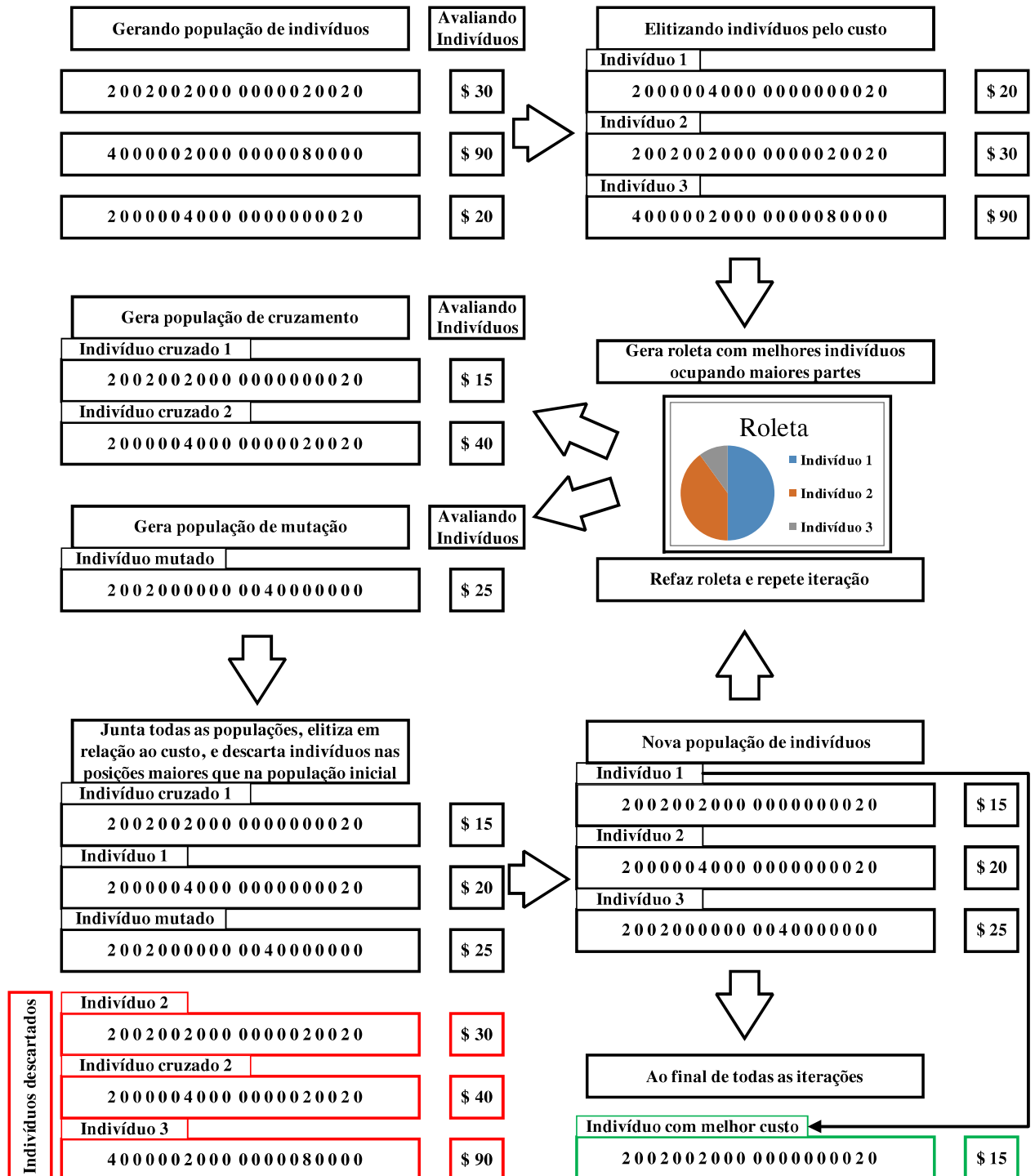


Figura 20 – Exemplo de funcionamento do AGM

5.3 O Algoritmo Diferencial Evolutivo Proposto

O algoritmo DE é uma metaheurística classificada como um algoritmo evolutivo, porém possui suas características inspiradas em conceitos matemáticos e estratégias metaheurísticas. O DE também mantém o padrão de evolução a partir de uma população inicial de soluções, e ao decorrer do processo iterativo tende a um resultado ótimo (Storn e Price 1997), (LACERDA 2010). No DE, o processo de seleção dos indivíduos que participarão da mutação e cruzamento se dá selecionando um primeiro indivíduo que pertence à iteração do momento, ou seja, caso esteja na iteração de número 15 será escolhido o indivíduo 15, para assim então 3 outros indivíduos serem selecionados aleatoriamente (Storn e Price 1997).

A metaheurística DE usado nessa aplicação possui algumas peculiaridades em relação ao programa base criado por Storn e Price (Storn e Price 1997). Os parâmetros de entrada (OLT, ONU e divisores ópticos) que o algoritmo trabalha são números inteiros, onde os divisores ópticos são os parâmetros que irão ser alterados ao longo do processo evolutivo variam de 0 a 6. O número 0 representa um nó onde não foram alocados divisores ópticos e os valores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 representam o tamanho do divisor óptico alocado no nó, que são respectivamente 2, 4, 8, 16, 32 e 64.

5.3.1 Mutação

A mutação se inicia selecionando os 3 indivíduos aleatórios, onde o indivíduo pertencente à iteração não é utilizado pela mutação, apenas pelo cruzamento. É gerado um vetor chamado *beta*, que no conceito criado por Storn e Price, é um vetor com números decimais aleatórios dentro de um limite pré-determinado. O programa adapta alguns fatores, como na geração dos valores do *beta*, onde ao invés de gerar valores aleatórios dentro de um limite, o vetor é preenchido aleatoriamente com os valores [1; 0,5; 2]. O *beta* é multiplicado por um dos indivíduos, fazendo com que as posições que possuam divisores ópticos reduzam na metade caso a posição do *beta* seja 0,5, dobre o tamanho do divisor caso a posição seja igual a 2 ou mantenha o valor original caso o valor seja 1.

O processo de mutação foi criado por Storn e Price utilizando-se conceitos matemáticos, assim a mutação é feita através de uma equação, utilizando soma, subtração e multiplicação vetorial. Dois indivíduos serão subtraídos, o resultado é multiplicado pelo *beta* e o vetor resultante é subtraído de um terceiro indivíduo e ao final de todo o equacionamento da mutação, são restabelecidos os limites de 1 a 6 dos divisores ópticos. O processo de mutação do DE pode ser melhor observado na Figura 21.

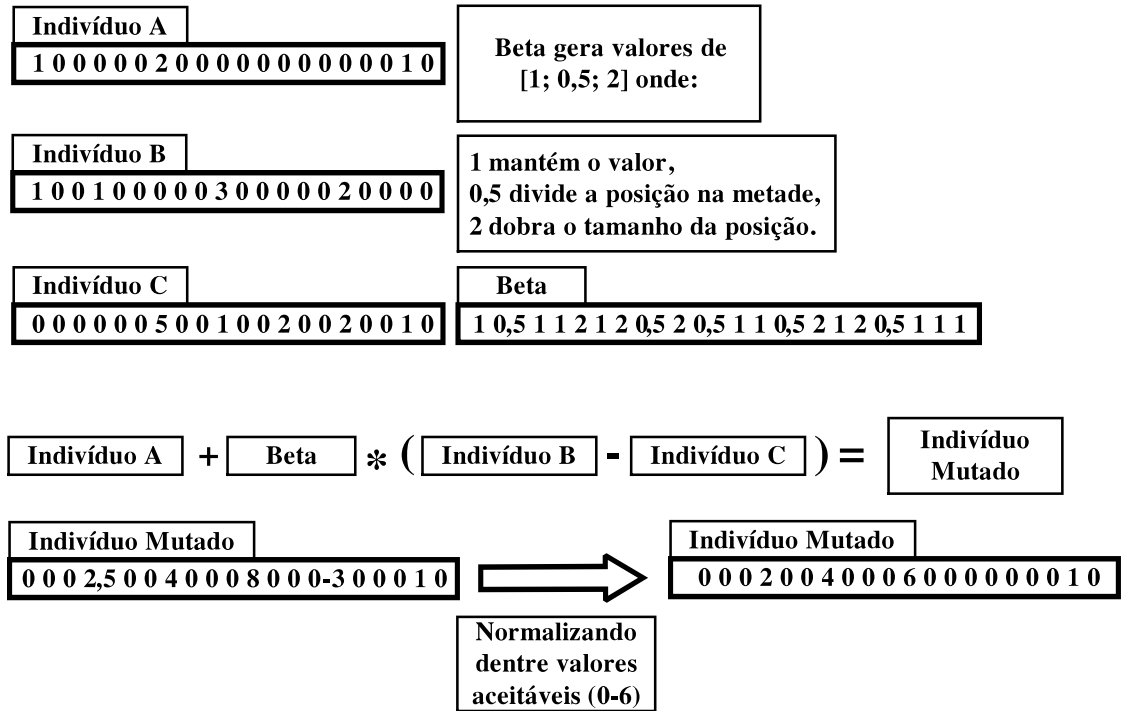


Figura 21 – Mutação no modelo DE

5.3.2 Cruzamento

O cruzamento é realizado entre o indivíduo pertencente a iteração atual e o indivíduo resultante da mutação. Algumas posições aleatórias do indivíduo mutado serão alocados no indivíduo da iteração atual. Além disso, cada posição da iteração atual possui uma probabilidade de realizar a troca por posições do indivíduo mutado. Com o processo de mutação e cruzamento finalizado, o indivíduo cruzado é selecionado para próxima iteração. O processo de cruzamento está representado na Figura 22, enquanto que a Figura 23 mostra um fluxograma de funcionamento do algoritmo DE, onde da mesma forma

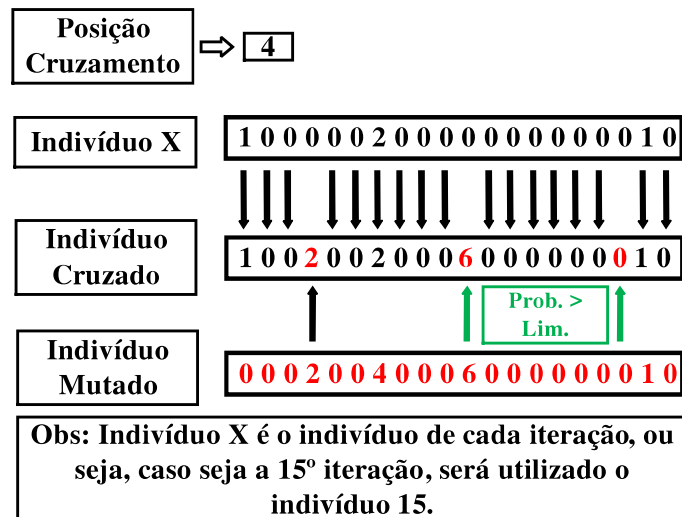


Figura 22 – Cruzamento no modelo DE

apresentada para o AGM, mostra as etapas do processo evolutivo do DE anteriormente explicadas de forma mais fluida.

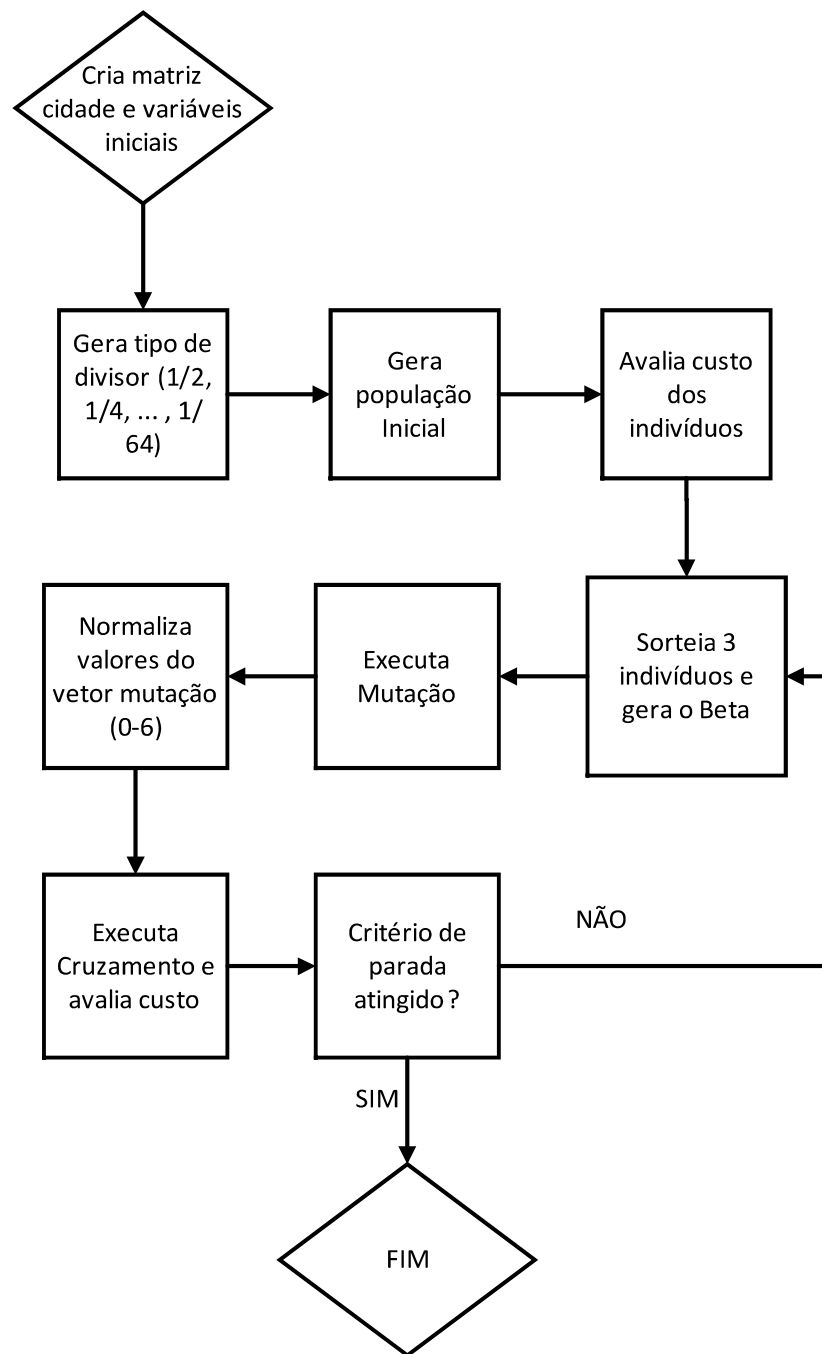


Figura 23 – Fluxograma DE

6 Análise dos Resultados

Para avaliar o desempenho das metaheurísticas aqui propostas para solucionar o problema de alocação de divisores ópticos, as simulações numéricas foram realizadas com o auxílio de um computador *Intel Core i5 – 2500*, 3,30 GHz e 8,00 GB de memória, e da linguagem de computação MATLAB®. As metaheurísticas iniciam com soluções iniciais aleatórias para uma busca das melhores soluções globais, utilizando seus parâmetros particulares de controle.

Os testes foram executados 3 vezes para cada uma das metaheurísticas apresentadas, que são o AGM e DE. Os ajustes dos parâmetros apresentados para as duas metaheurísticas foram obtidos a partir de inúmeras simulações realizadas, com diversas dimensões de redes, onde foi tido como melhores configurações as apresentadas nas Tabelas 7 e 8. Para o caso do AGM, a parametrização também utilizou-se de estudos anteriores (Rocha 2010), com algumas adaptações exclusivas para o problema de alocação de divisores ópticos.

Tabela 7 – Parâmetros de funcionamento do AGM

Parâmetros de funcionamento do AGM			
Tamanho da população			
50			
Número de iterações			
100			
Método de seleção para cruzamento e mutação			
Roleta			
Quantidade de indivíduos cruzados		Quantidade de indivíduos mutados	
20%		20%	
Tipos de cruzamento		Tipos de mutação	
Par-ímpar	Compatibilidade de trechos	Aleatória	Posições vizinhas
		Taxa de mutação por indivíduo	
		3% das posições	

Já para o algoritmo DE, a metaheurística foi executada como proposto por Price e Storn (Storn e Price 1997), tendo os parâmetros utilizados representados na Tabela 8, onde também estão exibidas as ressalvas do vetor beta e o vetor indivíduo, que deixou de aceitar números decimais, como explicado na seção 5.3.

Nesse estudo foi adotada inicialmente a representação de regiões metropolitanas bem planejadas (simétricas) onde o grafo possui arestas iguais. Após a análise do planejamento na região metropolitana bem planejada, o algoritmo que obtiver melhor resultado será

Tabela 8 – Parâmetros de funcionamento do DE

Parâmetros de funcionamento do DE	
Tamanho da população	50
Número de iterações	100
Valores possíveis do Beta	0,5; 1; 2
Probabilidade de cruzamento	20%
Variável de decisão superior	6
Variável de decisão inferior	0

analisado sua capacidade de produzir um planejamento ótimo em regiões mal planejadas (não simétricas), criando para isso grafos com arestas de comprimentos variando de 30 a 50 metros.

Primeiramente foi gerado um grafo com o número de nós desejados para a simulação, pelo qual ainda não foi definidas as posições das ONUs, onde esse grafo pode ser observado na Figura 24. O grafo da Figura 24 é um grafo representativo, que possui apenas 49 nós, sendo mostrado inicialmente para elucidar como seriam os grafos de maiores dimensões pelos quais não são possíveis de serem representados nesta dissertação. Para os sistemas com arestas iguais, os grafos tem os pesos das arestas e quantidade de ONUs definidos pela Tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões das regiões metropolitanas

ONUs	Quantidade de Nós do Grafo	Distância Entre Nós Adjacentes (Metros)	Área Metropolitana (Km ²)
64	169	500	42,25
256	625	500	156,25
400	961	500	240,25
676	1600	40	2,56
1024	2401	40	3,84
1600	3721	40	5,95

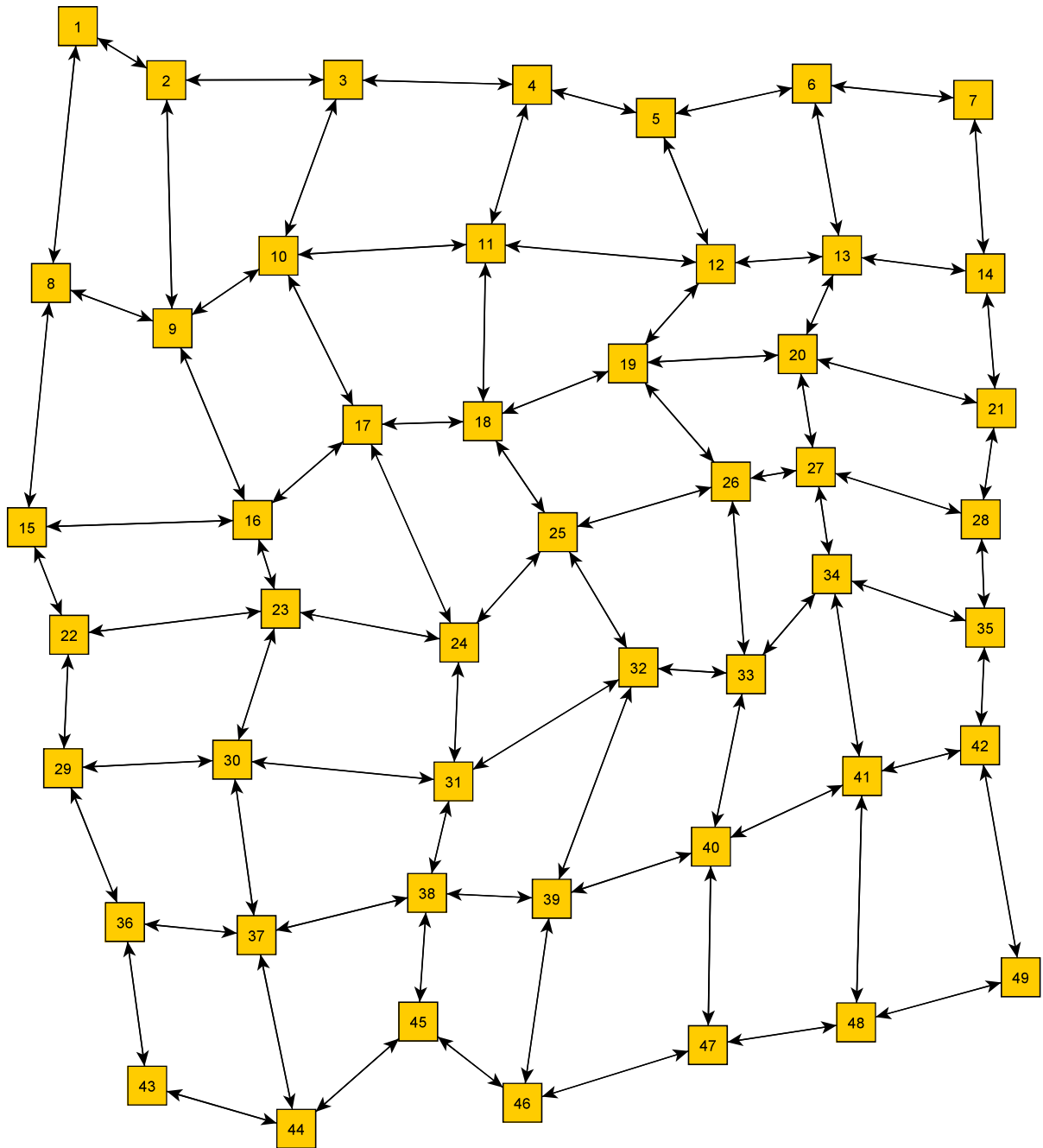


Figura 24 – Grafo com 49 nós e arestas sem pesos

6.1 Modelos de Referência para a Comparação de Resultados

A matriz metropolitana utilizada para realização dos testes foi criada exclusivamente para essa pesquisa. Pelo fato da geometria da rede utilizada ser simétrica, ao observar a rede já organizada é possível encontrar soluções de maneira semi-empírica de forma ligeiramente simples quando o sistema é pequeno. As soluções chamadas de semi-empíricas são soluções encontradas com a distribuição visual dos divisores na região metropolitana, e o custo

é calculado pelo programa, onde o mesmo seleciona os caminhos percorridos pela fibra obedecendo as limitações do problema. Devido à distribuição semi-empírica ser visual é ligeiramente simples quando a região metropolitana é pequena, porém bastante complicada com o aumento da região metropolitana, sendo assim foi utilizada a extrapolação dos resultados de menor dimensão para obter uma estimativa de custo para regiões maiores.

As soluções encontradas de maneira semi-empírica não necessariamente são as soluções ótimas para o problema de alocação de divisores, porém podem produzir boas soluções, dito isso, doze modelos foram feitas a partir da região metropolitana com 64 e 256 ONUs, onde estão apresentadas na Figura 25. Cada modelo tem disponível apenas um tipo de divisor óptico para alocação, tendo como resultados os valores presentes nas Tabelas 10 e 11. Dentre os melhores resultados existem aqueles que foram o melhor entre cada iteração ou tipo de sistema apresentado, onde estes serão mostrados em negrito em cada tabela, padrão este que se manterá por em todas as tabelas de resultados deste tipo.

Tabela 10 – Resultados dos 6 modelos de referências para grafos com 64 ONUs

Resultados dos Modelos Base de Comparação (64 ONUs)			
Modelo	Divisores Ópticos	Custo de Projeto	
		Aresta com 40 metros	Aresta com 500 metros
a)	1 x (1:64)	\$ 170.159,00	\$ 284.975,00
b)	2 x (1:32)	\$ 168.508,00	\$ 262.900,00
c)	4 x (1:16)	\$ 167.268,00	\$ 245.100,00
d)	8 x (1:8)	\$ 167.136,00	\$ 240.000,00
e)	16 x (1:4)	\$ 166.192,00	\$ 223.600,00
f)	32 x (1:2)	\$ 167.936,00	\$ 240.800,00

Tabela 11 – Resultados dos 6 modelos de referências para grafos com 256 ONUs

Resultados dos Modelos Base de Comparação (256 ONUs)			
Modelo	Divisores Ópticos	Custo de Projeto	
		Aresta com 40 metros	Aresta com 500 metros
a)	4 x (1:64)	\$ 686.252,00	\$ 1.204.400,00
b)	8 x (1:32)	\$ 685.744,00	\$ 1.162.300,00
c)	16 x (1:16)	\$ 673.812,00	\$ 1.040.400,00
d)	32 x (1:8)	\$ 673.536,00	\$ 1.022.400,00
e)	64 x (1:4)	\$ 673.216,00	\$ 1.000.000,00
f)	128 x (1:2)	\$ 690.416,00	\$ 1.196.600,00

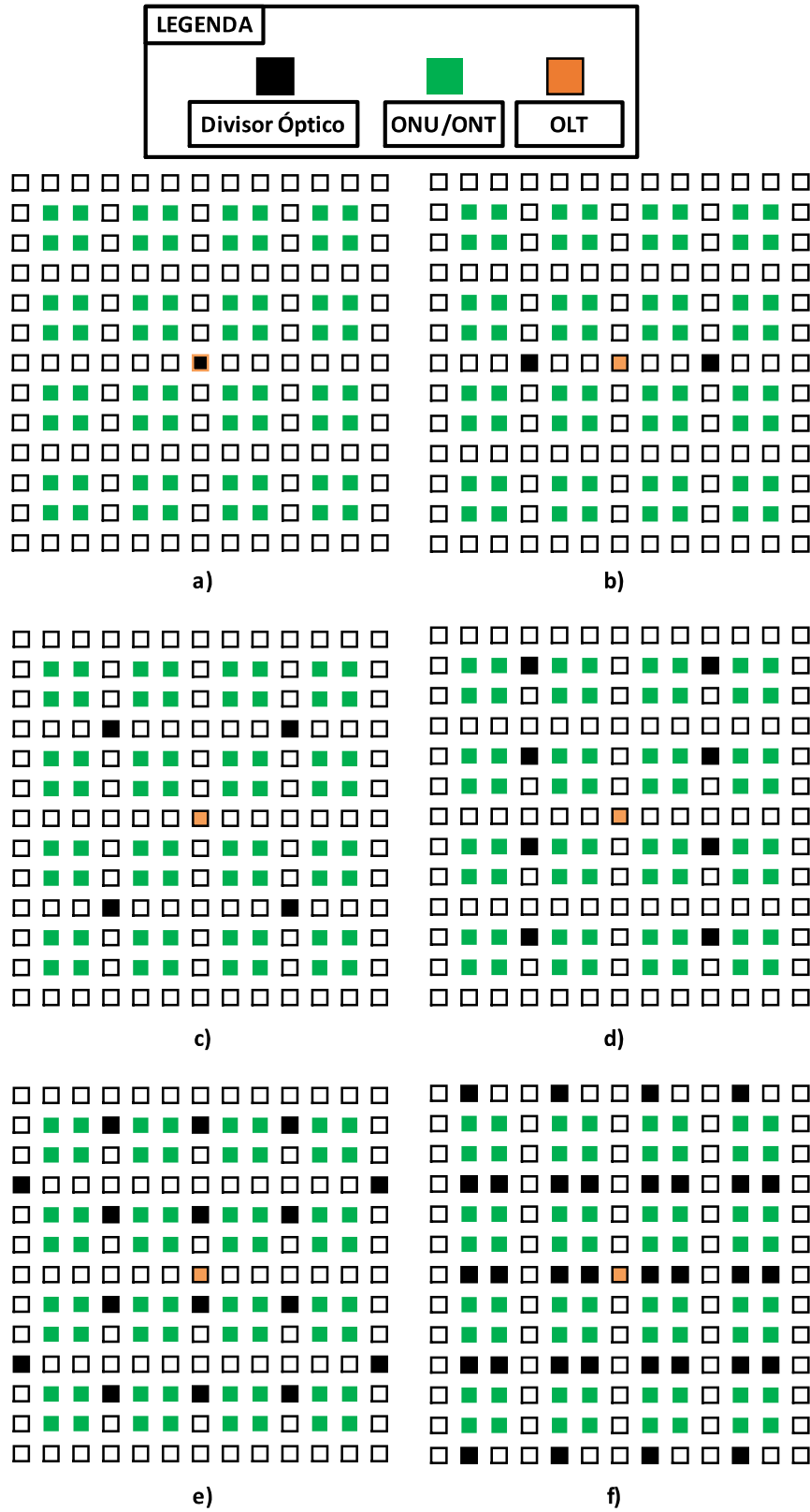


Figura 25 – Regiões metropolitanas criadas como modelos de referência.

6.2 Resultados para Sistemas de arestas de 500 m Usando as Metaheurísticas Propostas

Para os sistemas com 500 metros entre nós adjacentes, o planejamento da rede foi feito pensando em uma rede FTTN, onde o enlace até os usuários finais podem ser utilizados cabos metálicos. Para os casos FTTN foram utilizados sistemas com 64, 256 e 400 ONUs, que tem seus resultados representados nas Tabelas 12, 13, 14 e o desempenho da otimização do melhor desses indivíduos através das Figuras 26, 27 e 28.

Tabela 12 – Resultados para 64 ONUs para regiões simétricas com as arestas de 500 m

64 ONUs, Simetria e 500 m			
Simulação	Tempo	Custo Inicial	Melhor Custo
AGM			
#1	35 Seg.	\$ 268.137,50	\$ 239.675,00
#2	28 Seg.	\$ 267.425,00	\$ 239.075,00
#3	22 Seg.	\$ 262.050,00	\$ 240.450,00
DE			
#1	28 Seg.	\$ 327.697,65	\$ 254.900,00
#2	29 Seg.	\$ 291.050,00	\$ 254.900,00
#3	28 Seg.	\$ 265.200,00	\$ 260.900,00

Curva de Otimização para 64 ONUs

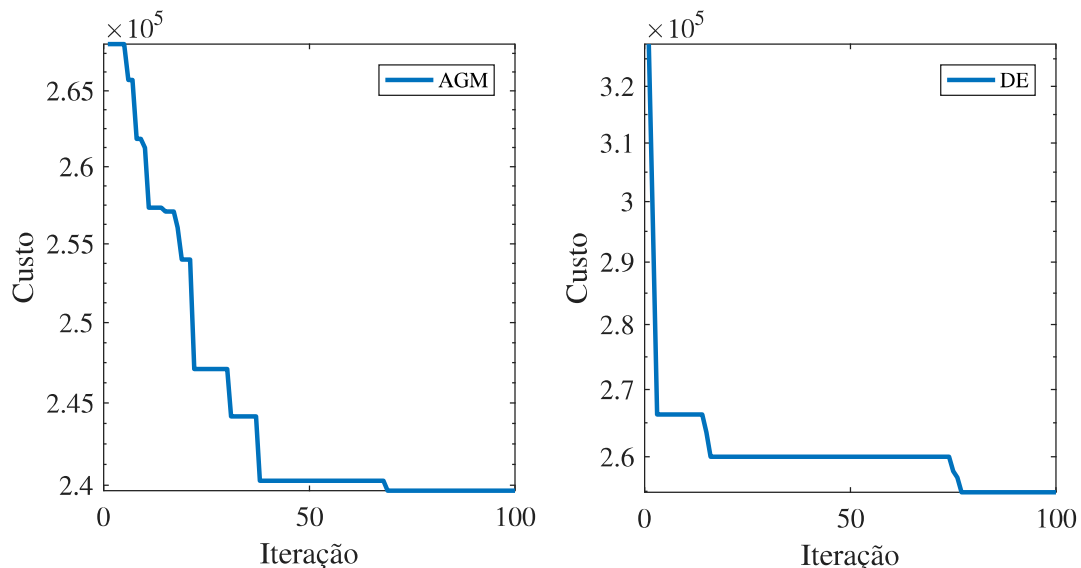


Figura 26 – Curvas de otimização do AGM e DE para 64 ONUs com simetria e arestas de 500 m

Tabela 13 – Resultados para 256 ONUs

256 ONUs			
Simulação	Tempo	Custo Inicial	Melhor Custo
AGM			
#1	3 Min. 59 Seg.	\$ 1.270.393,75	\$ 1.136.625,00
#2	4 Min. 43 Seg.	\$ 1.167.225,00	\$ 1.110.359,37
#3	4 Min. 29 Seg.	\$ 1.133.600,00	\$ 1.058.834,37
DE			
#1	6 Min. 28 Seg.	\$ 1.466.819,53	\$ 1.174.425,00
#2	6 Min. 24 Seg.	\$ 1.379.436,71	\$ 1.201.350,00
#3	6 Min. 19 Seg.	\$ 1.370.218,75	\$ 1.198.734,37

Curva de Otimização para 256 ONUs

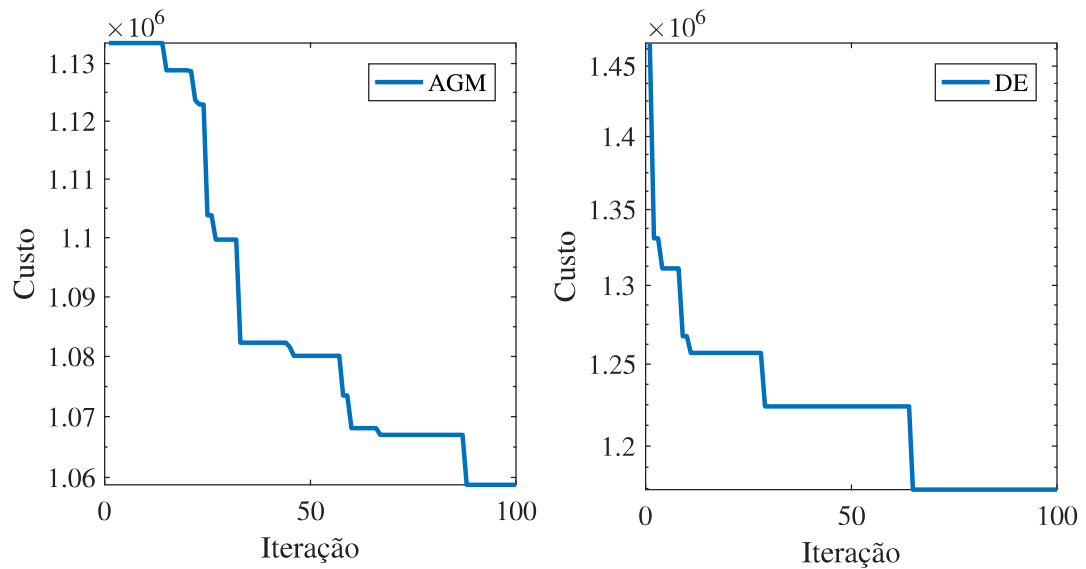


Figura 27 – Curvas de otimização do AGM e DE para 256 ONUs

Tabela 14 – Resultados para 400 ONUs

400 ONUs			
Simulação	Tempo	Custo Inicial	Melhor Custo
AGM			
#1	12 Min. 4 Seg.	\$ 1.994.143,75	\$ 1.761.175,00
#2	10 Min. 11 Seg.	\$ 1.999.475,00	\$ 1.763.225,00
#3	10 Min. 25 Seg.	\$ 1.948.900,00	\$ 1.799.250,00
DE			
#1	15 Min. 44 Seg.	\$ 2.134.258,59	\$ 1.990.359,37
#2	15 Min. 43 Seg.	\$ 2.240.143,75	\$ 2.024.331,25
#3	16 Min. 34 Seg.	\$ 2.080.565,62	\$ 1.976.078,12

Curva de Otimização para 400 ONUs

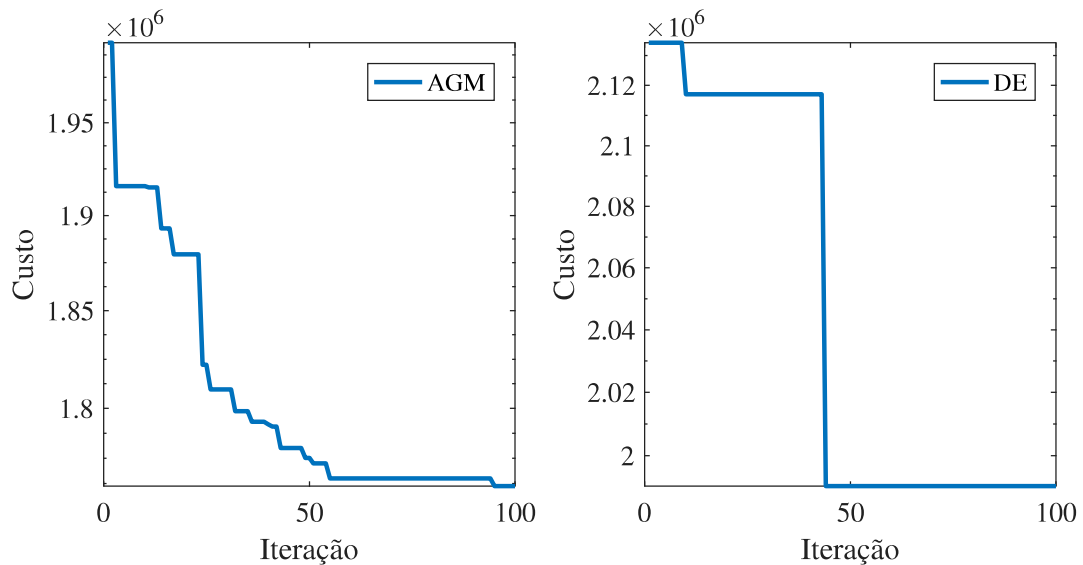


Figura 28 – Curvas de otimização do AGM e DE para 400 ONUs

Como pode ser observado, o desempenho em relação ao custo, o AGM é melhor para as 3 regiões metropolitanas simétricas no modelo FTTN, que possui arestas de 500 metros. A porcentagem média de custo em que o AGM foi superior ao DE é de 6,68%, 7,51% e 11,13% para 64, 256 e 400 ONUs, respectivamente, e ao realizar a comparação dos melhores resultados encontrados por cada metaheurística, essa diferença vai para 6,20%, 9,84% e 10,87%.

A comparação entre os modelos de referência e as metaheurísticas serão feitos utilizando-se apenas os melhores resultados de cada simulação. Os modelos de referência usados obtiveram um menor custo de \$223.600,00 para 64 ONUs e \$1.000.000,00 para 256 ONUs, que são os casos que utilizam divisores de 1 : 4.

Na comparação de custo das simulações realizadas e os modelos de referência, tanto o AGM quanto o DE obtiveram resultados razoáveis, com destaque para o AGM, pelo qual obteve um custo apenas 6,47% e 5,55% pior para 64 e 256 ONUs, respectivamente, enquanto o DE obteve um custo 12,27% e 14,85% pior.

Em relação ao tempo de processamento, para o caso com 64 ONUs as duas metaheurísticas obtiveram o mesmo tempo médio de processamento. Para os casos com 256 e 400 ONUs quem se saiu melhor foi o AGM, com um tempo médio menor em 31,27% e 31,96%. Os tempos de processamento foram bons para as dimensões até aqui simuladas, demorando poucos segundos para o menor caso.

6.3 Resultados para Sistemas de arestas de 40 m Usando as Metaheurísticas Propostas

Para regiões metropolitanas com maior quantidade de ONUs foi decidido executar o planejamento da rede por FTTHs, levando assim a fibra até o usuário final. Com o aumento na quantidade de ONUs a serem atendidos assumiu-se a distância de 40 metros nas arestas do grafo para esse primeiro caso, representando as distâncias padrões de postes de uma rede de distribuição de energia elétrica (CEMIG 2014). Com esses novos parâmetros de distâncias, a região metropolitana é mais densa em quantidade de ONUs do que as representadas nas regiões metropolitanas anteriores. Os resultados para 676, 1024 e 1600 ONUs, estão representados nas Tabelas 15, 16, 17 e as curvas de otimização estão demonstradas nas Figuras 29, 30 e 31.

Tabela 15 – Resultados para 676 ONUs

676 ONUs			
Simulação	Tempo	Custo Inicial	Melhor Custo
AGM			
#1	34 Min. 55 Seg.	\$ 1.852.151,00	\$ 1.820.718,00
#2	38 Min. 52 Seg.	\$ 1.853.961,00	\$ 1.817.212,00
#3	38 Min. 20 Seg.	\$ 1.852.603,00	\$ 1.824.922,00
DE			
#1	46 Min. 48 Seg.	\$ 1.967.478,87	\$ 1.856.624,62
#2	52 Min. 13 Seg.	\$ 1.896.322,12	\$1.848.664,62
#3	48 Min. 31 Seg.	\$ 1.969.080,00	\$ 1.854.814,00

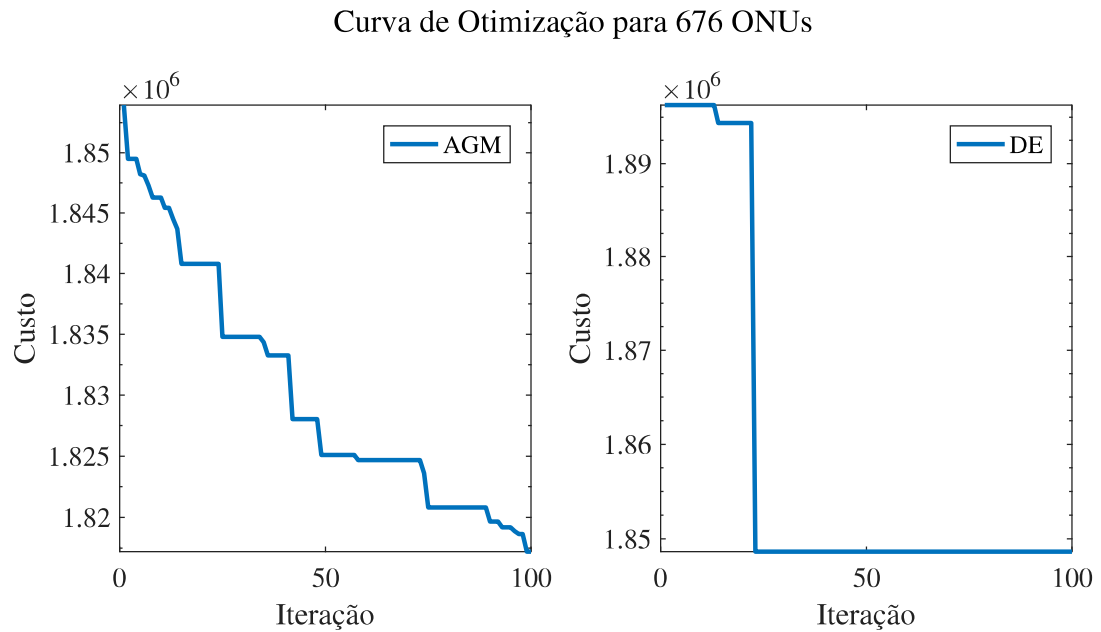


Figura 29 – Curvas de otimização do AGM e DE para 676 ONUs

Tabela 16 – Resultados para 1024 ONUs

1024 ONUs			
Simulação	Tempo	Custo Inicial	Melhor Custo
AGM			
#1	2 H. 5 Min. 58 Seg.	\$ 2.794.335,00	\$ 2.774.728,00
#2	2 H. 16 Min. 28 Seg.	\$ 2.831.720,00	\$ 2.767.945,00
#3	1 H. 53 Min. 37 Seg.	\$ 2.825.981,00	\$ 2.771.374,00
DE			
#1	2 H. 22 Min. 42 Seg.	\$ 2.891.527,12	\$ 2.866.843,00
#2	2 H. 59 Min. 58 Seg.	\$ 3.019.244,87	\$ 2.841.507,25
#3	2 H. 21 Min. 6 Seg.	\$ 2.953.419,53	\$ 2.846.556,00

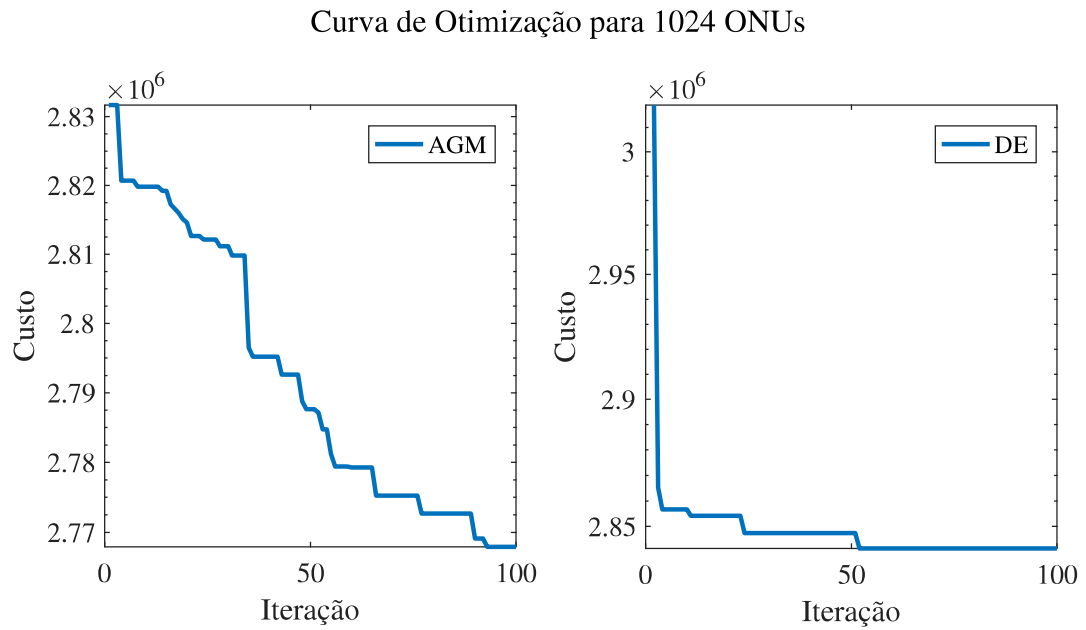


Figura 30 – Curvas de otimização do AGM e DE para 1024 ONUs

Tabela 17 – Resultados para 1600 ONUs

1600 ONUs			
Simulação	Tempo	Custo Inicial	Melhor Custo
AGM			
#1	6 H. 26 Min. 53 Seg.	\$ 4.428.287,50	\$ 4.349.761,00
#2	5 H. 29 Min. 17 Seg.	\$ 4.433.402,00	\$ 4.354.558,00
#3	6 H. 56 Min. 31 Seg.	\$ 4.412.874,00	\$ 4.332.041,00
DE			
#1	9 H. 33 Min. 46 Seg.	\$ 4.588.350,75	\$ 4.478.063,00
#2	9 H. 20 Min. 4 Seg.	\$ 4.662.976,43	\$ 4.494.840,75
#3	7 H. 12 Min. 45 Seg.	\$ 4.594.005,00	\$ 4.506.737,06

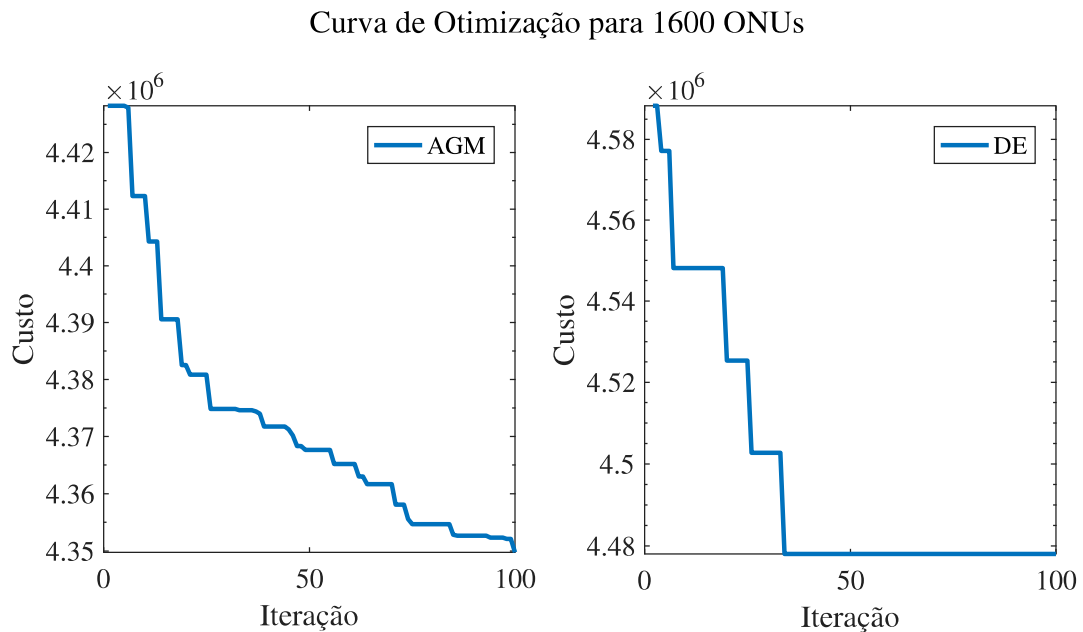


Figura 31 – Curvas de otimização do AGM e DE para 1600 ONUs

Em relação as simulações do planejamento de regiões metropolitanas para redes FTTH, o AGM continuou obtendo melhores resultados quando comparado ao DE, alcançando em média, um custo 1,74%, 2,81% e 3,28% menor para 676, 1024 e 1600 ONUs, respectivamente. O tempo de processamento também continuou sendo melhor para o AGM, em média cerca de 24,00%, 18,91%, 27,69% melhor.

6.4 Evolução do Custo do Projeto com o Crescimento da Rede

Com todas as simulações realizadas de todos os modelos de regiões metropolitanas, foi possível traçar uma curva de interpolação como o objetivo de obter a curva de tendência de custo. As Figuras 32 e 33 apresentam as curvas de tendência para o custo de projeto das redes FTTN e FTTH, enquanto que a curva do tempo de processamento é demonstrada na Figura 34. Nas Figuras 32 e 33 as curvas de custos dos modelos de referência foi necessário fazer uma extrapolação de custo para sistemas acima de 256 ONUs.

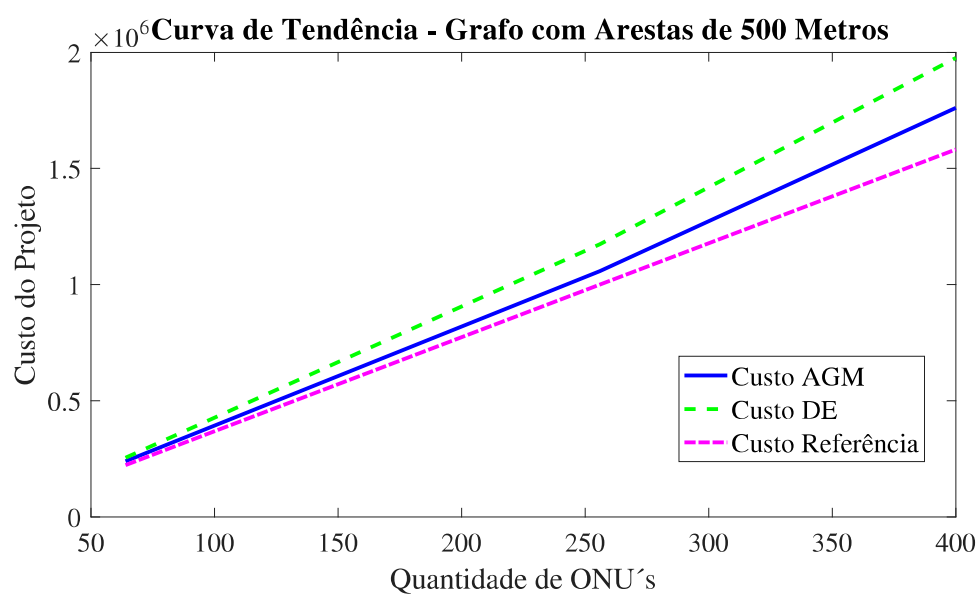


Figura 32 – Curva de tendência para região metropolitana com 500 metros nas arestas.

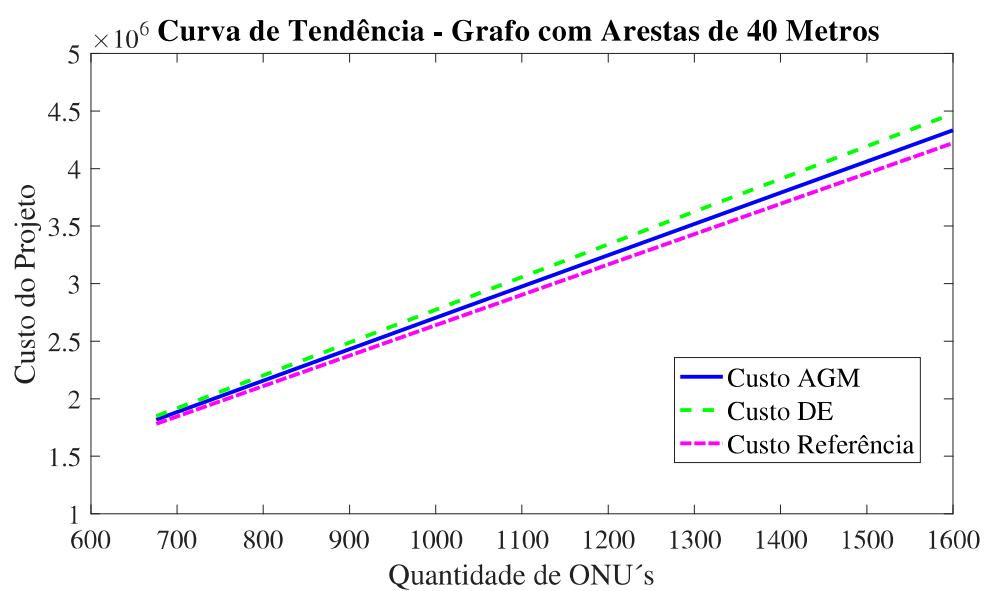


Figura 33 – Curva de tendência para região metropolitana com 40 metros nas arestas.

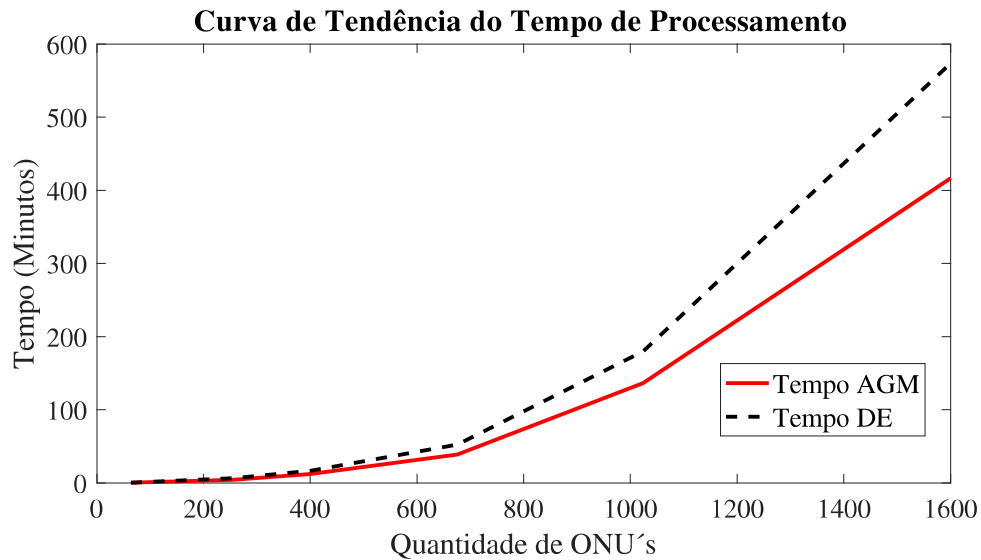


Figura 34 – Curva de tendência do tempo de processamento para regiões metropolitanas simétricas.

As duas metaheurísticas obtiveram resultados satisfatórios da evolução dos custos, com o aumento na quantidade de ONUs. Em relação ao aumento exponencial no tempo computacional, se deve ao fato do aumento do tamanho das instâncias dos grafos utilizados, visto que o limite da capacidade de memória ou processamento da máquina não foi saturada. Na Tabela 18 estão apresentadas a distribuição pelo tamanho de divisores e as sobras de saídas desses divisores para as simulações que obtiveram o menor custo.

Tabela 18 – Quantidade de divisores e sobras de saídas de divisores

	ONUs	Melhor Resultado	Quantidade de Divisores						Sobras de Saída de Divisores
			1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	
AGM	64	\$ 239.075,00	2	3	2	2	0	0	0
	256	\$ 1.058.834,37	13	8	9	8	0	0	2
	400	\$ 1.761.175,00	16	20	14	7	2	0	0
	676	\$ 1.817.212,00	14	22	14	14	3	2	0
	1024	\$ 2.767.945,00	42	35	20	12	6	4	0
	1600	\$ 4.332.041,00	48	34	37	25	13	4	0
DE	64	\$ 254.900,00	0	0	0	2	1	0	0
	256	\$ 1.174.425,00	0	0	6	7	3	0	0
	400	\$ 1.976.078,12	3	2	5	18	0	1	6
	676	\$ 1.848.664,62	9	7	9	5	7	4	2
	1024	\$ 2.841.507,25	4	11	6	6	8	9	4
	1600	\$ 4.478.063,00	10	17	19	15	9	13	0

Os resultados da distribuição randômica de poisson na geração inicial do AGM pode ser observada ao analisar os valores de custo inicial do AGM em relação ao DE, ocasionando

assim na melhoria de 9,81%, 7,33%, 10,39%, 1,72%, 1,62% e 1,69% do custo inicial em relação ao custo ótimo encontrado, para respectivamente, 64, 256, 400, 1024 e 1600 ONUs, comparada com os 12,08%, 15,11%, 7,13%, 4,65%, 1,49% e 0,63% do DE, proporcionando assim um trabalho a mais de desempenho da metaheurística para chegar a um valor ótimo para o sistema apresentado.

Para também comprovar a eficácia da distribuição randômica de poisson, utilizada na geração inicial do AGM, pode-se observar a distribuição dos divisores ópticos na Tabela 18 com um aumento gradual dos divisores menores e a utilização de divisores de maior capacidade com o aumento de ONUs. Já para o DE, a distribuição da utilização dos divisores é bastante aleatória, com a utilização de divisores de menor ou maior capacidade sem relação com o crescimento na quantidade de ONUs.

A representação das regiões metropolitanas de forma clara em imagens não são possíveis para sistemas com uma elevada quantidade de ONUs devido ao tamanho dos grafos. Assim sendo, neste trabalho será apresentado uma imagem da organização do sistema com 256 ONUs através das Figuras 35, 36 e 37 que representam, respectivamente, a metaheurística AGM, DE e o modelo de referência, com as representações das OLTs, ONUs e divisores ópticos.

Ao observar a região metropolitana das Figuras 35 e 36, algo que deve ser destacado é a maior quantidade de divisores ópticos da região metropolitana do AGM, no qual existem 22 divisores a mais do que na região metropolitana projetada pelo DE. Além da diferença na quantidade de divisores, o AGM necessitou de 3 OLTs devido a sobra de 2 saídas de divisores, sofrendo uma penalização de custo pelas sobras, porém a utilização de uma OLT a mais influenciaram positivamente no custo do projeto, levando a um custo melhor que o DE, mesmo com as penalizações aplicadas ao sistema projetado pelo AGM.

A diferença na quantidade de divisores entre os 3 modelos é perceptível, mostrando que uma alocação distribuída dos divisores é eficiente. A Figura 37 mostra a região metropolitana com divisores 1 : 4, que é o melhor resultado para 256 ONUs do modelo de referência (Tabela 11). Através desse resultado é possível perceber que projetos de sistemas de regiões metropolitanas simétricas tendem a distribuições de divisores de forma geometricamente simétrica, que é uma conclusão um tanto óbvia. Porém, dado que o resultado do AGM para essa mesma região metropolitana foi apenas 5% pior, acredita-se que essa diferença possa ser diluída adequando pequenos erros locais que o AGM não foi capaz de resolver, como a proximidade de divisores de 2 saídas, que poderiam ser substituídos por um divisor de 4 saídas, ou a proximidade de divisores de alta capacidade (64 saídas) das OLTs, podendo levar a um resultado melhor que o modelo de referência.

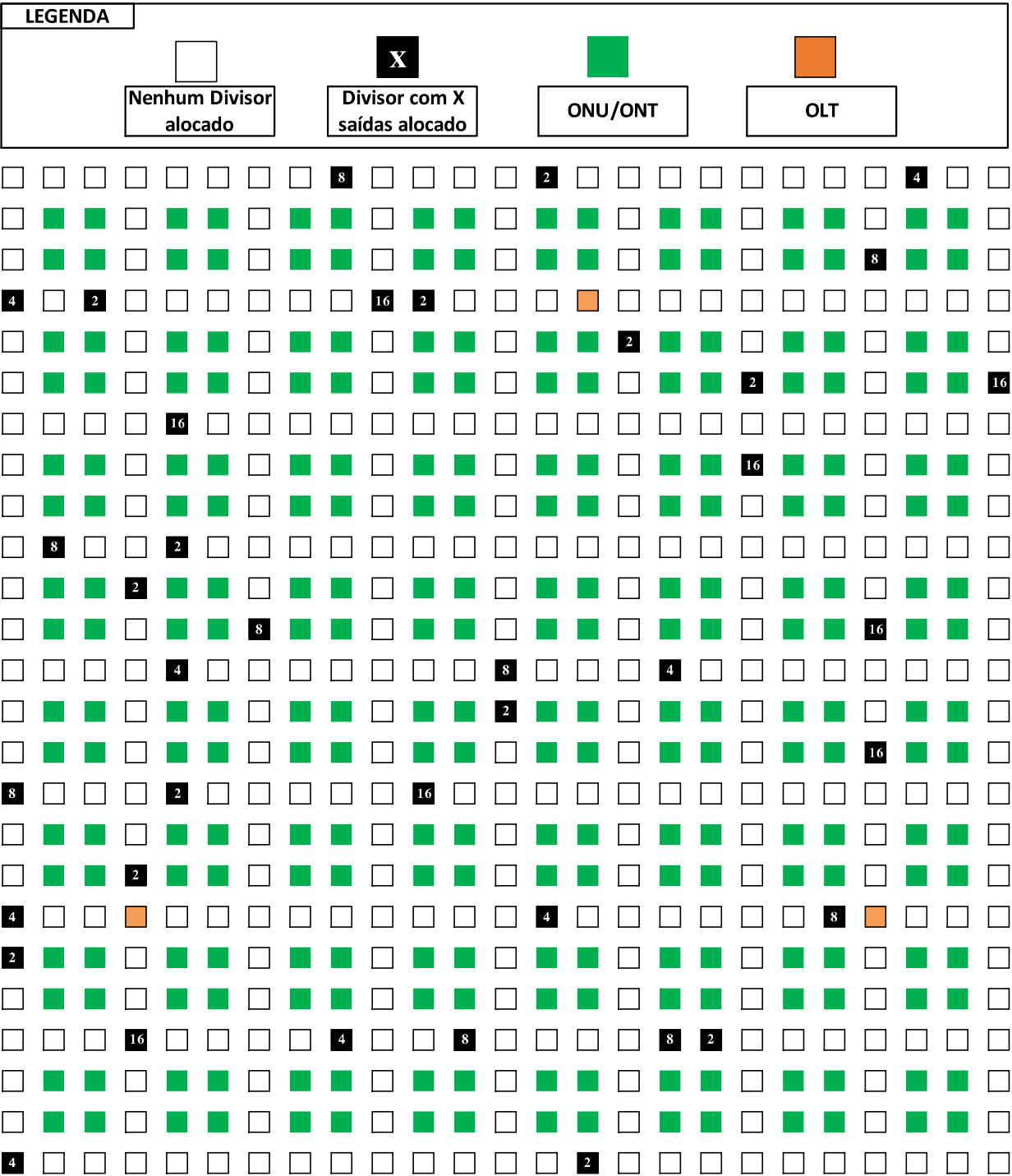


Figura 35 – Região metropolitana com 256 ONUs gerada pelo AGM

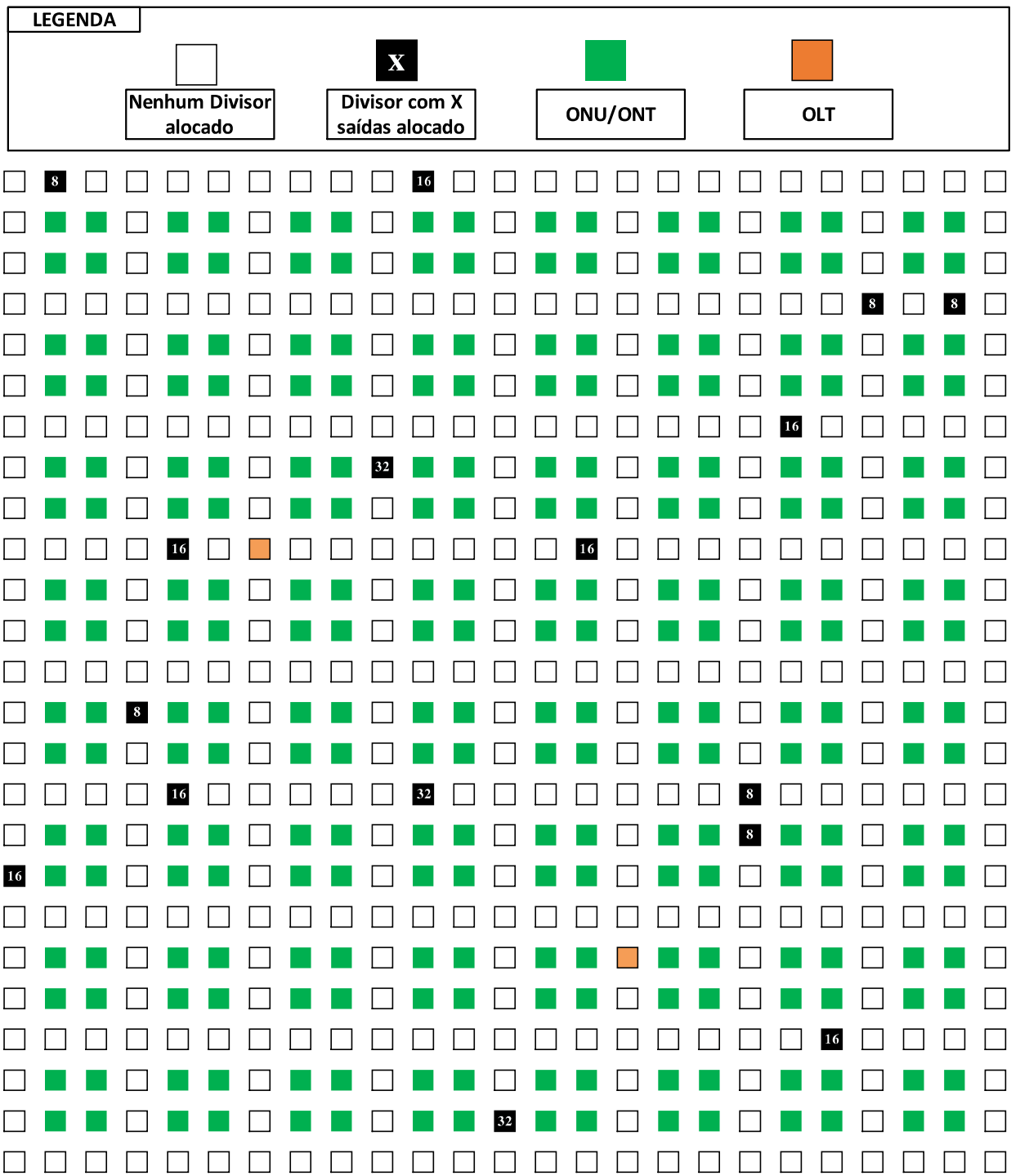


Figura 36 – Região metropolitana com 256 ONUs gerada pelo DE

6.5 Projetos de Redes em Grafos de Arestas Variadas e Grafos Planares Aleatórios

Com a eficácia dos algoritmos evidenciada nas seções anteriores, será mostrado agora a aplicação em regiões metropolitanas representadas por grafos ponderados de arestas variadas, representando assim de forma mais fiel uma região metropolitana real, com as distâncias entre postes variando de 30 a 50 metros, variação essa em torno da distância de 40 metros que é a distância média entre postes de uma região metropolitana (CEMIG 2014). Na Figura 38 está representada as diferenças entre os grafos planares aleatórios de arestas variadas e grafos simétricos de arestas variadas.

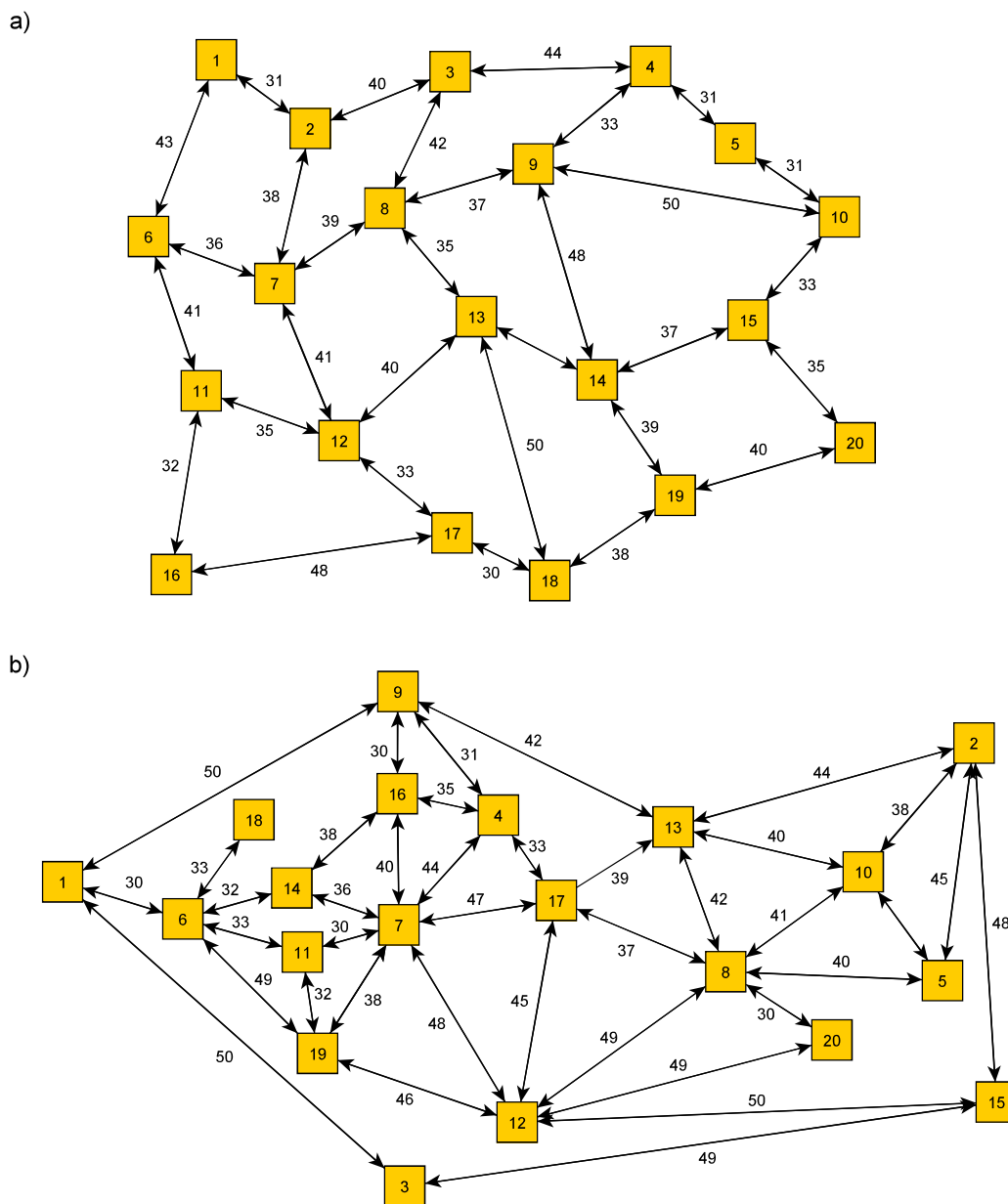


Figura 38 – Comparação de distribuição física entre a) grafo simétrico de arestas variadas e b) grafo planar aleatório de arestas variadas.

Foram realizados pelo AGM os planejamentos de redes com 16, 64, 256, 676 e 1600 ONUs. As redes também foram planejadas de forma semi-empírica para obtenção de modelos de referência para os resultados, e a partir dos mesmos realizar a extrapolação para prever o custo para redes maiores. Para os casos a partir daqui apresentados, será utilizado apenas o AGM devido ao seu melhor desempenho nos casos anteriores.

Na Figura 39 é mostrada a curva de desempenho do AGM, mostrando com isso que o algoritmo continua trabalhando de forma semelhante aos modelos de grafos anteriores. Através da Tabela 19 o melhor dos 3 resultados de cada dimensão de rede está sendo apresentada com os custos e a distribuição dos divisores de acordo com o tamanho do divisor.

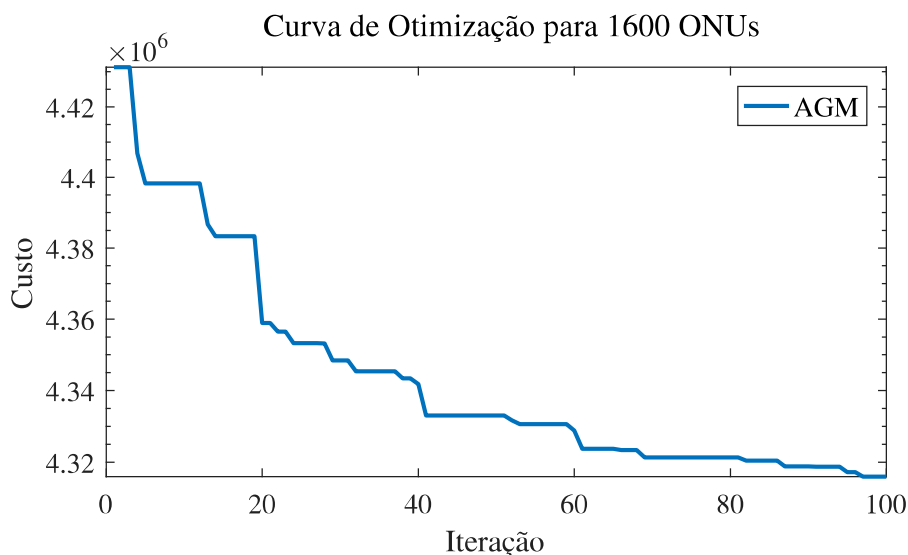


Figura 39 – Curva de otimização do AGM para 1600 ONUs em grafo simétrico.

Tabela 19 – Quantidade de divisores e sobras de saídas de divisores para o caso dos grafos simétricos.

	ONUs	Melhor Resultado	Quantidade de Divisores						Sobras de Saída de Divisores
			1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	
AGM	16	\$ 41.367,20	0	2	1	0	0	0	0
	64	\$ 166.877,00	2	3	4	1	0	0	0
	256	\$ 677.146,60	4	2	8	7	2	0	0
	676	\$ 1.806.607,80	20	25	15	18	2	1	0
	1600	\$ 4.315.982,60	60	34	32	24	12	5	0

Foram feitas regiões metropolitanas otimizadas de forma semi-empírica usando modelos de referência dos sistemas com 16, 64 e 256 ONUs. No projeto desses sistemas foram utilizados somente os divisores de 4 saídas pelo fato dos resultados das redes anteriores (grafos de arestas iguais) terem obtidos os melhores resultados na utilização desses divisores de potência.

Na Tabela 20 estão os resultados das redes planares com 16, 64 e 256 ONUs, onde pode-se observar um custo maior de todos os sistemas em relação aos resultados obtidos pelo AGM apresentados na Tabela 19.

Tabela 20 – Modelo de projeto realizado manualmente no grafo de arestas variadas com 16 e 64 e 256 ONUs para ser utilizado de comparação dos resultados.

Resultados dos modelos de referência utilizando grafos simétricos de arestas variadas		
Quantidade de ONUs	Divisores Ópticos	Custo de Projeto
16	4 x (1:4)	\$ 41.525,00
64	16 x (1:4)	\$ 168.910,00
256	64 x (1:4)	\$ 683.770,00

O desempenho do AGM se mostrou superior ao gerado de forma semi-empírica, com um custo médio de cerca de 1% melhor. Na Figura 40 está representado a curva de desempenho de custo do AGM e da extrapolação realizada para o custo do planejamento semi-empírico.

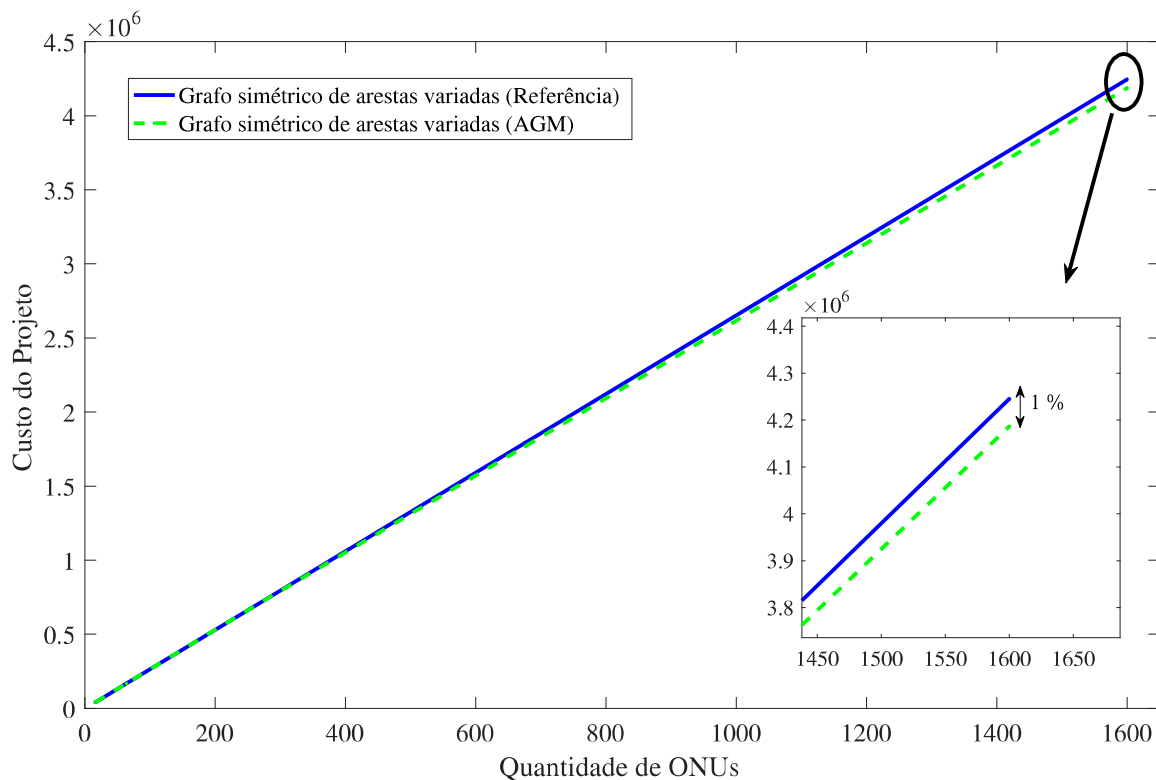


Figura 40 – Curva de tendência de custo para região metropolitana com grafo planar simétrico.

Após os testes realizados com as redes simétricas com arestas variadas, foram criados grafos planares totalmente aleatórios com arestas que também variam entre 30 m e 50 m para uma representação fidedigna de regiões não planejadas como da Figura 11. Esta variação de distância mantém uma média de 40 metros entre postes do sistema de distribuição de energia elétrica, porém cria regiões com maior nível de complexidade no quesito planejamento eficiente da rede PON, por se tratar de grafos aleatórios. Foram comparados na Figura 41 os custos dos projetos de referência e os gerados pelo AGM para redes aleatórias de arestas variadas, onde os resultados também estão presentes na Tabela 21. Nesse caso, para o AGM foram realizados testes com sistemas com 16 e 64 ONUs, e a partir dessa quantidade foi realizada a mesma extrapolação do modelo de referência.

Tabela 21 – Resultados gerados pelo AGM e pelo modelo de referência para redes aleatórias de arestas variadas.

ONUs	AGM	Modelo de Referência
16	\$ 41.134,00	\$ 41.460,00
64	\$ 166.025,00	\$ 168.600,00
256	\$ 665.600,00	\$ 677.100,00
1600	\$ 4.163.000,00	\$ 4.243.000,00

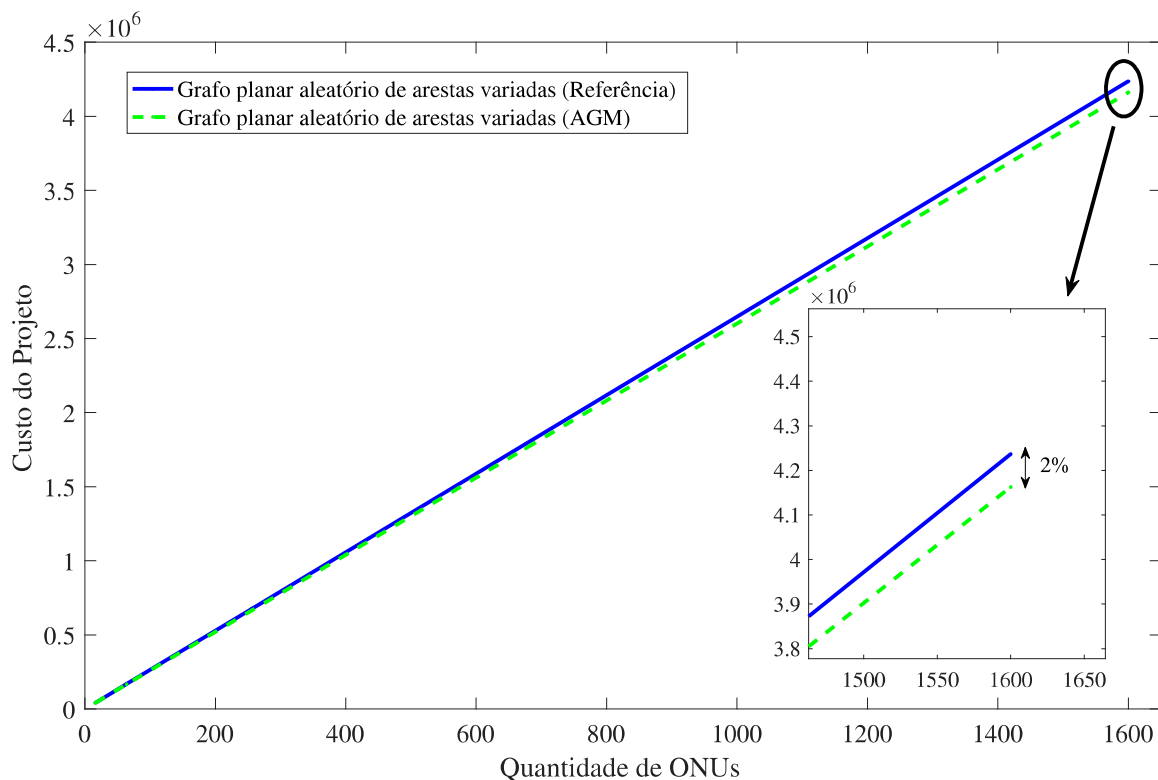


Figura 41 – Curva de tendência de custo para região metropolitana com grafo planar aleatório.

Para essas últimas redes, o AGM obteve um resultado cerca de 2% melhor que os modelos de referência, representando um custo aproximadamente \$80.000,00 menor no sistema com

1600 ONUs. Os resultados obtidos por essas redes se mostram como os mais promissores, dado que uma rede tende a ser bastante parecida com as criadas como redes aleatórias com grafos planares de arestas variadas, como a representada na Figura 11, do que redes mais simétricas como da Figura 10.

Em relação à tempo computacional, o AGM levou o mesmo tempo de 6 segundos para o menor sistema do dois casos de arestas variadas. Para caso de 1600 ONUs, projetado no sistema de grafo não aleatório de arestas variadas, o AGM levou 5 horas, 25 minutos e 57 segundos, levando aproximadamente 4 minutos a menos que para a rede de arestas iguais, sendo essa diferença irrisória e mostrando que para o algoritmo é indiferente o formato da rede para o tempo de processamento.

Na Figura 42 está representado o melhor resultado no modelo com 16 ONUs de grafo não aleatório de arestas variadas, onde os nós com a coloração verde são os ONUs, vermelha o divisor óptico, azul a OLT e os demais nós são as possíveis posições de divisores ópticos e OLTs, pelos quais não foram utilizados.

Ao ser observado o comportamento linear dos resultados do AGM, é possível atestar a eficiência da metaheurística frente ao planejamento manual, pelo qual obtém resultados ótimos para tamanhos de rede com um alto nível de complexidade. O planejamento de redes desse tipo torna o auxílio por ferramentas de computação algo importante, não somente pela dificuldade de realização de um planejamento bem feito, mas também pela necessidade de comprovação que o sistema planejado é eficiente.

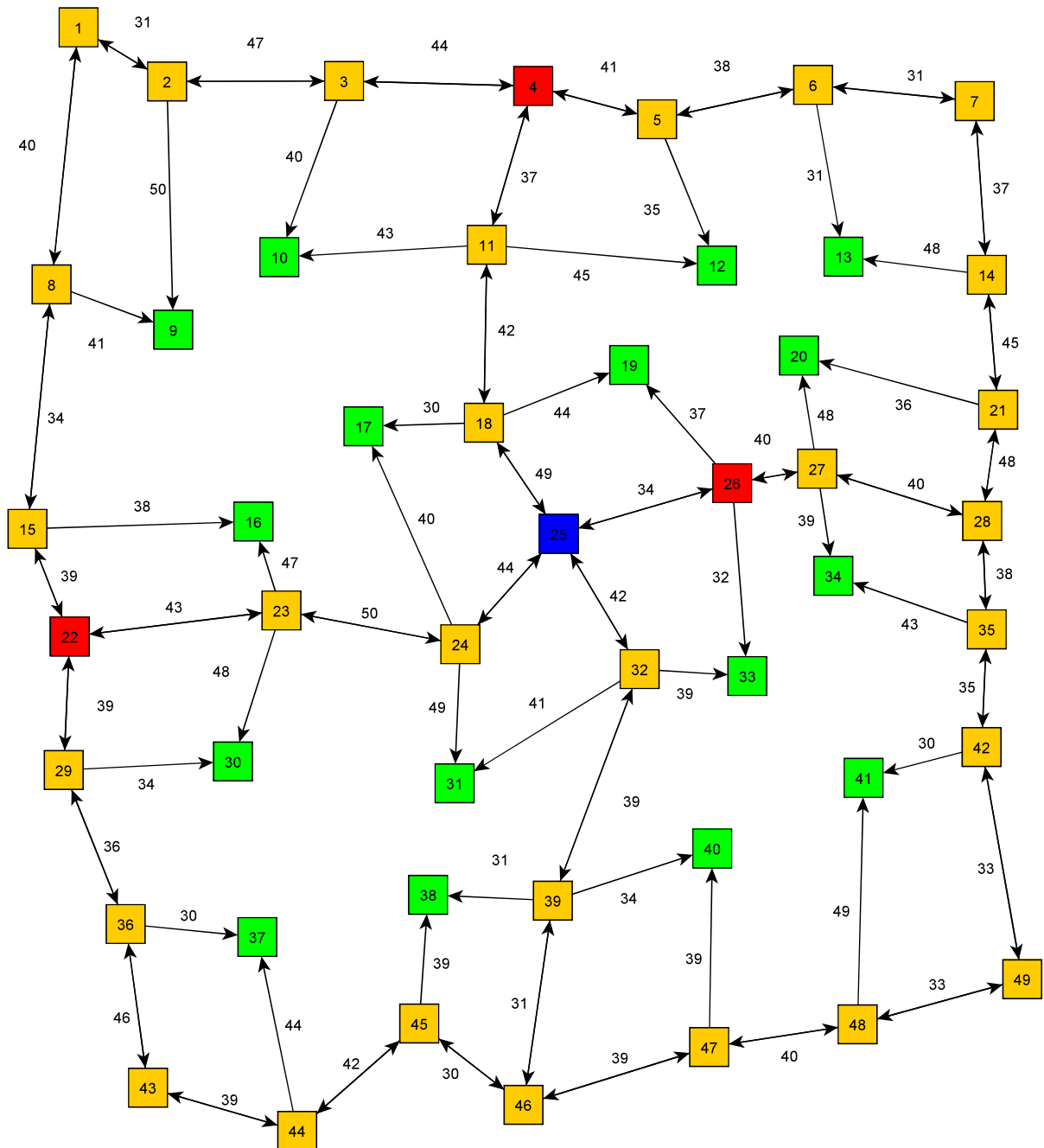


Figura 42 – Grafo ponderado contendo as posições do melhor resultado de projeto feito pelo AGM para 16 ONUs, que são representadas pela coloração verde, o divisor óptico pela cor vermelha e a OLT na cor azul.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram utilizadas metaheurísticas para elaboração de projetos de alocação ótima de OLTs, divisores de potência (*splitters*) e fibras em redes ópticas passivas. Para tal, um algoritmo Genético, também conceituado para a obtenção da solução do problema de alocação de divisores ópticos, bem como um algoritmo diferencial evolutivo, foram adaptados de acordo com as especificações do problema proposto.

Para a minimização dos custos de implantação destas redes, optou-se por modelar o problema em forma de grafo. Os algoritmos desenvolvidos foram testados inicialmente em 6 grafos direcionados e ponderados que representam regiões metropolitanas, onde a quantidade de nós do grafo variam de 169 a 3721. A quantidade de unidades de redes ópticas conectadas se relaciona diretamente ao tamanho da região metropolitana, variando de 64 a 1600 ONUs. O problema de alocação de divisores ópticos foi tratado como um problema de otimização combinatória e foi formulado de forma a atender as limitações intrínsecas de uma rede óptica passiva, tais como o limite de perda do sinal óptico pela distância ou divisões ópticas excessivas.

O AG utilizado nesse problema foi nomeado de Algoritmo Genético Modificado (AGM) pelo fato das alterações em seu processo evolutivo, especificamente para o problema de alocação de divisores ópticos para redes PON. O AGM mostrou-se eficiente ao encontrar boas soluções para o problema de alocação de *splitters* com custo minimizado. A solução inicial foi gerada de forma randômica a partir de uma distribuição de Poisson, priorizando os divisores de menor capacidade, cuja eficiência foi observada a partir de simulações anteriores realizadas no âmbito deste trabalho.

Para o caso dos grafos de arestas iguais, o AGM levou de 28 segundos para atender 64 ONUs e, até 6 horas, 56 minutos e 31 segundos em uma rede PON com 1600 ONUs. Portanto, a solução via AGM mostrou-se mais eficiente do que o diferencial evolutivo que obteve um tempo médio aproximadamente 22% maior. No caso de grafos de arestas variadas foram criados dois modelos, um que mantém uma certa simetria, como no caso dos grafos de arestas iguais, e outro com a disposição dos elementos da rede totalmente aleatória, através de um grafo planar. Em relação ao tempo computacional foi possível verificar que o mesmo é indiferente quanto a mudança de complexidade da rede (grafo de arestas iguais ou variadas e grafos planares aleatórios), havendo mudança no tempo de processamento quando a quantidade de ONUs na rede cresce até atingir 1600.

Para cada tipo de grafo originário de um padrão de rede foram criados manualmente redes para comparação dos resultados, produzindo assim uma estimativa de desempenho dos

algoritmos. Para uma rede simétrica, praticamente impossível de se encontrar em uma região metropolitana real, O AGM novamente mostrou-se mais eficiente do que o algoritmo diferencia evolutivo, obtendo um custo cerca de 5% pior quando comparado com o modelo de referência. Nos resultados de redes mais próximas das reais com arestas não variadas, que representam regiões metropolitanas bem planejadas, o AGM obteve um resultado melhor que as redes de referência, sendo essa a única metaheurística utilizada devido ao seu melhor desempenho na primeira etapa da pesquisa.

Para o planejamento de redes aleatórias utilizando grafos planares de arestas variadas, representando regiões metropolitanas mais semelhantes à realidade da maioria das cidades, obteve-se um custo estimado de \$4.170.000,00 para 1600 ONUs, resultado este proveniente da otimização via AGM. Portanto, o AGM conseguiu reduzir o custo em relação ao modelo de referência em 2%, que representa um custo de aproximadamente 80.000,00.

Como trabalhos futuros, sugere-se uma melhoria no quesito tempo computacional através da proposição de outras metaheurísticas, tais como os baseados em buscas em vizinhanças variáveis, entre outras. Outro fator que pode ser melhorado refere-se à possibilidade do cascadeamento de divisores ópticos, produzindo assim resultados em uma rede mais dinâmica e complexa.

Referências

- ABNT 2005 ABNT. Nbr 15214: Rede de distribuição de energia elétrica - compartilhamento de infra-estrutura com redes de telecomunicações. 2005. Cited 2 times in pages 35 e 38.
- AMPLA 2012 AMPLA. Compartilhamento de infraestrutura de redes de distribuição com redes de telecomunicações. 2012. Cited 2 times in pages 35 e 38.
- Banerjee et al. 2005 BANERJEE, A. et al. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (wdm-pon) technologies for broadband access: a review. *Journal of optical networking*, Optical Society of America, v. 4, n. 11, p. 737–758, 2005. Cited on page. 27.
- Bondy, Murty et al. 1976 BONDY, J. A.; MURTY, U. S. R. et al. *Graph theory with applications*. [S.l.]: Macmillan London, 1976. v. 290. Cited on page. 29.
- Bonilla, Moschim e Barbosa 2009 BONILLA, M. L.; MOSCHIM, E.; BARBOSA, F. R. Estudio comparativo de redes gpon y epon. *Scientia et technica*, Universidad Tecnológica de Pereira, v. 15, n. 41, p. 321–326, 2009. Cited 3 times in pages 25, 26 e 27.
- Bonilla et al. 2008 BONILLA, M. L. et al. Analise critica de plataformas gpon e epon, para aplicação em redes opticas de acesso de alta capacidade. [sn], 2008. Cited on page. 35.
- CEMIG 2014 CEMIG. Manual de distribuição: Projeto de redes de distribuição aéreas urbanas. 2014. Cited 4 times in pages 35, 38, 61 e 71.
- Cormen et al. 2009 CORMEN, T. H. et al. *Introduction to algorithms*. [S.l.]: MIT press, 2009. Cited on page. 31.
- Costa 2019 COSTA, H. D. *Planejamento e Roteamento de Trens Utilizando a Meta-heurística VNS e Técnicas em Grafos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2019. Cited 2 times in pages 29 e 42.
- Coura, Silva e Segatto 2009 COURA, D. J.; SILVA, J. A.; SEGATTO, M. E. A bandwidth scalable ofdm passive optical network for future access network. *Photonic Network Communications*, Springer, v. 18, n. 3, p. 409, 2009. Cited 2 times in pages 16 e 37.
- Cruz 2016 CRUZ, M. A. d. R. S. *Otimização da Alocação de PMUs em Redes Elétricas com Infraestrutura de Comunicações*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2016. Cited on page. 31.
- Dias et al. 2017 DIAS, L. P. et al. Redes ópticas passivas: Uma nova alternativa para as redes locais lan. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 7, n. 2, p. 54–60, 2017. Cited on page. 35.
- Dijkstra 1959 DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. Cited on page. 31.

- Eira, Pedro e Pires 2012 EIRA, A.; PEDRO, J.; PIRES, J. Optimized design of multistage passive optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 4, n. 5, p. 402–411, 2012. Cited 3 times in pages 18, 20 e 38.
- ELETROBRAS 2011 ELETROBRAS. Manual técnico de compartilhamento de infraestrutura. 2011. Cited 2 times in pages 35 e 38.
- ENERGISA 2009 ENERGISA. Norma técnica: Compartilhamento de infraestrutura. 2009. Cited 2 times in pages 35 e 38.
- Evans 2011 EVANS, D. A internet das coisas: como a próxima evolução da internet está mudando tudo. *CISCO IBSG*, 2011. Cited 2 times in pages 8 e 16.
- Feofiloff, Kohayakawa e Wakabayashi 2011 FEOFILOFF, P.; KOHAYAKAWA, Y.; WAKABAYASHI, Y. Uma introdução sucinta à teoria dos grafos. 2011. Cited on page 30.
- Fernandes 2019 FERNANDES, S. R. D. Software para automatização do projetos de redes Ópticas passivas (pon). *Instituto Federal Minas Gerais*, 2019. Cited 2 times in pages 29 e 42.
- Ferreira 2003 FERREIRA, S. C. Redes de fibra óptica e tecnologia da informação: sociedade, espaço e tempo em dimensões on-line. *GEOGRAFIA (Londrina)*, v. 12, n. 1, p. 441–450, 2003. Cited on page 15.
- Filgueiras e Pessoa 2016 FILGUEIRAS, G. G.; PESSOA, C. R. M. Fttth em redes opticas passivas. *Engenharias On-line*, v. 1, n. 2, p. 34–42, 2016. Cited on page 15.
- Fornari 2015 FORNARI, W. R. Tecnologia gpon em redes de fibra Óptica. 2015. Cited 2 times in pages 26 e 27.
- Furukawa 2018 FURUKAWA. Disponível no site <http://www.furukawa.com.br>, acessado em 05/03/2018. 2018. Cited 2 times in pages 37 e 38.
- Garey e Johnson 1977 GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. The rectilinear steiner tree problem is np-complete. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, SIAM, v. 32, n. 4, p. 826–834, 1977. Cited on page 29.
- Goldberg e Holland 1988 GOLDBERG, D. E.; HOLLAND, J. H. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, Springer, v. 3, n. 2, p. 95–99, 1988. Cited on page 43.
- Gorshe e Mandin 2009 GORSHE, S.; MANDIN, J. *Introduction to IEEE 802.3 av 10Gbit/s Ethernet Passive Optical Networks*. [S.l.]: PMC-Sierra, Burnaby, Canada, 2009. Cited on page 27.
- Hajduczenia, Silva e Monteiro 2006 HAJDUCZENIA, M.; SILVA, H. J. da; MONTEIRO, P. P. Epon versus apon and gpon: a detailed performance comparison. *Journal of Optical Networking*, Optical Society of America, v. 5, n. 4, p. 298–319, 2006. Cited on page 25.
- Harboe e Souza 2013 HARBOE, P. B.; SOUZA, J. R. Passive optical network: characteristics, deployment, and perspectives. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 11, n. 4, p. 995–1000, 2013. Cited 3 times in pages 15, 16 e 18.

- IBGE 2016 IBGE, I. Pesquisa nacional por amostra de domicílio-pnad contínua. *Brasília (DF), Trimestral*, 2016. Cited on page. 15.
- IEEE Sept. 7 2004 IEEE. Ieee std 802.3ah – standard for information technology – local and metropolitan area networks – part 3: Cdma/cd access method and physical layer specifications amendment: Media access control parameters, physical layers, and management parameters for subscriber access networks. IEEE, Sept. 7 2004. Cited on page. 37.
- ITU 2000 ITU, G. 983.2: The ont management and control interface specification for atm pon. *ITU-T*, 2000. Cited 3 times in pages 16, 17 e 25.
- ITU 2003 ITU, G. 984.2: Gigabit-capable passive optical networks (gpon): physical media dependent (pmd) layer specification. *ITU-T, March*, 2003. Cited 2 times in pages 17 e 26.
- ITU 2008 ITU, G. 984.1: Gigabit-capable passive optical networks (gpon): General characteristics. *ITU-T, March*, 2008. Cited 7 times in pages 8, 16, 17, 18, 26, 27 e 37.
- ITU 2012 ITU, G. 987: 10-gigabit-capable passive optical network (xg-pon) systems: Definitions, abbreviations and acronyms. *ITU-T*, 2012. Cited 3 times in pages 27, 28 e 37.
- ITU 2013 ITU, G. 989.1: 40-gigabit-capable passive optical networks (ng-pon2): General requirements. *ITU-T*, 2013. Cited 2 times in pages 17 e 28.
- ITU 2015 ITU, G. 9802: Multiple-wavelength passive optical networks (mw-pons). *ITU-T*, 2015. Cited 2 times in pages 17 e 28.
- ITU 2018 ITU, G. 989: Pon transmission technologies above 10 gbit/s per wavelength. *ITU-T*, 2018. Cited 3 times in pages 17, 28 e 37.
- Jaumard e Chowdhury 2011 JAUMARD, B.; CHOWDHURY, R. Location and allocation of switching equipment (splitters/awgs) in a wdm pon network. In: IEEE. *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2011 Proceedings of 20th International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 1–8. Cited 2 times in pages 18 e 20.
- Junior 2018 JUNIOR, E. W. D. S. M. Projeto e execução de rede ftth (fiber to the home) para isp. *REPOSITÓRIO DE RELATÓRIOS-Engenharia Elétrica*, n. 1, 2018. Cited 3 times in pages 18, 20 e 43.
- Keiser 2006 KEISER, G. *FTTX concepts and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. v. 91. Cited on page. 34.
- Keiser 2008 KEISER, G. *Optical fiber communications*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2008. Cited 2 times in pages 22 e 25.
- Kim 2003 KIM, K. S. On the evolution of pon-based ftth solutions. *Information sciences*, Elsevier, v. 149, n. 1-3, p. 21–30, 2003. Cited on page. 16.
- Kokangul e Ari 2011 KOKANGUL, A.; ARI, A. Optimization of passive optical network planning. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 35, n. 7, p. 3345–3354, 2011. Cited on page. 16.

- Kramer e Pesavento 2002 KRAMER, G.; PESAVENTO, G. Ethernet passive optical network (epon): building a next-generation optical access network. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 40, n. 2, p. 66–73, 2002. Cited on page. 15.
- LACERDA 2010 LACERDA, A. S. M. *Proposta de um algoritmo evolucionário nebuloso para solução de problemas de otimização multiobjetivo*. Tese (Doutorado) — Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, 2010. Cited on page. 50.
- Lee, Sorin e Kim 2006 LEE, C.-H.; SORIN, W. V.; KIM, B. Y. Fiber to the home using a pon infrastructure. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 24, n. 12, p. 4568–4583, 2006. Cited 2 times in pages 17 e 34.
- Lin, Lin e Ho 2012 LIN, B.; LIN, L.; HO, P.-H. Cascaded splitter topology optimization in lrpns. In: IEEE. *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2012. p. 3105–3109. Cited on page. 38.
- Marin 2009 MARIN, P. S. *Cabeamento estruturado: desvendando cada passo: do projeto à instalação*. [S.l.]: Ed. Érica, 2009. Cited on page. 23.
- Meza et al. 2013 MEZA, E. B. M. et al. Modelo matemático para o planejamento de redes óticas de telecomunicação: Um enfoque nas redes pon. 2013. Cited 3 times in pages 18, 20 e 38.
- Miller e Childers 2012 MILLER, S.; CHILDERS, D. *Probability and random processes: With applications to signal processing and communications*. [S.l.]: Academic Press, 2012. Cited on page. 44.
- Nunes et al. 2016 NUNES, R. B. et al. Experimental demonstration of a 33.5-gb/s ofdm-based pon with subcarrier pre-emphasis. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 28, n. 8, p. 860–863, 2016. Cited 4 times in pages 16, 22, 28 e 37.
- Oliveira 2017 OLIVEIRA, A. *Alocação Resiliente de Equipamentos BPL para Comunicação em Redes Elétricas de Média Tensão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2017. Cited on page. 43.
- Pereira 2008 PEREIRA, R. J. G. *Fibras Ópticas e WDM*. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Seção: Comunicações Ópticas, 2008. Cited on page. 15.
- Picin O. J. Gimenez 2015 PICIN O. J. GIMENEZ, E. J. C. Rede gpon: Conceito e aplicações. *III SRST – Seminário de Redes e Sistemas de Telecomunicações, Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL*, INATEL, 2015. Cited on page. 16.
- Pinheiro 2017 PINHEIRO, J. *Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2017. Cited on page. 15.
- Prestes 2016 PRESTES, E. Introdução à teoria dos grafos. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informática, Departamento de Informática Teórica, Tech. Rep*, 2016. Cited on page. 29.
- Rocha 2010 ROCHA, H. R. d. O. *Construção de plano de medição para estimação de estados em sistemas de potência via metaheurística*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal Fluminense (UFF), 2010. Cited on page. 53.

- Roland 2012 ROLAND, F. B. Cidade digital: Projeto baseado em tecnologia gpon. *TELECO Inteligência em Telecomunicações*, 2012. Cited 2 times in pages 26 e 35.
- Ruan et al. 2015 RUAN, Y. et al. Measuring enterprise network usage pattern & deploying passive optical lans. In: IEEE. *Integrated Network Management (IM), 2015 IFIP/IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2015. p. 890–893. Cited on page. 23.
- Salgado, Zhao e Inovação 2014 SALGADO, J.; ZHAO, R.; INOVAÇÃO, N. M. P. New ftth-based technologies and applications. *FTTH Council Europe*, Citeseer, 2014. Cited on page. 17.
- Shinohara 2005 SHINOHARA, H. Broadband access in japan: Rapidly growing ftth market. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 43, n. 9, p. 72–78, 2005. Cited on page. 16.
- Silva 2012 SILVA, H. A. da. *Algoritmo de otimização multinível aplicado a problemas de planejamento de redes*. Tese (Doutorado) — Pontifical Catholic University of Paraná, Curitiba, Brazil, 2012. Cited 2 times in pages 29 e 42.
- Storn e Price 1997 STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, Springer, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997. Cited 2 times in pages 50 e 53.
- Szwarcfiter 2018 SZWARCFITER, J. L. *Teoria computacional de grafos: Os algoritmos*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2018. Cited on page. 29.
- Takeuti 2005 TAKEUTI, P. *Projeto e dimensionamento de redes ópticas passivas (PONs)*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005. Cited 3 times in pages 18, 20 e 43.
- Villalba 2009 VILLALBA, T. V. *Distribuição de divisores de potência em redes ópticas passivas utilizando algoritmos genéticos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Cited 5 times in pages 18, 19, 20, 25 e 43.
- Xinsheng 2012 XINSHENG, W. *Insights into NextGeneration PON Evolution*. [S.l.]: ZTE Technologies, 2012. v. 14. Cited on page. 17.
- Zhang et al. 2012 ZHANG, M. et al. A new method for layout optimization of $1 \times n$ optical power splitters. In: IEEE. *2012 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. [S.l.], 2012. p. 1–3. Cited on page. 38.