



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
DEE - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO PEREIRA DIAS

*Otimização de Redes de Acesso PON Utilizando Algoritmos
Genéticos e Análise Técnico-Econômica da Proposta PON-
LAN*

Salvador – Bahia
2018

LEONARDO PEREIRA DIAS

*Otimização de Redes de Acesso PON Utilizando Algoritmos
Genéticos e Análise Técnico-Econômica da Proposta PON-
LAN*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – UFBA, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Processamento e Transmissão da Informação

Orientador: Prof. Dr. Karcus Day Rosário Assis

Salvador – Bahia
2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dias, Leonardo Pereira
Otimização de Redes de Acesso PON Utilizando
Algoritmos Genéticos e Análise Técnico-Econômica da
Proposta PON-LAN / Leonardo Pereira Dias. --
Salvador, 2018.
155 f.

Orientador: Karcus Day Assis.
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal da
Bahia, Escola Politécnica, 2018.

1. Sistemas PON-LAN. 2. Redes ópticas passivas
(PON). 3. Planejamento de redes. 4. Algoritmos
genéticos (AGs). I. Assis, Karcus Day. II. Título.

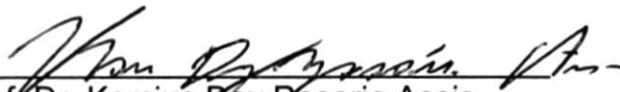
LEONARDO PEREIRA DIAS

Otimização de Redes de Acesso PON Utilizando Algoritmos Genéticos e Análise Técnico-Econômica da Proposta PON-LAN.

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de *Mestre*.

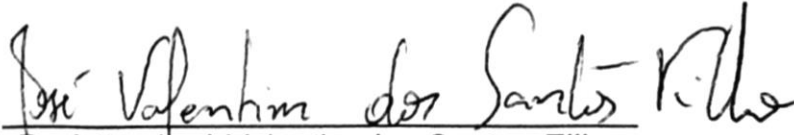
APROVADA em: 16 de Julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Karcius Day Rosario Assis
Orientador - UFBA


Prof. Dr. Eduardo Furtado de Simas Filho
UFBA


Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar
UFCG/UFBA


Prof. Dr. José Valentim dos Santos Filho
UFRB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo suporte espiritual e pelo direcionamento durante toda essa jornada. À minha família: pai, mãe e irmã que mesmo distantes sempre se fazem presentes nos momentos mais difíceis.

À minha esposa Sabrina, pelo incentivo, carinho e paciência nos melhores e piores momentos dessa longa caminhada.

Ao professor Dr. Karcus Assis e também ao professor Dr. Alex Ferreira, pela orientação, apoio, oportunidade, dedicação e paciência durante a construção deste trabalho.

Aos colegas e amigos da Companhia de Processamento de Dados do Estado da Bahia pelas valiosas contribuições e sugestões.

Por fim, agradeço a todos os amigos construídos durante o curso de mestrado e todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação da UFBA que, de alguma forma, contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal.

“O prazer no trabalho aperfeiçoa a obra”

Aristóteles

RESUMO

Esta dissertação tem como objeto de estudo dois problemas relacionados às tecnologias de redes ópticas passivas (PON), sendo: (1) Análise técnico-econômica da proposta PON-LAN (*Passive Optical Network for Local Area Network*) e (2) Otimização de redes de acesso PON utilizando algoritmo genético. No primeiro problema alvo deste trabalho busca-se compreender detalhadamente a proposta PON-LAN. Devido ao sucesso das redes PON nas redes de acesso, a alta capacidade dos sistemas ópticos e à constante queda nos custos dos materiais utilizados, criou-se a possibilidade desta mesma tecnologia ser utilizada em redes locais de computadores, dando origem a uma nova alternativa ao tradicional sistema de cabeamento estruturado metálico. Nesta etapa, por intermédio de uma comparação realizada em um cenário corporativo real, buscou-se conhecer as vantagens de sua aplicação comprovando assim sua real eficiência em projetos de infraestrutura de redes locais de médio e grande porte. No segundo problema alvo deste trabalho busca-se desenvolver um sistema computacional, baseado em algoritmo genético, que permita elaborar de forma rápida, automática e eficiente, soluções para o problema de planejamento e projetos de redes de acesso PON. O planejamento de uma rede PON é uma tarefa árdua e complexa, que envolve a determinação geográfica do posicionamento de diferentes equipamentos, cabos de fibra óptica e de diversos outros parâmetros relevantes para o funcionamento adequado da rede. Para tanto, busca-se desenvolver uma ferramenta completa que utilize mapas reais, minimize os custos de implantação e reduza o tempo destinado para a elaboração de projetos. A eficiência do sistema proposto foi validada a partir de comparações com redes PON elaboradas manualmente, obtendo-se um bom desempenho, com valores (de custo total) inferiores aos obtidos com a solução tradicional. Destaca-se também a drástica redução do tempo necessário para elaboração da solução (com percentuais de redução de tempo superiores à 96%). Diante do resultado, tornou-se clara a potencialidade da ferramenta e sua relevância do ponto de vista técnico, econômico e comercial.

Palavras-chave: Sistemas PON-LAN. Redes ópticas passivas (PON). Planejamento de redes. Algoritmos genéticos (AGs).

ABSTRACT

This dissertation investigates two problems related to Passive Optical Network (PON), which are: (1) Technical-economic analysis of PON-LAN (Passive Optical Network for Local Area Network) and (2) Optimization of access network PON deployment using genetic algorithms. In the first part of this work, the PON-LAN approach has been widely assessed. Due to the success of PON in the access networks, the high data transmission capacity of optical systems, and the constant decrease in the cost of materials, the use of PON technology for LAN has been proposed, originating on a new alternative for the traditional cabling systems of local area network based on metallic cables. At this stage, by means of a comparison made in a real corporate environment, the advantages of the PON-LAN deployment have been investigated, proving its real efficiency in infrastructure projects of medium and large local area networks. On the second part of this work, a metaheuristic has been developed, based on genetic algorithms, capable of elaborating fast, automatic and efficient solutions for the design and planning of the PON access network problem. An arduous and complex step in the design of such networks involves determining the placement of equipment, optical fiber cables and several other parameters relevant to the proper functioning of the network. In order to do so, a complete tool has been developed using real maps, aiming to minimize deployment costs and time spending to make the project. The efficiency of the proposed system have been validated by comparisons with manual optimization of PON networks, resulting on great performance, with values (of total cost) lower than those obtained with the traditional solution. It is worth mentioning the drastic reduction of time required for the elaboration of the solution (with time reduction indexes above 96%). Based on the obtained results, the potential of the tool is quite clear, as well as its relevance from a technical, economic, and commercial point of view.

Keywords: PON-LAN systems. Passive Optical Network (PON). Network Planning. Network Design. Genetic Algorithms (GAs).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1. Motivação e Objetivos	26
1.2. Trabalhos publicados durante o curso de pós-graduação	26
1.3. Estrutura da Dissertação	27
2. ESTRUTURA BÁSICA DAS REDES DE TELECOMUNICAÇÕES	28
2.1. Redes de interligação ou Redes <i>Core</i>	29
2.2. Redes de Acesso	29
2.3. Rede do Cliente (Redes Locais)	31
3. REDES ÓPTICAS DE ACESSO E ARQUITETURAS FTTx	32
3.1. Arquiteturas FTTx	32
3.2. Redes ópticas passivas	33
3.2.1. Sistemas TDM-PON	35
3.2.2. Sistemas WDM-PON	36
3.2.3. Sistemas TWDM-PON	38
3.2.4. Comparativo das tecnologias baseadas em PON	38
3.3. Redes Ópticas Ativas – AON	40
3.3.1. AON – <i>Active Ethernet</i>	40
3.3.2. AON – PtP ou <i>Home-Run</i>	40
4. UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIA PON EM LAN	42
4.1. Redes PON: Uma Alternativa às LANs Convencionais	42
4.2. Trabalhos Relacionados	46
4.3. Tecnologia PON e o Uso Compartilhado de Banda	46
4.4. Simulações e Análises Comparativas de CAPEX e OPEX	48
4.4.1. Capital Investido (CAPEX)	49
4.4.2. Custos Operacionais (OPEX)	51
4.4.3. Estimativa de redução de CAPEX para outros cenários	52
4.5. Conclusão	53
5. PROPOSTA DE ALGORITMO PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ACESSO PON	55
5.1. Problema Alvo	55
5.2. Planejamento de uma rede óptica PON	57
5.3. Trabalhos relacionados e soluções existentes	58
5.4. Topologias de rede PON e cenário escolhido para o sistema proposto	60
5.4.1. Topologias básicas de rede PON	60
5.4.2. Topologias adotadas para sistema proposto	62
5.5. Teoria dos grafos	65
5.6. Processo de Importação dos Mapas	66
5.6.1. Criação e edição de mapas	68
5.6.2. Importação dos mapas para Matlab	69
5.7. Estado Inicial da rede	71
5.8. Orçamento de Potência Óptica (<i>Link Budget</i>)	73
5.9. Metodologia Proposta	75
5.9.1. Algoritmos Genéticos e Visão Geral do Sistema Proposto	75
5.9.2. Função Geradora de Indivíduos	80
5.9.3. Função Aptidão	81

5.9.4.	Função Selecciona Indivíduos	88
5.9.5.	Função de Cruzamento (<i>Crossover</i>)	89
5.9.6.	Função de Mutação (<i>Mutation</i>).....	89
6.	AVALIAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO	91
6.1.	Cenário Escolhido e Estado Inicial do Algoritmo	91
6.2.	Validação dos resultados em cenário reduzido.....	94
6.2.1.	Topologia Centralizada – Tipo 1 (1×64).....	94
6.2.2.	Topologia Centralizada – Tipo 2 (1×2 e 1×32)	101
6.2.3.	Topologia Distribuída – Tipo 1 (1×04 e 1×16).....	108
6.2.4.	Topologia Distribuída – Tipo 2 (1×8 e 1×8).....	114
6.3.	Outras simulações.....	120
6.3.1.	Mapa com 314 nós	120
6.3.1.1.	Resultados para cenário não denso	121
6.3.1.2.	Resultados para cenário denso	126
6.3.2.	Mapa com 714 nós	129
6.3.2.1.	Resultados para cenário não denso	131
6.3.2.2.	Resultados para cenário denso	135
6.4.	Conclusão	138
7.	CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	141
7.1.	Conclusão – Problema Alvo 1	141
7.2.	Conclusão – Problema Alvo 2.....	142
	REFERÊNCIAS	144
	APÊNDICE A – Descrição completa dos materiais e serviços considerados nos projetos de rede de acesso PON.....	151
	ANEXO A – Imagens dos materiais considerados nos projetos de rede de acesso PON	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Acessos de serviços de banda larga no Brasil. Disponível em [6].	24
Figura 2.1 – Estrutura geral das redes de telecomunicações. Adaptado de [5].	28
Figura 2.2 – Diferentes meios de transmissão na rede de acesso. Adaptado de [5].	30
Figura 2.3 – Rede doméstica (LAN) típica de um cliente residencial.	31
Figura 3.1 – Arquiteturas de redes de acesso FTTx. Adaptado de [5].	32
Figura 3.2 – Elementos básicos de uma Rede Óptica Passiva PON.	34
Figura 3.3 – Exemplo de uma rede PON [27].	35
Figura 3.4 – Funcionamento de <i>downstream</i> e <i>upstream</i> em sistemas TDM-PON.	36
Figura 3.5 – Esquema básico do modelo WDM-PON [31].	37
Figura 3.6 – Evolução da normatização das tecnologias PON [32].	39
Figura 3.7 – Sistemas AON: a) <i>Active Ethernet</i> e b) PtP ou <i>Home-Run</i> .	41
Figura 4.1 – Comparação entre cabeamento estruturado tradicional x Redes PON-LAN. Adaptado de [14].	43
Figura 4.2 – Comparação entre as soluções LAN tradicional e PON LAN.	53
Figura 5.1 – Exemplo de um divisor óptico 1:2 e as configurações típicas.	56
Figura 5.2 – Topologia em barramento.	61
Figura 5.3 – a) Topologia em anel e b) Adaptação de topologia em anel (árvore com tronco redundante).	61
Figura 5.4 – Topologias em árvore. a) árvore simples b) árvore com dois níveis de <i>splitters</i> .	62
Figura 5.5 – Diagrama físico da rede que representa a topologia centralizada do Tipo 1.	63
Figura 5.6 – Diagrama físico da rede que representa a topologia centralizada do Tipo 2.	63
Figura 5.7 – Diagrama físico da rede que representa a topologia distribuída do Tipo 1.	64
Figura 5.8 – Diagrama físico da rede que representa a topologia distribuída do Tipo 2.	65
Figura 5.9 – Exemplo de uma representação de um grafo.	65
Figura 5.10 – Ambiente de edição da plataforma JOSM. O mapa cartográfico é disponibilizado pela base de dados do OSM. Linhas devem ser desenhadas sobre ruas e avenidas.	68
Figura 5.11 – Ambiente de edição da plataforma JOSM. Linhas desenhadas sobre ruas e avenidas. Os dados brutos serão exportados para o Matlab®.	69

Figura 5.12 – Dados brutos obtidos no JOSM em formato XML importados pelo Excel® e prontos para serem exportados ao Matlab®.	70
Figura 5.13 – Exemplo de um grafo georreferenciado importado para o Matlab®.	71
Figura 5.14 – Exemplo de um estado inicial (grafo da rede + clientes + CO).	72
Figura 5.15 – Fluxograma do AG proposto para o problema de otimização de redes de acesso PON.	77
Figura 5.16 – Exemplo gráfico do primeiro indivíduo das matrizes de população inicial (com dois níveis divisores ópticos) apresentadas acima. Cada par de indivíduos das matrizes irão representar uma solução distinta.	81
Figura 5.17 – Fluxograma que descreve o funcionamento básico da função aptidão.	82
Figura 5.18 – Exemplo gráfico da etapa passo 2 da função aptidão (para um indivíduo). Neste passo são encontradas as distâncias mínimas entre clientes- <i>splitter</i> (respeitando as restrições).	83
Figura 5.19 – Exemplo gráfico da etapa passo 3 da função aptidão (para um indivíduo). Neste passo são encontradas as distâncias mínimas entre <i>splitter2N-splitter1N</i>	84
Figura 5.20 – Exemplo gráfico da etapa passo 4 da função aptidão (para um indivíduo). Neste passo são encontradas as distâncias mínimas entre <i>splitter1N-CO</i> (respeitando as restrições).	85
Figura 5.21 – Exemplo gráfico da operação de cruzamento com um par de indivíduos.	89
Figura 5.22 – Exemplo gráfico da operação genética de mutação com um indivíduo.	90
Figura 6.1 – Mapa da região de interesse (Bairro Costa Azul) com grafo sobreposto.	92
Figura 6.2 – Grafo do mapa da região de interesse à ser importado para Matlab®.	92
Figura 6.3 – Grafo da rede (bairro Costa Azul) importado para Matlab® contendo 108 nós.	93
Figura 6.4 – Exemplo de um estado inicial para o algoritmo proposto (Grafo da Rede e Clientes).	94
Figura 6.5 – Comparação da evolução do AG para quatro simulações com o mesmo estado inicial – Topologia Centralizada (Tipo 1).	96
Figura 6.6 – Evolução do AG para o melhor resultado da Topologia Centralizada (Tipo 1).	97
Figura 6.7 – Estado inicial utilizado para simulação da Topologia Centralizada (Tipo 1).	97
Figura 6.8 – Orçamento de potência óptica da rede gerado pelo AG para Top. Centralizada (Tipo 1).	97
Figura 6.9 – Resultado gráfico gerado pelo AG para Topologia Centralizada (Tipo 1).	97

Figura 6.10 – Solução elaborada por projetista para Topologia Centralizada (Tipo 1).	98
Figura 6.11 – Comparação por categoria (do custo total) para teste de validação da Top. Centralizada – Tipo 1.	100
Figura 6.12 – Comparação da evolução do AG para quatro simulações com o mesmo estado inicial – Topologia Centralizada – Tipo 2.....	102
Figura 6.13 – Evolução do AG para o melhor resultado da Topologia Centralizada – Tipo 2.	103
Figura 6.14 – Estado inicial para simulação da Topologia Centralizada – Tipo 2.....	103
Figura 6.15 – Orçamento de potência óptica da rede gerado pelo sistema computacional para a Topologia Centralizada – Tipo 2.....	103
Figura 6.16 – Resultado gráfico gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 2. Obs: todos divisores ópticos de primeiro nível (1x2) estão localizados na CO e não estão representados.	103
Figura 6.17 – Resultado gráfico gerado pelo método manual para Topologia Centralizada – Tipo 2. Obs: todos divisores ópticos de primeiro nível (1x2) estão localizados na CO e não estão representados.	105
Figura 6.18 – Comparação por categoria (do custo total) para teste de validação da Top. Centralizada – Tipo 2.	107
Figura 6.19 – Comparação da evolução do AG para quatro simulações com o mesmo estado inicial – Topologia Distribuída – Tipo 1.	109
Figura 6.20 – Evolução do AG para o melhor resultado da Topologia Distribuída – Tipo 1.	110
Figura 6.21 – Estado inicial para simulação da Topologia Distribuída – Tipo 1.....	110
Figura 6.22 – Orçamento de potência óptica da rede gerado pelo sistema computacional para Topologia Distribuída – Tipo 1.	110
Figura 6.23 – Resultado gráfico gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 1.....	110
Figura 6.24 – Resultado gráfico gerado pelo método manual para Topologia Distribuída – Tipo 1.....	112
Figura 6.25 – Comparação por categoria (do custo total) para teste de validação da Topologia Distribuída – Tipo 1.....	113
Figura 6.26 – Comparação da evolução do AG para quatro simulações com o mesmo estado inicial – Topologia Distribuída – Tipo 2.	115
Figura 6.27 – Estado inicial para simulação da Topologia Distribuída – Tipo 2.....	116

Figura 6.28 – Evolução do AG para o melhor resultado da Topologia Distribuída – Tipo 2.	116
Figura 6.29 – Resultado gráfico gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 2.	116
Figura 6.30 – Orçamento de potência óptica da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 2.	116
Figura 6.31 – Resultado gráfico gerado pelo método manual para Topologia Distribuída – Tipo 2.	118
Figura 6.32 – Comparação por categoria (custo total) para teste de validação da Topologia Distribuída – Tipo 2.	119
Figura 6.33 – Mapa da região de interesse (Bairro Pituba) com grafo sobreposto.	121
Figura 6.34 – Grafo do mapa da região de interesse à ser importado para Matlab®.	121
Figura 6.35 – Grafo da rede (bairro Pituba) importado para Matlab® contendo 314 nós.	121
Figura 6.36 – Estado inicial da rede (com 314 nós) para cenário não denso.	123
Figura 6.37 – Evolução do AG para cada Topologia para cenário não denso.	123
Figura 6.38 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 para cenário não denso.	123
Figura 6.39 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 para cenário não denso.	123
Figura 6.40 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 para cenário não denso.	123
Figura 6.41 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 para cenário não denso.	123
Figura 6.42 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 p/ cenário não denso.	124
Figura 6.43 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 p/ cenário não denso.	124
Figura 6.44 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 p/ cenário não denso.	124
Figura 6.45 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 p/ cenário não denso.	124
Figura 6.46 – Comparação por categoria (do custo total) para cenário não denso com 314 nós.	125
Figura 6.47 – Estado inicial da rede (com 314 nós) para cenário denso.	127
Figura 6.48 – Evolução do AG para cada Topologia para cenário denso.	127
Figura 6.49 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 para cenário denso.	127
Figura 6.50 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 para cenário denso.	127
Figura 6.51 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 para cenário denso.	127

Figura 6.52 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 para cenário denso.	127
Figura 6.53 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 p/ cenário denso.	128
Figura 6.54 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 p/ cenário denso.	128
Figura 6.55 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 p/ cenário denso.	128
Figura 6.56 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 p/ cenário denso.	128
Figura 6.57 – Comparação por categoria (do custo total) para cenário denso com 314 nós.	129
Figura 6.58 – Mapa da região de interesse (região central da cidade de Camaçari) com grafo sobreposto.	130
Figura 6.59 – Grafo do mapa da região de interesse (Camaçari) à ser importado para Matlab®.	130
Figura 6.60 – Grafo da rede (região central da cidade de Camaçari) importado para Matlab® contendo 714 nós.	130
Figura 6.61 – Estado inicial da rede (com 714 nós) para cenário não denso.	132
Figura 6.62 – Evolução do AG para cada Topologia para cenário não denso (com 714 nós).	132
Figura 6.63 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 para cenário não denso (com 714 nós).	132
Figura 6.64 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 para cenário não denso (com 714 nós).	132
Figura 6.65 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 para cenário não denso (com 714 nós).	132
Figura 6.66 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 para cenário não denso (com 714 nós).	132
Figura 6.67 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Top. Centralizada – Tipo 1 p/ cenário não denso – 714 nós.	133
Figura 6.68 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Top. Centralizada – Tipo 2 p/ cenário não denso – 714 nós.	133

Figura 6.69 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Top. Distribuída – Tipo 1 p/ cenário não denso – 714 nós.	133
Figura 6.70 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Top. Distribuída – Tipo 2 p/ cenário não denso – 714 nós.	133
Figura 6.71 – Comparação por categoria do custo total (para cenário não denso – 714 nós).134	
Figura 6.72 – Estado inicial da rede (com 714 nós) para cenário denso.	136
Figura 6.73 – Evolução do AG para cada topologia para cenário denso (com 714 nós).	136
Figura 6.74 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 para cenário denso (com 714 nós).	136
Figura 6.75 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 para cenário denso (com 714 nós).	136
Figura 6.76 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 para cenário denso (com 714 nós).	136
Figura 6.77 – Solução AG para Top. Dist. – Tipo 2 para cenário denso (com 714 nós).	136
Figura 6.78 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 p/ cenário denso – 714 nós.	137
Figura 6.79 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Top. Centralizada – Tipo 2 p/ cenário denso – 714 nós.	137
Figura 6.80 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Top. Distribuída – Tipo 1 p/ cenário denso – 714 nós.	137
Figura 6.81 – <i>Link Budget</i> da rede gerado pelo AG para Top. Distribuída – Tipo 2 p/ cenário denso – 714 nós.	137
Figura 6.82 – Comparação por categoria do custo total (para cenário denso – 714 nós).....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Participação das tecnologias em redes de acesso no Brasil. Disponível em [6].	24
Tabela 3.1 – Principais características das tecnologias PON (padronizadas pelo ITU-T e pelo IEEE). Obtido em [21], [33], [34] e [35].	39
Tabela 4.1 – Trabalhos relacionados: Redução de CAPEX e OPEX obtidos na utilização de PON LAN (comparação com cabeamento metálico convencional) [14], [15] e [16].	46
Tabela 4.2 – Consumo de banda típico para aplicações corporativas comuns. Dados obtidos em [14].	47
Tabela 4.3 – Número de pontos de rede solicitados e ONTs necessárias para cada pavimento do cenário em estudo (prédio típico do governo do estado).	49
Tabela 4.4 – Comparação do CAPEX entre a solução LAN convencional (utilizando cabos CAT6) e a solução PON-LAN para o cenário em estudo (prédio típico do Governo do Estado).	50
Tabela 4.5 – Comparação do OPEX (período de um ano) entre a solução LAN convencional (utilizando cabos CAT6) e a solução PON-LAN para o cenário em estudo (prédio típico do Governo do Estado).	52
Tabela 5.1 – Simbologia utilizada para o estado inicial (Grafo da Rede + Clientes).	72
Tabela 5.2 – Descrição das atenuações dos cabos utilizados.	74
Tabela 5.3 – Descrição das atenuações dos dispositivos da rede.	74
Tabela 5.4 – Características dos equipamentos ativos considerados.	74
Tabela 5.5 – Formulação matemática de cada material e serviço utilizado na função aptidão.	87
Tabela 6.1 – Simbologia utilizada para o estado inicial (Grafo da Rede e Clientes).	93
Tabela 6.2 – Características iniciais da rede definidas para a Topologia Centralizada (Tipo 1).	95
Tabela 6.3 – Análise da variabilidade do algoritmo proposto para Topologia Centralizada (Tipo 1).	95
Tabela 6.4 – Principais resultados obtidos com o AG para Topologia Centralizada (Tipo 1).	97
Tabela 6.5 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 1º Nível – Topologia Centralizada (Tipo 1).	98

Tabela 6.6 – Principais resultados obtidos com a solução elaborada por projetista – Top. Centralizada. Tipo 1.	99
Tabela 6.7 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 1º nível – Topologia Centralizada (Tipo 1).....	99
Tabela 6.8 – Comparação entre solução do AG e solução manual – Topologia Centralizada (Tipo 1).....	100
Tabela 6.9 – Características iniciais da rede definidas para a Topologia Centralizada – Tipo 2.	101
Tabela 6.10 – Análise da variabilidade do algoritmo proposto para Topologia Centralizada – Tipo 2.....	102
Tabela 6.11 – Principais resultados obtidos com o AG para a Topologia Centralizada – Tipo 2.	104
Tabela 6.12 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 2º nível (obtido com o AG para a Top. Cent. – Tipo 2).....	104
Tabela 6.13 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 1º nível (obtido com o AG para a Top. Cent. – Tipo 2).....	104
Tabela 6.14 – Principais resultados obtidos pelo método convencional (projetista) para a Top. Centr. Tipo 2.....	105
Tabela 6.15 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 2º nível (obtido com o AG para a Top. Cent. Tipo 2).....	105
Tabela 6.16 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 1º nível (obtido com o método convencional para a Topologia Centralizada Tipo 2).....	106
Tabela 6.17 – Comparação entre solução do AG e solução manual – Topologia Centralizada (Tipo 2).....	106
Tabela 6.18 – Características iniciais da rede definidas para a Topologia Distribuída – Tipo 1.	108
Tabela 6.19 – Análise da variabilidade do algoritmo proposto para Topologia Distribuída – Tipo 1.....	108
Tabela 6.20 – Principais resultados obtidos com o AG para a Topologia Distribuída – Tipo 1.	110
Tabela 6.21 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 2º nível (obtido com o AG para a Top. Distribuída – Tipo 1).	111

Tabela 6.22 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 1º nível (obtido com o AG para a Topologia Distribuída – Tipo 1).....	111
Tabela 6.23 – Principais resultados obtidos com o método convencional (projetista) para a Topologia Distribuída – Tipo 1.	112
Tabela 6.24 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 2º nível (obtido com o método convencional para a Topologia Distribuída – Tipo 1).....	112
Tabela 6.25 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 1º nível (obtido com o método convencional para a Topologia Distribuída – Tipo 1).....	112
Tabela 6.26 – Comparação entre solução do AG e solução convencional – Topologia Distribuída (Tipo 1).....	113
Tabela 6.27 – Características iniciais da rede definidas para a Topologia Distribuída – Tipo 2.	115
Tabela 6.28 – Análise da variabilidade do algoritmo proposto para Topologia Distribuída – Tipo 2.....	115
Tabela 6.29 – Principais resultados obtidos com o AG para a Topologia Distribuída – Tipo 2.	117
Tabela 6.30 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 2º nível (obtido com o AG para a Top. Distribuída – Tipo 2).	117
Tabela 6.31 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 1º nível (obtido com o AG para a Top. Distribuída – Tipo 2).	117
Tabela 6.32 – Principais resultados obtidos com o método convencional para a Topologia Distribuída – Tipo 2.....	118
Tabela 6.33 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 2º nível (método convencional para a Top. Dist. – Tipo 2).	118
Tabela 6.34 – Matriz de informação dos <i>splitters</i> de 1º nível (método manual para a Top. Distribuída – Tipo 2)	119
Tabela 6.35 – Comparação entre solução do AG e solução manual – Topologia Distribuída (Tipo 2).....	119
Tabela 6.36 – Características iniciais da rede definidas para as simulações do Mapa de 314 nós – não denso.	122
Tabela 6.37 – Comparação entre as topologias para o mesmo estado inicial (cenário não denso – 314 nós).	124

Tabela 6.38 – Características iniciais da rede definidas para as simulações do Mapa de 314 nós – Denso.	126
Tabela 6.39 – Comparação entre as topologias para o mesmo estado inicial (cenário denso – 314 nós).	128
Tabela 6.40 – Características iniciais da rede definidas para as simulações do Mapa de 714 nós – não denso.	131
Tabela 6.41 – Comparação entre as topologias para o mesmo estado inicial (cenário não denso – 714 nós).	133
Tabela 6.42 – Características iniciais da rede definidas para as simulações do Mapa de 714 nós – Denso.	135
Tabela 6.43 – Comparação entre as topologias para o mesmo estado inicial (cenário denso – 714 nós).	137

LISTA DE ACRÔNIMOS

ACO	Ant Colony Optimization
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
AG	Algoritmo Genético
ANSI	American National Standards Institute
AON	Active Optical Network
AWG	Arrayed Waveguide Grating
CAPEX	Capital Expenditure / Capital Investido
CEO	Caixa de Emenda Óptica
CO	Central Office / Escritório Central
CPE	Customer Premises Equipment
CPE	Customer Premises Equipment
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EIA	Electronic Industries Association
EPON	<i>Ethernet</i> Passive Optical Network
EON	Elastic Optical Network
FCC	Federal Communications Commission
FDH	Fiber Distribution Hub
FTTB	Fiber-To-The-Building
FTTC	Fiber-To-The-Curb
FTTCab	Fiber-To-The-Cabinet
FTTH	Fiber-To-The-Home
FTTN	Fiber-To-The-Node
FTTx	Fiber to the x
GPON	Gigabit Passive Optical Network
HD	High Definition
HFC	Hybrid Fiber Coaxial
IP	Internet Protocol
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunications Union

JOSM	Java Open Street Maps
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
MDU	Multi Dwelling Unit / Unidade de Habitação Múltipla
NG-PON2	Next Generation – PON2
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
OPEX	Operational Expenditure Costs
OSM	Open Street Maps
OSP	Outside Plant / Planta Externa
PNBL	Plano Nacional de Banda Larga
PON	Passive Optical Network / Rede Óptica Passiva
PON-LAN	Passive Optical Network for Local Area Network
PoP	Point of Presence / Ponto de Presença
PRODEB	Companhia de Processamento de Dados do Estado da Bahia
PSTN	Public Switched Telephone Network
POT	Ponto de Terminação Óptico
PtP	Point to point
SFU	Single Family Unit
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
TDMA	Time Division Multiple Access
TDM-PON	Time Division Multiplexing – PON
TI	Tecnologia da Informação
TIA	Telecommunications Industries Association
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TWDM-PON	Time Wavelength Division Multiplexing – PON
VDSL	Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line
VLANs	Virtual LANs
VoIP	Voice Over IP
WDM	Wavelength Division Multiplexing

WDM-PON	Wavelength Division Multiplexing – PON
WLAN	Wireless Local Area Network
xDSL	Digital Subscriber Line
NG-PON	Next Generation Passive Optical Network

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a comunicação de dados têm-se tornado tão importante quanto serviços básicos, a exemplo do fornecimento de energia elétrica e água [1]. Desta maneira espera-se que as redes de comunicação tenham a mesma capilaridade que as redes elétricas, e atendam, com qualidade, um vasto número de usuários [1]. É importante salientar que a demanda por largura de banda exigida pelos usuários vem aumentando constantemente, devido a aplicações como televisão de alta definição, vídeo 3-D, computação em nuvem, jogos *online*, videoconferência, Internet das coisas (IoT – *Internet of Things*), além de outras funcionalidades [2]. Desta forma, as redes de telecomunicações necessitam de uma grande largura de banda para suportar essa nova demanda.

Atualmente, segundo a Comissão Federal de Comunicações [3], em uma residência comum, onde ocorra regularmente o uso simultâneo de até dois dispositivos com aplicações que demandem tráfego básico ou moderado (*e-mail*, *browsing*, vídeo, VoIP e pelo menos um *streaming* de vídeo HD ou uma aplicação de jogos *online*), é necessário um serviço que ofereça uma largura de banda de 12 a 25 *Mbit/s*. Diante deste cenário, todas essas demandas podem não ser atendidas de maneira satisfatória, caso não haja uma rede de acesso de qualidade disponível na região do assinante.

Conforme destacado em [4], as soluções de redes de acesso mais utilizadas atualmente, a xDSL (*Digital Subscriber Line*) e a *Cable Modem*, se tornarão, devido à limitação física para transferência de dados em cabos metálicos, insuficientes dentro de pouco tempo. Ao buscar soluções para este problema, surge como alternativa a utilização de tecnologias baseadas em redes ópticas, para suprir a elevada demanda e alta qualidade exigida nas redes de acesso [5]. A Tabela 1.1, disponível em [6], apresenta as principais tecnologias utilizadas nas redes de acesso do Brasil. É possível notar que, aproximadamente 80% dos acessos ainda são baseados em redes metálicas. Outro ponto que deve ser destacado é o crescimento da utilização da fibra óptica nas redes de acesso, cujo percentual é de aproximadamente 11%. Ainda para correto entendimento da Tabela 1.1, além das tecnologias já citadas, a tecnologia *Ethernet* também é baseada em cabos metálicos e as tecnologias LTE (*Long Term Evolution*) [7] e *Spread Spectrum* [8] são baseadas em ondas de rádio.

Tabela 1.1 – Participação das tecnologias em redes de acesso no Brasil. Disponível em [6].

Tecnologia	Agosto 2017	Setembro (2017)	Outubro (2017)	Novembro (2017)	Dezembro (2017)	Janeiro (2018)	Fevereiro (2018)
Cable Modem	31,16%	31,19%	31,23%	31,27%	31,26%	30,98%	31,11%
<i>ETHERNET</i>	2,06%	2,04%	2,10%	2,10%	2,28%	2,42%	2,50%
Fibra	9,10%	9,43%	9,70%	10,01%	10,64%	10,91%	10,98%
LTE	1,30%	1,29%	1,27%	1,28%	1,27%	1,25%	1,23%
SATELITE	0,28%	0,29%	0,38%	0,46%	0,47%	0,47%	0,51%
Spread Spectrum	7,49%	7,47%	7,60%	7,49%	6,99%	7,85%	7,70%
xDSL	47,28%	46,94%	46,36%	46,00%	45,63%	44,67%	44,54%
Outros	1,32%	1,35%	1,36%	1,40%	1,45%	1,45%	1,43%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Ao analisar os dados estatísticos fornecidos por [6], na Figura 1.1, é possível observar, que em 100 domicílios brasileiros apenas 41 possuem o serviço de banda larga. Isto demonstra um potencial de crescimento para as redes de acesso no cenário nacional. É importante salientar os esforços governamentais realizados para a popularização do acesso à Internet no País, destacando-se o PNBL (Plano Nacional de Banda Larga), coordenado pelo Ministério das Telecomunicações. Este programa busca, além de propor valores acessíveis ao consumidor, incentivar a ampliação das redes ópticas no País.

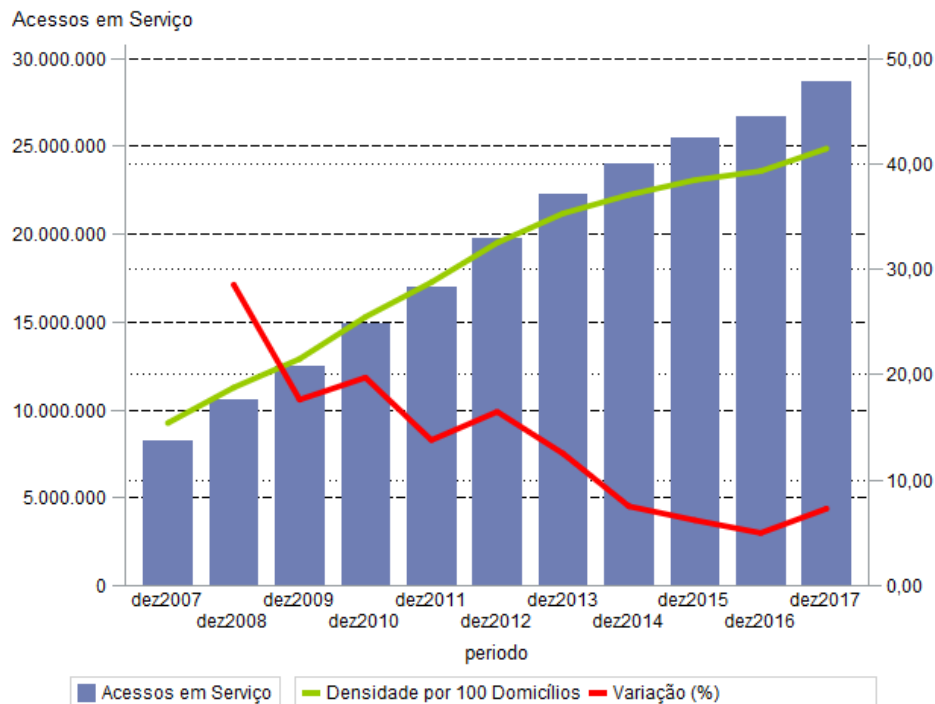


Figura 1.1 – Acessos de serviços de banda larga no Brasil. Disponível em [6].

Diante das inúmeras tecnologias de redes ópticas, destaca-se a PON (*Passive Optical Network*) [9], rede passiva, ou seja, não necessitam de alimentação elétrica na rede de distribuição. Como vantagem, apresentam facilidade de instalação e atualização, baixo custo de operação, manutenção, confiabilidade, imunidade eletromagnética e cabos mais leves e compactos [10].

Um dos desafios das operadoras de telecomunicações é o planejamento de uma rede PON [11]. Devido às inúmeras possibilidades de posicionamento de divisores ópticos passivos ao longo da rede, razão de divisão, além da distribuição geográfica dos assinantes (e potenciais assinantes), é necessário que haja um estudo minucioso para a construção e execução do projeto. Para isto, são utilizadas diversas técnicas de otimização, para cada nova rede de acesso, de forma que toda a infraestrutura seja disposta de maneira eficiente e atenda, com qualidade, toda a demanda, obtendo sempre o menor custo possível.

Na literatura já existem diversos trabalhos, como [10], [12] e [13], a respeito da aplicação de algoritmos baseados em técnicas heurísticas e métodos exatos, utilizando de Programação Inteira (PI), para elaboração de projetos de redes. No entanto, o intuito deste trabalho é elaborar uma nova ferramenta que permita a descrição do problema com um maior nível de detalhe e assim, seja capaz de aumentar, ainda mais, a eficiência do planejamento de redes PON para cada cenário apresentado.

Sendo assim, propõe-se um algoritmo para planejamento de redes PON baseado na utilização do algoritmo genético (AG). A partir de algumas informações básicas como: ruas e avenidas, localização da central (operadora) e localização dos clientes, busca-se desenvolver uma solução que seja capaz de gerar a topologia adequada para cada situação. Com isto, objetiva-se otimizar a utilização de cabos e equipamentos ópticos, além de reduzir consideravelmente o tempo gasto para elaborar a solução do problema. Deve-se destacar que, normalmente, nas pequenas e grandes operadoras, os projetos de redes PON são desenvolvidos por técnicos e engenheiros de forma tradicional, demandando vários dias para sua conclusão, desperdiçando recursos que poderiam ser alocados para outras demandas.

Outro problema abordado nesta pesquisa é a recente proposta de utilização da tecnologia PON em Redes Locais (LAN), substituindo os tradicionais sistemas de cabeamento estruturado, baseados em cabeamento metálico. Esses sistemas são conhecidos como PON-LAN e prometem alta eficiência energética, melhor gerência da rede, alto nível de segurança, investimento duradouro e principalmente custo competitivo de implantação, operação e manutenção [14].

Apesar de ser um conceito relativamente novo e ainda não existir uma norma técnica que discuta esta aplicação, sistemas PON-LAN têm sido recomendados por fornecedores e empresas do ramo de telecomunicações para grandes estabelecimentos e condomínios. Deve-se destacar que alguns trabalhos já foram divulgados sobre o tema, como [14], [15] e [16], porém o assunto ainda carece de conclusões. Buscando entender a proposta, realizou-se um estudo sobre essa nova solução, e, por intermédio de comparativos realizados em um cenário corporativo real, foram analisadas as principais vantagens e desvantagens do uso da tecnologia.

1.1. Motivação e Objetivos

Devido às aplicações de Internet que requerem maior largura de banda, a tecnologia PON tem-se tornado mais atrativa para suprir essa demanda, em virtude sua capacidade de transmissão em *Gbits/s*. Essa tecnologia tem sido adotada frequentemente nas redes de acesso como solução para sistemas FTTH (*Fiber-To-The-Home*) em todo o mundo [17].

Ao levar em consideração a dimensão continental do Brasil e que tem, atualmente, apenas ~11% dos acessos realizados com fibras, é possível prever que muitos cabos ópticos serão instalados para atender as expectativas de demandas de taxa de transmissão atuais e futuras. Em contrapartida, é importante salientar a necessidade do planejamento de uma rede óptica. Conforme citado em [18], muitas fibras que são planejadas e instaladas não são utilizadas. Na prática, as instalações de novas fibras ocorreram à medida que surge a necessidade. Desta forma, fica evidente que a falta de planejamento eficiente de um sistema PON pode gerar prejuízos, afetar possíveis expansões da rede e, inclusive, afetar a qualidade do serviço oferecido.

Diante do cenário exposto, esta dissertação propõe uma nova técnica de planejamento de redes PON, utilizando um método de otimização de redes, com de algoritmos genéticos, que resulta em ganhos substanciais em relação ao planejamento de redes realizado de forma tradicional. Os principais objetivos, como visto anteriormente, são: minimizar os custos de implantação, eliminar eventuais erros de projetos, reduzir o tempo envolvido no processo e garantir as condições mínimas de funcionamento adequado da rede, garantindo assim a qualidade da rede óptica proposta.

1.2. Trabalhos publicados durante o curso de pós-graduação

- Publicado – L. P. Dias; G. L. J. Assis; A. F. Santos; K. D. R. Assis. "*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, Agosto, 2017.

- Publicado – L. P. Dias; J. J. F. Cerqueira; K. D. R. Assis; R. C. Almeida. *"Using Artificial Neural Network in Intrusion Detection Systems to Computer Networks"*. Computer Science and Electronic Engineering (CEECE), IEEE, p. 145-150, Novembro, 2017.
- Aceito para publicação – L. P. Dias; A. F. Santos; K. D. R. Assis. *"Planejamento Eficiente de Redes de Acesso PON Utilizando Algoritmos Genéticos"*. XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT2018, Setembro de 2018.

1.3. Estrutura da Dissertação

Essa dissertação é composta por sete capítulos, cujos conteúdos são descritos a seguir:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Neste capítulo é apresentado o problema de forma introdutória, com a motivação e os objetivos a serem cumpridos;
- **Capítulo 2 – Estrutura Básicas das Redes de Telecomunicações:** São apresentados os segmentos que constituem uma estrutura completa de telecomunicações;
- **Capítulo 3 – Redes Ópticas de Acesso e Arquiteturas FTTx:** Discute a fundamentação teórica das soluções de redes de acesso que utilizam a fibra óptica como meio de transmissão;
- **Capítulo 4 – Problema Alvo 1 – Utilização de Tecnologia PON em LAN:** Discute o primeiro problema alvo do trabalho: a aplicação de sistemas PON em redes locais LAN (em alternativa aos convencionais sistemas de cabeamento estruturado baseados em redes metálicas) e também são apresentados os trabalhos relacionados, metodologia, os resultados obtidos e as conclusões;
- **Capítulo 5 – Problema Alvo 2 – Proposta de Algoritmo para Otimização de Redes de Acesso PON:** Neste capítulo é apresentado o segundo problema alvo do trabalho: otimização de redes de acesso PON. São apresentados também, de forma detalhada, os trabalhos relacionados e a metodologia a ser utilizada;
- **Capítulo 6 – Problema Alvo 2 – Avaliação do Algoritmo Proposto:** Neste capítulo são descritos e discutidos os testes realizados do sistema computacional proposto, os resultados encontrados por meio das simulações e as conclusões;
- **Capítulo 7 – Conclusões Finais e Trabalhos Futuros:** Nesta capítulo são apresentadas as conclusões finais do trabalho e também é sugerido possíveis trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. ESTRUTURA BÁSICA DAS REDES DE TELECOMUNICAÇÕES

A infraestrutura básica das redes de telecomunicações está representada na Figura 2.1, na qual é possível identificar os diferentes segmentos de rede que utilizam as mais diversas tecnologias de transmissão, comutação e encaminhamento [5]. Pode-se verificar também a maneira como os diversos tipos de redes são interconectadas, sejam elas redes cabeadas (fixa) ou redes sem fio (fixa ou móveis).

As atuais redes de telecomunicações podem ser tradicionalmente divididas e representadas em de três grandes grupos: redes principais (*core*) ou de interligação, redes de acesso e rede do cliente (redes locais). Cada grupo possui suas particularidades, que serão detalhadas nas próximas seções.

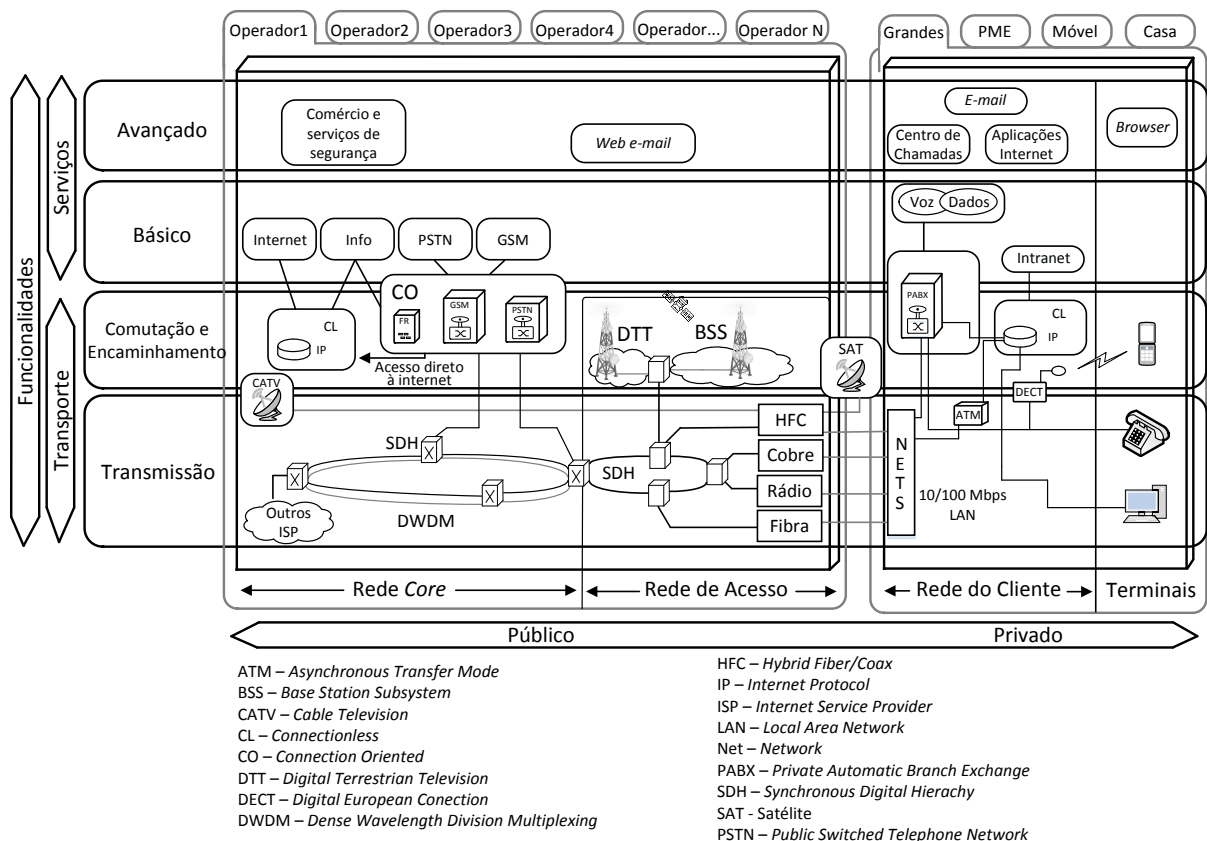


Figura 2.1 – Estrutura geral das redes de telecomunicações. Adaptado de [5].

2.1. Redes de interligação ou Redes Core

A rede *core* é responsável pela interligação entre as várias redes de acesso. Ela deve ser escalável, transmitir elevadas taxas de dados, alcançar grandes distâncias e preservar a qualidade da informação, conforme citado em [19]. Redes *core* operam em grandes escalas, como nacional, continental ou, até mesmo, intercontinental. Comumente, esta rede conduz tráfego de centenas de *gigabits* ou *terabits* por segundo.

Os sistemas de comunicações baseados na tecnologia óptica têm sido implantados, cada vez mais, devido ao crescimento exponencial e contínuo do volume de tráfego demandado pelos usuários. Sendo assim, nas últimas décadas, diversas redes *core* foram, e ainda vem sendo, implantadas fazendo principalmente o uso de tecnologias baseadas em WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e sua evolução DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Estas tecnologias utilizam a transmissão de dados em diferentes comprimentos de onda com uso de uma única fibra óptica, aumentando assim a capacidade de transmissão. Com relação às redes metropolitanas, comumente utiliza-se anéis interconectados com tecnologia SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) que permite altas taxas de tráfego [20]. Normalmente, a tecnologia SDH é utilizada em meios de transmissão óptico, elétrico ou rádio. Deve-se destacar também a possibilidade de redundância, que confere ao sistema características como robustez e capacidade de auto-recuperação em caso de falhas [5].

2.2. Redes de Acesso

A rede de acesso é o segmento que interliga o provedor de serviço, por meio das centrais locais CO (*Central Office*), aos equipamentos dos clientes CPE (*Customer Premises Equipment*). É importante ressaltar que, inicialmente, essa rede foi desenvolvida exclusivamente para tráfego de voz por meio da PSTN (*Public Switched Telephone Network*) [5]. Com o passar dos anos, foi explorada a reutilização de parte da infraestrutura existente da telefonia convencional, com o objetivo de reduzir os investimentos.

As primeiras tecnologias de transmissão de dados nas redes de acesso utilizavam a PSTN e eram conhecidas como soluções *Dial-Up* ou simplesmente linha discada. Essa solução surgiu com o intuito de aproveitar ao máximo a infraestrutura de cobre existente para telefonia, não possibilitando serviços de voz e dados simultaneamente. Para contornar o problema e melhorar a qualidade do serviço, foi desenvolvida a tecnologia xDSL (*Digital Subscriber Line*) [19], que faz o uso de diferentes bandas de frequências e reutiliza a infraestrutura telefônica,

permitindo a existência de diferentes tipos de tráfego na mesma rede. As tecnologias xDSL mais comuns utilizadas atualmente são a ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) e a VDSL (*Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line*) [21].

Outra tecnologia de rede de acesso muito popular é a HFC (*Hybrid Fiber Coaxial*), que surgiu com o objetivo inicial de atender à demanda de televisão a cabo [22]. Ela utiliza fibra até um determinado ponto e a partir deste ponto usa cabo coaxial. As operadoras de telecomunicações, focadas no lucro, viram essa infraestrutura como uma alternativa às redes xDSL, sendo a HFC muito utilizada ainda nos dias atuais, permitindo o fornecimento simultâneo de canais de televisão e tráfego de voz e dados [21].

Devido à crescente demanda por tráfego e queda no custo dos materiais ópticos, foi recentemente implementado o uso da fibra óptica também nas redes de acesso. Surgem então as tecnologias FTTx (*Fiber to the x*), em que *x* é um termo genérico que indica o quão próximo do cliente está da rede óptica [11]. Essa tecnologia pode ser ativa ou passiva e permite o serviço *triple play*, que entrega voz, dados e vídeo no mesmo canal de comunicação, com uma qualidade superior às tecnologias que utilizam cabos metálicos [14].

O segmento de redes de acesso é composto por diferentes tipos de tecnologias que utilizam os mais diversos meios de transmissão, conforme pode ser visto na Figura 2.2.

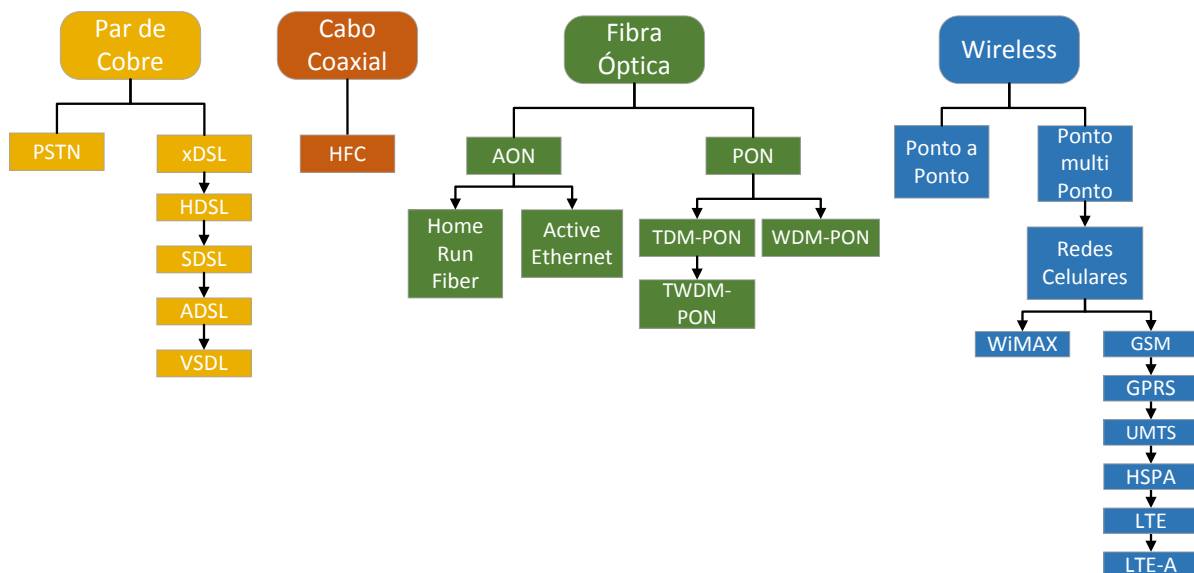


Figura 2.2 – Diferentes meios de transmissão na rede de acesso. Adaptado de [5].

Existem fundamentalmente quatro principais tipos de meios físicos para transmissão de dados nas redes de acesso:

- a) **Cabo de cobre:** Inicialmente utilizado para sistemas telefônicos. É utilizado na PSTN e em redes xDSL;
- b) **Cabo coaxial:** Inicialmente projetado para a transmissão de canais de televisão fechado, é utilizado também para a transmissão de dados e voz;
- c) **Wireless** (transmissão em espaço livre): Utiliza ondas eletromagnéticas de rádio e é encontrado em redes telefônicas móveis e demais enlaces de dados do tipo ponto-multi-ponto ou enlaces ponto a ponto;
- d) **Fibra óptica:** Inicialmente utilizada apenas nas redes *core*, devido à alta capacidade de transmissão e alto custo dos materiais envolvidos. No entanto, em função da constante redução de custos, é considerada por muitos o meio de transmissão adequado para suprir as altas demandas de tráfego dos clientes, tanto em redes de acesso como também em redes locais.

2.3. Rede do Cliente (Redes Locais)

A rede do cliente (rede local) tem, normalmente, pequenas dimensões, é localizada nas dependências do consumidor e interliga usuários finais à rede de acesso. A operadora fornece, por meio do CPE (*Costumer Premisses Equipment*), o serviço contratado de voz, dados ou vídeo. A rede local tem a função de encaminhar o tráfego para os dispositivos conectados. Essas redes podem ser residenciais ou comerciais e são de responsabilidade dos próprios clientes, variando o tamanho e o número de usuários nelas inseridas.

O protocolo comumente utilizado em redes LAN é o IP (*Internet Protocol*), que é encapsulado em quadros *Ethernet* e toda comunicação é realizada por cabos ou com tecnologias sem fio (WLAN: *Wireless Local Area Network*), segundo as normas IEEE 802.3 e 802.11 [22].

Na Figura 2.3 pode-se ver uma típica rede local residencial, que comumente usa a tecnologia cabeada ou tecnologia sem fio.

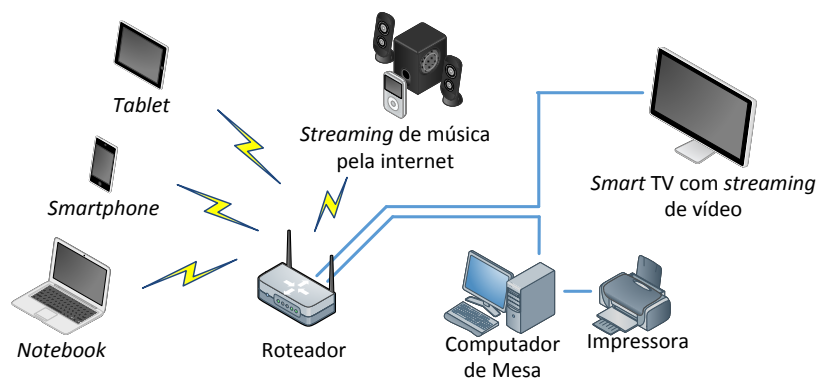


Figura 2.3 – Rede doméstica (LAN) típica de um cliente residencial.

CAPÍTULO 3

3. REDES ÓPTICAS DE ACESSO E ARQUITETURAS FTTx

No capítulo anterior foi apresentada uma visão geral da estrutura básica dos sistemas de telecomunicações. O presente capítulo busca abordar os conceitos elementares das arquiteturas FTTx e das soluções para redes de acesso que utilizam tecnologias de redes ópticas passivas e ativas.

3.1. Arquiteturas FTTx

Dependendo do ponto de término da utilização da fibra, a arquitetura da rede receberá diferentes nomenclaturas [11]. As arquiteturas comumente utilizadas pelas operadoras estão representadas na Figura 3.1 e são descritas nos itens a seguir:

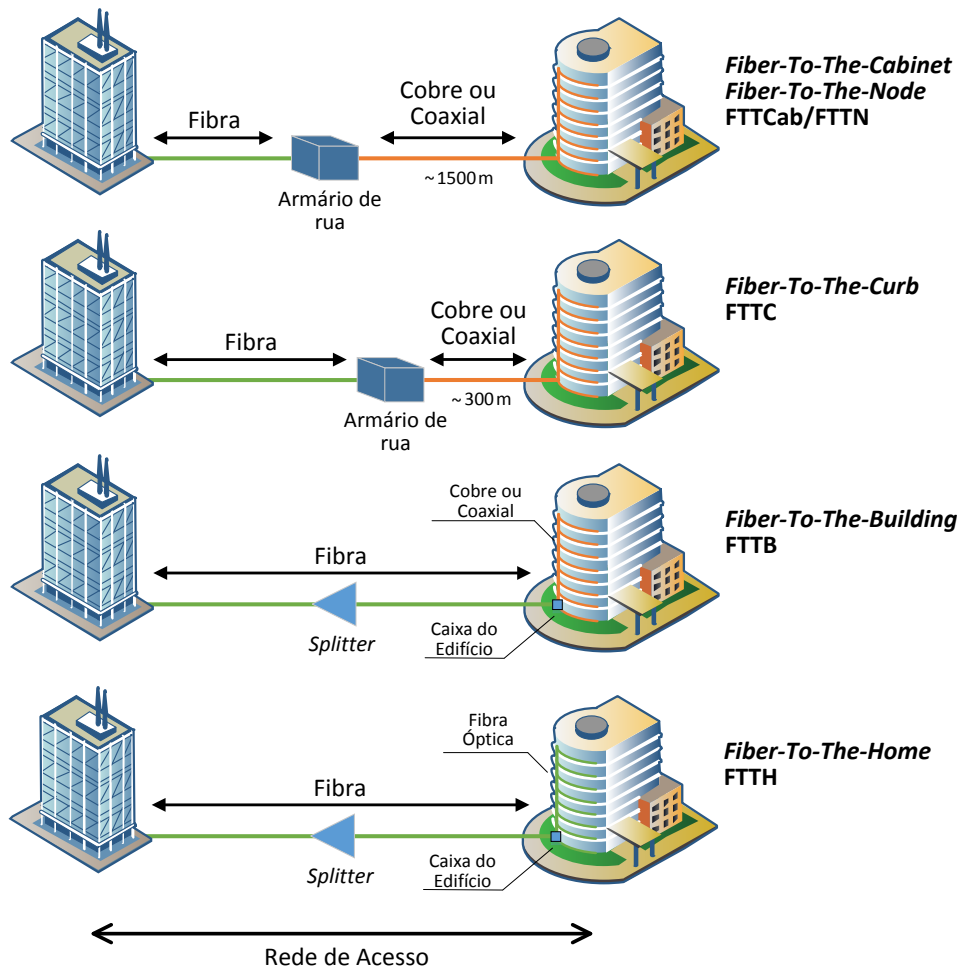


Figura 3.1 – Arquiteturas de redes de acesso FTTx. Adaptado de [5].

- a) **FTTN (*Fiber-To-The-Node*)** ou **FTTCab (*Fiber-To-The-Cabinet*)**: são nomenclaturas utilizadas para representar a arquitetura em que a fibra óptica termina em um armário de telecomunicações localizado em áreas externas (exemplo: calçada de uma rua) [23]. Nessa configuração são reutilizadas infraestruturas de tecnologias existentes, como par de cobre ou cabo coaxial, para levar a rede até a casa do cliente. O raio da área coberta por essa arquitetura é normalmente inferior a 1500m e poderá abranger até algumas centenas de clientes [5];
- b) **FTTC (*Fiber-To-The-Curb*)**: é uma arquitetura cujos cabos de fibra óptica chegam até um armário de telecomunicações, localizado em áreas externas, servindo uma área reduzida (com cerca de 300m de raio) [22]. Nesta configuração, também é efetuada a reutilização de infraestrutura de tecnologias existentes (par de cobre ou cabo coaxial). Esta arquitetura difere das arquiteturas FTTN e FTTCab, pois o armário de telecomunicações já se encontra a uma pequena distância dos clientes;
- c) **FTTB (*Fiber-To-The-Building*)**: nesta arquitetura a fibra óptica chega até o edifício do cliente (não chegando diretamente à casa do utilizador final) [22]. A interligação entre a caixa de entrada do edifício e o utilizador é realizada por de par de cobre, cabo coaxial ou algum outro meio de comunicação diferente da fibra óptica;
- d) **FTTH (*Fiber-To-The-Home*)**: a fibra óptica chega à residência do usuário final ou ao estabelecimento comercial do cliente [11]. Esta arquitetura apresenta maior qualidade e capacidade de transmissão, quando comparada às arquiteturas anteriores, devido à utilização de fibra óptica em toda a rede de acesso. No entanto, para implementar essa tecnologia é necessário maior investimento.

3.2. Redes ópticas passivas

A tecnologia PON (*Passive Optical Network*) é uma solução desenvolvida para redes de acesso que fazem o uso de conexões ponto-multiponto e utiliza arquiteturas FTTx. Conforme apresentado na Figura 3.2 e descrito nas referências [24], [25] e [26], a rede PON é originalmente composta por três dispositivos principais, além de cabos e acessórios ópticos, que são descritos a seguir:

- a) **OLT (*Optical Line Terminal*)**: este equipamento tem a função de administrar o tráfego da rede, disponibilizar serviços para usuários finais, controlar a qualidade de serviço

- (QoS), entre outras tarefas. Para isso, ele se encontra na sala de equipamentos do provedor de serviços (*Central Office*).
- b) **ONT (*Optical Network Terminal*) ou ONU (*Optical Network Unit*):** Na terminação da rede (cliente) está localizado a ONT ou ONU, que tem a função básica de converter o sinal óptico em sinal elétrico para ser utilizado por dispositivos eletrônicos da rede local.
- c) **Acopladores ou Divisores Ópticos (*Splitters*):** São dispositivos passivos, ou seja, não requerem alimentação elétrica e nem ambiente climatizado. Possuem múltiplas saídas e têm a função de dividir o sinal óptico de entrada, proveniente de uma porta da OLT, em várias saídas para as fibras que serão conectadas a cada ONT (no sentido *downstream*). Também são capazes de recombinar o sinal no sentido *upstream*. Sua configuração de entrada/saída varia comumente entre 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64. Estes dispositivos apresentam tamanho reduzido e baixo custo.

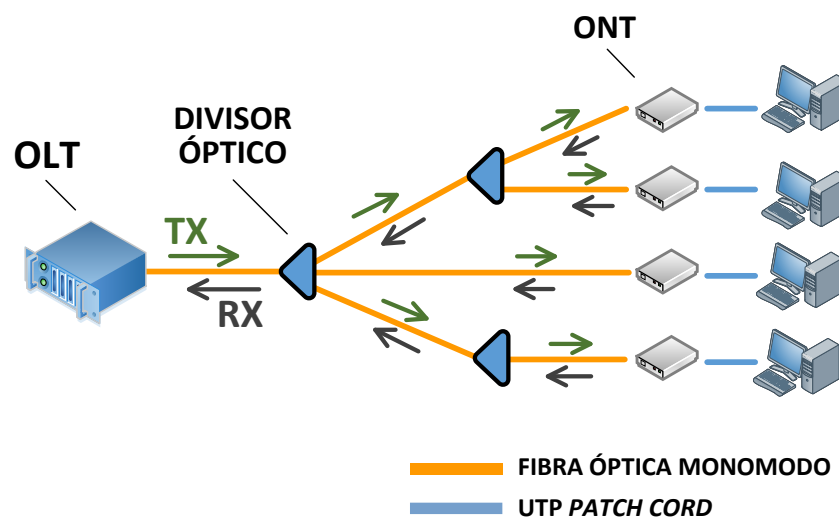


Figura 3.2 – Elementos básicos de uma Rede Óptica Passiva PON.

Conforme apresentado na Figura 3.2, na rede óptica de distribuição ODN (*Optical Distribution Network*) de um sistema PON, são utilizadas apenas fibras monomodo e divisores ópticos passivos (*splitters*) e, desta forma, uma única fibra óptica é capaz de servir vários clientes simultaneamente, atendendo tipicamente entre 64 e 128 clientes (o número de clientes depende da tecnologia ou equipamentos utilizados) [26]. Essa arquitetura permite uma grande redução no número de fibras utilizadas, quando comparada às arquiteturas ponto a ponto, simplificando assim as redes de acesso das empresas de telecomunicações. Um esquema básico de uma rede típica PON é apresentado na Figura 3.3, na qual é possível observar os elementos e os diversos serviços que podem ser oferecidos.

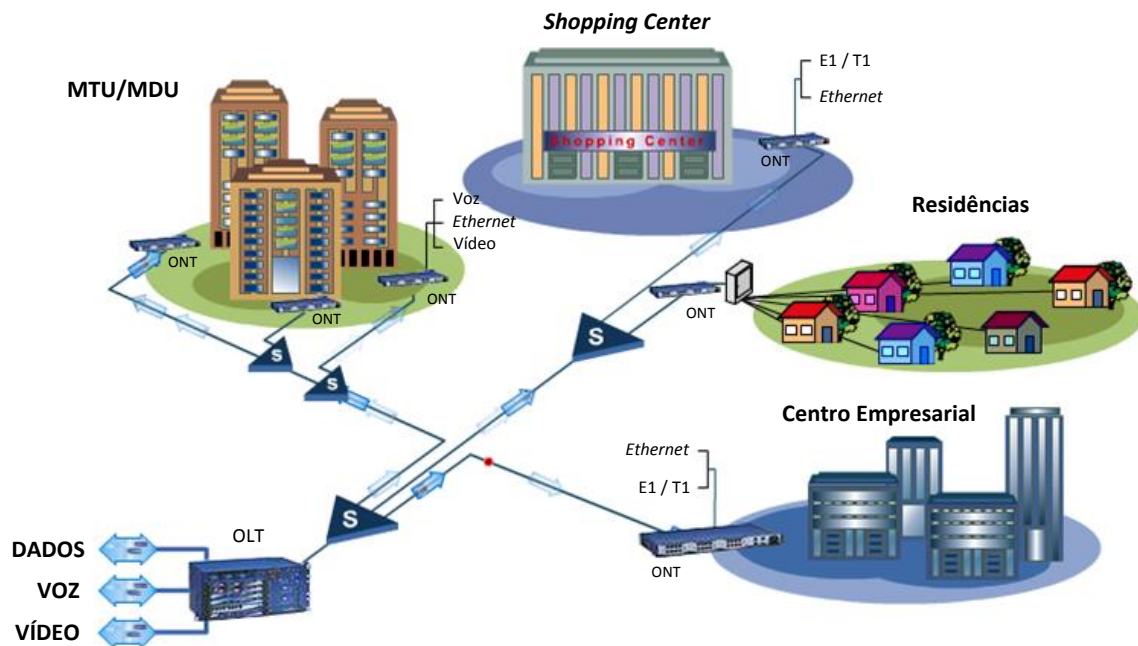


Figura 3.3 – Exemplo de uma rede PON [27].

Os sistemas PON são essencialmente baseados no princípio de compartilhamento temporal do canal conhecido como TDM (*Time Division Multiplexing*) ou baseados no compartilhamento espectral do canal conhecido como WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [28]. No primeiro caso encontram-se os sistemas TDM-PON, com estão os conhecidos e difundidos sistemas EPON (*Ethernet Passive Optical Network*), GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) e suas evoluções. No segundo caso, e muito mais recente, estão os sistemas WDM-PON. Um terceiro e último caso, ainda em fase de desenvolvimento, engloba os sistemas híbridos baseados em TWDM-PON (*Time Wavelength Division Multiplexing – PON*).

3.2.1. Sistemas TDM-PON

Atualmente, as soluções de acesso ópticas mais utilizadas e difundidas no mundo são baseadas em TDM-PON [25], que combina alta capacidade oferecida pelas fibras ópticas com o baixo custo na instalação e manutenção da infraestrutura passiva. Neste sistema, uma fibra utiliza dois comprimentos de onda distintos, sendo um para transmissão do sinal de *downstream*, ou seja, da central (OLT) para usuários (usa-se a região do espectro de 1.490nm) e outro para *upstream*, do usuário para a central (usa-se a região do espectro de 1.310nm). Deve-se destacar que o comprimento de onda 1550nm é, normalmente, reservado para transmissão de sinais de vídeo [24].

Na tecnologia TDM-PON os fluxos *downstream* e *upstream* acontecem de maneira diferente. Os sinais *downstream* são transmitidos em *broadcast*, por mecanismo de TDM, pela OLT para todos os dispositivos finais que partilham a mesma fibra, e cada ONT seleciona a informação que a ela é destinada. Os dados são criptografados para que apenas a estação correta tenha acesso à informação transmitida. No sentido *upstream* os sinais são combinados com o protocolo de acesso múltiplo TDMA (*Time Division Multiple Access*), compartilhando assim o mesmo meio físico. Deve-se destacar que o elemento concentrador da rede (OLT) se comunica constantemente com as ONTs, de forma a garantir o correto sincronismo nas comunicações *upstream*, utilizando algoritmos de alocação dinâmica de banda (DBA) [29], permitindo assim que a banda compartilhada se adapte instantaneamente à demanda de tráfego de cada dispositivo da rede. A Figura 3.4 representa como os fluxos *downstream* e *upstream* ocorrem em um sistema PON baseado em TDM.

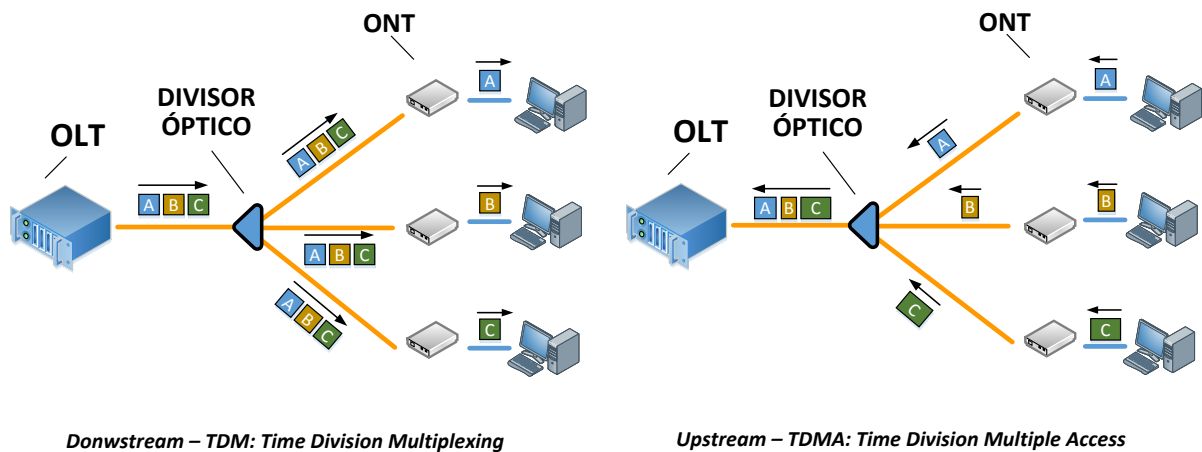


Figura 3.4 – Funcionamento de *downstream* e *upstream* em sistemas TDM-PON.

3.2.2. Sistemas WDM-PON

Nos sistemas baseados em WDM-PON são utilizados múltiplos comprimentos de onda (Figura 3.5). Desta forma, cada ONT tem seu próprio canal de comunicação com a OLT dentro de uma mesma fibra óptica [30]. Assim, obtém-se uma maior capacidade de transmissão de dados, segurança e estabilidade devido ao uso de comprimentos de onda distintos, e não janelas temporais como no caso das tecnologias PON baseadas em TDM.

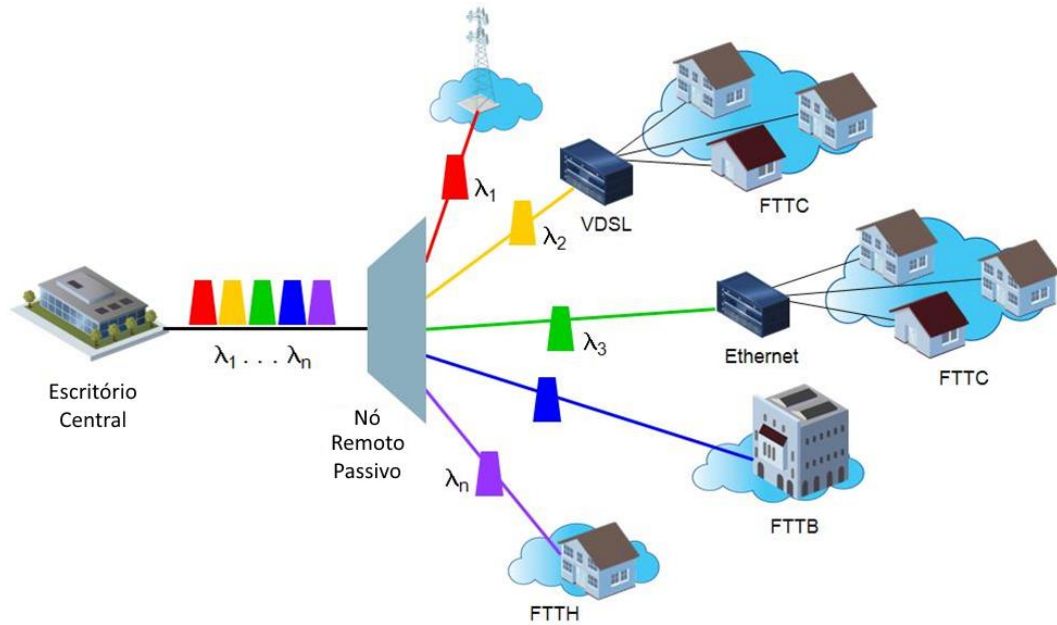


Figura 3.5 – Esquema básico do modelo WDM-PON [31].

A topologia da rede WDM-PON pode ser configurada de várias maneiras, porém os dois métodos mais básicos são descritos a seguir.

- a) **Método *Broadcast***: A OLT envia todos os comprimentos de onda em uma única fibra e, por meio de divisores ópticos passivos (*splitters*), todas as ONTs recebem o sinal, contendo todos os comprimentos de onda. Na recepção as ONTs realizam a filtragem, com receptores ópticos sintonizáveis, para ter acesso somente à frequência a ela destinada.
- b) **Método de utilização de AWG (*Arrayed Waveguide Grating*)**: Utiliza-se um dispositivo passivo na rede ODN conhecido como AWG que funciona como um roteador de comprimento de ondas. O dispositivo recebe um sinal com vários comprimentos de onda e os separa em diferentes saídas, conforme exemplificado na Figura 3.5.

Apesar da maior sensibilidade à temperatura e complexidade dos dispositivos AWG em relação aos *splitters*, esses possuem perdas reduzidas (em torno de 5 dB independentemente do número de comprimento de ondas utilizados) e oferecem maior segurança à rede [30].

Embora o sistema WDM-PON seja considerado, por muitos, uma alternativa para as redes de acesso e possua algumas vantagens, esta tecnologia apresenta um alto custo quando comparado às tradicionais soluções TDM-PON. É importante ressaltar que o sistema

WDM-PON não é padronizado por nenhum órgão internacional de telecomunicações [32]. Portanto, a solução ainda não é adotada em grande escala pelas grandes operadoras de telecomunicações.

3.2.3. Sistemas TWDM-PON

Buscando padronizar uma tecnologia PON que seja capaz de oferecer largura de banda superior à 10 Gbit/s, a ITU (*International Telecommunications Union*), em 2013 escolheu a tecnologia TWDM como solução primária para a NG-PON2 (*Next Generation – PON2*). Apesar de ser uma tecnologia recente, e ainda pouco explorada, espera-se taxas de transmissão *downstream* na ordem de 40 Gbit/s e que áreas de cobertura de 40km sejam alcançadas por uma única OLT [21]. Um dos requisitos que deve ser respeitado é a compatibilidade com as redes ODNs existentes, podendo, inclusive, operar em paralelo com outras redes TDM-PON. Apesar das vantagens citadas, deve-se ressaltar que o processo de padronização do TWDM-PON ainda está em curso pelo ITU-T (recomendações G.989.x).

O conceito básico de funcionamento da rede TWDM-PON é simples e se baseia em agregar mais canais PON em uma única fibra, por meio de diferentes comprimentos de onda. Segundo os requisitos definidos pela ITU-T em [33], uma rede TWDM-PON requer quatro ou oito canais e cada par representa um canal de comprimento de onda para tráfego *downstream* e *upstream*, respectivamente. É importante salientar que o sistema TDWDM-PON não requer uma grande quantidade de canais como o WDM-PON puro. Desta forma, os detectores/transmissores não apresentam custos tão elevados.

3.2.4. Comparativo das tecnologias baseadas em PON

Conforme destacado em [32], a Figura 3.6 ilustra a cronologia de evolução das tecnologias PON especificadas pelo ITU-T e pelo IEEE. A Tabela 3.1 apresenta as principais características técnicas de cada tecnologia.

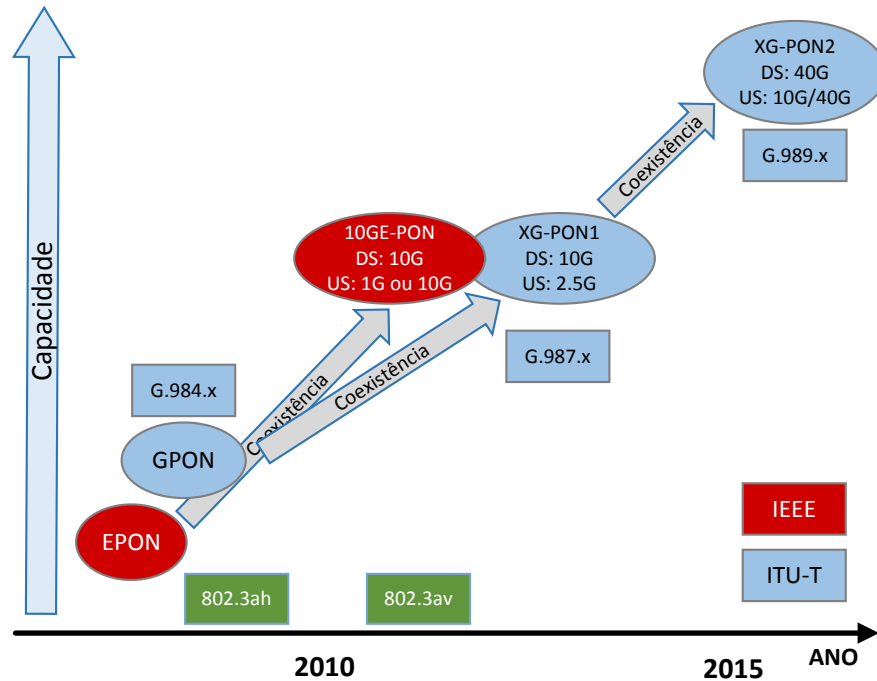


Figura 3.6 – Evolução da normatização das tecnologias PON [32].

Tabela 3.1 – Principais características das tecnologias PON (padronizadas pelo ITU-T e pelo IEEE). Obtido em [21], [33], [34] e [35].

	EPON	GPON	10GE-PON	10GPON (NG-PON1)	TWDM-PON (NG-PON2)
Taxa de <i>downstream</i>	1,25 Gbit/s	2.5 Gbit/s	10 Gbit/s	10 Gbit/s	40 Gbit/s
Taxa de <i>upstream</i>	1,25 Gbit/s	1.25 ou 2.5 Gbit/s	1 ou 10 Gbit/s	2.5 ou 10 Gbit/s	10 ou 40 Gbit/s
Comprimento de onda <i>downstream</i>	1490 nm	1490 nm	1575 a 1580 nm	1575 a 1580 nm	4×λ. Ajustável (dentro os disponíveis)
Comprimento de onda <i>upstream</i>	1310 nm	1310 nm	1260 a 1280 nm	1260 a 1280 nm	4×λ. Ajustável (dentro os disponíveis)
Comprimento de onda de vídeo <i>broadcast</i>	1550 nm	1510 nm	1550 nm	1550 nm	Ajustável
Alcance máximo	20 km	20 km	20 km	20 km	40 km
Número máximo de usuários (porta PON)	16 ou 32	64 ou 128	64 ou 128	128 ou 256	256
Custo	Baixo	Médio	Alto	Alto	Não disponível comercialmente

Diante das características apresentadas na Figura 3.6 e na Tabela 3.1, deve-se destacar que, atualmente, a tecnologia GPON tem sido a principal escolha das operadoras de telecomunicações para as redes de acesso. Esta escolha se baseia principalmente no seu bom custo/benefício e também na possibilidade de coexistência na mesma infraestrutura com seu sucessor 10GPON [32]. Essa coexistência só é possível devido aos diferentes comprimentos de onda centrais utilizados entre as tecnologias nos sentidos *downstream* e *upstream*.

3.3. Redes Ópticas Ativas – AON

As redes ópticas ativas (AON – *Active Optical Network*) se diferenciam das redes passivas basicamente pela presença de dispositivos que necessitam de energia elétrica na rede de distribuição ODN (*Optical Distribution Network*) [5]. Esses dispositivos são normalmente roteadores, comutadores ou multiplexadores que são dispostos ao longo da rede ODN e possuem N portas, fazendo a transformação do sinal óptico em elétrico e depois novamente em sinal óptico. Este procedimento pode ocorrer mais de uma vez até que o sinal chegue à casa do usuário final.

As redes AON podem ser divididas basicamente em duas categorias: *Active Ethernet* e PtP (*Point to point*) ou *Home Run*.

3.3.1. AON – *Active Ethernet*

A rede AON – *Active Ethernet* é considerada o tipo mais comum de redes ópticas ativas, e se baseia no padrão de rede *Ethernet*. Nesta tecnologia utilizam-se comutadores ópticos na ODN (*Optical Distribution Network*), para realizar a distribuição do sinal proveniente do CO (*Central Office*) e, desta forma, configura-se uma arquitetura ponto-multiponto em que múltiplos utilizadores partilham a capacidade mesma fibra óptica até um determinado nó da rede, conforme apresentado na Figura 3.7. Porém, deve-se destacar que, devido ao compartilhamento da infraestrutura entre o CO e o nó remoto, a largura de banda do sistema é compartilhada nestes trechos.

Devido ao pioneirismo, a simplicidade e por ser baseada em *Ethernet*, a arquitetura de redes de acesso AON – *Active Ethernet*, é uma das principais tecnologias de redes de acesso utilizadas na Europa e, em 2012, representava mais de 78% da tecnologia utilizada no mercado Europeu [36]. No entanto, devido ao alto custo de manutenção e por não suportar o *triple play service* de forma nativa, as redes AON têm sido gradativamente substituídas pelas redes PON.

3.3.2. AON – PtP ou *Home-Run*

Na arquitetura conhecida como *Home-Run* é utilizado uma infraestrutura ponto a ponto, ou seja, uma única fibra óptica dedicada é interligada diretamente entre a OLT (*Optical Line Terminal*), localizada no *Central Office*, e a ONT (ONU), localizada nas dependências do assinante, conforme apresentado na Figura 3.7. Nesta arquitetura os assinantes podem estar localizados a uma distância de, no máximo, 80km da OLT, e cada um tem uma fibra óptica dedicada

que garante largura de banda completa e bidirecional [5]. A grande vantagem desta topologia é a capacidade de ser reconfigurada somente alterando os equipamentos terminais, já que a infraestrutura entre a central e o assinante é composta apenas por fibra óptica dedicada. Entretanto, o número de fibras necessárias e os elevados custos envolvidos para implantação e manutenção tornam esta tecnologia uma opção pouco vantajosa em termos de CAPEX (*Capital Expenditure*) e OPEX (*Operational Expenditure Costs*) por assinante para as operadoras.

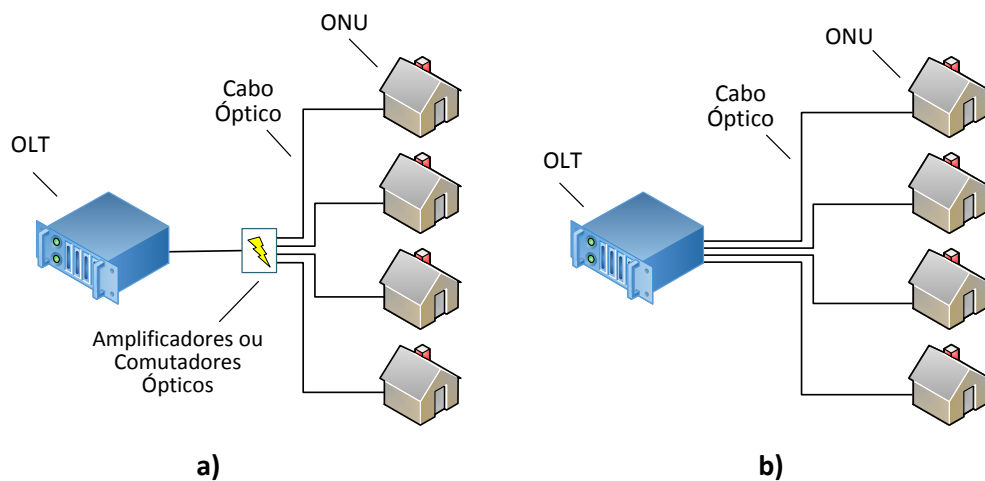


Figura 3.7 – Sistemas AON: a) *Active Ethernet* e b) *PtP* ou *Home-Run*.

CAPÍTULO 4

4. UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIA PON EM LAN

Neste capítulo é detalhado um dos problemas foco deste trabalho: a análise de uma nova proposta, conhecida como PON-LAN, que usa a tecnologia PON para LANs. Conforme já detalhado nas seções anteriores, os sistemas PON são soluções originalmente desenvolvidas para redes de acesso. No entanto, devido ao seu sucesso, à alta capacidade dos sistemas ópticos e à queda nos custos dos materiais usados, a tecnologia passou a ser utilizada em redes locais (redes dos clientes) de médio e grande porte, dando origem a uma nova alternativa ao tradicional sistema de cabeamento estruturado metálico.

Apesar do conceito PON-LAN ser uma aplicação relativamente nova e ainda não existir uma norma técnica que trate exclusivamente desta aplicação, sistemas PON-LAN tem sido recomendados por fornecedores e empresas do ramo de telecomunicações para grandes estabelecimentos, condomínios, etc. Esta solução, inclusive, já possui alguns *cases* implantados com a promessa de alta eficiência energética, melhor gerência da rede, investimento duradouro e principalmente custo competitivo de implantação, operação e manutenção quando comparado à solução metálica tradicional [14]. No entanto, apesar das promessas dos fabricantes, encontram-se ainda na literatura poucos trabalhos que abordam o tema de forma profunda e que contenham análises de cenários reais. Sendo assim, alguns pontos ainda precisam ser observados e analisados:

- Quais são as reais vantagens dos sistemas PON-LAN em um cenário corporativo real?
- Para quais cenários sistemas PON-LAN são recomendados?

4.1. Redes PON: Uma Alternativa às LANs Convencionais

Em redes locais de médio e grande porte a quantidade de cabos, ativos da rede e o número de conexões (além da maneira como estes elementos estarão dispostos) são fatores cruciais em um projeto de infraestrutura de redes. Eles passam a ter um importante papel no custo de instalação, manutenção e gerenciamento da rede. Ao buscar uma solução que minimizasse todos estes problemas, foi desenvolvido, por comitês técnicos internacionais, em meados de

1991, um conjunto de normas cujo objetivo era planejar e estabelecer padrões para instalações de cabeamento de redes locais (redes LAN) em edifícios comerciais. Destes padrões, o mais conhecido e adotado é o americano revisado ANSI/TIA/EIA-568-B, que discute os requisitos gerais para esses sistemas.

Esse conjunto de normas, quando aplicado a uma determinada rede local, é conhecido tecnicamente como sistema de cabeamento estruturado e pode ser definido como um sistema que envolve cabos e *hardware* de conexão (conforme definido em normas), capaz de atender as necessidades de telecomunicações dos usuários e de edifícios comerciais [37]. Nesse sistema, cada tomada instalada em uma área de trabalho é considerada uma tomada para telecomunicações e pode ser usada para qualquer aplicação disponível, seja uma aplicação de dados, voz ou vídeo.

Atualmente, em projetos de infraestrutura desenvolvidos para redes locais, o uso do cabeamento metálico foi, e ainda é, predominante neste tipo de aplicação. No entanto, devido ao sucesso da tecnologia PON nas redes de acesso, percebeu-se que ela pode ser aplicada nas redes locais. A proposta é entregar todos os serviços presentes em uma LAN, por meio do uso da rede óptica passiva, buscando suprir as principais deficiências encontradas nas soluções que utilizam o cabeamento metálico convencional. Na Figura 4.1 são destacadas as principais diferenças entre a estrutura do cabeamento estruturado tradicional e a estrutura das redes PON-LAN.

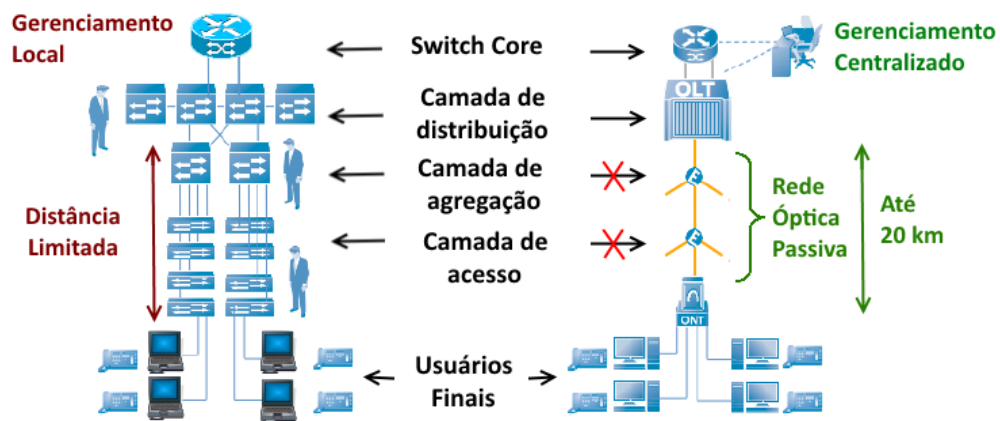


Figura 4.1 – Comparação entre cabeamento estruturado tradicional x Redes PON-LAN. Adaptado de [14].

No sistema de cabeamento estruturado tradicional, o conceito e os materiais utilizados possuem algumas deficiências que podem ser destacadas. Entre essas deficiências estão fatores relacionados ao cabeamento metálico, consumo de energia, refrigeração e densidade de usuá-

rios finais [14]. Devido a uma limitação física do cabeamento metálico empregado (par trançado), recomenda-se a sua utilização para distâncias de no máximo 100m entre o *switch* de acesso e a estação de trabalho (usuário final) [37]. Essa limitação, juntamente com o baixo número de portas em *switches* convencionais, faz com que, em complexos de média a grande área geográfica, seja necessária a utilização de um grande número de *switches* para atender a camada de acesso, aumentando assim o custo de instalação, gastos com energia e refrigeração e o espaço físico necessário para o armazenamento seguro de ativos da rede. Outra limitação de arquiteturas tradicionais LAN é a complexidade de gerência da rede. Para configuração de algumas aplicações na rede, como por exemplo VLANs (*Virtual LANs*), é necessário a configuração individual de múltiplos *switches* presentes na rede, o que pode gerar um trabalho intenso e muito susceptível a erros humanos [14].

Diante das deficiências apresentadas, existem algumas claras vantagens na utilização da tecnologia PON em alternativa ao sistema de cabeamento estruturado convencional. Estas podem ser destacadas:

- **Infraestrutura reduzida:** A distância máxima entre a OLT e as ONTs pode ser de até 20km (em redes GPON), ou seja, 200 vezes o valor recomendado para cabeamento metálico. Portanto, não há a necessidade de salas técnicas e equipamentos ativos de rede nas camadas intermediárias e assim, conseqüentemente, há uma redução de espaço físico necessário e consumo de energia com equipamentos ativos e para refrigeração. Nos grandes centros urbanos, onde o valor do m² pode ser consideravelmente alto, esta vantagem torna-se ainda mais evidente;
- **Baixo consumo de energia:** O equipamento concentrador da rede (OLT) tem como característica um baixo consumo de energia elétrica, quando comparado a uma rede convencional com *switches* ativos [16]. Para uma OLT GPON, cada porta tem, normalmente, a capacidade de atendimento de até 64 pontos/clientes. Considerando que cada ONT normalmente possui até quatro portas *Ethernet* e cada OLT pode possuir de oito a 72 portas PON, totaliza uma capacidade de atendimento de até 18.432 pontos de acesso em uma única OLT;
- **Investimento protegido:** A tecnologia PON utiliza em sua rede de distribuição basicamente fibras ópticas monomodo e *splitters*. A fibra óptica monomodo é um meio de transmissão de alta capacidade que ainda não foi totalmente explorada. Logo, com a evolução da tecnologia, o mesmo cabo óptico monomodo, hoje utilizado, tem

potencial para atingir taxas de transmissão cada vez maiores. Em testes, a possibilidade de transmissão alcança a ordem de *Tbit/s* [38]. Atualmente em sistemas GPON é possível alcançar taxas de até 2.5 *Gbit/s* para *downlink* e 1.25 *Gbit/s* para *uplink* por ponto. No entanto, é importante destacar que, em futuras atualizações de tecnologia, será necessário somente a substituição da OLT e das ONTs, e não de todo o cabeamento, como ocorre hoje com a solução metálica;

- **Fácil Integração:** Ao utilizar a tecnologia PON, todos os serviços convergirão para uma única infraestrutura, eliminando a necessidade das múltiplas plataformas. Dados, voz (sistema analógico de telefonia e sistemas VoIP), sistemas de vídeo, videoconferências, sistemas sem fio e sistemas de monitoramento (câmeras, sensores, sistemas de automação, entre outros) são suportados pela tecnologia PON [38];
- **Segurança:** Faz o uso de criptografia nativa (AES – *Advanced Encryption Standard*) na comunicação entre OLT e ONT, garantindo a integridade dos dados. Como o sistema é baseado no uso de fibras ópticas, toda a rede de distribuição PON é imune a interferências eletromagnéticas;
- **Menor custo com infraestrutura e instalação:** Dependendo do tamanho e da disposição da rede, o CAPEX (*Capital Expenditure*), ou seja, capital investido em materiais e instalação física da rede pode ser consideravelmente menor [14]. Visto que, um cabo óptico, para aplicação *indoor*, com poucas fibras ópticas, tem dimensões menores, sendo mais leve que o cabo metálico UTP CAT6 (categoria 6). Os custos com instalação de cabeamento para camada de acesso são menores quando comparados a uma solução LAN tradicional. Essa economia fica mais evidente quando se leva em conta que, normalmente, uma única ONT possui quatro portas *Ethernet*, ou seja, com uma única fibra pode-se atender quatro dispositivos finais [16]. Essa redução de cabos significa também infraestruturas mais simples, redução de espaços e menor tempo de instalação;
- **Menor custo com operação:** Por utilizar uma topologia centralizada, somente a OLT é acessada para fazer toda e qualquer gerência na rede, incluindo atualizações e modificações nas ONTs, gerando uma economia operacional (OPEX – *Operational Expenditure*) considerável em relação às redes tradicionais que utilizam *switches*.

4.2. Trabalhos Relacionados

Apesar do conceito PON LAN ser uma aplicação relativamente nova e ainda não existir uma norma técnica que trate exclusivamente desta aplicação, alguns estudos e projetos já foram desenvolvidos nesta área e parte deles foram executados em ambientes corporativos reais, apresentando uma redução de custo significativa quando comparado ao sistema de cabeamento estruturado metálico convencional.

Durante as pesquisas foi detectado que maioria dos trabalhos que abordam o tema, somente trata das vantagens técnicas deixando de lado um importante dado: a estimativa de redução de custo na instalação e na operação em cenários corporativos reais.

Na Tabela 4.1 encontram-se os principais trabalhos e projetos disponíveis na literatura e suas respectivas reduções de CAPEX e OPEX (em comparação a projetos de cabeamento estruturado convencionais). No trabalho [14] foi desenvolvido um estudo comparativo com uma rede PON LAN implantada em um ambiente corporativo de um prédio de médio porte nos Estados Unidos. Nos trabalhos [15] e [16] são realizadas comparações hipotéticas entre a solução PON LAN e a solução de cabeamento metálico convencional.

Tabela 4.1 – Trabalhos relacionados: Redução de CAPEX e OPEX obtidos na utilização de PON LAN (comparação com cabeamento metálico convencional) [14], [15] e [16].

Trabalhos Relacionados	Número de Usuários	Número de andares	CAPEX	OPEX (1 ANO)
[14]	1500	4	36,7%	-40%
[15]	2000	10	56%	-54%
[16]	250	N/D	31%	-40%
[16]	500	N/D	41%	-50%
[16]	1000	N/D	48%	-65%
[16]	5000	N/D	55%	-70%

N/D: Valores não disponíveis

4.3. Tecnologia PON e o Uso Compartilhado de Banda

Conforme pode ser visto na Tabela 3.1, em sistemas GPON, uma única porta da OLT normalmente é capaz de atender simultaneamente até 64 ONTs, embora divisões maiores sejam possíveis ao custo de redução da banda disponível por ONT. O fato que deve ser destacado é que na tecnologia GPON a banda disponível em cada porta PON (2.5/1.25 Gbit/s) é compartilhada entre o número total de ONTs conectadas a aquela porta, ou seja, em uma situação hipotética em que o sistema opere com as 64 ONTs conectadas, cada uma terá 39.06/19.53 Mbit/s de *downlink* e *uplink*, respectivamente. Considerando que normalmente cada ONT possui quatro portas *Ethernet* e, para otimizar os custos, espera-se que sejam utilizadas ao máximo as

portas disponíveis, estaria disponível em cada porta da ONT 9.76Mbit/s e 4.88Mbit/s de *downlink* e *uplink*, respectivamente. Apesar dessa característica, deve-se ressaltar que a tecnologia GPON faz o uso de alocação dinâmica de banda no sentido *upstream*, permitindo assim que a banda compartilhada se adapte instantaneamente à demanda de tráfego de cada dispositivo da rede [29], o que faz com que todo o recurso de cada porta da OLT seja utilizado de forma eficiente. É possível também definir, de acordo com a necessidade individual de cada usuário ou de um grupo, a capacidade de banda disponível por porta na ONT.

Para efeito de comparação, em sistemas de cabeamento metálico convencional, o atendimento dos dispositivos finais faz-se com o uso de *switches* de acesso, que normalmente possuem a capacidade de transferência de 100 ou 1000Mbit/s por porta *Ethernet*. No entanto, estes valores podem não ser atingidos devido à interligação entre o conjunto de *switches* empilhados da camada de acesso e os *switches* da camada de agregação, pois são normalmente feitos com dois links de 1Gbit/s . Logo, na situação hipotética de total utilização das 24 portas disponíveis de cada equipamento em uma pilha de, por exemplo, oito *switches* pode-se obter $10,41\text{Mbit/s}$ de *downlink* e *uplink* para cada porta disponível no *switch* de acesso (o tamanho máximo da pilha varia conforme as características dos equipamentos utilizados).

Diante dos valores apresentados para cada tecnologia, deve-se destacar que estes cenários descrevem o pior caso, em que todo o recurso da rede é distribuído igualmente entre as portas disponíveis, fato este que, estatisticamente, não ocorre em uma situação real.

Em [14] foram analisados padrões de tráfego e utilização típica de banda por aplicação em um grande cenário corporativo. Na Tabela 4.2 pode-se observar que as aplicações comuns em ambientes corporativos não requerem um demasiado consumo de banda, ajustando-se perfeitamente aos valores oferecidos tanto pela solução metálica tradicional quanto pela tecnologia GPON, mesmo para casos extremos de uso da rede.

Tabela 4.2 – Consumo de banda típico para aplicações corporativas comuns. Dados obtidos em [14].

Aplicação	Configuração	Taxa Utilizada
Telefone VoIP	64kbit/s Setup	$\sim 100\text{kbit/s}$
Video	Alta Definição MPEG4	$\sim 6\text{Mbit/s}$
E-mail	Atualizações média de dois minutos	~ 50 a 500kbit/s
Navegação WEB	Websites sem conteúdo de vídeo	~ 50 a 300kbit/s
Vídeo Conferência	720p	$\sim 2\text{Mbit/s}$
Cloud Access	Aplicação corporativa	~ 50 a 200kbit/s
Desktop Virtual	1080p full screen display	$\sim 50\text{kbit/s}$ a 2Mbit/s

4.4. Simulações e Análises Comparativas de CAPEX e OPEX

Desde sua fundação, no início da década de 1970, a PRODEB (Companhia de Processamento de Dados do Estado da Bahia) tem sido referência em atividades de prestação de serviços de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação) para órgãos do Governo do Estado da Bahia, tendo elaborado centenas de projetos de cabeamento estruturado convencional. Diante da possibilidade de redução de custos e de todos os benefícios prometidos com a utilização da tecnologia GPON para redes LAN, foi realizado um estudo comparativo, em um cenário real, entre as soluções de cabeamento estruturado convencional e a solução PON-LAN.

O cenário do estudo em questão foi um prédio de configuração típica do Governo do Estado da Bahia, com área física total de 1350m² por andar, distribuídos por cinco pavimentos e um subsolo, com um total de 1.708 pontos de acesso de rede, onde foi realizado o projeto de cabeamento estruturado convencional pela PRODEB, no ano de 2013. Para fins de comparação, foram atualizados os custos de materiais envolvidos nesse projeto de cabeamento estruturado e realizou-se a comparação detalhada de custo com um possível novo projeto PON-LAN.

Comumente, em projetos de cabeamento estruturado, o cliente envia o *layout* do prédio e sinaliza os locais onde é necessária a instalação das tomadas duplas de telecomunicações, sendo que normalmente espera-se que seja utilizada uma para dados e outra para voz por área de trabalho. Em situações de prédios comerciais em que o *layout* não está definido, a norma sugere que sejam instaladas no mínimo dois pontos de telecomunicações para 10m² de área de trabalho [37]. Em projetos PON-LAN, devido ao custo relativamente alto da ONT e buscando otimizar ao máximo os custos da rede, é recomendado que, sempre que possível, seja prevista a utilização das quatro portas *Ethernet*. Essas portas são normalmente disponíveis em cada ONT, para atender os pontos de telecomunicações em áreas de trabalho, o que, na prática, significa que alguns dispositivos finais necessitam estar localizados relativamente próximos (é recomendada a utilização de no máximo 5 m de cordão de manobra na área de trabalho [37]). Diversos estudos e demonstrativos de fabricantes sugerem a utilização das ONTs nestas condições, podendo ser destacados [14] e [16]. No entanto, apesar de ser frequente a utilização de baias em *layouts* de ambientes corporativos, nem sempre é possível o compartilhamento das quatro portas *Ethernet* da ONT entre duas áreas de trabalho, devido à distância física entre elas.

No projeto PON-LAN elaborado, a partir dos pontos de rede solicitados, em planta baixa do prédio do cenário em estudo, levou-se em conta a recomendação de distância máxima no

uso de cordões de manobra em área de trabalho. Desta forma, observou-se o quantitativo necessário de ONTs, por pavimento, para a solução. Os dados obtidos estão descritos na Tabela 4.3 e, a partir dela, verificou-se que é prevista a utilização, em média, de aproximadamente 2,93 pontos de rede por ONT para este projeto.

Tabela 4.3 – Número de pontos de rede solicitados e ONTs necessárias para cada pavimento do cenário em estudo (prédio típico do governo do estado).

PAVIMENTO	PONTOS DE REDE	ONTs NECESSÁRIAS	PONTOS DE REDE / ONTs (POR PAVIMENTO)
SUBSOLO	60	18	3,33
TERREO	228	72	3,17
1º PAV	426	153	2,78
2º PAV	266	96	2,77
3º PAV	464	156	2,97
4º PAV	264	87	3,03
MÉDIA / PAVIMENTO	284,66	97	2,93

4.4.1. Capital Investido (CAPEX)

A partir dos projetos elaborados para cada uma das soluções, obteve-se então o CAPEX (Capital Investido) para ambos os cenários. Esta informação representa o capital necessário para aquisição e instalação de todo o material a ser utilizado em cada solução. Para melhor representação, o custo total foi dividido em quatro categorias: infraestrutura horizontal, infraestrutura vertical, sala de equipamentos e serviço de instalação. O cálculo total do CAPEX para cada tecnologia pode ser definido como:

$$C_j = \sum_{i=1}^n (X_i + Y_i) Z_i, \quad (4-1)$$

$$T = \sum_{j=1}^m C_j, \quad (4-2)$$

em que C_j representa o CAPEX para a categoria j , T representa o CAPEX total, X_i representa o custo de aquisição do equipamento ou material i , Y_i representa o custo de instalação do equipamento ou material i e Z_i representa a quantidade necessária do equipamento ou material i . Foram usados 25 diferentes elementos para solução LAN e 24 diferentes elementos para solução PON.

Conforme pode ser visto na Tabela 4.4 nota-se que, para o cenário do estudo, há uma redução de capital investido total de 18%, quando se utiliza a solução PON. Foram utilizados

nesta comparação valores comumente praticados em cotações no mercado brasileiro de TI. Em relação ao CAPEX, os fatores mais relevantes, por categoria, são destacados a seguir.

Para a categoria infraestrutura horizontal o volume de cabos utilizados é significativamente menor, devido ao compartilhamento de fibras no cabo óptico (faz-se o uso de pontos de consolidação) e também devido às suas características físicas (eles são mais finos e mais leves em comparação com o cabo UTP CAT6). No entanto, destaca-se que, no projeto, o custo da infraestrutura horizontal na tecnologia PON é ligeiramente maior. Isto deve-se principalmente ao custo individual das ONTs, que é caracterizado como um dos parâmetros mais relevantes em um possível projeto PON LAN.

Para a categoria infraestrutura vertical há uma drástica redução no custo. Esta redução se justifica pela rede de distribuição na tecnologia PON ser centralizada e totalmente passiva, dispensando assim o uso de *switches* de acesso, permitindo custos significativamente menores em comparação com a tecnologia LAN convencional.

Para a sala de equipamentos (*data center*) o custo da tecnologia PON é significativamente maior, principalmente devido ao custo do equipamento concentrador da rede (OLT) que centraliza todo o tráfego e possui todos os recursos de processamento e segurança da rede.

Em relação ao serviço de instalação há uma significativa redução no custo e no tempo de instalação, devido principalmente ao menor volume de cabos a serem instalados na tecnologia PON. Por este motivo também, na rede de distribuição, são necessárias infraestruturas de menor capacidade e custo.

Tabela 4.4 – Comparação do CAPEX entre a solução LAN convencional (utilizando cabos CAT6) e a solução PON-LAN para o cenário em estudo (prédio típico do Governo do Estado).

	LAN	PON	ECONOMIA
INFRAESTUTURA HORIZONTAL	R\$ 498.000,24	R\$ 534.838,00	-7%
INFRAESTRUTURA VERTICAL	R\$ 227.723,68	R\$ 56.488,62	75%
SALA DE EQUIPAMENTOS (DATA CENTER)	R\$ 29.213,20	RS 61.109,40	-107%
SERVIÇO DE INSTALAÇÃO	R\$ 337.980,00	R\$ 249.013,33	26%
TOTAL CAPEX	R\$1.092.917,12	R\$ 901.449,35	18%

4.4.2. Custos Operacionais (OPEX)

Também a partir dos projetos elaborados obteve-se o OPEX para cada solução. Esta informação representa o capital utilizado, em um determinado período, para manter em funcionamento e sem interrupções toda a infraestrutura de rede de uma corporação. Para melhor representação o custo total foi dividido em quatro categorias: custo de gerência da rede, custo de refrigeração, custo de energia (ativos da rede) e espaço físico. O cálculo do OPEX anual para cada tecnologia pode ser definido como:

$$O_j = \sum_{i=1}^n 12X_i, \quad (4.3)$$

$$T = \sum_{j=1}^m O_j, \quad (4.4)$$

em que O_j representa o OPEX anual por categoria j , T representa o OPEX anual total, X_i representa o custo mensal estimado para manter o item ou serviço i em funcionamento e sem interrupções.

Conforme pode ser visto na Tabela 4.5, estimou-se o OPEX por um período de um ano obtendo-se uma redução de custo total de 32,97% e uma economia de espaço físico de 63,9%.

As demandas mais comuns de responsabilidade dos gestores de rede são: incluir ou remover dispositivo de rede, criar ou modificar endereços de IP, configurar algum serviço ou aplicação específica de rede, realizar atualização de *firmware* e *software* dos ativos, garantir a integridade e realizar o monitoramento da rede, garantir políticas de segurança na rede, aprimorar o conhecimento técnico da equipe por meio de cursos e treinamentos, substituir peças e gerenciar o estoque de reposição (*spare*) ou contratos de suporte e garantia do fabricante.

Na categoria custo de gerência da rede estimou-se que há uma redução de 30,74% no custo anual. Este fato se deve principalmente às redes PON utilizarem uma topologia centralizada e passiva, tendo toda a gerência lógica centralizada em um único equipamento, a OLT. Desta forma, há uma redução no tamanho e demanda de serviço da equipe de suporte e gerência da rede. Outro ponto que deve ser destacado é que o *troubleshooting* de problemas na solução de cabeamento estruturado convencional demanda o estudo de diversos pontos de falhas entre os *switches*, sendo assim o tempo necessário para identificar a origem da indisponibilidade pode ser longo e ocasionar prejuízos significativos às atividades da empresa. Assim, faz-se necessária

a aquisição de um *software* de gerenciamento e monitoramento de todos os ativos em uma única plataforma, para centralizar os alertas e as configurações. Na solução PON-LAN, a OLT permite de forma nativa que o administrador da rede tenha uma visão detalhada de todos os ativos, desempenho das aplicações, históricos de problemas (*logs*), sendo todo o ambiente monitorado e gerenciado pela própria OLT, dispensando o uso de programas de terceiros.

Deve-se destacar como pontos negativos o alto valor dos equipamentos para manutenção, testes e certificação de cabos ópticos (apesar da possibilidade da rede PON utilizar conectores de campo dispensando o uso de fusões ópticas para novos pontos de acesso). Outro ponto negativo é que o padrão de cabeamento estruturado metálico já está consolidado no mercado há vários anos. Isto significa que técnicos de suporte já possuem experiência nesta solução. No caso de implantação da nova tecnologia PON-LAN, haverá a necessidade de treinamento adequado para a toda a equipe de TI.

Nas categorias Refrigeração, Energia e Espaço físico necessário há uma redução de 83,3%, 12,6%, 63,9%, respectivamente. Novamente, essas reduções acontecem devido à rede de distribuição PON ser totalmente passiva e não necessitar de refrigeração nos armários de telecomunicações intermediários (que possuem dimensões reduzidas quando se compara à necessidade da solução metálica convencional), podendo então ser considerada uma tecnologia verde, conceito chave para os empreendimentos modernos, seja por motivos econômicos, ambientais ou de mercado.

Tabela 4.5 – Comparação do OPEX (período de um ano) entre a solução LAN convencional (utilizando cabos CAT6) e a solução PON-LAN para o cenário em estudo (prédio típico do Governo do Estado).

	LAN	PON	ECONOMIA
CUSTO DE GERÊNCIA DA REDE	R\$350.746	R\$242.921	30,74%
CUSTO DE REFRIGERAÇÃO	R\$ 24.463	R\$ 4.077	83,3%
CUSTO DE ENERGIA (ATIVOS DA REDE)	R\$ 21.943	R\$ 19.184	12,6%
TOTAL OPEX	R\$397.152	R\$266.182	32,97%
ESPAÇO FÍSICO NECESSÁRIO	71m ²	25m ²	63,9%

4.4.3. Estimativa de redução de CAPEX para outros cenários

Baseando-se novamente nos valores praticados no mercado e com o objetivo de conhecer a redução de custos para os mais diversos tamanhos de redes LAN, realizou-se uma simulação que estima e compara os custos de CAPEX para os seguintes cenários: a) simulação em um cenário de utilização de cabeamento metálico convencional; b) simulação em um cenário

PON LAN com utilização das quatro portas *Ethernet* disponíveis na ONT; c) simulação em um cenário PON LAN com utilização de, em média, 2,93 portas por ONT.

A estimativa de cada cenário supracitado foi baseada nas Equações (4-1) e (4-2). É importante salientar que se adequou (de forma estimada) a quantidade necessária de material Z_i para cada respectivo número de pontos de telecomunicações. Foram obtidos então valores de CAPEX para um cenário que varia de 24 até 2000 pontos de telecomunicações em uma rede LAN, conforme apresenta a Figura 4.2.

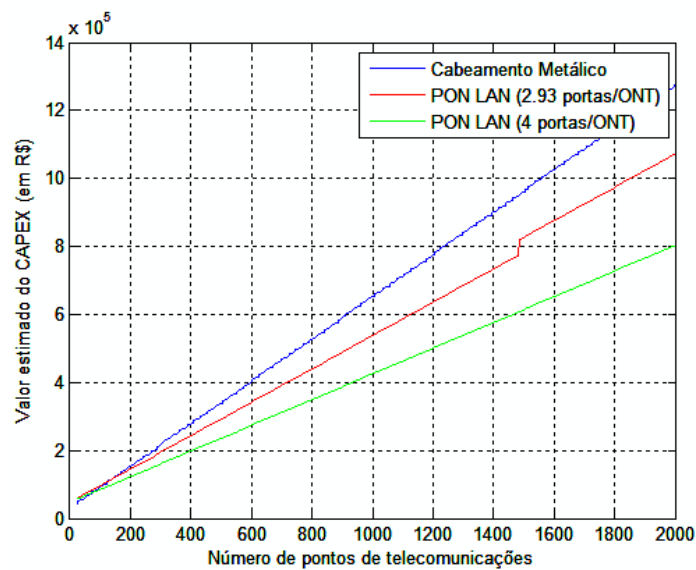


Figura 4.2 – Comparação entre as soluções LAN tradicional e PON LAN.

É possível notar que há uma redução de custo muito satisfatória (em relação à tecnologia de cabeamento metálico convencional), mesmo na situação baseada em um cenário real, em que há a utilização, em média, de 2,93 portas da ONT. Observa-se também que esta redução de custo tende a se tornar cada vez maior, conforme o tamanho da rede vai crescendo. Com base neste cenário, espera-se que a tecnologia PON-LAN passe a ser mais vantajosa, no aspecto econômico, a partir de projetos de rede contendo, pelo menos, 150 pontos de telecomunicações.

4.5. Conclusão

Apesar de ser um conceito relativamente novo e ainda não possuir uma regulamentação específica, a utilização das redes PON em aplicações LAN já é realidade e conta com alguns casos de sucesso implementados no mercado. Sendo assim, a solução PON-LAN surge como

uma alternativa aos difundidos sistemas de cabeamento estruturado convencionais, baseados em cabeamento metálico.

Neste trabalho concluiu-se que, tecnicamente, o novo sistema proposto possui diversas vantagens, sendo capaz de atender a todos os requisitos de uma rede corporativa comum e, em um estudo realizado em um cenário corporativo real com 1.708 pontos de telecomunicações, observa-se uma redução de CAPEX de 18% e de OPEX de 32,97% em um período de um ano (com destaque para a redução de consumo de energia elétrica).

Apesar de ser uma alternativa muito promissora para ambientes corporativos, a implantação da solução PON-LAN necessita ser analisada caso a caso, e com cautela, especialmente em situações de atualização de tecnologia, em que quase toda a infraestrutura deverá ser substituída. Deve-se levar em conta também que atualmente o cabeamento estruturado convencional é um padrão mundialmente consolidado, movimentando cerca de US\$24 bilhões de dólares anualmente [39] e ainda demandará algum tempo até que treinamentos e suporte para tecnologia PON LAN sejam igualmente difundidos no mercado de TI.

Pode-se concluir então que, devido às inúmeras vantagens do uso da tecnologia PON e à constante redução de custo dos materiais ópticos, a utilização das soluções tradicionais para as redes LAN (baseadas em cabeamento metálico) ganharam uma nova alternativa competitiva e promissora. Sendo assim a tendência é que, com passar dos anos, esta nova solução passe a ser cada vez mais utilizada e difundida no mercado de telecomunicações.

CAPÍTULO 5

5. PROPOSTA DE ALGORITMO PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ACESSO PON

Este capítulo descreve e detalha a ferramenta proposta para o problema de otimização de projetos de infraestrutura de redes ópticas de acesso PON. O planejamento e otimização de redes é um desafio presente no dia a dia de todas as pequenas e grandes empresas de telecomunicações, que desejam reduzir custos, melhorar os serviços e otimizar novos projetos de redes ópticas.

5.1. Problema Alvo

A crescente necessidade de taxa de transmissão por parte dos clientes e a busca por tecnologias ópticas que ofereçam CAPEX e OPEX reduzidos, aliados a uma demanda por alta qualidade de serviço, fizeram com que a PON surgisse como a tecnologia mais promissora para redes de acesso em situações de *upgrade* ou em *greenfield deployment* (situação em que toda a rede é instalada do zero) [25].

Conforme descrito no Capítulo 2, a rede de acesso é o segmento, de domínio e responsabilidade da prestadora de serviço, que conecta o nó de acesso da rede aos assinantes. Este nó de acesso pode ser o central, conhecido como *Central Office* (CO) ou outro ponto de interconexão da rede (*Point of Presence* – PoP) [10].

Atualmente, no Brasil, as redes de acesso são predominantemente constituídas por soluções baseadas em cabeamento metálico, conforme já visto na Tabela 1.1. Deve-se destacar que, devido às dimensões do País e o baixo desenvolvimento econômico apresentado em algumas regiões, ainda há diversas áreas sem ou com pouca abrangência do serviço de banda larga fixa de qualidade (apesar dos esforços do governo em expandir o serviço por todo o território nacional) [6].

Desta maneira, os sistemas ópticos baseados na tecnologia PON se apresentam como uma alternativa viável e econômica, capaz de suprir com qualidade, a demanda apresentada. Em comparação com o cabeamento metálico, as fibras ópticas são imunes a interferências eletromagnéticas, são capazes de transmitir altas taxas de informações e, devido as baixas atenuações, em distâncias consideravelmente superiores [9].

A PON é uma implementação ponto-multi-ponto, que possui rede de distribuição passiva (não requer nenhuma alimentação elétrica). Tradicionalmente esta rede utiliza dois ou três comprimentos de onda distintos para *downstream*, *upstream* de dados e (opcionalmente) *broadcast* de vídeo. O sinal proveniente de uma porta da OLT alcança um divisor óptico (*splitter*) e, a partir deste, é enviado para uma ou mais fibras, compartilhando assim a infraestrutura e reduzindo os custos (Figura 3.2 e Figura 3.3). Em outras palavras, o divisor óptico é um acoplador de fibra óptica, sendo um componente passivo, que tem a função básica de dividir o sinal óptico em várias saídas (no sentido *downstream*) e recombina-lo (no sentido *upstream*) [10]. Diferente das soluções ópticas ativas, divisores ópticos utilizados nas redes PON são dispositivos de baixo custo que não realizam a conversão óptico-elétrica, e desta maneira a rede torna-se totalmente óptica e passiva desde a central (OLT) até o equipamento localizado nas dependências do assinante (ONT), como no caso da situação de uma rede FTTH (*Fiber-To-The-Home*). Assim, a central é capaz de atender vários clientes simultaneamente, compartilhando uma única fibra óptica e tornando possível para as operadoras o fornecimento de serviços de comunicação, para um grande número de usuários simultaneamente (residenciais ou comerciais) a um baixo custo [1]. Um exemplo de uma topologia completa de uma rede PON está apresentado na Figura 3.3. Na Figura 5.1 está representado o funcionamento de um divisor óptico do tipo 1:2 (uma entrada e duas saídas) e as principais configurações de entrada e saída usuais.

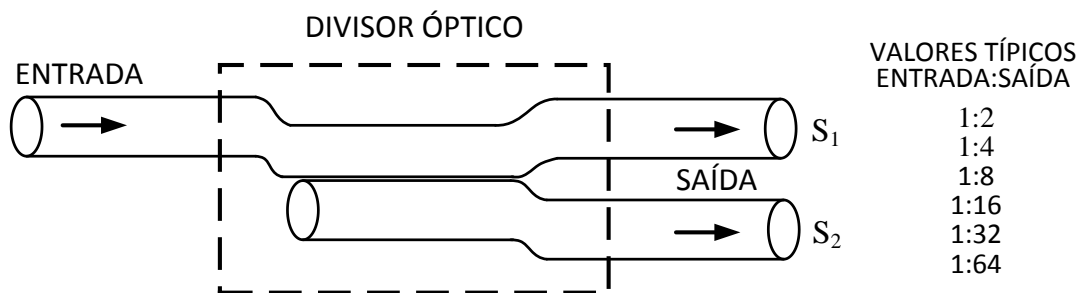


Figura 5.1 – Exemplo de um divisor óptico 1:2 e as configurações típicas.

É importante salientar que cada componente empregado na rede óptica PON insere uma atenuação no sistema. Então, quanto mais componentes (emendas, conectores, divisores ópticos, etc) existirem, juntamente com o comprimento da fibra, mais perdas o sistema apresentará. Desta forma poderá, em um caso crítico, comprometer seu funcionamento adequado. Por isso uma das etapas mais importantes do planejamento de uma rede PON é o cálculo de perdas, conhecido como *link budget* ou orçamento de potência óptica [10].

Devido às inúmeras possibilidades de configurações na rede de distribuição (ODN) e as diversas possibilidades de topologias de redes, aliada às restrições de atenuação, a tarefa de planejamento e desenvolvimento de uma rede óptica PON torna-se difícil e com diversas variáveis.

Diante deste problema, e com o objetivo de atender todos os requisitos de uma rede PON, nas seções a seguir apresenta-se o método proposto nesta dissertação. Também se discutem as estratégias que possibilitam a elaboração de projetos de redes PON, de forma rápida e otimizada, por meio de métodos computacionais.

5.2. Planejamento de uma rede óptica PON

A implantação de uma rede PON requer um grande investimento inicial e, portanto, é recomendado um cuidadoso planejamento para se reduzir ao máximo os investimentos, aumentar o lucro médio por usuário conectado à rede e manter a qualidade do serviço oferecido. A importância desta etapa é tamanha que um bom planejamento da rede pode representar uma redução de custos de implantação e operação da ordem de 30% [40]. Em suma, em projetos de redes ópticas PON, deve-se:

- ✓ **Possuir um profundo conhecimento da área de cobertura desejada:** Deve-se conhecer a região, as ruas, as avenidas, a possibilidade e o custo de utilização compartilhada de infraestrutura (postes ou dutos subterrâneos) da concessionária de energia local ou outras operadoras, as necessidades novas de infraestruturas, os aspectos legais para implantação de rede na região, etc.
- ✓ **Conhecer o perfil do cliente e o perfil de consumo da região:** Deve-se conhecer as demandas de serviços dos clientes, o poder aquisitivo e estimar um perfil de consumo para a região de interesse. Essas informações, juntamente com a taxa de penetração do serviço, são fundamentais pois fornecem aspectos que auxiliam na definição de preços e permitem uma análise financeira do projeto sendo possível estimar, por exemplo, o retorno de investimento (*payback*).
- ✓ **Estimar a taxa de penetração do serviço:** Outro aspecto fundamental é a estimativa da taxa de penetração do serviço. Esta informação é definida como a quantidade de casas que se espera estejam conectadas (*connected homes*) dividido pela quantidade de casas passadas (*passed homes*). É importante que se considere os distintos casos

de SFU (*Single Family Unit*), onde exista somente um cliente por unidade e os casos de MDU (*Multi Dwelling Unit*) onde existam diversos possíveis clientes em uma mesma unidade (ex: apartamentos e condomínios).

- ✓ **Definir a tecnologia PON e a topologia da rede a ser implantada:** Dependendo da demanda e da taxa de penetração define-se a tecnologia da rede PON a ser utilizada e também a topologia da rede. Nesta etapa existem diversas possibilidades e cada projeto vai ter uma diferente solução. A escolha vai depender da situação geográfica do local, da taxa de penetração estimada, do nível de serviço desejado, da largura de banda oferecida, dentre outros fatores.

5.3. Trabalhos relacionados e soluções existentes

O problema de planejamento de redes PON é um assunto relativamente comum na literatura e as mais diversas técnicas matemáticas e algoritmos heurísticos têm sido utilizados para solucionar este problema de otimização. Em [10] o autor implementa um algoritmo genético para solução de projetos PON para três diferentes tipos de topologias básicas de redes: árvore, anel e barramento. O algoritmo desenvolvido é responsável por determinar a posição dos divisores ópticos na rede e também o encaminhamento dos cabos ópticos, buscando o menor custo de implantação da rede. Entretanto, apesar de apresentar um bom desempenho quando comparado a métodos manuais, a ferramenta desenvolvida é bem simples e considera apenas o custo dos *splitters* e o custo de um único tipo de cabo, não levando em conta outros diversos fatores envolvidos em um planejamento adequado de rede. Outro ponto negativo é que os mapas utilizados não estão georreferenciados e não são fornecidos maiores detalhes sobre o processo de importação dos mapas, o que leva a crer que eles foram construídos de forma tradicional.

Em [12] é apresentado um algoritmo para otimização de projetos de redes PON que se baseia nos princípios do ACO (*Ant Colony Optimization*). Basicamente, o algoritmo ACO é uma técnica de otimização heurística, baseada em probabilidade, que é inspirada no comportamento de colônias formigas que saem do ninho em busca de alimentos. Neste artigo busca-se um sistema capaz de gerar soluções para redes PON baseadas em uma topologia específica do tipo árvore, que utiliza um nível de divisor óptico e também armários para distribuição de fibras ópticas (*Drop Closures*). A função objetivo considerada para esse trabalho é o custo total da rede. Entretanto, para cálculo do custo são considerados somente os cabos ópticos, os divisores

ópticos e os *Drop Closures*, desprezando outros custos importantes como emendas, ativos na CO, etc. Na etapa de avaliação dos resultados, o autor utiliza duas diferentes abordagens para o ACO proposto e realiza a comparação entre os resultados obtidos. Entretanto, o artigo não apresenta a validação do algoritmo proposto em comparação com resultados já conhecidos. Sobre os cenários utilizados para os testes o autor informa apenas que estes foram baseados em cenários reais, porém não apresenta os mapas utilizados e também não informa maiores detalhes sobre eles.

No artigo [13] é proposto um algoritmo de planejamento e otimização de redes PON que seja uma alternativa aos métodos comumente utilizados na literatura. O sistema proposto utiliza uma combinação de diferentes métodos para gerar uma distância ótima (mínima) entre OLT-ONTs e, então, posteriormente elabora a topologia otimizada da rede (distribuição de divisores ópticos) baseada na distância mínima necessária de escavação (considerou-se uma rede que utiliza apenas infraestrutura subterrânea). Para a primeira etapa utiliza-se um algoritmo baseado no algoritmo de Dijkstra e para a segunda etapa utiliza-se o método de *k-means clustering* e *hierarchical clustering technique*. Foram consideradas topologias baseadas em árvore e os critérios que definem a qualidade da solução são: somatório total de cabos ópticos, distância necessária de escavação (dutos subterrâneos) e nível de atenuação óptica no usuário. Para os testes realizados, utilizou-se um mapa real de um pequeno bairro residencial da cidade de Praga, na República Tcheca, que foi obtido usando a plataforma *Open Street Map*. Para as simulações, foram utilizados cenários com 40 ONTs e uma OLT, distribuídas aleatoriamente no mapa, utilizando de um a três níveis de divisores ópticos na rede. A ferramenta apresenta-se como uma boa alternativa aos métodos convencionais e os resultados são apresentados na forma gráfica e de tabelas. Entretanto, importantes parâmetros que influenciam o custo não foram considerados (como emendas, armários, OLT, etc) e utilizou-se apenas um único tipo de cabo para toda a rede. Outro ponto negativo é que o cenário sob teste é relativamente pequeno, o que diminui bastante o espaço de busca e simplifica a tarefa de encontrar a solução ótima.

Para o sistema computacional proposto nessa dissertação é elaborada uma ferramenta capaz de realizar o planejamento eficaz de redes PON de uma maneira completa, suprimindo as principais deficiências encontradas nos trabalhos anteriores. A técnica proposta se baseia na utilização de algoritmo genético e essa escolha se dá, principalmente, devido à simplicidade de sua implementação e aos bons resultados obtidos em problemas que envolvam grafos. O algoritmo tem o objetivo de tornar a tarefa de planejamento da rede automática, desde a importação

dos mapas, até a etapa de exibição dos resultados em forma gráfica, amigável e completa. Para os cálculos de custo total da rede foram considerados todos os principais materiais e serviços envolvidos na implantação de uma rede PON. As restrições consideradas neste trabalho também são mais rígidas e se baseiam em cenários reais, o que significa resultados mais precisos. Em relação às simulações e testes do sistema proposto, mapas reais georreferenciados foram utilizados (de tamanho consideravelmente grande), juntamente com as principais topologias de redes PON comumente empregadas pelas operadoras de telecomunicações.

5.4. Topologias de rede PON e cenário escolhido para o sistema proposto

Nesta subseção são apresentados os conceitos básicos das topologias fundamentais de redes PON que são comumente exemplificados na literatura. Descreve-se também, de forma detalhada, cada topologia considerada no sistema computacional proposto juntamente com sua justificativa.

5.4.1. Topologias básicas de rede PON

Sistemas PON podem adotar topologias em barramento, anel, árvore, ou um misto das topologias anteriores. Esta definição ocorre na etapa de planejamento da rede. Cada topologia apresenta características distintas, sendo implementada conforme a situação e necessidade de cada projeto [41]. Desta maneira, a escolha adequada da topologia depende basicamente das premissas do projeto (como por exemplo necessidade de redundância), capilaridade de atendimento e de como os assinantes (e possíveis novos assinantes) estarão dispostos geograficamente.

A topologia em barramento mostra-se a configuração mais simples e nesta topologia o meio de transmissão é compartilhado entre todos os elementos da rede. A OLT é interligada a diversas ONTs por meio de um segmento de fibra óptica e vários divisores ópticos com fator de derivação 1:2 [10]. Conforme demonstrado na Figura 5.2, estes divisores ópticos podem ser desbalanceados enviando uma parcela maior de potência óptica no segmento do barramento, alcançando assim distâncias ainda maiores. Esta topologia é útil para aplicações FTTC e para situações onde clientes estão espalhados geograficamente.

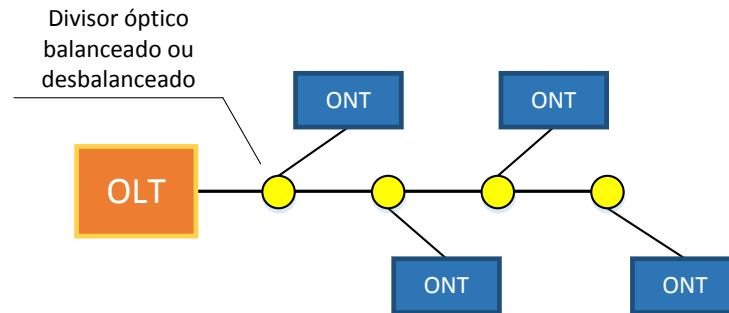


Figura 5.2 – Topologia em barramento.

Na topologia em anel duas ONTs são conectadas a uma OLT criando dois segmentos de transmissão. As demais ONTs são conectadas de forma serial formando um barramento óptico, conforme citado em [41] e apresentado na Figura 5.3-a. Ainda nesta topologia existe também a possibilidade de utilização de divisores ópticos do tipo $2:N$ que possuem duas entradas e N saídas e permitem que cada entrada seja interligada a diferentes portas PON podendo ser, inclusive, de diferentes OLTs [42]. Esta segunda configuração é representada na Figura 5.3-b e é também conhecida como árvore com tronco redundante (*tree with redundant trunk*). A principal vantagem desta topologia é a proteção, pois caso ocorra um rompimento na fibra, o tráfego da rede passa a circular na outra direção.

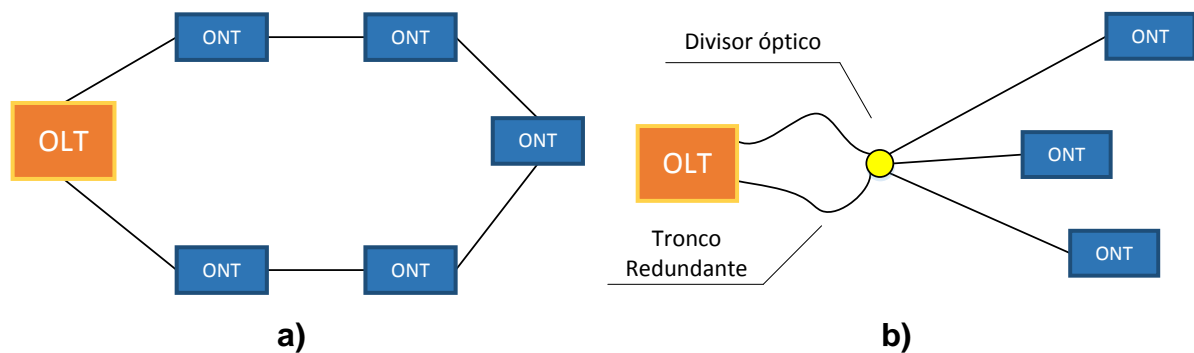


Figura 5.3 – a) Topologia em anel e b) Adaptação de topologia em anel (árvore com tronco redundante).

A topologia em árvore surgiu associada aos serviços distribuídos em que o objetivo é difundir o mesmo sinal desde o nó gerador (OLT) para todos os assinantes do sistema (ONTs). Esta solução foi desenvolvida originalmente no âmbito das redes de distribuição de TV a cabo [10]. Nas redes PON, com topologia em árvore, uma porta da OLT é conectada diretamente, por intermédio de fibra, a um divisor óptico considerado de 1º nível. A partir deste divisor óptico, as ONTs são interligadas diretamente a este divisor óptico ou ainda podem haver mais níveis de divisão, conforme apresentado na Figura 5.4. Esta topologia possui a vantagem de

utilizar menos divisores ópticos passivos e é adequada quando muitos usuários estão agrupados geograficamente [41].

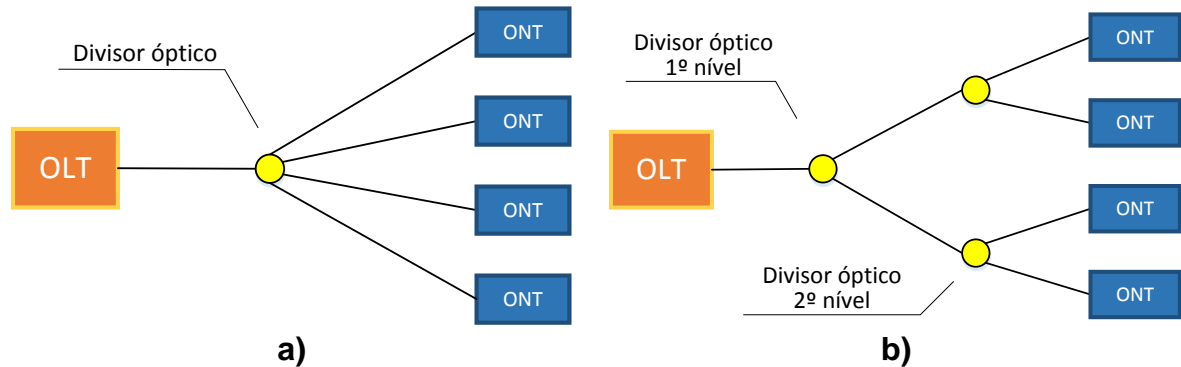


Figura 5.4 – Topologias em árvore. a) árvore simples b) árvore com dois níveis de *splitters*.

5.4.2. Topologias adotadas para sistema proposto

Apesar das diversas topologias básicas de redes PON, normalmente os provedores de serviços de telecomunicações utilizam a topologia em árvore. Isto deve-se à redução de custos de implantação quando os clientes estão concentrados em uma determinada região (situação comum em zonas urbanas). A maneira como os divisores ópticos vão estar dispostos na rede definirão se esta será uma topologia do tipo centralizada (com um único estágio de divisores ópticos na OSP) ou uma topologia distribuída (com múltiplos estágios de divisores ópticos na OSP) [43].

Para este trabalho definiu-se as seguintes de topologias:

- ✓ **Topologia Centralizada – Tipo 1:** Nesta topologia utiliza-se um único nível divisores ópticos com fator de divisão de 1x64. Este divisor ópticos estará sempre disposto na ODN em um armário de telecomunicações conhecido como FDH (*Fiber Distribution Hub*). Nesta topologia tem-se uma redução do número de dispositivos passivos na rede externa. Entretanto, há um aumento considerável na quantidade de cabos do tipo *drop*. Para melhor entendimento, a Figura 5.5 apresenta o diagrama físico da rede quando se utiliza a topologia centralizada do tipo 1. Nota-se que um cabo alimentador (*feeder cable*) com uma alta quantidade de fibras vai alimentando as FDHs que contém divisores ópticos de distribuição com fator de divisão de 1x64.

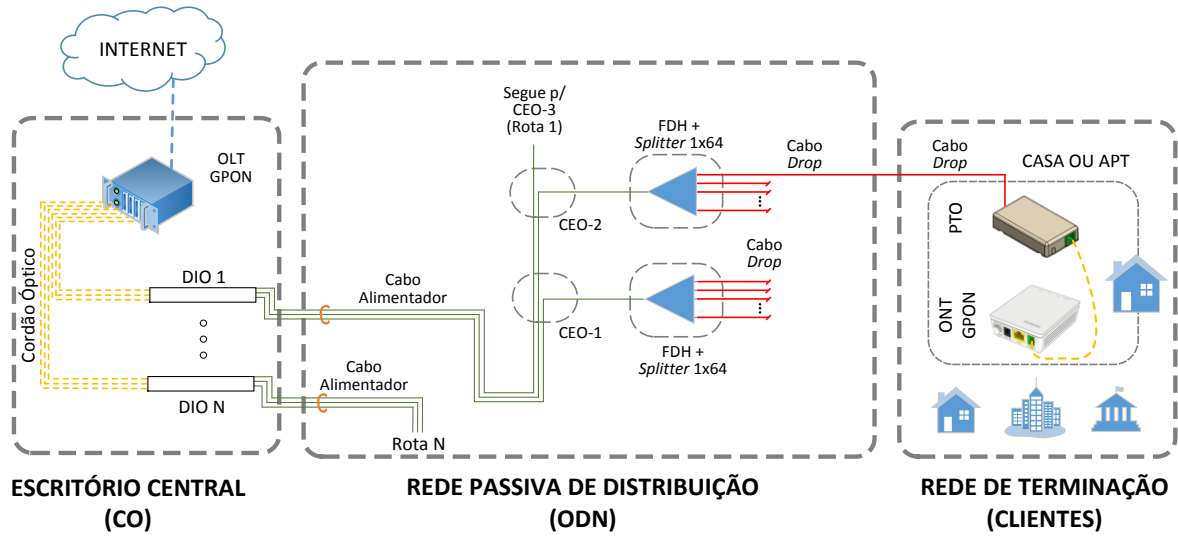


Figura 5.5 – Diagrama físico da rede que representa a topologia centralizada do Tipo 1.

- ✓ **Topologia Centralizada – Tipo 2:** Nesta topologia utiliza-se dois níveis de divisores ópticos, um com fator de divisão 1x2 (localizado sempre no CO) e outro com fator de divisão 1x32 disposto na ODN e armazenado em dispositivos do tipo FDH. Esta topologia é considerada do tipo centralizada, pois ainda há apenas um nível de divisor óptico na rede externa. Em relação à topologia anterior há um aumento no número de FDH's na rede externa (devido à menor capacidade do divisor óptico de atendimento) e uma maior utilização de fibras no cabo alimentador. Entretanto, a tendência é que haja uma redução na quantidade de cabos do tipo *drop* utilizados no atendimento dos clientes. Para melhor entendimento, a Figura 5.6 ilustra o diagrama físico da rede quando se utiliza a topologia centralizada do tipo 2.

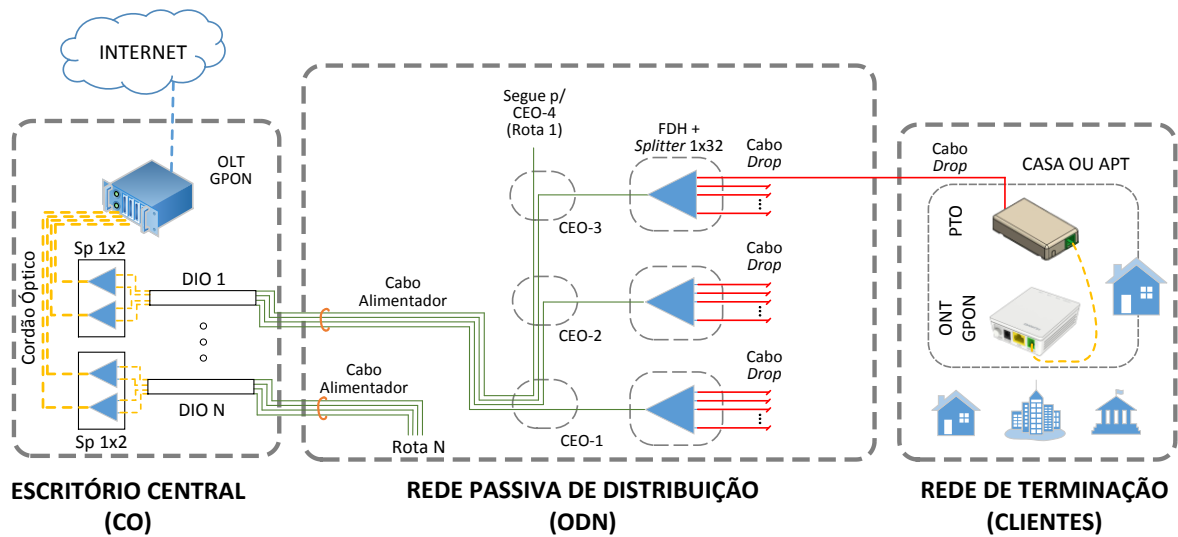


Figura 5.6 – Diagrama físico da rede que representa a topologia centralizada do Tipo 2.

- ✓ **Topologia Distribuída – Tipo 1:** Nesta topologia utilizam-se dois níveis de divisores ópticos na ODN. O primeiro nível é um divisor óptico para distribuição com um fator de divisão de 1x4 armazenado em uma CEO (caixa de emendas ópticas). O segundo nível é um divisor óptico para atendimento com fator de divisão de 1x16 armazenado em FDH's. Em relação à topologia anterior nota-se um aumento significativo de dispositivos ao longo da rede externa e uma menor utilização de fibras no cabo alimentador. Entretanto, a tendência é que haja uma redução na quantidade de cabos do tipo *drop* utilizados no atendimento dos clientes. Para melhor entendimento a Figura 5.7 apresenta o diagrama físico da rede quando se utiliza a topologia distribuída do tipo 1.

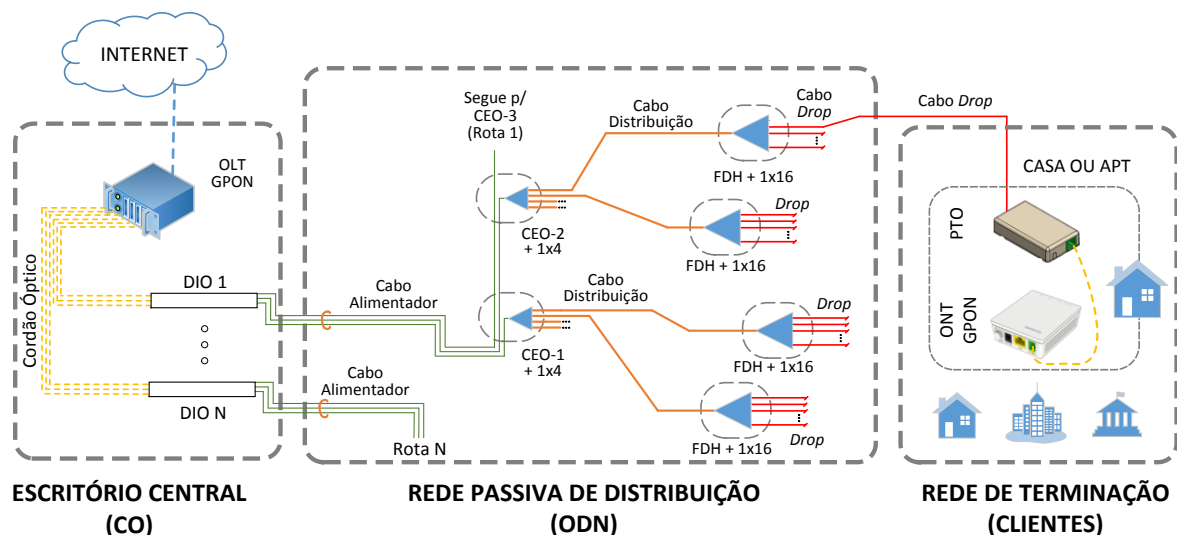


Figura 5.7 – Diagrama físico da rede que representa a topologia distribuída do Tipo 1.

- ✓ **Topologia Distribuída – Tipo 2:** Nesta topologia utiliza-se dois níveis de divisores ópticos na ODN. O primeiro possui um fator de divisão de 1x8 e é armazenado em CEO's o segundo nível têm outros *splitters* 1x8 armazenados em FDH's. Entre as topologias consideradas neste trabalho, esta é a que apresenta maior número de dispositivos dispostos na ODN. Entretanto tende a ser a topologia que apresenta menor quantidade de utilização de cabos do tipo *drop*. Para melhor entendimento a Figura 5.8 apresenta o diagrama físico da rede quando se utiliza a topologia distribuída do tipo 2.

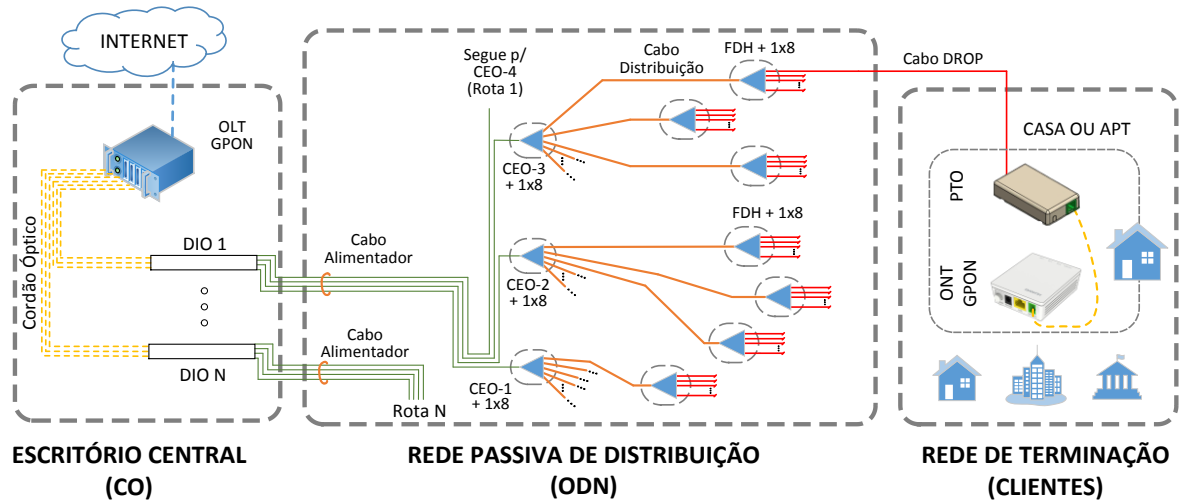


Figura 5.8 – Diagrama físico da rede que representa a topologia distribuída do Tipo 2.

Deve-se ressaltar que neste trabalho, para elaboração do sistema computacional proposto, optou-se pelas características técnicas da tecnologia GPON (com fator de divisão máximo de 1x64 por porta PON). Entretanto, com alguns poucos ajustes no sistema pode-se definir os parâmetros de qualquer sistema PON, uma vez que só é preciso ajustar o fator máximo de divisão desejado e algumas outras restrições (como os tipos de divisores ópticos a serem utilizados e alcance máximo da rede).

5.5. Teoria dos grafos

Os grafos são importantes ferramentas matemáticas e vem sendo utilizados para representar problemas nas mais diversas áreas do conhecimento. Eles podem reproduzir qualquer rede de rotas, como por exemplo, uma rede de telecomunicações [1]. Um grafo pode ser representado matematicamente como uma tupla

$$G = (V, A), \tag{5-1}$$

em que: V representa os vértices (ou nós) e A representa as arestas (ou linhas). Ao observar a Figura 5.9, é possível verificar a representação de um grafo simples com poucos vértices, $V = \{v1, v2, v3, \dots, v6\}$ e $A = \{a1, a2, a3, \dots, a8\}$.

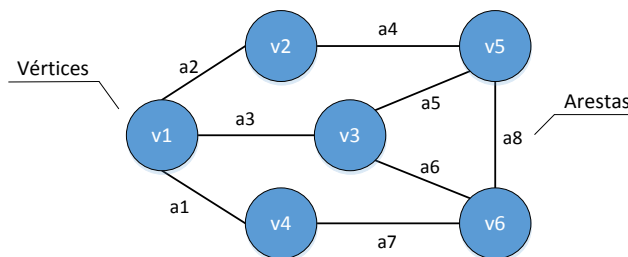


Figura 5.9 – Exemplo de uma representação de um grafo.

Uma das formas mais simples de se representar matematicamente um grafo é por meio do uso de matrizes de adjacências. Essas matrizes descrevem a forma como todos os vértices do grafo estão relacionados. De forma geral, dado um grafo G com n vértices (ou nós), pode-se representá-lo a partir de uma matriz A de dimensão $n \times n$. Para representação de grafos não dirigidos, simples e sem pesos nas arestas, cada valor da matriz A será definido como:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{caso os vértices } v_i \text{ e } v_j \text{ sejam adjacentes,} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (5-2)$$

Nota-se então que será formada uma matriz binária para este caso. Se as arestas tiverem pesos associados, o valor inserido para a_{ij} pode conter, em vez de 1, o valor numérico associado à própria aresta. Para ilustrar, a matriz (5-3) apresenta a matriz de adjacência (sem pesos) do grafo representado na Figura 5.9.

$$A(G) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5-3)$$

Nesta dissertação são considerados grafos simples e não orientados. Estes grafos representarão o mapa georreferenciado da região de interesse, para a qual se deseja elaborar o projeto da rede óptica PON. A utilização de grafos como ferramenta para representação de mapas é muito comum na literatura e pode-se citar os trabalhos [10], [13] e [17] que os utilizam para descrever o problema de um projeto de redes PON. De forma geral, esquinas podem ser representadas por vértices, arestas podem representar ruas e avenidas, e os pesos de cada aresta as distâncias.

5.6. Processo de Importação dos Mapas

Como passo fundamental para elaboração de qualquer projeto de infraestrutura de redes de telecomunicações, é necessário que se conheça a geografia da região de interesse [40]. Isso significa que é essencial o conhecimento profundo de ruas e avenidas da região, onde o cabeamento e os equipamentos da rede poderão ser instalados. Outra informação de importante é a densidade demográfica da região de interesse. Este dado estatístico é utilizado para a previsão de possíveis assinantes da rede proposta (clientes). Portanto, somente com essas informações será possível estudar, analisar e definir de que maneira os equipamentos de telecomunicações devem estar dispostos na rede, reduzindo assim os custos de implantação.

Atualmente, existem diversos serviços de georreferenciamento de mapas no mercado podendo-se destacar as plataformas *Google Maps*, *Bing Maps*, *Here Maps*, *Open Street Maps (OSM)*, dentre várias outras. Essas plataformas possuem cadastradas em sua base dados ruas, avenidas e diversas outras informações como prédios e estabelecimentos. Além da visualização em formato simples de mapas, é possível também sobrepor as informações em imagens reais com vista superior da região, obtidas a partir de satélites orbitais. Em especial, deve-se destacar que o *Google Maps* possui um recurso exclusivo e extremamente útil, conhecido como *Google Street View*, que disponibiliza ao usuário imagens panorâmicas de 360° na horizontal (ao nível do solo) de diversas regiões do mundo. Tais imagens podem ser navegadas de forma bastante intuitiva facilitando a elaboração de projetos de rede, uma vez que o projetista pode ter uma noção da região de interesse sem sair do escritório (caso esta região seja cadastrada no sistema).

Para a obtenção de mapas foi utilizada a plataforma *Open Street Maps (OSM)*. Este sistema é um projeto de mapeamento colaborativo para criar um mapa livre, gratuito e editável de todo o mundo. Isso significa que qualquer pessoa que tenha conhecimento sobre o local pode contribuir inserindo, editando ou corrigindo informações disponíveis no sistema. Atualmente o OSM conta com mais de três milhões de usuários registrados no sistema [44]. Porém, a vantagem deste sistema é que, diferentemente de sistemas de mapas proprietários como *Google Maps* e *Bing Maps*, o OSM é constituído de dados abertos e públicos. Desta forma qualquer pessoa tem a liberdade de usar os dados para qualquer fim, desde que credite a autoria ao *Open Street Maps* e aos seus colaboradores [45].

No Brasil ainda há diversas cidades que carecem de mapeamento no OSM, especialmente pequenas cidades do interior do norte e nordeste. Segundo informações disponíveis em [46], no estado da Bahia, apesar das principais cidades do estado estarem mapeadas, apenas 17 municípios de um total de 417 contam com um mapeamento bom ou razoável. Diante do exposto apenas ~4% das cidades do estado estão mapeadas.

Deve-se destacar também que a comunidade desenvolvedora dos mapas do OSM criou diversas ferramentas que são de fácil utilização para a criação e edição dos mapas. É possível mapear lugares usando rotas de GPS ou utilizar imagens de satélites gratuitas, fornecidas pelo sistema, para mapeamento de forma sobreposta.

Diante das vantagens supracitadas, escolheu-se a plataforma livre OSM para obtenção dos dados brutos a serem importados para o algoritmo proposto.

5.6.1. Criação e edição de mapas

No portal *online* do *Open Street Maps* é possível exportar os dados brutos dos mapas de regiões cadastradas. Os dados brutos são compostos basicamente por nós (coordenadas e caminhos), podendo ser visualizados e editados de forma gráfica com uso da ferramenta auxiliar JOSM (*Java Open Street Maps*). Entretanto, quando se exporta esses dados brutos disponíveis no portal, diversas informações que não são de relevância para sistema são exportadas em conjunto, como lagos, pistas de caminhadas, pistas de ciclismo, entre outras, o que aumenta o custo computacional e dificulta a filtragem dos dados que realmente interessam (ruas e avenidas).

Com o objetivo de simplificar o trabalho de filtragem, os mapas utilizados nesta dissertação serão criados a partir de imagens de mapas cartográficos e imagens de satélites disponíveis no JOSM. Para tanto, basta ao usuário apenas desenhar as linhas ao longo das ruas e avenidas. A Figura 5.10 mostra o ambiente de edição do JOSM e o processo de criação de um mapa (grafo) a partir do mapa cartográfico fornecido pelo OSM. A Figura 5.11 apresenta a imagem das linhas desenhadas sobre o mapa cartográfico.

É importante destacar que, em um cenário real, os equipamentos da rede podem ser dispostos em qualquer posição do mapa (desde que exista infraestrutura adequada no local). Entretanto, para facilitar e reduzir a complexidade do problema, foram considerados como vértices apenas os pontos de interseção entre ruas, salvo algumas exceções para grandes avenidas.

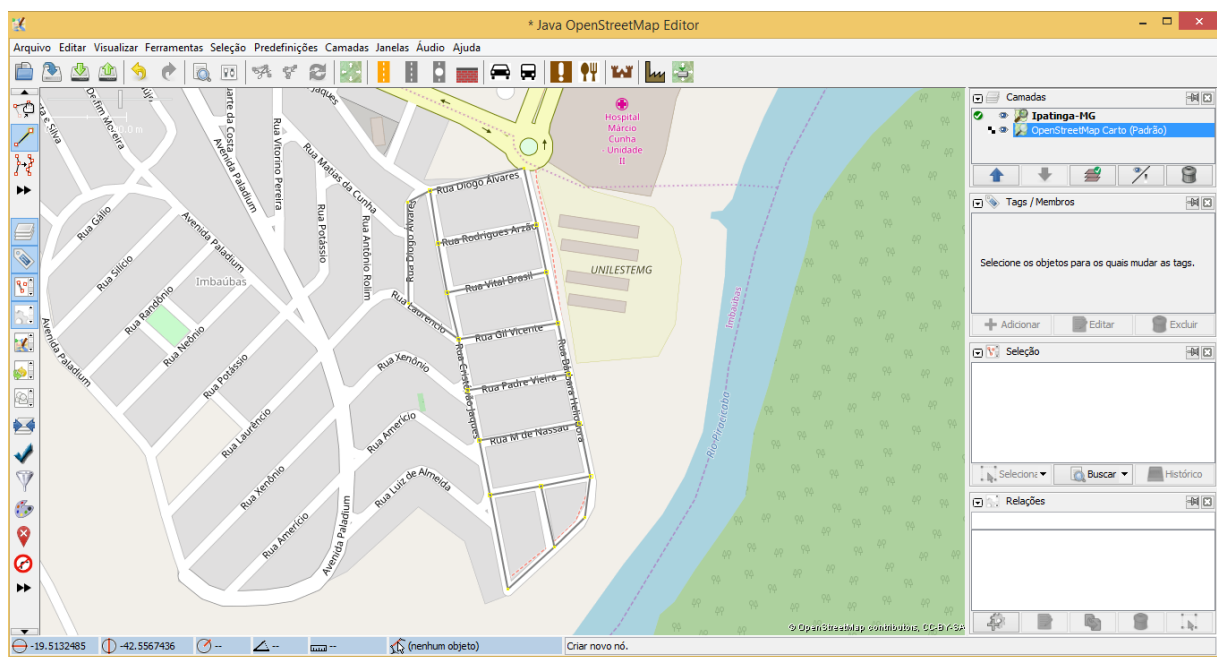


Figura 5.10 – Ambiente de edição da plataforma JOSM. O mapa cartográfico é disponibilizado pela base de dados do OSM. Linhas devem ser desenhadas sobre ruas e avenidas.

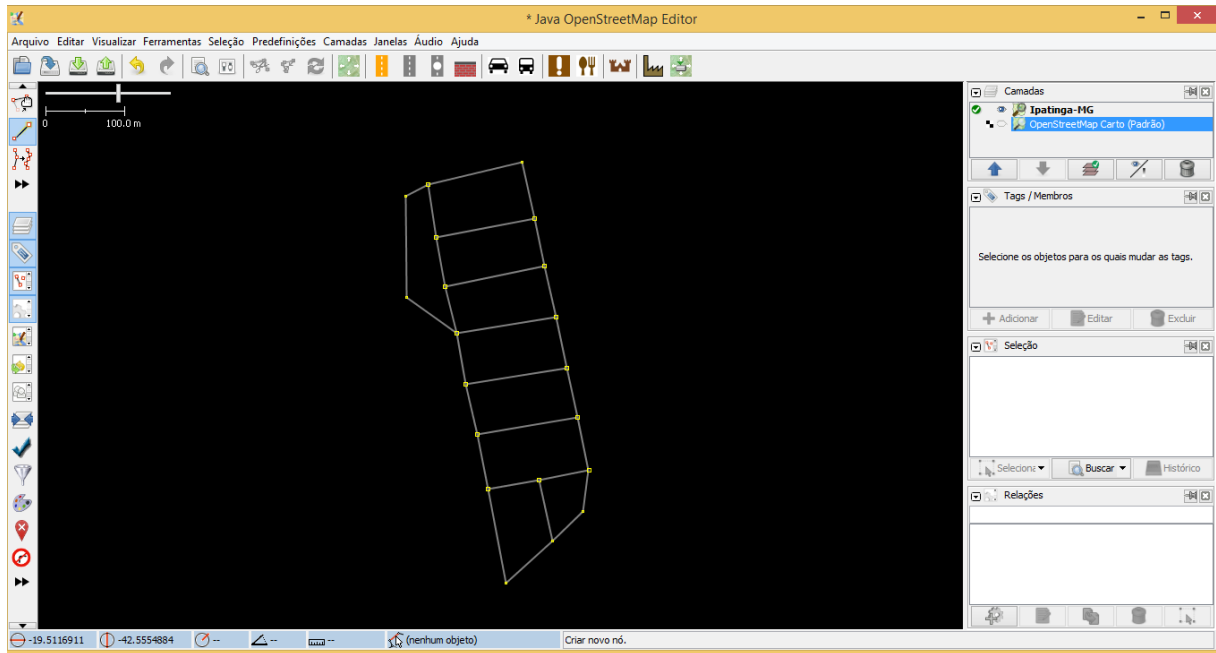


Figura 5.11 – Ambiente de edição da plataforma JOSM. Linhas desenhadas sobre ruas e avenidas. Os dados brutos serão exportados para o Matlab®.

Após o processo de criação do grafo, os dados brutos a serem exportados pelo JOSM (contendo nós, coordenadas e caminhos), serão salvos no formato .xml. Entretanto, para utilização destes dados no Maltab, cada arquivo do tipo xml deve ser convertido para um formato em que o Maltab possua uma função nativa de importação (para a extensão de arquivo). Escolheu-se então o formato .xls (Excel®).

5.6.2. Importação dos mapas para Maltab

Os dados brutos do mapa da região de interesse a serem importados para o Maltab possuem informações essenciais para o projeto da rede. Entre as mais relevantes para esta dissertação destacam-se:

- ✓ **Id:** Identificador único para cada nó do mapa;
- ✓ **Lat:** Valor (em decimal) da coordenada geográfica de latitude do nó;
- ✓ **Lon:** Valor (em decimal) da coordenada geográfica de longitude do nó;
- ✓ **Id2:** Identificador que descreve cada conjunto de nós que formam as linhas;
- ✓ **Ref:** Sequência de nós que pertencem a aquele identificador de conjunto de nós (Id2).

Na Figura 5.12 é ilustrada a estrutura dos dados em formato XML importado para o programa Excel®. Os campos não citados anteriormente, que estão presentes na Figura, não possuem relevância para o algoritmo e serão desconsiderados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	version	generator	id	action	lat	lon	id2	action3	ref
105	0,6	JOSM	-47970	modify	-12,9900996	-38,4472156			
106	0,6	JOSM	-47990	modify	-12,9899521	-38,4466319			
107	0,6	JOSM	-48138	modify	-12,9913797	-38,4452991			
108	0,6	JOSM	-48228	modify	-12,9939941	-38,4406525			
109	0,6	JOSM	-48254	modify	-12,9928964	-38,4500671			
110	0,6	JOSM					-39182	modify	-38980
111	0,6	JOSM					-39182	modify	-38982
112	0,6	JOSM					-39182	modify	-38984
113	0,6	JOSM					-39182	modify	-38986
114	0,6	JOSM					-39182	modify	-38988
115	0,6	JOSM					-39182	modify	-38980

Figura 5.12 – Dados brutos obtidos no JOSM em formato XML importados pelo Excel® e prontos para serem exportados ao Matlab®.

Com os dados brutos já no formato de arquivo escolhido (formato .xls) importam-se as informações para o Matlab®. A primeira tarefa a ser realizada pelo algoritmo é a renomeação dos identificadores (Id) dos nós para números sequenciais que comece pelo número inteiro e positivo 1. Esta etapa tem o objetivo de facilitar a visualização e manipulação posterior das informações do grafo. Em seguida, desenha-se em um gráfico cada nó da rede juntamente com seu identificador utilizando as coordenadas de latitude e longitude de cada nó. Conhecendo-se também cada conjunto de nós que formam os caminhos (Id2), o algoritmo proposto desenha linhas retas entre os nós, que são adjacentes, obtém e armazena cada distância (em metros) usando uma função desenvolvida para cálculo de distâncias entre coordenadas geográficas em formato decimal.

Ao final desse processo o algoritmo retorna a imagem do grafo georreferenciado (conforme ilustrado na Figura 5.13) e duas matrizes que serão utilizadas posteriormente na elaboração da solução pelo sistema proposto:

- Matriz com o novo identificador de cada nó com as respectivas coordenadas de latitudes e longitudes;
- Matriz de adjacência $n \times n$, em que n é o número de nós do grafo. Nesta matriz os nós que estão conectados (nós adjacentes) são representados pelo valor da distância (em metros) entre os respectivos nós.

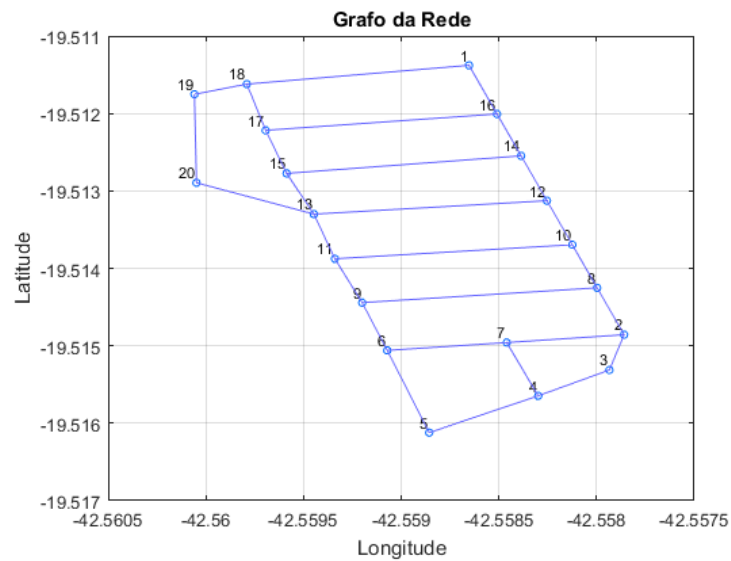


Figura 5.13 – Exemplo de um grafo georreferenciado importado para o Matlab®.

5.7. Estado Inicial da rede

Para o planejamento e elaboração de um projeto de rede PON é fundamental que o estado inicial da rede esteja definido, ou seja, as condições iniciais do problema. Esta etapa ocorre de forma posterior à definição da região de interesse e ao processo de importação do mapa descrito na Seção 5.6 desta dissertação.

Com os dados do mapa já importados para o Matlab®, deve-se estimar a forma como os possíveis usuários da rede estarão dispostos. Para esta tarefa é crucial o conhecimento demográfico da região de interesse para prever, estatisticamente, a demanda de clientes residenciais ou comerciais pelo serviço. Existem algumas bases de dados proprietárias, vendidas sob demanda, que fornecem informações completas sobre determinadas cidades ou regiões de interesse. Essas bases de dados podem descrever a densidade demográfica, poder aquisitivo da população, entre outras diversas características que auxiliam na análise de viabilidade de um projeto de telecomunicações. Entretanto, nesta dissertação, a distribuição dos clientes é realizada por meio de processos aleatórios e com imagens de satélites das regiões de interesse.

Para o algoritmo proposto, os clientes só poderão estar relacionados à nós já existentes no mapa importado. Sendo assim, em cenários de média ou alta densidade demográfica é necessário que mais de um cliente seja associado a um mesmo nó. Para uma melhor representatividade da rede optou-se pelas configurações de dois clientes, quatro clientes ou sete clientes por nó (conforme apresentado na Tabela 5.1).

Outro parâmetro essencial é a definição da localização do equipamento concentrador da rede (OLT). Este equipamento é normalmente acomodado no escritório central da operadora e esta posição deve ser definida levando em conta vários fatores como: proximidade com os clientes, custo para locação e implantação do espaço, perspectiva de expansão, entre outros. Neste trabalho a posição da OLT é sempre definida em uma posição central à região de interesse com o objetivo de reduzir a quantidade necessária de cabos para atendimento dos clientes.

Para a inserção destes dados no Matlab® foram definidos três vetores alteráveis (de acordo com a quantidade de clientes por nó) que indicam a posição desejada de cada cliente e um vetor que indica a posição da CO na rede. Os dados armazenados nestes vetores serão utilizados posteriormente pelo algoritmo proposto para elaboração da solução com o método computacional de algoritmo genético.

A Tabela 5.1 apresenta a simbologia gráfica utilizada para representação do estado inicial do algoritmo. Para ilustrar, a Figura 5.14 exibe um exemplo de distribuição de clientes e uma CO em um grafo de tamanho reduzido para uma determinada região.

Tabela 5.1 – Simbologia utilizada para o estado inicial (Grafo da Rede + Clientes).

Simbologia	Descrição
●	Nó da rede contendo dois clientes
●	Nó da rede contendo quatro clientes
●	Nó da rede contendo sete clientes
■	Central da rede (CO ou POP)

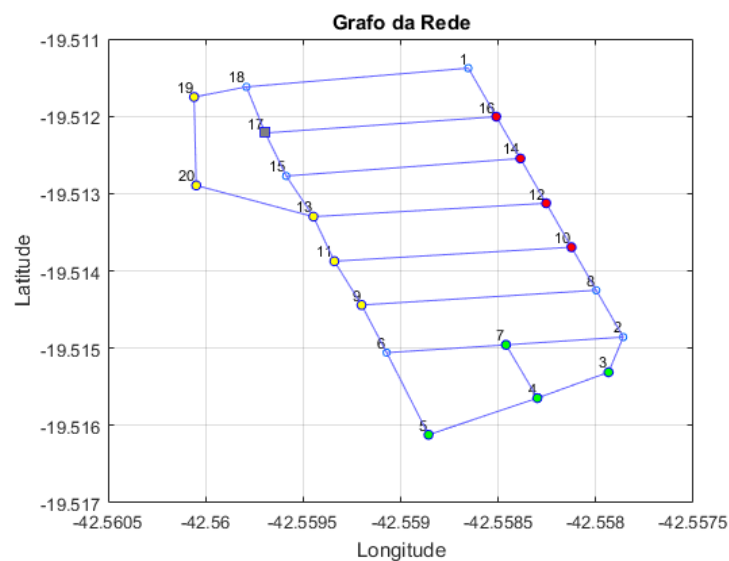


Figura 5.14 – Exemplo de um estado inicial (grafo da rede + clientes + CO).

5.8. Orçamento de Potência Óptica (*Link Budget*)

A perda de potência óptica entre a OLT e as ONTs é informação importante que deve ser cuidadosamente calculada para garantir o funcionamento da rede com os parâmetros mínimos de qualidade. Ao longo de um enlace óptico existe diversos componentes que são inseridos na rede e contribuem para as perdas no sinal, devido suas características construtivas. Entre estes componentes destacam-se as emendas ópticas, conectores, elementos passivos da rede e o cabeamento óptico.

O orçamento de potência em um enlace óptico PON pode ser calculado da seguinte forma

$$P_r = P_{tx} - \sum P_{at}, \quad (5-4)$$

em que P_r representa a potência recebida (em dBm), P_{tx} representa a potência transmitida (em dBm) e $\sum P_{at}$ é o somatório da atenuação do enlace (em dB) que é dado por

$$\sum P_{at} = \sum \alpha_c + \sum \alpha_e + \sum \alpha_{sp} + \sum (\alpha_{f,\lambda} \times L), \quad (5-5)$$

em que α_c é a perda de inserção de cada conector óptico (em dB), α_e é a perda de inserção de cada emenda óptica no enlace (em dB), α_{sp} representa a perda de inserção de cada *splitter* óptico passivo (em dB), $\alpha_{f,\lambda}$ é a atenuação característica da fibra para o comprimento de onda λ (em dB/km) e L representa o comprimento do enlace (em km).

Para a rede funcionar de maneira adequada, a OLT e as ONTs devem possuir um limiar de recepção de potência óptica (sensibilidade óptica) fornecido nas especificações técnicas dos equipamentos. Caso a rede apresente atenuação maior que a potência de limiar, ela poderá apresentar falhas de comunicação ou até mesmo gerar a indisponibilidade do serviço. Portanto, a condição de funcionamento do *link* óptico (C) é dada por

$$C = \begin{cases} 1, & P_s > P_r \\ 0, & P_s < P_r \end{cases}, \quad (5-6)$$

em que P_s representa a sensibilidade óptica do equipamento (em dBm) e P_r é a potência recebida (em dBm).

Conforme já descrito na Seção 3.2.1, um sistema PON trabalha normalmente com três comprimentos de onda distintos sendo: um para *downstream* de dados em 1490 nm, outro para

upstream de dados em 1310nm e outro opcional para *broadcast* de vídeo em 1510nm. Portanto, para cada sentido do enlace óptico, haverá pelo menos um valor de atenuação distinto.

Para o cálculo da atenuação óptica foram utilizadas as perdas definidas e baseadas na recomendação ITU-T G.671 [47], que caracteriza componentes ópticos, e também nos *datasheets* dos equipamentos considerados para este trabalho. Os valores das atenuações máximas inseridas por cada dispositivo na rede (e sua referência) são apresentados na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3. Na Tabela 5.4 está descrita a potência inserida pelos elementos ativos da rede, bem como os valores mínimos para evitar sobrecarga na recepção e a sensibilidade óptica dos equipamentos ativos. Para o cálculo do orçamento óptico, considera-se sempre o menor valor de potência inserida (pior caso). Maiores informações sobre os materiais utilizados nesta dissertação e suas ilustrações podem ser obtidas no Apêndice A e Anexo A respectivamente.

Tabela 5.2 – Descrição das atenuações dos cabos utilizados.

Descrição	Atenuação Max.		Referência ou Part Number
	Downstream (1490nm)	Upstream (1310nm)	
Cabo Óptico 02FO – Drop Cable	0.25 dB/km	0.37 dB/km	17042026
Cabo Óptico 12FO – Cabo de Distribuição	0.23 dB/km	0.37 dB/km	17045113
Cabo Óptico 48FO – Cabo Alimentador	0.23 dB/km	0.37 dB/km	17040049
Cabo Óptico 144FO – Cabo Alimentador	0.23 dB/km	0.37 dB/km	17040172

Tabela 5.3 – Descrição das atenuações dos dispositivos da rede.

Descrição	Atenuação Max.	Referência ou Part Number
Splitter Óptico 1x2	3,7 dB	35500123
Splitter Óptico 1x4	7,1 dB	35505000
Splitter Óptico 1x8	10,5 dB	35505001
Splitter Óptico 1x16	13,7 dB	35505002
Splitter Óptico 1x32	17,10 dB	35505003
Splitter Óptico 1x64	20,50 dB	35505047
Emenda – método de fusão óptica	0,08 dB	ITU-T G.671
Emenda – método mecânico	0,15 dB	ITU-T G.671
Conector Óptico	0,30 dB	ITU-T G.671

Tabela 5.4 – Características dos equipamentos ativos considerados.

Descrição	Potência Transmitida	Sobrecarga de recepção	Sensibilidade Óptica	Referência ou Part Number
OLT (SFP GPON OLT CLASSE B+)	1.5 – 5 dBm	-8 dBm	-28 dBm	35510197
ONT (ONT GPON FK-ONT-G421W)	0.5 – 5 dBm	-8 dBm	-27 dBm	35510133

No sistema computacional proposto, para cada solução encontrada nas gerações do algoritmo genético, é calculado o orçamento de potência óptica no sentido *upstream*, sendo verificada também a condição do sistema. O não cálculo do sentido *downstream* se justifica, pois, as perdas ópticas para o comprimento de onda 1310nm (utilizado no sentido *upstream*) são

maiores. Portanto, definem a condição do funcionamento da rede. O resultado de cada enlace encontrado pelo algoritmo para a solução final será apresentado em forma de tabela ou na forma gráfica.

Para o algoritmo proposto, vale ressaltar que estes parâmetros podem ser facilmente alterados ou ajustados. Isto deve-se ao processo de inserção destes dados no sistema, que é realizado com a de importação de uma planilha em formato Excel®. Em métodos convencionais, utilizados pelas empresas de telecomunicações, o cálculo de orçamento de potência para cada enlace da rede é realizado com o auxílio de planilhas, o que demanda muito tempo do projetista, além de ser um procedimento bastante susceptível a erros. No sistema proposto o cálculo é realizado de forma rápida e totalmente automática.

5.9. Metodologia Proposta

Esta seção busca apresentar a modelagem matemática do problema, o sistema computacional proposto e a estratégia adotada para encontrar a solução ótima para cada topologia apresentada na Seção 5.4.2.

5.9.1. Algoritmos Genéticos e Visão Geral do Sistema Proposto

As primeiras pesquisas sobre Algoritmos Genéticos foram desenvolvidas e apresentadas por John Holland, publicadas em [48]. Desde então, esses algoritmos vêm sendo aplicados com sucesso nos mais diversos problemas de otimização e aprendizado de máquinas, incluindo problemas de otimização de redes PON como [49] e [50]. Basicamente estes algoritmos são métodos de otimização inspirados na evolução genética dos seres vivos e se baseiam em princípios descritos por Darwin [10].

Em suma, o objetivo principal do algoritmo é encontrar os indivíduos que melhor se adaptam ao ambiente durante o processo de evolução. Os indivíduos mais adaptados vão se mantendo durante o processo enquanto os que não se adaptam são descartados.

A técnica de otimização utilizada pelo AG consiste na busca de uma solução ótima para o problema proposto (ou uma solução que seja mais próxima possível da ótima). Para se obter este resultado, várias soluções são testadas durante o processo de evolução. A cada geração, somente as melhores soluções são armazenadas, modificadas e novamente inseridas no sistema até que a solução desejada seja encontrada. Para que o processo de otimização seja viável, todas as soluções possíveis do problema devem se encontrar no espaço de busca a ser verificado pelo

algoritmo, e uma função aptidão (*fitness*) deve estar definida para avaliar a qualidade de cada solução encontrada.

Inicialmente, quando um algoritmo genético é executado gera-se de forma aleatória N indivíduos (conjunto de cromossomos) e cada indivíduo representa uma possível solução para o problema. Como processo posterior do algoritmo, este conjunto de indivíduos (população) é analisado com a função aptidão (ou função objetivo) e os indivíduos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados. A partir deste ponto, os indivíduos selecionados sofrem modificações por meio dos operadores genéticos de cruzamento (*crossover*) e mutação (*mutation*). Repetem-se então para os novos indivíduos formados, os processos de avaliação (com a função aptidão), seleção e descarte. Este ciclo se repete até que uma solução adequada seja encontrada ou o número de interações (gerações), previamente definido, seja alcançado.

Uma das vantagens no uso de AGs é a simplicidade que permite a formulação do problema de otimização. Normalmente, utiliza-se como entrada de dados do algoritmo cadeias de *bits* de tamanho fixo, o que se adapta perfeitamente a problemas que envolvam grafos. Outra vantagem é o rápido tempo de convergência, em relação a algoritmos do tipo polinomial, para problemas que envolvem um grande número de variáveis. Apesar de o AG ser um algoritmo que normalmente apresenta resultados robustos, por ser um método meta-heurístico, a solução pode convergir para um máximo local, apresentando uma falsa resposta ótima. Entretanto, esta convergência prematura pode ser minimizada com o ajuste adequado no número de gerações e tamanho da população.

Visto as vantagens obtidas na utilização do AG, o tamanho do espaço de busca do problema de otimização de redes de acesso PON e levando em conta a necessidade de resultados rápidos, desenvolveu-se em Matlab® um sistema computacional baseado em AG que busca e encontra uma solução adequada para o problema proposto. O fluxograma da Figura 5.15 descreve o funcionamento do sistema.

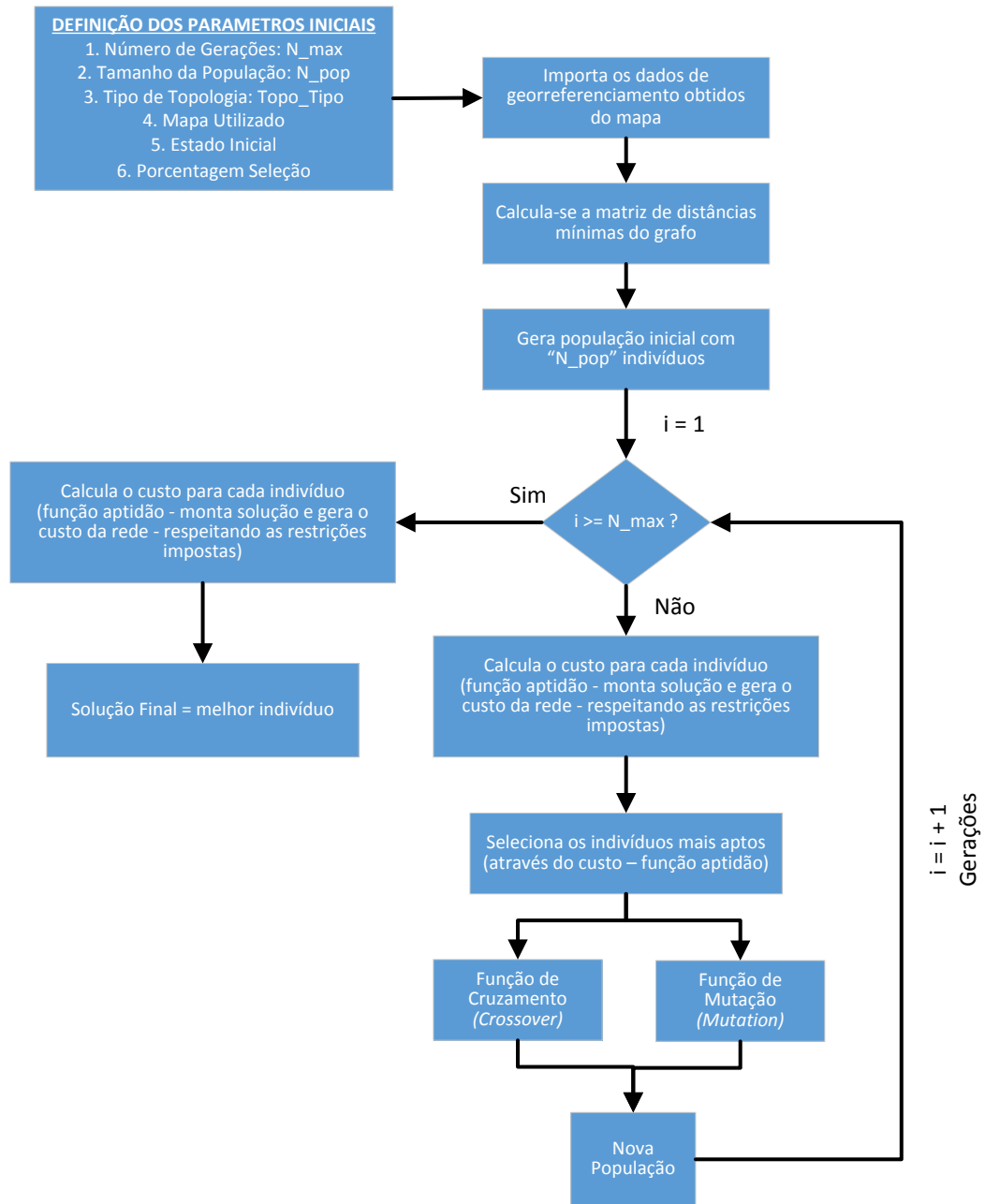


Figura 5.15 – Fluxograma do AG proposto para o problema de otimização de redes de acesso PON.

Conforme apresentado na Figura 5.15, observa-se que o algoritmo pode ser representado pelas seguintes etapas:

➤ **Definição dos parâmetros iniciais:** Inicialmente devem ser definidos os parâmetros básicos para funcionamento do algoritmo proposto. Estes são:

- ✓ **Número de Gerações:** representa o número de interações que irá ocorrer no algoritmo. A cada interação são executados os operadores genéticos (cruzamento e mutação) e os indivíduos gerados que forem mais aptos são mantidos

para a próxima geração. Quanto maior o valor escolhido neste parâmetro, a tendência é que o resultado se aproxime cada vez mais do mínimo global. Entretanto, quanto maior for o número de gerações maior será o tempo gasto para se obter a solução final. Portanto o valor adequado dependerá do tamanho do grafo, do tempo disponível para elaboração da solução e do nível de precisão esperado pelo usuário;

- ✓ **Tamanho da População:** Descreve o número de indivíduos que cada população terá a cada geração. Cada indivíduo representa uma possível solução, portanto, quanto maior for a população mais testes (cruzamento e mutação) ocorrerão simultaneamente a cada interação. Logo, o tamanho da população afeta o desempenho e a eficiência do AG. Com uma população pequena o desempenho pode cair pois será fornecida uma pequena cobertura do espaço de busca. Com grandes populações tem-se uma cobertura do espaço de busca maior e evita-se convergências prematuras ao custo de maiores recursos computacionais e tempo de processamento. Portanto, o valor adequado novamente dependerá do tamanho do grafo, do tempo disponível para elaboração da solução e do nível de precisão esperado pelo usuário;
- ✓ **Tipo de Topologia:** Define a topologia da rede PON a ser utilizada no projeto. No sistema computacional proposto estão disponíveis quatro tipos de topologias que encontram-se descritas na Seção 5.4.2;
- ✓ **Mapa utilizado:** Define o local e o nome do arquivo a ser importado para o sistema;
- ✓ **Estado inicial:** Define o tipo e o local de cada possível cliente presente no cenário proposto. Nesta etapa é definido também o local da CO. Esta etapa está explicada na Seção 5.7;
- ✓ **Porcentagem de seleção:** Define o número de indivíduos mais aptos (em %) que participarão, a cada geração, das etapas posteriores de Cruzamento e Mutação.

➤ **Importa os dados de georreferenciamento obtidos dos mapas:** Nesta etapa é importado o mapa cartográfico e obtém-se as matrizes de informações que serão utilizadas pelo sis-

tema computacional proposto (matriz de coordenadas dos nós e matriz de adjacências com distâncias em metros). Também é exibido o grafo da rede. O processo de obtenção de mapas está descrito na Seção 5.6.

➤ **Calcula-se a matriz de distancias mínimas do grafo:** Com os dados obtidos na etapa anterior, o algoritmo realiza o cálculo da matriz de distâncias mínimas do grafo, por meio de uma função que utiliza o algoritmo de *Floyd-Warshall*. A escolha deste algoritmo se dá devido ao bom desempenho e a simplicidade encontrada na sua implementação. A matriz de distâncias mínimas gerada será de tamanho $N \times N$ (em que N é a dimensão do grafo) e conterá as distâncias mínimas (em metros) entre todos os pontos do grafo. Desta maneira esta matriz será calculada apenas uma vez e estará sempre disponível para a consulta de distância mínima entre dois nós do grafo.

➤ **Gera a população inicial com N_{pop} indivíduos:** Para esta etapa foi desenvolvida uma função que gera aleatoriamente o conjunto de indivíduos que irão pertencer à população inicial. Cada indivíduo representa a maneira como os divisores ópticos estarão dispostos na rede, ou seja, cada indivíduo representa uma possível solução do problema. Este processo está descrito detalhadamente na Seção 5.9.2.

➤ **Calcula o custo para cada indivíduo (função aptidão):** Com os indivíduos gerados na etapa anterior e as informações obtidas do mapa, monta-se a rede para cada indivíduo (respeitando as restrições impostas) e gera-se o custo total para cada indivíduo. Este processo está descrito detalhadamente na Seção 5.9.3.

➤ **Seleciona os indivíduos mais aptos:** Nesta etapa organizam-se em ordem crescente os indivíduos de acordo com cada valor obtido na função aptidão (custo total da rede). Os melhores indivíduos serão armazenados e participarão das etapas de cruzamento e mutação. Os demais indivíduos serão descartados. Esta etapa está descrita com maiores detalhes na Seção 5.9.4.

➤ **Função de cruzamento e Função de mutação:** Aplicam-se os operadores genéticos para os indivíduos selecionados na etapa anterior. A função de cruzamento combina aleatoriamente características (cromossomos) de dois indivíduos sorteados (dentre os selecionados). A função de mutação altera arbitrariamente uma ou mais características (cromossomos) do indivíduo selecionado. Os procedimentos de cruzamento e mutação estão descritos de maneira detalhada nas Seções 5.9.5 e 5.9.6, respectivamente.

➤ **Nova população:** Nesta etapa será armazenada a nova população que será formada por: melhores indivíduos selecionados na etapa anterior (com o objetivo de manter os mais aptos em caso de piora das soluções) e os indivíduos oriundos dos operadores genéticos de cruzamento e mutação.

Após a obtenção da nova população o sistema computacional realiza N interações (repetindo os passos anteriores) até que o valor pré-definido para as gerações seja alcançado. Quando este valor atinge o N_{max} , o algoritmo calcula novamente o custo da rede para a população do estado atual e o melhor indivíduo é considerado como a solução final para o problema proposto.

5.9.2. Função Geradora de Indivíduos

Para a execução desta etapa foi desenvolvida uma função em Matlab® responsável pela geração dos indivíduos da população inicial. Cada indivíduo será representado por uma linha de uma matriz conhecida como matriz população, que conterá $N \times M$ posições (em que N é a dimensão do grafo e M representa o tamanho da população). Cada indivíduo terá valores definidos em 0's e 1's e a posição que tiver valor 1 significa que haverá um divisor óptico naquela posição do grafo.

Para a geração da população inicial foi definida inicialmente uma variável aleatória cujo valor é definido de forma arbitrária entre 0.3 e 0.7. Quanto mais próximo de 0.7 for o valor aleatório sorteado pelo algoritmo, menor será a probabilidade de alocação 1's nas posições do vetor de cada indivíduo. Este procedimento contribui para uma maior diversidade nos indivíduos da população inicial.

Para topologias que possuem dois níveis de divisores ópticos distribuídos na ODN (como é caso da topologia distribuída) serão utilizadas no algoritmo duas matrizes população: uma para divisores ópticos de primeiro nível e outra para divisores ópticos de segundo nível. Os indivíduos da matriz de primeiro nível estarão sempre relacionados de forma sequencial aos indivíduos da matriz de segundo nível e, em pares, darão origem à cada solução. Com intuito de exemplificar o processo, gerou-se um pequeno grafo de 43 nós e definiu-se a localização da CO. Posteriormente estipulou-se uma população inicial para o primeiro e segundo nível de divisores ópticos, conforme apresentado nas matrizes (5-7) e (5-8). Para melhor visualização, a Figura 5.16 apresenta o primeiro indivíduo das matrizes M_1 e M_2 de forma gráfica.

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (5-7)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (5-8)$$

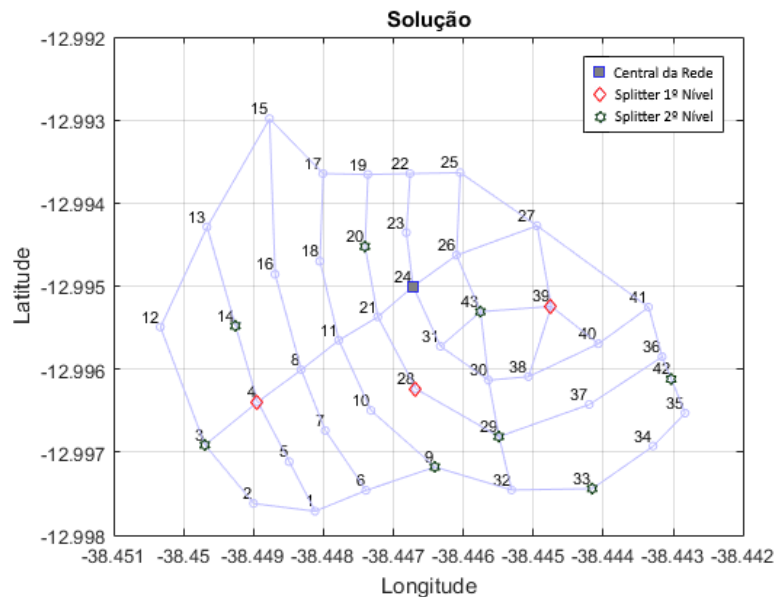


Figura 5.16 – Exemplo gráfico do primeiro indivíduo das matrizes de população inicial (com dois níveis divisores ópticos) apresentadas acima. Cada par de indivíduos das matrizes irão representar uma solução distinta.

5.9.3. Função Aptidão

Nesta etapa é calculada a aptidão de cada indivíduo da população oriunda de etapas anteriores (população inicial ou nova população). A aptidão será representada pelo custo financeiro total de implantação da rede (gerada a partir de cada indivíduo). Entretanto este cálculo é um procedimento longo e de alto custo computacional.

Para melhor entendimento do funcionamento desta etapa, a Figura 5.17 apresenta um fluxograma que descreve resumidamente a forma como é calculado o custo total de cada indivíduo (possível solução).

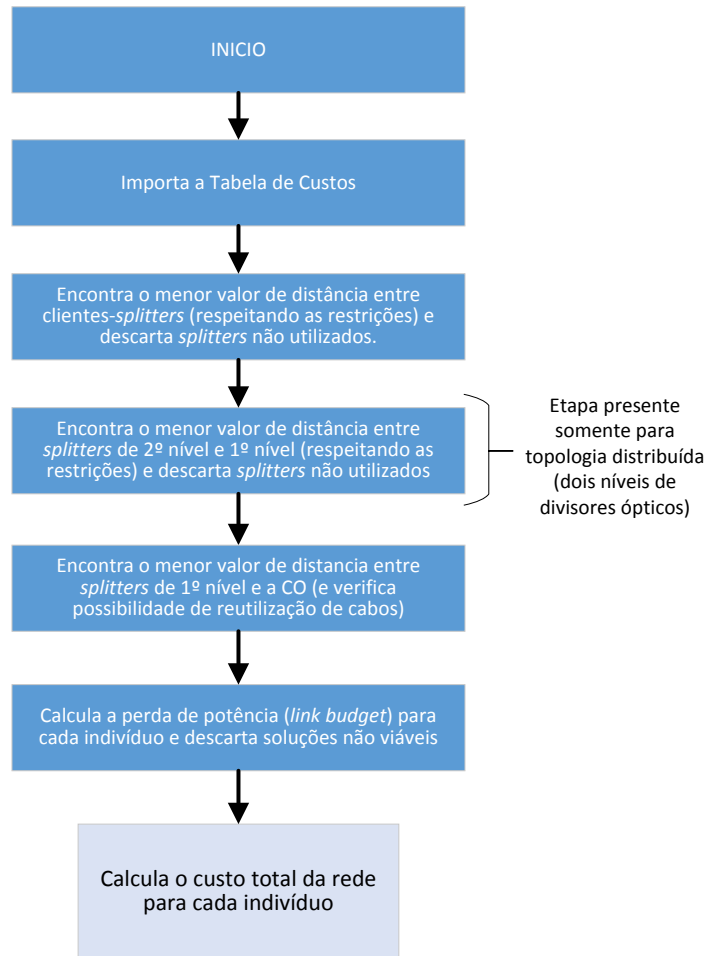


Figura 5.17 – Fluxograma que descreve o funcionamento básico da função aptidão.

Conforme apresentado no fluxograma, a função aptidão do sistema proposto pode ser dividida em seis passos principais.

- **Passo 1 – Importa a tabela custo:** Primeiramente o sistema proposto importa uma tabela contendo as informações de custo de cada equipamento, material e serviço que poderá ser utilizado na rede. Esta tabela está apresentada no Apêndice A. No Anexo A é apresentado graficamente cada equipamento, material e serviço que pode ser utilizado na solução proposta pelo algoritmo.
- **Passo 2 – Encontra o menor valor de distâncias entre clientes-splitters:** Nesta etapa obtém-se o menor caminho possível entre os clientes e os divisores ópticos de atendimento disponíveis (para cada indivíduo). As restrições para esta etapa são: 1 – a conexão da última milha será sempre realizada por um cabo *drop* e deve respeitar o limite máximo de 400 metros; 2 – a quantidade de clientes atendidos por um único divisor óptico não pode ser maior do que a quantidade de portas disponíveis naquele divisor óptico; 3 – todo cliente deve estar ligado a

algum divisor óptico. Para esta tarefa utiliza-se a matriz de distâncias mínimas, o estado inicial da rede e a matriz de população de indivíduos. Basicamente, pela multiplicação de matrizes, são encontrados todos os caminhos possíveis entre cada cliente e os divisores ópticos disponíveis (para cada indivíduo da população). A partir desta informação seleciona-se o menor caminho (entre os disponíveis) para cada cliente. Os divisores ópticos que não possuem clientes atribuídos são descartados (valor contido na posição específica da matriz é definido em zero). Indivíduos que não atendam às restrições tem seu custo definido como infinito e, conseqüentemente, são descartados para as próximas gerações.

Com os caminhos mais curtos definidos, a quantidade total de cabos do tipo *drop* utilizados para última milha pode ser encontrado multiplicando os valores obtidos pela quantidade de clientes por nó. Para melhor entendimento, na Figura 5.18 é apresentado graficamente um exemplo de um indivíduo e sua execução no passo 2. Os clientes são atribuídos a algum divisor óptico de atendimento disponível na rede por meio do cálculo do menor caminho e os divisores ópticos não utilizados são descartados.

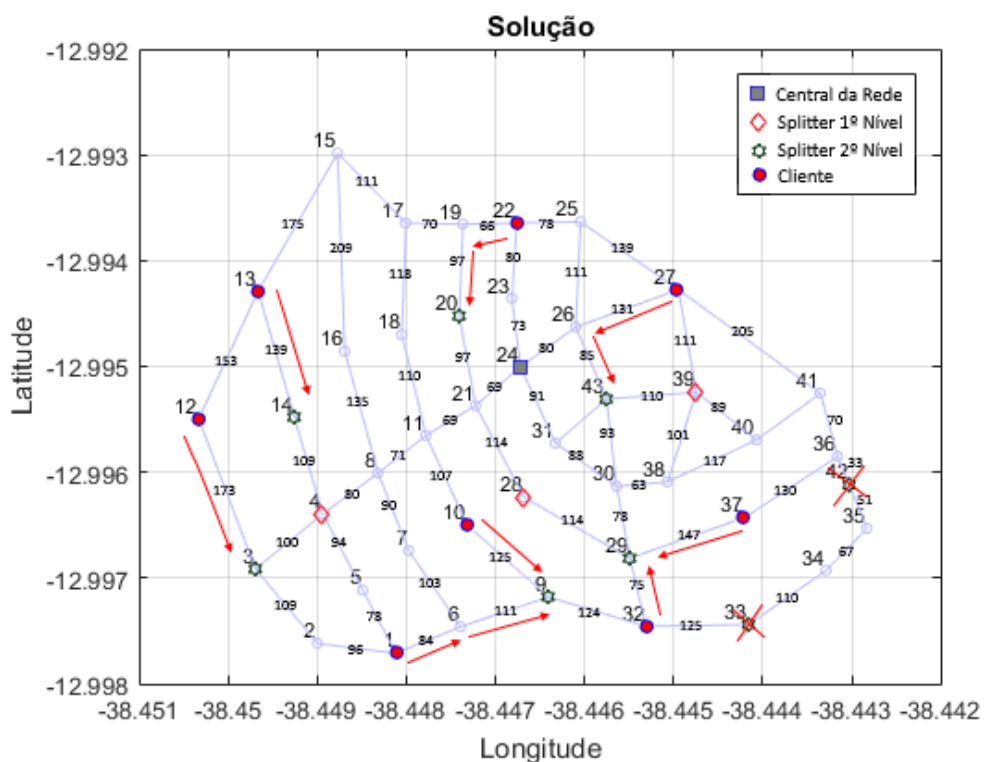


Figura 5.18 – Exemplo gráfico da etapa passo 2 da função aptidão (para um indivíduo). Neste passo são encontradas as distâncias mínimas entre clientes-*splitter* (respeitando as restrições).

• **Passo 3 – Encontra-se o menor valor de distâncias entre *splitters* de 2º nível e 1º nível:** Nesta etapa, já com os clientes alocados, obtém-se o menor caminho entre os divisores ópticos de 2º e 1º nível. Deve-se destacar que esta etapa só ocorre em topologias que possuem

dois níveis de divisores ópticos na OSP (caso das topologias distribuídas). Basicamente o cálculo é novamente realizado pela multiplicação de matrizes. Manipula-se, com cálculos matemáticos, a matriz de distâncias mínimas e as matrizes de população dos divisores ópticos de 1º e 2º nível para que se encontre a menor distância entre eles. Divisores ópticos de 1º nível que não possuem nenhum divisor óptico de 2º nível interligado serão descartados (valor contido na posição específica da matriz é definido em zero). Deve-se ressaltar que, nesta etapa da função aptidão, existe a possibilidade de existência de mais um divisor óptico de 1º nível por nó e isso ocorre quando há utilização total das portas disponível de um único divisor óptico. Para exemplificar esta etapa, a Figura 5.19 apresenta a forma como ocorrem as interligações entre os divisores ópticos de um indivíduo.

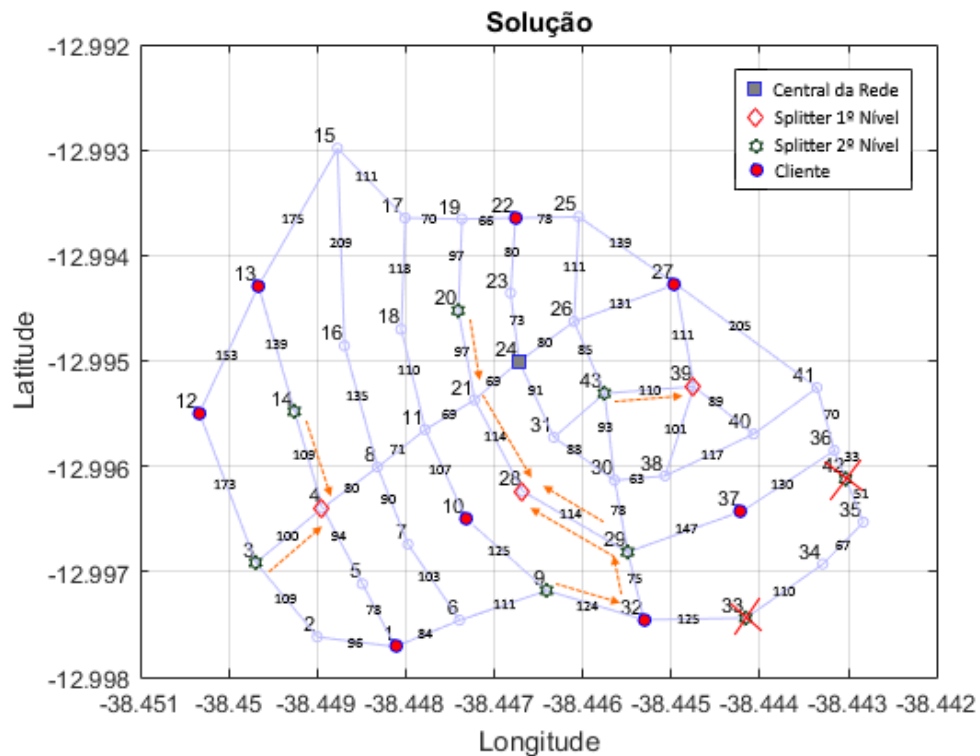


Figura 5.19 – Exemplo gráfico da etapa passo 3 da função aptidão (para um indivíduo). Neste passo são encontradas as distâncias mínimas entre *splitter2N-splitter1N*.

Passo 4 – Encontra-se o menor valor de distâncias entre *splitters* de 1º nível e CO (e verifica a possibilidade de reutilização de cabos): Nesta etapa, por meio de operações matriciais, é calculada a distância mínima entre todos os divisores ópticos de 1º nível e a CO. Com esta informação conhecida, as distâncias são organizadas em ordem crescente. O procedimento se inicia interligando o divisor óptico de menor distância à CO e adiciona-se a informação de seu nó em uma matriz auxiliar (esta matriz tem o objetivo de armazenar divisores ópticos que já estão interligados à CO). O próximo divisor óptico que possui o segundo menor valor

distância em relação à CO consultará a matriz auxiliar para verificar se a menor distância é a interligação direta à CO ou se é a interligação a um nó de um divisor óptico já consultado. Este procedimento garante que seja reutilizado rotas de cabos já conectadas à CO e permite a utilização de outras fibras disponíveis em um mesmo cabo. Desta forma é definida a rota de todos os cabos alimentadores que serão utilizados pela rede. A Figura 5.20 apresenta graficamente a forma como ocorre a interligação entre os divisores ópticos de 1º nível e a CO. Para este exemplo específico, devido às distâncias apresentadas, não houve reutilização de cabos e a ordem de interligação está identificada na cor vermelha.

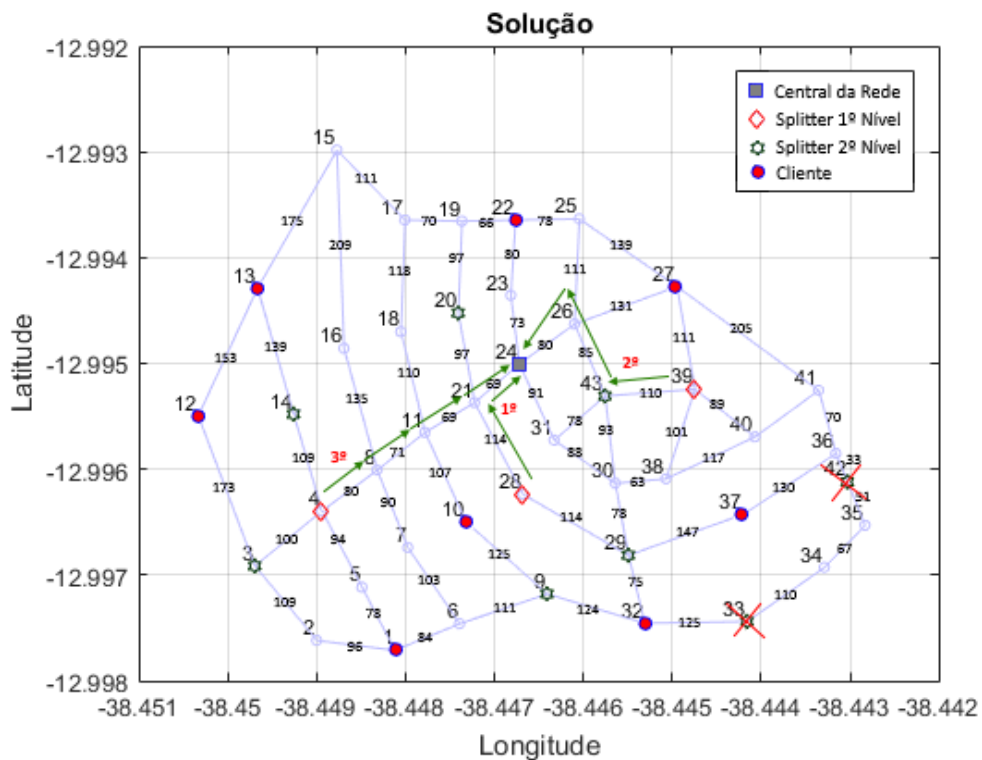


Figura 5.20 – Exemplo gráfico da etapa passo 4 da função aptidão (para um indivíduo). Neste passo são encontradas as distâncias mínimas entre *splitter*_{IN-CO} (respeitando as restrições).

Passo 5 – Calcula a perda de potência (*link budget*) para cada indivíduo e descarta soluções não viáveis: Após a elaboração da rede para cada indivíduo da população, calcula-se o orçamento de potência para cada enlace entre a CO e os divisores ópticos de atendimento. Com todas as distâncias já calculadas e armazenadas nos passos anteriores, juntamente com o número de CEOs por rota, o cálculo da perda estimada (em dBm) é realizado pela multiplicação de matrizes. O procedimento matemático e os valores das perdas características de equipamentos e materiais utilizados no sistema computacional estão descritos na Seção 5.8 deste trabalho. Com o objetivo de simplificar as operações de cálculo de perda de potência, na última milha de

cada enlace considerou-se sempre a distância máxima de 400m para interligação entre divisores ópticos de 2º nível e clientes. Indivíduos que ultrapassarem o valor do limiar de potência terão o custo definido como infinito e conseqüentemente serão descartados nas próximas gerações.

Passo 6 – Calcula o custo total da rede para cada indivíduo: Com os valores de todas as distâncias já armazenadas e conhecendo as posições de todos os divisores ópticos calcula-se o custo da rede (para cada indivíduo). Para melhor visualização e entendimento dos resultados, todos os materiais e serviços foram divididos em sete categorias distintas e o custo total (C_T) será calculado pela soma das sete categorias.

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 , \quad (5-9)$$

em que:

- ✓ C_1 : representa a categoria denominada Cabos e contém o custo de cada cabo utilizado na rede;
- ✓ C_2 : é a categoria denominada Equipamentos Passivos ODN-PON e inclui os equipamentos passivos (divisores ópticos, CEOs, armários, etc) utilizados na rede OSP.
- ✓ C_3 : representa a categoria denominada de Acessórios infraestrutura (ODN – rede aérea) e inclui os acessórios necessários para instalação de cabos em postes (de forma aérea).
- ✓ C_4 : corresponde à categoria denominada Custo – OLT GPON e inclui todos os equipamentos e acessórios relacionados ao concentrador da rede (OLT GPON).
- ✓ C_5 : representa a categoria denominada Componentes e acessórios – POP GPON e inclui todos os demais equipamentos que estarão localizados no POP.
- ✓ C_6 : é a categoria denominada Equipamentos cliente – GPON. Esta categoria contém todos os equipamentos e acessórios relacionados à instalação da última milha do cliente final (exceto o cabo *drop*).
- ✓ C_7 : é a categoria denominada Serviços de Instalação. Esta categoria contém os serviços de instalação e montagem de equipamentos bem como outros serviços como fusão óptica.

A Tabela 5.5 apresenta a identificação de cada material ou serviço utilizado no sistema computacional proposto, a unidade de medida, a formulação matemática para a cada item e o

valor unitário (em R\$). Os valores considerados nesta dissertação são valores comumente praticados no mercado de telecomunicações. A descrição completa de cada item, bem como suas ilustrações, encontra-se apresentada no Apêndice A e Anexo A respectivamente.

Tabela 5.5 – Formulação matemática de cada material e serviço utilizado na função aptidão.

(Continua)

Categoria	Item	ID Matlab	Formulação Matemática	Unidade	Custo Unitário (R\$)
Categoria 1 - Cabos	01	CABO_02F	$Cabo\ 02F = \sum Dist. Clientes - SP_{1N}$	Metro	0,91
	02	CABO_12F	$Cabo\ 12F = \sum Dist. SP_{2N} - SP_{1N}$	Metro	1,89
	03	CABO_48F	$Cabo\ 48F = \begin{cases} \sum Dist. SP_{1N} - CO, & FO\ Utilizadas < 36 \\ 0, & FO\ Utilizadas > 36 \end{cases}$	Metro	5,61
	04	CABO_144F	$Cabo\ 144F = \begin{cases} \sum Dist. SP_{1N} - CO, & FO\ Utilizadas > 36 \\ 0, & FO\ Utilizadas < 36 \end{cases}$	Metro	15,44
Categoria 2 - Equipamentos Passivos ODN-PON	05	FDH_1x8	$FDH_{1x8} = \begin{cases} \sum SP_{2N}, & Topologia\ Dist.\ T02 \\ 0, & Outros\ casos \end{cases}$	Peça	347,82
	06	FDH_1x16	$FDH_{1x16} = \begin{cases} \sum SP_{2N}, & Topologia\ Dist.\ T01 \\ 0, & Outros\ casos \end{cases}$	Peça	479,32
	07	FDH_1x32	$FDH_{1x32} = \begin{cases} \sum SP_{2N}, & Topologia\ Cent.\ T01 \\ 0, & Outros\ casos \end{cases}$	Peça	885,50
	08	FDH_1x64	$FDH_{1x64} = \begin{cases} \sum SP_{2N}, & Topologia\ Cent.\ T02 \\ 0, & Outros\ casos \end{cases}$	Peça	1.185,50
	09	CEO_144	$CEO_{144} = \begin{cases} \sum SP_{2N}, & Topologias\ Cent.\ T01\ ou\ T02 \\ \sum SP_{1N}, & Topologias\ Dist.\ T01\ ou\ T02 \end{cases}$	Peça	252,98
	10	BAND_CEO	$BAND_CEO = \begin{cases} \sum CEO_{144}, & FO\ Utilizadas\ na\ Rota_n > 24 \\ 0, & FO\ Utilizadas < 24 \end{cases}$	Peça	21,05
	11	SP_1x4	$SP_{1x4} = \begin{cases} \sum SP_{1N}, & Topologia\ Dist.\ T01 \\ 0, & Outros\ casos \end{cases}$	Peça	46,20
	12	SP_1x8	$SP_{1x8} = \begin{cases} \sum SP_{1N}, & Topologia\ Dist.\ T02 \\ 0, & Outros\ casos \end{cases}$	Peça	45,76
Categoria 3 - Acessórios Infraestrutura (Rede Aérea)	13	PLAQ_ID	$PLAQ_ID = \sum KIT_{FERR} + \sum RES_{TEC} + \sum CEO_{144} + \sum FDH_{1x64} + \sum FDH_{1x32} + \sum FDH_{1x16} + \sum FDH_{1x8}$	Peça	0,91
	14	KIT_FERR	$KIT_FERR = (\sum CABO_{02F} + \sum CABO_{12F} + \sum CABO_{48F} + \sum CABO_{144F})/30$	Peça	1,89
	15	RES_TEC	$RES_TEC = 2 * KIT_FERR$	Peça	5,61
Categoria 4 - Custo OLT-GPON	16	OLT_1	$OLT_1 = ceil(OLT_7/40)$	Peça	12.000,00
	17	OLT_2	$OLT_2 = OLT_1$	Peça	6.974,29
	18	OLT_3	$OLT_3 = 2 * ceil(OLT_7/40)$	Peça	7.564,32
	19	OLT_4	$OLT_4 = OLT_3$	Peça	76,22
	20	OLT_5	$OLT_5 = OLT_3$	Peça	3.714,57
	21	OLT_6	$OLT_6 = 2 * ceil(OLT_7/4)$	Peça	5.632,96
	22	OLT_7	$OLT_7 = \begin{cases} \sum SP_{2N}, & Topologia\ Cent.\ T01 \\ (\sum SP_{2N})/2, & Topologia\ Cent.\ T02 \\ \sum SP_{1N}, & Topologia\ Dist.\ T01\ e\ T02 \end{cases}$	Peça	412,41
	23	OLT_8	$OLT_4 = OLT_3$	Peça	1.282,04
Categoria 5 - Componentes e acessórios POP GPON	24	CORD_CON2	$COORD_CON2 = OLT_7$	Peça	16,19
	25	RACK_44U	$RACK_{44U} = ceil \left[\frac{OLT_2 * 7 + DIO_{144A} * 3 + DIO_{48A} * 1 + PP_{MOD} * 1}{44} \right]$	Peça	2.800,00
	26	KIT_EX	$KIT_EX = RACK_{44U}$	Peça	168,18
	27	EXT_DIO	$EXT_DIO = 12 * DIO_{144A}$	Peça	113,96

(Conclusão)

Categoria	Item	ID Matlab	Formulação Matemática	Unidade	Custo Unitário (R\$)
Categoria 5 - Componentes e acessórios POP GPON	28	DIO_144A	$DIO_{144a} = \sum QUANT_ROTAS_CABO_{144F}$	Peça	816,03
	29	DIO_144B	$DIO_{144B} = 4 * DIO_{144a}$	Peça	50,88
	30	DIO_48A	$DIO_{48A} = \sum QUANT_ROTAS_CABO_{48F}$	Peça	634,39
	31	DIO_48B	$DIO_{48B} = 1 * DIO_{144a}$	Peça	37,58
	32	PP_MOD	$PP_MOD = \text{ceil}\left(\frac{SP_{1x2c}}{3}\right)$	Peça	56,66
	33	SP_1x2C	$SP_{1x2C} = \begin{cases} \frac{\sum SP_{2N}}{2}, & \text{Topologia Cent. T02} \\ 0, & \text{Outros casos} \end{cases}$	Peça	163,48
Categoria 6 - Equipamentos cliente - GPON	34	CON_CAMP	$CON_CAMP = 2 * \sum TOTAL_CLIENTES$	Peça	16,44
	35	PATCH_COR	$PATCH_COR = 1 * \sum TOTAL_CLIENTES$	Peça	15,99
	36	CORD_CON1	$CORD_CON1 = 1 * \sum TOTAL_CLIENTES$	Peça	15,37
	37	ADAP_CON	$ADAP_CON = 2 * \sum TOTAL_CLIENTES$	Peça	1,89
	38	PTO_2F	$PTO_{2F} = 1 * \sum TOTAL_CLIENTES$	Peça	12,73
	39	ONT_GPON	$ONT_GPON = 1 * \sum TOTAL_CLIENTES$	Peça	680,92
Categoria 7 - Serviços de Instalação	01	SERV_CABO	$SERV_CABO = \sum CABO_{02F} + \sum CABO_{12F} + \sum CABO_{48F} + \sum CABO_{144F}$	Metro	2,38
	02	SERV_FUS	$SERV_FUS = \sum DIO_{144A} * 144 + \sum DIO_{48A} * 48 + 2 * \sum (FDH_{64} + FDH_{32} + FDH_{16} + FDH_{08})$	Unidade	43,75
	03	SERV_FUSM	$SERV_FUSM = 2 * \sum TOTAL_CLIENTES$	Unidade	22,50
	04	SERV_CEO	$SERV_CEO = CEO_{144}$	Unidade	426,25
	05	SERV_FDHD	$SERV_FDHD = \sum (FDH_{64} + FDH_{32} + FDH_{16} + FDH_{08})$	Unidade	755,00
	06	SERV_CERT	$SERV_CERT = OLT_7$	Unidade	31,67
	07	SERV_RACK	$SERV_RACK = RACK_{44U}$	Unidade	1.350,00
	08	SERV_PTO	$SERV_PTO = PTO_{2F}$	Unidade	45,00
	09	SERV_PL_OLT	$SERV_P_OLT = \frac{OLT_7}{4}$	Unidade	3.350,00

5.9.4. Função Selecciona Indivíduos

Para a execução desta etapa desenvolveu-se uma função que tem o objetivo de seleccionar os indivíduos mais aptos da população (que apresentem menor custo). Com o custo já conhecido e armazenado na etapa anterior (função aptidão) o sistema reorganiza os indivíduos de forma crescente. Indivíduos menos aptos serão descartados de acordo com a porcentagem de

seleção pré-definida no início do sistema proposto. Para este trabalho, de modo empírico, definiu-se um valor de 0.4, ou seja, 40% por cento dos indivíduos mais aptos serão selecionados a cada geração e participarão das etapas de Cruzamento e Mutação. Os demais indivíduos serão descartados a cada geração.

5.9.5. Função de Cruzamento (*Crossover*)

A função de cruzamento é um dos operadores genéticos que tem o objetivo de modificar e variar a população a cada geração. A principal função deste operador é garantir a troca de cromossomos entre dois diferentes indivíduos chamados de pais, combinando aleatoriamente as características de ambos. Desta forma espera-se que haja uma probabilidade razoável de se obter indivíduos mais aptos que os indivíduos pais. Neste trabalho a etapa de cruzamento funciona da seguinte maneira: em um o conjunto de indivíduos selecionados na etapa anterior, sorteia-se aleatoriamente pares de indivíduos que participarão da operação. Para cada par sorteia-se novamente os cromossomos que participarão da função de cruzamento. Cromossomos não sorteados para a operação herdarão os valores do primeiro indivíduo sorteado. A Figura 5.21 apresenta um exemplo gráfico do operador genético de cruzamento para um par de indivíduos.

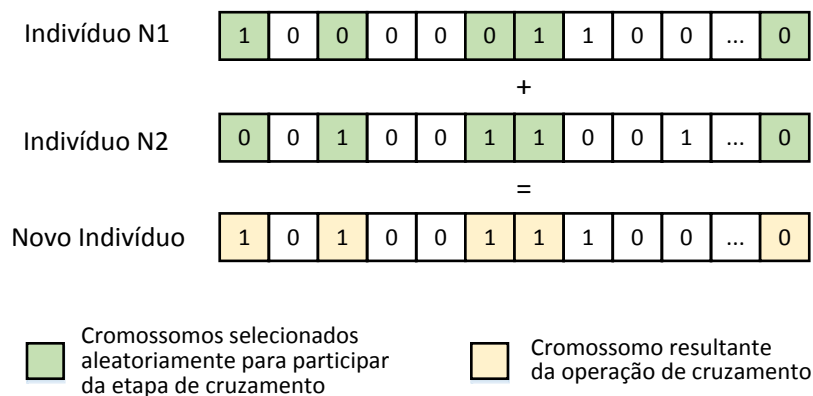


Figura 5.21 – Exemplo gráfico da operação de cruzamento com um par de indivíduos.

5.9.6. Função de Mutação (*Mutation*)

A função de mutação é outro operador genético que tem o objetivo de modificar a população. A principal função deste operador é trocar aleatoriamente alguns cromossomos dos indivíduos assegurando sempre a diversidade da população, evitando que a solução convirja prematuramente para regiões de mínimos e máximos locais. Neste trabalho a etapa de mutação

funciona da seguinte forma: todos os indivíduos selecionados anteriormente na função seleciona indivíduos participam desta etapa e tem seus cromossomos alterados de forma e em número aleatório a cada geração. Para melhores resultados desenvolveu-se um índice que verifica e acompanha, a cada interação, o número restante de gerações até que se obtenha a solução final. Desta forma, à medida que as gerações vão avançando o sistema torna mais reduzida a probabilidade de muitas alterações nos cromossomos de cada indivíduo. Isto permite uma maior chance de ocorrência de ajustes finos nas soluções quando estas estão com índice avançado de gerações. Outro aspecto a ser destacado é que topologias distribuídas possuem um maior espaço de busca. Para melhores resultados e ajustes mais precisos, além da redução da probabilidade de alterações em gerações avançadas, quando o índice de gerações atinge o valor de 60%, as alterações passam a ocorrer apenas nos indivíduos que representam os divisores ópticos de segundo nível (divisores ópticos de atendimento). Detectou-se por testes que, nas gerações avançadas, as alterações nos divisores ópticos de primeiro nível já não são significativas e pouco influenciam na redução geral do custo. A Figura 5.22 apresenta um exemplo gráfico do operador genético de mutação para um indivíduo.

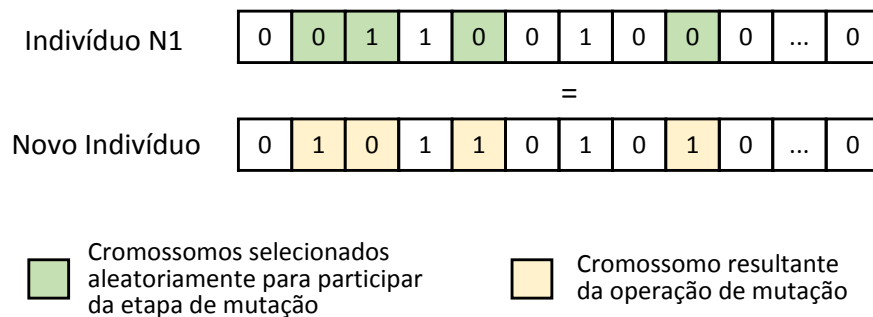


Figura 5.22 – Exemplo gráfico da operação genética de mutação com um indivíduo.

CAPÍTULO 6

6. AVALIAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos utilizando o sistema computacional proposto para otimização de redes PON. Para as simulações realizadas neste trabalho serão empregadas quatro topologias de redes GPON. Estas topologias são comumente empregadas pelas operadoras de telecomunicações em projetos de redes, especialmente em sistemas FTTH. A descrição de cada uma das topologias utilizadas encontra-se na Seção 5.4.2.

Com a finalidade de validar o método proposto são realizadas comparações com soluções elaboradas com o método tradicional (sem o auxílio de ferramentas de otimização de redes). Para validação do sistema são gerados, para cada topologia, gráficos e tabelas que descrevem o comportamento da evolução do algoritmo, bem como o resultado da melhor solução encontrada e também o custo detalhado de cada rede proposta. Também é calculado o orçamento de potência óptica (*link budget*), outro importante parâmetro de uma rede PON, que garante o correto funcionamento do sistema. Após a validação do algoritmo são realizados testes em cenários maiores (com uma maior quantidade de nós no grafo) com o objetivo de analisar o comportamento do sistema computacional proposto. Também analisa-se a forma como a escolha da topologia influencia no custo total da rede (em conjunto com a disposição dos clientes e a localização da CO). É importante destacar que, para todas as simulações descritas nessa dissertação, utilizou-se um computador Intel® Core i5 @ 1.8 GHz com 8 Gb de memória RAM.

Inicialmente, para a avaliação do algoritmo proposto, utiliza-se um grafo de dimensão relativamente reduzida, com o objetivo de facilitar a compreensão do leitor e também facilitar a elaboração da solução com o método tradicional.

6.1. Cenário Escolhido e Estado Inicial do Algoritmo

Para a elaboração de um sistema de redes ópticas PON é necessário que algumas informações estejam previamente definidas. O projetista da rede deve conhecer a região de interesse (ruas, avenidas e dutos onde seja possível a instalação de rede óptica), a localização da central da rede ou ponto de presença (CO ou POP) e a disposição dos possíveis clientes da rede.

Conforme descrito anteriormente na Seção 5.5, a representação da região de interesse (mapa) que descreve o cenário escolhido é realizada com uso de grafos não dirigidos, em que

as arestas representam as ruas e, portanto, os possíveis encaminhamentos de cabos ópticos. A localização da CO e a localização dos clientes são previamente definidas de acordo com a demanda estimada de clientes na região. Deve-se ressaltar que todos os clientes somente podem estar dispostos em nós do grafo já existentes, o que simplifica a configuração da etapa inicial.

O cenário escolhido para os testes iniciais e validação do algoritmo foi a região sul do bairro do Costa Azul, localizado próximo à orla da cidade de Salvador. A escolha deste cenário para a avaliação do algoritmo se dá pelo tamanho relativamente reduzido do bairro e da disposição ordenada das ruas, o que facilita sua visualização. Por meio da plataforma *Open Street Map* obteve-se as informações georreferenciadas de cada rua e avenida do bairro, sendo possível a elaboração de um grafo sobreposto ao mapa conforme apresentado na Figura 6.1. A Figura 6.2 ilustra o grafo do mapa da região de interesse à ser importado para a plataforma Matlab®. O processo de importação de mapas contido no algoritmo proposto está descrito detalhadamente na Seção 5.6 deste trabalho.



Figura 6.1 – Mapa da região de interesse (Bairro Costa Azul) com grafo sobreposto.

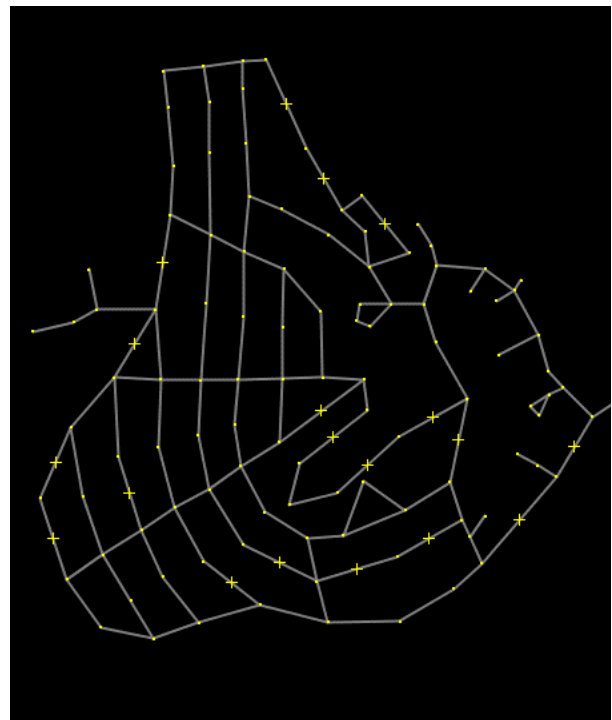


Figura 6.2 – Grafo do mapa da região de interesse à ser importado para Matlab®.

O grafo da rede obtido para o cenário proposto apresenta um total de 108 nós e uma área de aproximadamente 0,64 km², conforme podemos ver na Figura 6.3. É possível notar também, a partir dos eixos de latitude e longitude presentes na figura, que o grafo a ser utilizado no

algoritmo está georreferenciado. Esta informação é de suma importância, pois com ela, é possível saber com precisão onde estará localizado cada componente da rede a ser implantada.

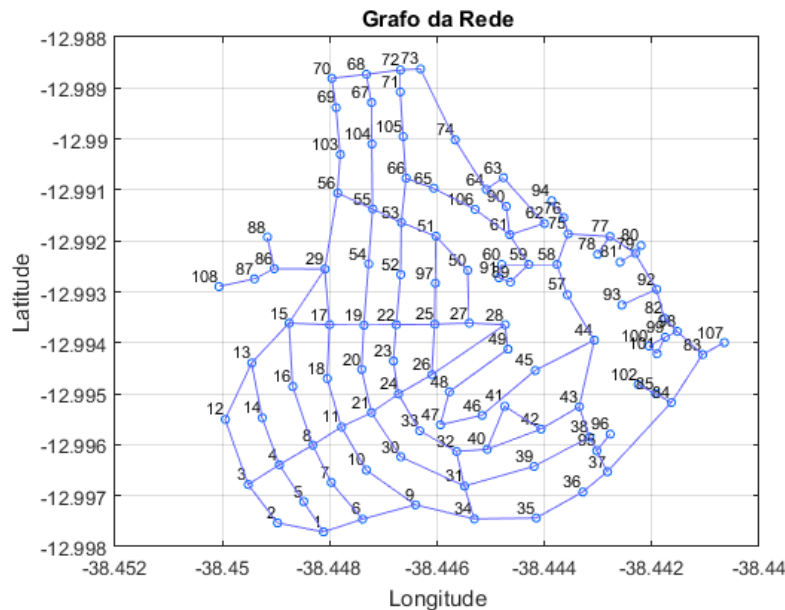


Figura 6.3 – Grafo da rede (bairro Costa Azul) importado para Matlab® contendo 108 nós.

Para que o estado inicial do algoritmo possa estar completo é necessário que seja definida a posição da CO, bem como a disposição dos possíveis clientes no grafo. Para a escolha do nó onde estará localizada a central da rede, local onde será armazenada a OLT, foi definido uma posição central à região de interesse com o objetivo de reduzir a quantidade necessária de cabos para atendimento dos clientes. Para uma melhor representatividade e entendimento de cada topologia de rede PON descrita nesta dissertação, os clientes (local onde estarão armazenadas as ONTs) foram dispostos de maneira variada no mapa, tendo cada topologia sob avaliação uma diferente distribuição de clientes. A Figura 6.4 ilustra um exemplo de um estado inicial completo, com a definição do local da CO e com os clientes já devidamente identificados no mapa. Para este trabalho, a quantidade de clientes por nó pode ser ajustada entre dois, quatro e sete clientes. A Tabela 6.1 apresenta a simbologia utilizada para representação da CO e da quantidade de clientes por nó.

Tabela 6.1 – Simbologia utilizada para o estado inicial (Grafo da Rede e Clientes).

Simbologia	Descrição
●	Nó da rede contendo dois clientes
●	Nó da rede contendo quatro clientes
●	Nó da rede contendo sete clientes
■	Central da rede (CO ou POP)

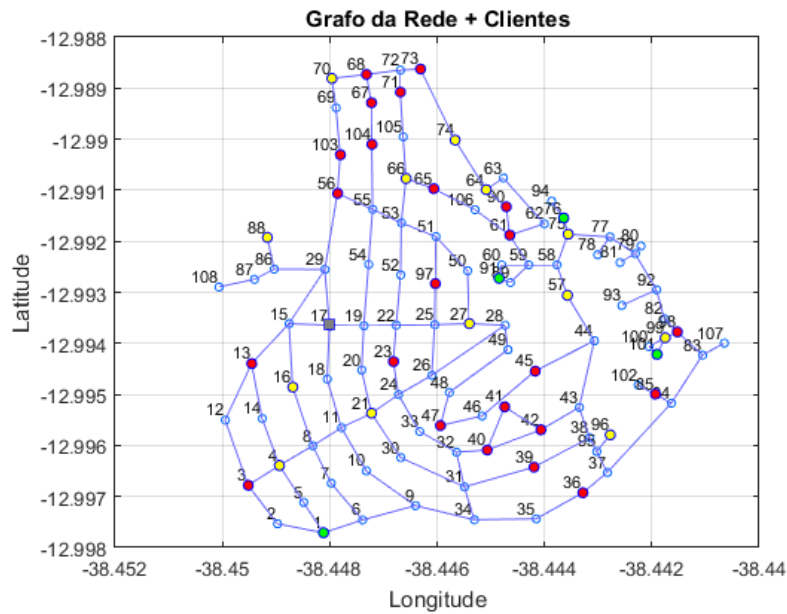


Figura 6.4 – Exemplo de um estado inicial para o algoritmo proposto (Grafo da Rede e Clientes).

6.2. Validação dos resultados em cenário reduzido

Nesta subseção são realizadas simulações utilizando o algoritmo proposto para cada uma das quatro topologias previamente definidas. Busca-se comprovar a eficácia do algoritmo para cada topologia por meio da comparação com soluções elaboradas por um projetista de rede utilizando, para cada teste, o mesmo estado inicial da rede (disposição da central da rede e possíveis clientes).

6.2.1. Topologia Centralizada – Tipo 1 (1×64)

Conforme ilustrado na Seção 5.4.2, a topologia centralizada pode ser comumente dividida em duas categorias. A primeira delas utiliza um único estágio de divisores ópticos com razão de divisão de 1×64 e eles são armazenados em armários de telecomunicações de tamanho intermediário (FDH) dispostos na rede externa OSP (*Outside Plant*). O atendimento de cada cliente da rede é realizado a partir de cada porta de saída do divisor óptico 1×64 e este trecho da rede é conhecido como última milha (*last mile*). Deve-se sempre ressaltar que, neste trabalho, foi considerada a limitação de distância recomendada pelos fabricantes, de 400 m em cabos do tipo *drop*. Este modelo de cabo óptico é normalmente utilizado em conexões de últimas milhas para atendimento de clientes FTTH devido a sua reduzida dimensão e também sua flexibilidade em dutos.

Para a simulação da topologia centralizada do tipo 1 utilizou-se o grafo descrito na Figura 6.3 e definiram-se as características iniciais do algoritmo (Tabela 6.2) bem como o estado inicial do problema (Figura 6.7). As características iniciais da rede foram ajustadas empiricamente e a disposição dos clientes no grafo foi realizada de forma que facilitasse a visualização dos resultados.

Tabela 6.2 – Características iniciais da rede definidas para a Topologia Centralizada (Tipo 1).

Característica	Valores
População Inicial (indivíduos)	100
Número de Gerações (iterações)	200
Porcentagem de Seleção	0,4
Reserva p/ futuros clientes (%)	0,125
Número de nós da rede	108
Número total de clientes atendidos	333
Número de nós com dois clientes (verde)	4
Número de nós com quatro clientes (amarelo)	13
Número de nós com sete clientes (vermelho)	39
Área do mapa (km ²)	0,64 km ²

6.2.1.1. Análise da Variabilidade do Resultado

Inicialmente, com o objetivo de conhecer a variabilidade do algoritmo proposto para este tipo de topologia, foi simulado o mesmo estado inicial quatro vezes, obtendo os resultados contidos na Tabela 6.3. É importante ressaltar que número de simulações foi definido empiricamente e os resultados obtidos sugerem a convergência da solução.

Tabela 6.3 – Análise da variabilidade do algoritmo proposto para Topologia Centralizada (Tipo 1).

Simulação	Custo Total (R\$)	Varição em relação ao menor custo (%)	Tempo de execução (s)
S-01	528.422,12	0,3252%	211,43
S-02	527.636,18	0,1767%	212,96
S-03	526.703,68	-	226,12
S-04	529.865,28	0,5967%	207,98

Devido à natureza aleatória do algoritmo genético, nota-se que existe uma variabilidade entre o custo total obtido em cada simulação executada, mesmo quando se utiliza parâmetros iniciais idênticos. Entretanto, quando se define um número de gerações adequado para o tamanho do grafo, o valor do resultado se aproxima do mínimo global a cada simulação e a variação apresentada tende a ser mínima podendo ser considerada desprezível. A Figura 6.5 apresenta a evolução da redução do custo da rede (em R\$) gerada pelo algoritmo genético para cada simulação.

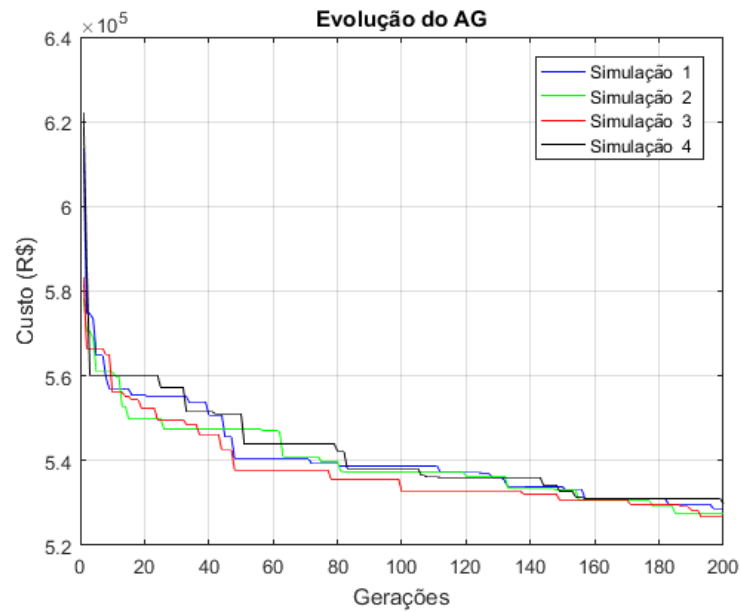


Figura 6.5 – Comparação da evolução do AG para quatro simulações com o mesmo estado inicial – Topologia Centralizada (Tipo 1).

6.2.1.2. Resultados Obtidos com a Utilização do Algoritmo Proposto

Para a simulação e obtenção dos resultados, definiu-se o estado inicial da rede (Figura 6.7) e os parâmetros do algoritmo de acordo com a Tabela 6.2. Utilizou-se o algoritmo proposto para a topologia centralizada – tipo 1, e obteve-se então os seguintes resultados. A Figura 6.6 ilustra a evolução da redução do custo em cada geração. Já na Figura 6.9 é exibida a distribuição dos elementos da rede gerada pelo algoritmo. Na Tabela 6.4 estão reunidas as principais informações da rede gerada pelo algoritmo: quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO e custo total da rede. Na Tabela 6.5 estão descritas as informações de cada divisor óptico da rede. A primeira coluna descreve o número sequencial de cada divisor óptico, a segunda coluna apresenta a razão de divisão, a terceira coluna mostra o número de portas disponíveis (considerando a reserva pré-definida para futuros clientes), a quarta coluna apresenta a quantidade de clientes ligados a cada divisor óptico, a quinta coluna identifica o nó de localização (no grafo) e a sexta coluna apresenta a perda estimada (em dBm) para os clientes ligados a aquele divisor óptico. Para o cálculo da perda foi considerado sempre o pior caso, o que significa um lance total de 400 metros de cabo óptico *drop* na última milha. Por fim, na Figura 6.8, é apresentado graficamente o orçamento de potência óptica da rede (em dBm). Cada barra representa a perda óptica dos enlaces entre a OLT e os divisores ópticos de atendimento (considerando 400 m de cabo óptico *drop* para última milha – pior caso). Para

efeito de comparação desenhou-se o limiar de funcionamento da rede e o limiar com uma margem de segurança adicional de 3 dBs (procedimento comum em planejamento de redes ópticas).

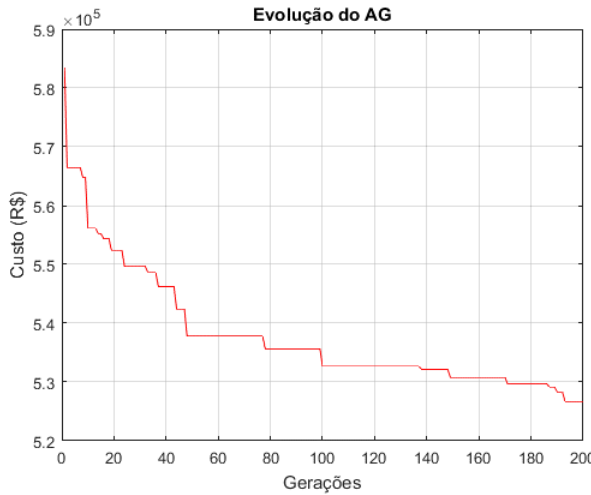


Figura 6.6 – Evolução do AG para o melhor resultado da Topologia Centralizada (Tipo 1).

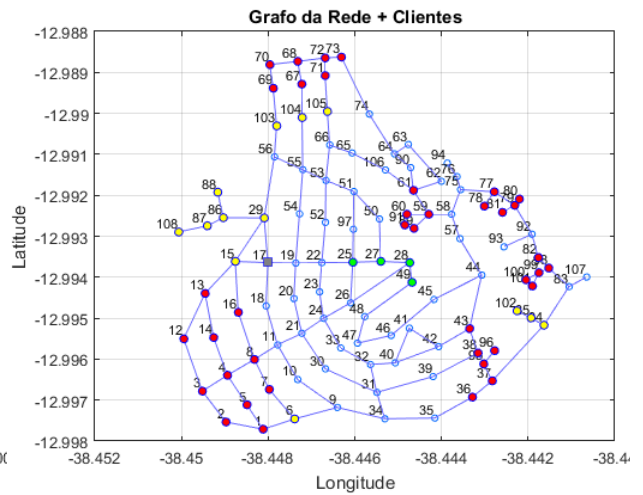


Figura 6.7 – Estado inicial utilizado para simulação da Topologia Centralizada (Tipo 1).

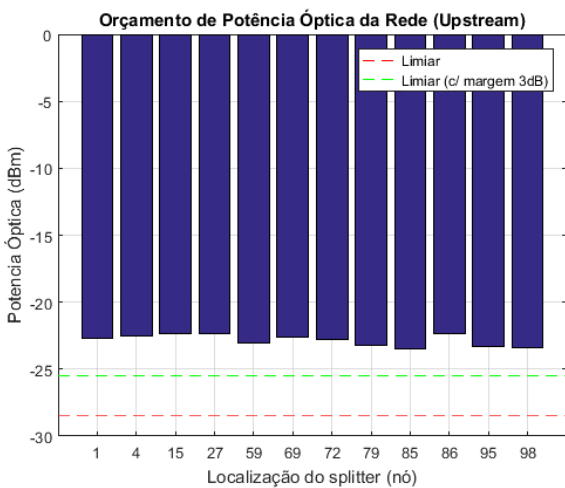


Figura 6.8 – Orçamento de potência óptica da rede gerado pelo AG para Top. Centralizada (Tipo 1).

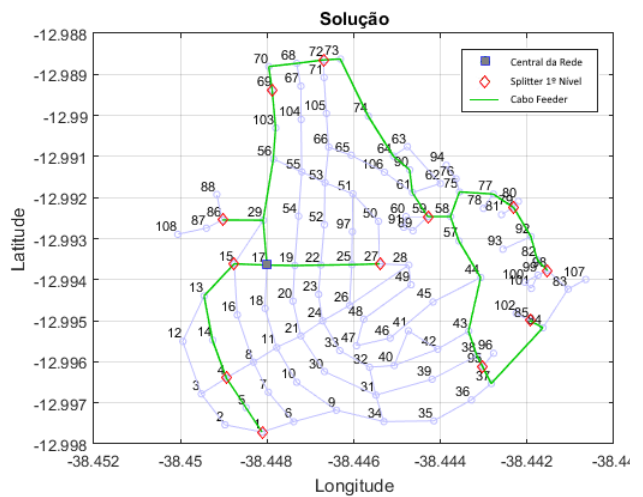


Figura 6.9 – Resultado gráfico gerado pelo AG para Topologia Centralizada (Tipo 1).

Tabela 6.4 – Principais resultados obtidos com o AG para Topologia Centralizada (Tipo 1).

ITEM	VALOR
Tempo de execução total	226,12 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	25.353 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	0 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	3.557 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	28.910 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	12 unidades
Quant. total de caixas de emendas ópticas (CEO)	12 unidades
Custo da rede total	R\$ 526.703,68

Tabela 6.5 – Matriz de informação dos *splitters* de 1º Nível – Topologia Centralizada (Tipo 1).

Id	Tipo do Splitter	Portas Disponíveis	Quant. de clientes atendidos	Localização do Splitter (nó)	Potência Recebida Ont (dBm)*
01	1x64	56	25	1	-22,6604
02	1x64	56	42	4	-22,5184
03	1x64	56	18	15	-22,3135
04	1x64	56	8	27	-22,3862
05	1x64	56	35	59	-23,0352
06	1x64	56	18	69	-22,6102
07	1x64	56	43	72	-22,7644
08	1x64	56	35	79	-23,2146
09	1x64	56	12	85	-23,4764
10	1x64	56	20	86	-22,3650
11	1x64	56	42	95	-23,2923
12	1x64	56	35	98	-23,3648

* Considerou-se 400m de cabo para atendimento de cliente (pior caso)

6.2.1.3. Resultados Obtidos Pelo Método Convencional

Com o objetivo de analisar os resultados obtidos com o algoritmo proposto para a Topologia centralizada do tipo 1, foi desenvolvida uma solução convencional utilizando o mesmo cenário, estado inicial, topologia e restrições. Deve-se ressaltar também que foram utilizados apenas os materiais disponíveis no Apêndice A e não era conhecida nenhuma solução anterior para o problema. Após a conclusão da tarefa de elaboração da rede obtiveram-se os resultados descritos a seguir. A Figura 6.10 apresenta graficamente a distribuição dos elementos da rede elaborada pelo método convencional. A Tabela 6.6 reúne as principais informações da rede gerada: quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO e custo total da rede. Já na Tabela 6.7, analogamente à Tabela 6.5, estão descritas as informações de cada divisor óptico da rede gerada pelo método manual.

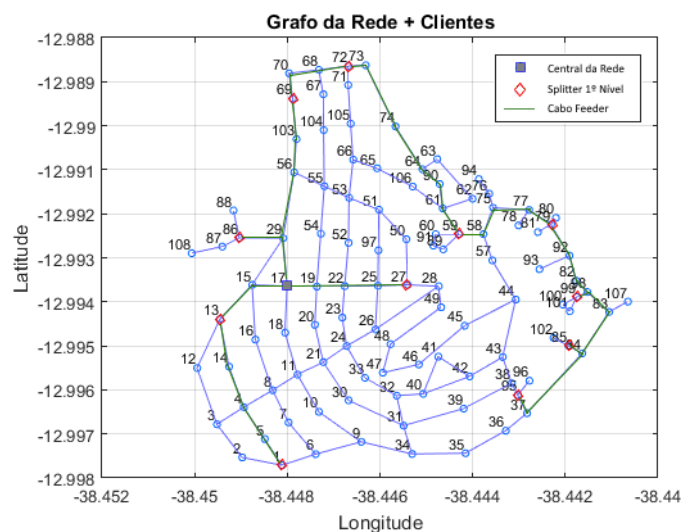


Figura 6.10 – Solução elaborada por projetista para Topologia Centralizada (Tipo 1).

Tabela 6.6 – Principais resultados obtidos com a solução elaborada por projetista – Top. Centralizada. Tipo 1.

ITEM	VALOR
Tempo de execução total	~9.600 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	28.298 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	0 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	3.354 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	31.652 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	11 unidades
Quant. total de caixas de emendas ópticas (CEO)	11 unidades
Custo da rede total	R\$ 531.193,55

Tabela 6.7 – Matriz de informação dos *splitters* de 1º nível – Topologia Centralizada (Tipo 1).

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Disponíveis	Quant. de clientes atendidos	Localização do <i>Splitter</i> (nó)	Potência Recebida Ont (dBm)*
01	1x64	56	53	1	-22,5804
02	1x64	56	32	13	-22,3553
03	1x64	56	8	27	-22,3868
04	1x64	56	35	59	-22,9552
05	1x64	56	18	69	-22,6102
06	1x64	56	43	72	-22,8444
07	1x64	56	35	79	-23,2146
08	1x64	56	12	85	-23,5488
09	1x64	56	20	86	-22,3650
10	1x64	56	42	95	-23,7328
11	1x64	56	35	99	-23,3748

* Considerou-se 400m de cabo para atendimento de cliente (pior caso)

6.2.1.4. Comparação Entre Solução do Algoritmo e Solução Manual

Para validar o algoritmo foram comparados os resultados obtidos pelo sistema computacional de otimização com a solução elaborada pelo método convencional para a topologia centralizada – tipo 1. A Tabela 6.8 descreve a comparação entre as soluções para os seguintes itens: tempo total necessário para conclusão da tarefa, quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO, quantidade de portas disponíveis em divisores ópticos (considerando as portas para reservadas para demandas futuras) e custo total da rede. A Figura 6.11 apresenta a comparação do custo total dividido em cinco categorias principais. As categorias são: (1) Cabos: contém todos os cabos ópticos utilizados na rede; (2) OLT GPON: contém todos os materiais e dispositivos que são utilizados na OLT; (3) Equipamentos Clientes: contém todos os equipamentos e materiais (com exceção do cabo óptico) que são utilizados para interligação entre o cliente e o divisores ópticos; (4) Serviços: contém todo o custo para instalação dos equipamentos e materiais da rede PON; (5) Outros: contém equipamentos passivos da ODN e demais componentes e acessórios da rede.

Tabela 6.8 – Comparação entre solução do AG e solução manual – Topologia Centralizada (Tipo 1).

ITEM	SOLUÇÃO AG	SOLUÇÃO MANUAL
Tempo de execução total	226,12 segundos	~9.600 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	25.353 metros	28.298 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	0 metros	0 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	3.557 metros	3.354 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	28.910 metros	31.652 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	12 unidades	10 unidades
Quantidade total de caixas de emendas ópticas (CEO)	12 unidades	10 unidades
Quantidade total de portas disponíveis em <i>splitters</i> (c/ reserva)	768	640
Quantidade total de portas utilizadas em <i>splitters</i>	333	333
Custo da rede total	R\$ 526.703,68	R\$ 531.193,55

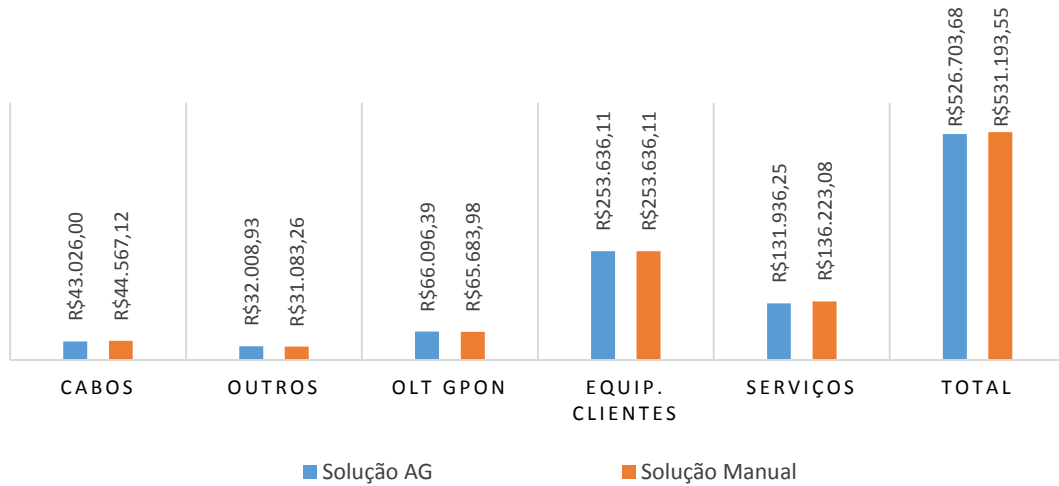


Figura 6.11 – Comparação por categoria (do custo total) para teste de validação da Top. Centralizada – Tipo 1.

Inicialmente, ao analisar os resultados obtidos observou-se que, apesar do cenário considerado ser bastante reduzido, o sistema computacional proposto apresentou taxas de atenuação dentro do limite esperado do sistema (que admite uma perda óptica máxima, em *uplink*, de -28.5dB), o que garante o funcionamento adequado da rede. Também cabe ressaltar a redução de custo de R\$ 4.489,87, no resultado algoritmo proposto em relação à solução convencional. Isto representa um decréscimo de 0.84% no custo total. Este decréscimo pode ser justificado pelo princípio de funcionamento do algoritmo genético proposto, que realiza o teste de centenas de possibilidades a cada geração e considera o valor de todos os elementos que compõem a rede, o que dificilmente ocorre em uma solução elaborada por um projetista. Outro fator a ser destacado é a drástica redução de tempo necessário para execução da mesma tarefa. Para o cenário da região de interesse, o algoritmo genético necessita de aproximadamente 3,5 minutos para encontrar uma solução adequada para o problema, enquanto a solução elaborada por um

projetista de rede demanda cerca de 2,6 horas, o que representa uma redução de tempo na ordem de 97,71%.

Em relação ao custo por categoria não há diferenças significativas entre as soluções, conforme podemos notar na Figura 6.11. Portanto, pode-se concluir que o algoritmo proposto é capaz de gerar resultados satisfatórios para a topologia em questão em um curto período de tempo.

6.2.2. Topologia Centralizada – Tipo 2 (1×2 e 1×32)

A segunda categoria de topologia centralizada utiliza dois níveis de divisores ópticos, conforme apresentado e ilustrado na Seção 5.4.2. O primeiro nível de divisor óptico possui razão de divisão de 1×2 e está sempre localizado e armazenado em *racks* dentro da CO. Isso significa que, na rede externa ao prédio da CO, haverá apenas o segundo nível de divisores ópticos com razão de divisão de 1×32. Estes divisores ópticos são armazenados em armários de telecomunicações (FDH) de tamanho intermediário dispostos na rede externa OSP (*Outside Plant*). O atendimento de cada cliente da rede é dado por meio de cada porta dos divisores ópticos 1×32 de segundo nível e este trecho de cabo é conhecido como última milha ou *last mile*. Novamente, assim como definido na topologia anterior, foi estabelecido o comprimento máximo de 400 m para cabos do tipo *drop* (em concordância com a recomendação da maioria dos fabricantes).

Para a simulação da topologia centralizada do tipo 2 utilizou-se outra vez o grafo ilustrado na Figura 6.14 e definiram-se as características iniciais do algoritmo (Tabela 6.9) bem como o estado inicial do problema (Figura 28). A disposição dos clientes da rede foi definida de forma que fosse facilitada a visualização dos resultados.

Tabela 6.9 – Características iniciais da rede definidas para a Topologia Centralizada – Tipo 2.

Característica	Valores
População Inicial (indivíduos)	100
Número de Gerações (iterações)	200
Porcentagem de Seleção	0.4
Reserva p/ futuros clientes (%)	0.125
Número de nós da rede	108
Número total de clientes atendidos	241
Número de nós com 2 clientes (verde)	4
Número de nós com 4 clientes (amarelo)	18
Número de nós com 7 clientes (vermelho)	23
Área do mapa (km ²)	0,64 km ²

6.2.2.1. Análise da Variabilidade do Resultado

Para conhecer a variabilidade do algoritmo proposto para esta topologia, foi simulado o mesmo estado inicial quatro vezes, obtendo os resultados contidos na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Análise da variabilidade do algoritmo proposto para Topologia Centralizada – Tipo 2.

Simulação	Custo Total (R\$)	Varição em relação ao menor custo (%)	Tempo de execução (s)
S-01	406.885,96	0,9758%	213.18
S-02	404.951,99	0,5028%	236.59
S-03	405.302,72	0,5889%	228.44
S-04	402.915,71	-	225.92

Similarmente aos resultados encontrados na seção anterior, a variação do custo total apresentado pelo algoritmo proposto a cada simulação é muito reduzida. É possível notar na Tabela 6.10 que a variação, em relação ao menor custo encontrado, apresenta índices sempre menores que 1%. A Figura 6.12 apresenta a evolução da redução do custo (em R\$) gerada pelo algoritmo genético para cada simulação realizada.

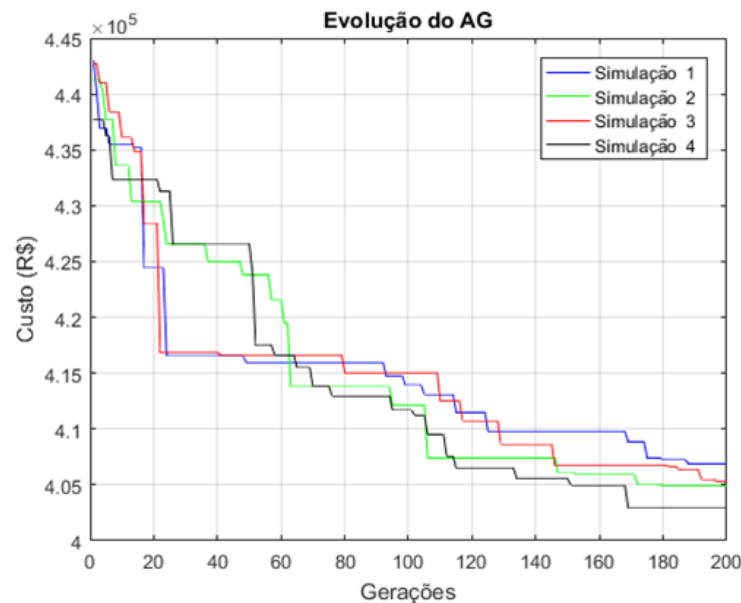


Figura 6.12 – Comparação da evolução do AG para quatro simulações com o mesmo estado inicial – Topologia Centralizada – Tipo 2.

6.2.2.2. Resultados Obtidos com a Utilização do Algoritmo Proposto

Para a simulação e obtenção dos resultados definiu-se o estado inicial da rede (Figura 6.14) e os parâmetros de acordo com a Tabela 6.9. Utilizou-se o algoritmo proposto para a topologia centralizada – tipo 2, e foram obtidos então os seguintes resultados que são

apresentados a seguir. A Figura 6.13 ilustra a evolução da redução do custo em cada geração. Já na Figura 6.16 é exibida a distribuição dos elementos da rede gerada pelo algoritmo. Na Tabela 6.11 estão reunidas as principais informações da rede construída pelo algoritmo. Na Tabela 6.12 estão descritas as informações dos divisores ópticos de segundo nível da rede e a perda estimada de potência óptica para os clientes atendidos por aquele determinado divisor óptico (em dBm). E, finalmente, na Tabela 6.13 são apresentadas as informações dos divisores ópticos de primeiro nível e na Figura 6.15 é apresentado o orçamento de potência óptica para a rede gerada.

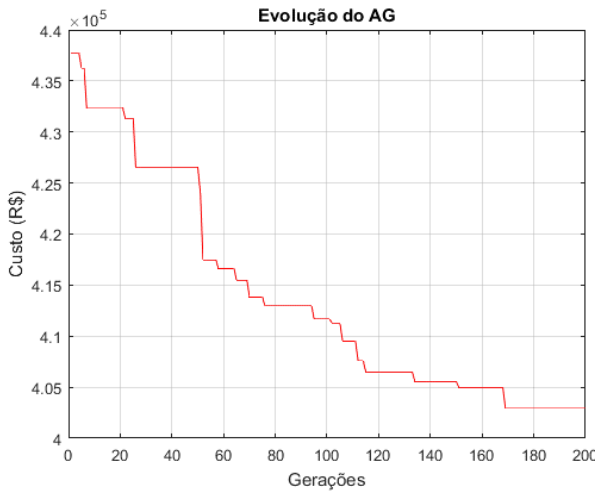


Figura 6.13 – Evolução do AG para o melhor resultado da Topologia Centralizada – Tipo 2.

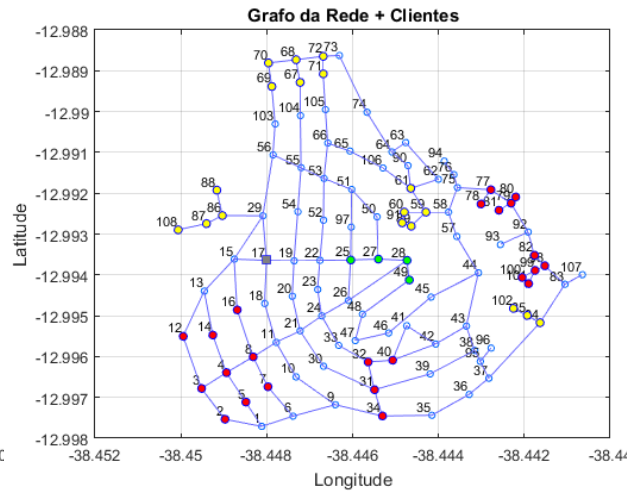


Figura 6.14 – Estado inicial para simulação da Topologia Centralizada – Tipo 2.

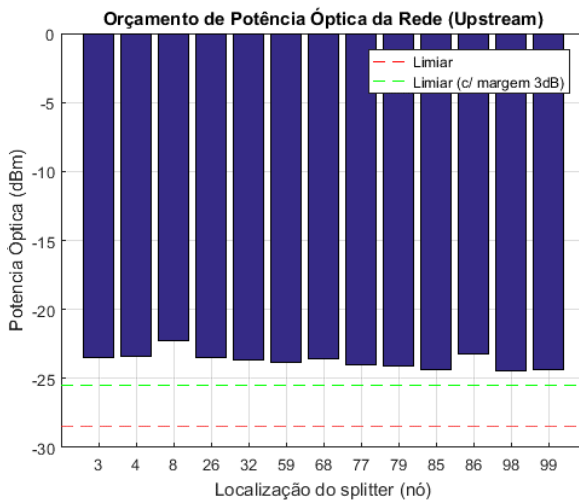


Figura 6.15 – Orçamento de potência óptica da rede gerado pelo sistema computacional para a Topologia Centralizada – Tipo 2.

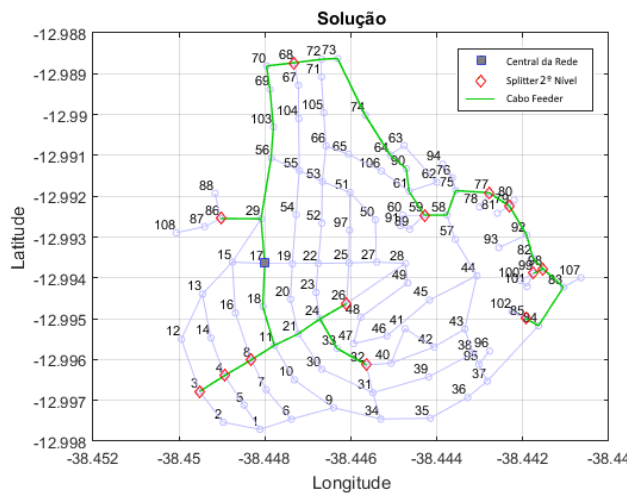


Figura 6.16 – Resultado gráfico gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 2. Obs: todos divisores ópticos de primeiro nível (1x2) estão localizados na CO e não estão representados.

Tabela 6.11 – Principais resultados obtidos com o AG para a Topologia Centralizada – Tipo 2.

ITEM	VALOR
Tempo de execução total	225,02 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	17.195 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	0 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	3.351 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	20.546 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	20 unidades
Quant. total de caixas de emendas ópticas (CEO)	13 unidades
Custo da rede total	R\$ 402.915,71

Tabela 6.12 – Matriz de informação dos *splitters* de 2º nível (obtido com o AG para a Top. Cent. – Tipo 2).

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Disponíveis	Quant. de clientes atendidos	Localização do <i>Splitter</i> (nó)	Potência Recebida Ont (dBm)*
01	1x32	28	21	3	-23.5082
02	1x32	28	21	4	-23.4004
03	1x32	28	21	8	-23.2916
04	1x32	28	8	26	-23.4757
05	1x32	28	28	32	-23.6489
06	1x32	28	20	59	-23.8552
07	1x32	28	24	68	-23.5592
08	1x32	28	14	77	-24.0119
09	1x32	28	21	79	-24.1146
10	1x32	28	12	85	-24.3414
11	1x32	28	16	86	-23.2650
12	1x32	28	14	98	-24.4648
13	1x32	28	21	99	-24.3548

* Considerou-se 400m de cabo para atendimento de cliente (pior caso)

Tabela 6.13 – Matriz de informação dos *splitters* de 1º nível (obtido com o AG para a Top. Cent. – Tipo 2).

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Utilizadas	Localização do <i>Splitter</i> (nó)
01	1x2	2	17
02	1x2	2	17
03	1x2	2	17
04	1x2	2	17
05	1x2	2	17
06	1x2	2	17
07	1x2	1	17

6.2.2.3. Resultados Obtidos Pelo Método Convencional

Com o objetivo de analisar os resultados obtidos com o algoritmo proposto para a Topologia Centralizada – Tipo 2 foi desenvolvida uma solução utilizando o mesmo cenário, estado inicial (Figura 31), topologia proposta e restrições. Após a conclusão da tarefa de elaboração da rede foram obtidos os resultados descritos a seguir. A Figura 6.17 apresenta graficamente a distribuição dos elementos da rede elaborada pelo método convencional. A Tabela 6.14 reúne as principais informações da rede gerada: quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO e custo total da rede. Já na Tabela 6.15 e na Tabela 6.16 estão

descritas as informações de cada divisor óptico de primeiro e segundo nível gerada pelo método manual.

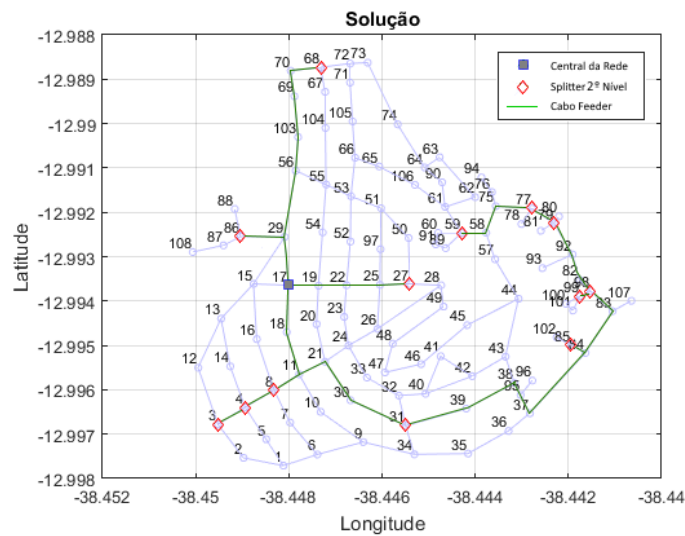


Figura 6.17 – Resultado gráfico gerado pelo método manual para Topologia Centralizada – Tipo 2. Obs: todos divisores ópticos de primeiro nível (1x2) estão localizados na CO e não estão representados.

Tabela 6.14 – Principais resultados obtidos pelo método convencional (projetista) para a Top. Centr. Tipo 2.

ITEM	VALOR
Tempo de execução total	~9.000 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	16.951 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	0 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	3.135 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	20.086 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	20 unidades
Quant. total de caixas de emendas ópticas (CEO)	13 unidades
Custo da rede total	R\$ 403.038,18

Tabela 6.15 – Matriz de informação dos *splitters* de 2º nível (obtido com o AG para a Top. Cent. Tipo 2).

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Disponíveis	Quant. de clientes atendidos	Localização do <i>Splitter</i> (nó)	Potência Recebida Ont (dBm)*
01	1x32	28	21	3	-23,5082
02	1x32	28	21	4	-23,4004
03	1x32	28	21	8	-23,2664
04	1x32	28	8	27	-23,2862
05	1x32	28	28	31	-23,5149
06	1x32	28	20	59	-24,4042
07	1x32	28	24	68	-23,5592
08	1x32	28	14	77	-24,2475
09	1x32	28	21	79	-24,1448
10	1x32	28	12	85	-23,8106
11	1x32	28	16	86	-23,2650
12	1x32	28	14	98	-23,9744
13	1x32	28	21	99	-24,0645

* Considerou-se 400m de cabo para atendimento de cliente (pior caso)

Tabela 6.16 – Matriz de informação dos *splitters* de 1º nível (obtido com o método convencional para a Topologia Centralizada Tipo 2).

Id	Tipo do Splitter	Portas Utilizadas	Localização do Splitter (nó)
01	1x2	2	17
02	1x2	2	17
03	1x2	2	17
04	1x2	2	17
05	1x2	2	17
06	1x2	2	17
07	1x2	1	17

6.2.2.4. Comparação Entre Solução do Algoritmo e Solução Convencional

Analogamente ao capítulo anterior, com a finalidade de validar o algoritmo proposto, foram comparados os resultados obtidos pelo sistema computacional de otimização com a solução elaborada pelo método convencional para a topologia centralizada – tipo 2. A Tabela 6.17 reproduz a comparação entre as soluções para os seguintes itens: tempo total necessário para conclusão da tarefa, quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO, quantidade de portas disponíveis em divisores ópticos (considerando as portas para reservadas para demandas futuras) e custo total da rede. A Figura 6.18 apresenta a comparação do custo total dividido em cinco categorias principais.

Tabela 6.17 – Comparação entre solução do AG e solução manual – Topologia Centralizada (Tipo 2).

ITEM	SOLUÇÃO AG	SOLUÇÃO MANUAL
Tempo de execução total	225,02 segundos	~9.000 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	17.195 metros	16.951 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	0 metros	0 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	3.351 metros	3.135 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	20.546 metros	20.086 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	20 unidades	20 unidades
Quantidade total de caixas de emendas ópticas (CEO)	13 unidades	13 unidades
Quantidade total de portas disponíveis em <i>splitters</i> (c/ reserva)	416	416
Quantidade total de portas utilizadas em <i>splitters</i>	241	241
Custo da rede total	R\$ 402.915,71	R\$ 403.038,18

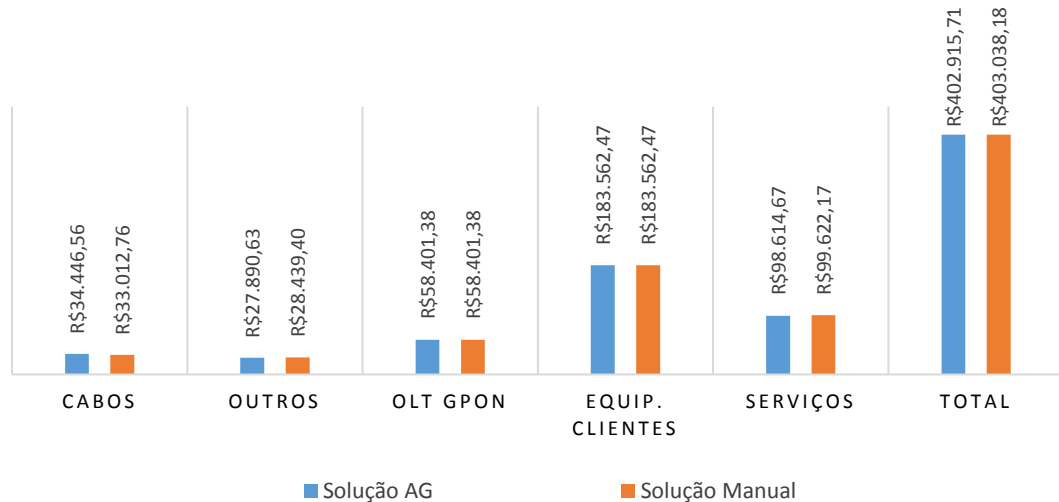


Figura 6.18 – Comparação por categoria (do custo total) para teste de validação da Top. Centralizada – Tipo 2.

Com os resultados apresentados pode-se observar que a rede elaborada pelo algoritmo proposto, para a topologia centralizada do tipo 2, apresenta taxas de atenuação dentro do limite esperado. Em relação ao custo total da rede nota-se uma redução de R\$ 122,47 no resultado do algoritmo proposto em relação à solução manual. Esta redução de custo representa um decréscimo de aproximadamente 0,03%. Entretanto, apesar de o algoritmo proposto ter obtido um menor custo para a rede, é importante destacar também que houve uma maior utilização de cabos ópticos em sua solução encontrada. Este fato pode ser justificado pois a função objetivo do algoritmo proposto é o custo total da rede e esta considera o custo individual de cada elemento que a compõe, fato que normalmente não ocorre em uma solução manual. Outro fator a ser ressaltado é a drástica redução de tempo necessária para a execução da mesma tarefa. Para o cenário da região de interesse, o algoritmo genético necessita de aproximadamente 3,75 minutos para encontrar uma solução adequada para o problema, enquanto a solução elaborada por um projetista de rede demanda cerca de 2,5 horas, o que representa uma redução de tempo na ordem de 97,5%.

Em relação ao custo por categoria não há diferenças significativas entre as soluções, conforme podemos notar na Figura 6.18. Portanto, pode-se concluir que o algoritmo proposto é capaz de gerar resultados satisfatórios para a topologia em questão em um curto período de tempo.

6.2.3. Topologia Distribuída – Tipo 1 (1×04 e 1×16)

Outra topologia proposta neste trabalho é a distribuída. Neste tipo de topologia os divisores ópticos são dispostos exclusivamente na OSP e utiliza-se, pelo menos, dois níveis de divisores ópticos. Conforme descrito na Seção 5.4.2, para este trabalho considerou-se dois tipos de topologias distribuídas com diferentes configurações, sendo elas nomeadas como topologia distribuída – tipo 1 e topologia distribuída – tipo 2. Ambas as topologias utilizam dois estágios de divisores ópticos, sendo a diferença entre elas a razão de divisão utilizada em cada nível. Para a topologia distribuída do tipo 1 utiliza-se no primeiro nível um divisor óptico com razão de divisão de 1×4 (armazenado em CEOs) e no segundo nível utiliza-se divisores ópticos com razão de divisão de 1×16 (armazenados em FDHs). O atendimento de cada cliente da rede é dado por cada porta dos divisores ópticos 1×16 de segundo nível.

Para a simulação da topologia distribuída do tipo 1 utilizou-se mais uma vez o grafo ilustrado na Figura 6.14 e definiram-se as características iniciais do algoritmo (Tabela 6.18) bem como o estado inicial do problema (Figura 6.21). A disposição dos clientes da rede foi definida de forma que fosse facilitada a visualização dos resultados.

Tabela 6.18 – Características iniciais da rede definidas para a Topologia Distribuída – Tipo 1.

Característica	Valores
População Inicial (indivíduos)	100
Número de Gerações (iterações)	200
Porcentagem de Seleção	0.4
Reserva p/ futuros clientes (%)	0.125
Número de nós da rede	108
Número total de clientes atendidos	92
Número de nós com 2 clientes (verde)	0
Número de nós com 4 clientes (amarelo)	16
Número de nós com 7 clientes (vermelho)	4
Área do mapa (km ²)	0,64 km ²

6.2.3.1. Análise da Variabilidade do Resultado

Para conhecer a variabilidade do algoritmo proposto para esta topologia, foi simulado o mesmo estado inicial quatro vezes, obtendo os resultados contidos na Tabela 6.19.

Tabela 6.19 – Análise da variabilidade do algoritmo proposto para Topologia Distribuída – Tipo 1.

Simulação	Custo Total (R\$)	Variação em relação ao menor custo (%)	Tempo de execução (s)
S-01	190.943,36	0,4154%	183,22
S-02	190.150,67	-	180,32
S-03	190.204,45	0,0283%	176,24
S-04	191.278,67	0,5897%	183,54

Similarmente aos resultados encontrados para as demais topologias, a variação do custo total apresentado pelo algoritmo proposto a cada simulação é muito reduzida. É possível notar na Tabela 6.19 que a variação, em relação ao menor custo encontrado, apresenta índices sempre menores que 0,5%. A Figura 6.19 apresenta a evolução da redução do custo (em R\$) gerada pelo algoritmo genético para cada simulação realizada.

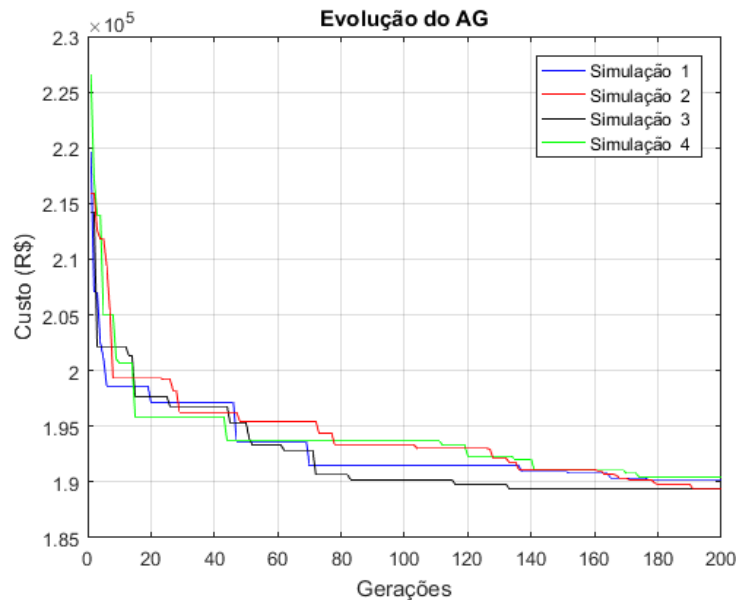


Figura 6.19 – Comparação da evolução do AG para quatro simulações com o mesmo estado inicial – Topologia Distribuída – Tipo 1.

6.2.3.2. Resultados Obtidos com a Utilização do Algoritmo Proposto

Para a simulação e obtenção dos resultados definiu-se o estado inicial da rede (Figura 6.21) e os parâmetros de acordo com a Tabela 6.18. Utilizou-se o algoritmo proposto para a topologia distribuída – tipo 1, e foram obtidos então os seguintes resultados que são apresentados a seguir. A Figura 6.20 ilustra a evolução da redução do custo por cada geração. Já na Figura 6.23 é exibida a distribuição dos elementos da rede gerada pelo algoritmo. Na Tabela 6.20 estão reunidas as principais informações da rede construída pelo algoritmo. Na Tabela 6.21 estão descritas as informações dos divisores ópticos de segundo nível da rede e a perda estimada de potência óptica para os clientes atendidos por aquele determinado divisor óptico (em dBm). E, finalmente, na Tabela 6.22 são apresentadas as informações dos divisores ópticos de primeiro nível e na Figura 6.22 é apresentado o orçamento de potência óptica para a rede gerada.

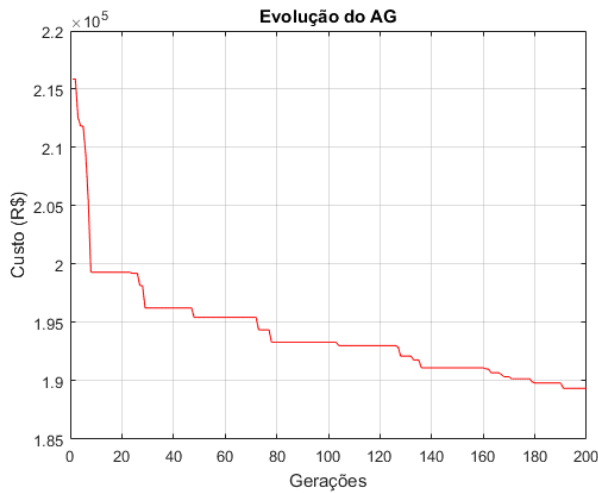


Figura 6.20 – Evolução do AG para o melhor resultado da Topologia Distribuída – Tipo 1.

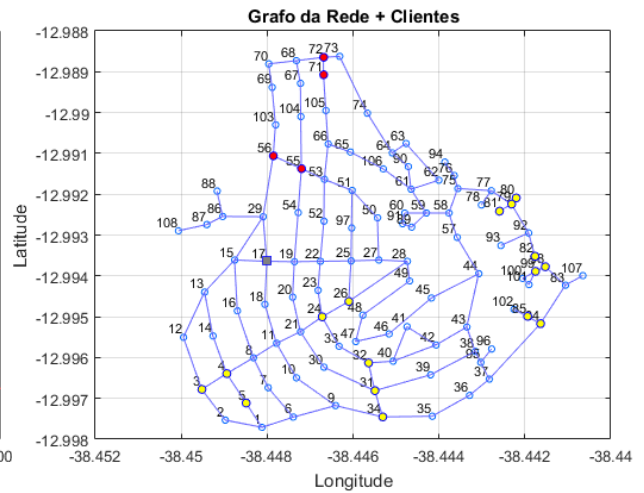


Figura 6.21 – Estado inicial para simulação da Topologia Distribuída – Tipo 1.

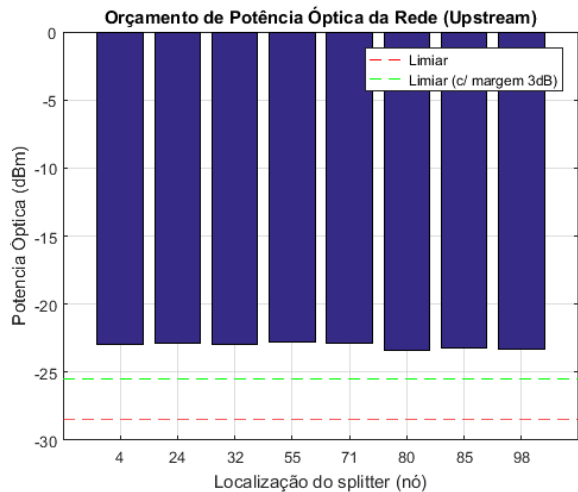


Figura 6.22 – Orçamento de potência óptica da rede gerado pelo sistema computacional para Topologia Distribuída – Tipo 1.

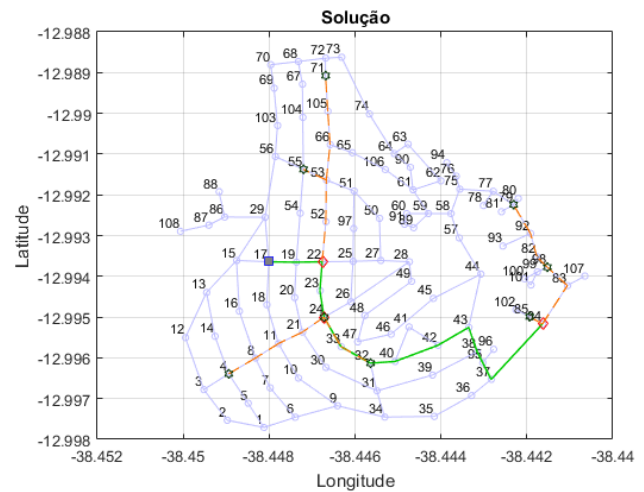


Figura 6.23 – Resultado gráfico gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 1.

Tabela 6.20 – Principais resultados obtidos com o AG para a Topologia Distribuída – Tipo 1.

ITEM	VALOR
Tempo de execução total	180,32 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	5.341 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	1.939 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	1.093 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	8.373 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	11 unidades
Quant. total de caixas de emendas ópticas (CEO)	03 unidades
Custo da rede total	R\$ 190.150,67

Tabela 6.21 – Matriz de informação dos *splitters* de 2º nível (obtido com o AG para a Top. Distribuída – Tipo 1).

Id	Tipo do Splitter	Portas Disponíveis	Quant. de clientes atendidos	Localização do Splitter (nó)	Interligado a Splitter de 1º nível (nó)	Potência Recebida Ont (dBm)*
01	1x16	14	12	4	24	-22,9521
02	1x16	14	8	24	24	-22,8660
03	1x16	14	12	32	24	-22,9125
04	1x16	14	14	55	22	-22,8170
05	1x16	14	14	71	22	-22,8966
06	1x16	14	12	80	84	-23,3575
07	1x16	14	8	85	84	-23,2315
08	1x16	14	12	98	84	-23,2873

* Considerou-se 400m de cabo para atendimento de cliente (pior caso)

Tabela 6.22 – Matriz de informação dos *splitters* de 1º nível (obtido com o AG para a Topologia Distribuída – Tipo 1).

Id	Tipo do Splitter	Portas Utilizadas	Localização do Splitter (nó)
01	1x4	2	22
02	1x4	3	24
03	1x4	3	84

6.2.3.3. Resultados Obtidos Pelo Método Convencional

Com o objetivo de analisar os resultados obtidos com o algoritmo proposto para a topologia distribuída do tipo 1 foi desenvolvida uma solução utilizando o mesmo cenário, estado inicial (Figura 6.21), topologia proposta e restrições. Após a conclusão da tarefa de elaboração da rede obteve-se os resultados descritos a seguir. A Figura 6.24 apresenta graficamente a distribuição dos elementos da rede elaborada pelo método convencional. A Tabela 6.23 reúne as principais informações da rede gerada: quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO e custo total da rede. Já na Tabela 6.24 e na Tabela 6.25 estão descritas as informações de cada divisor óptico de primeiro e segundo nível da rede gerada pelo método convencional.

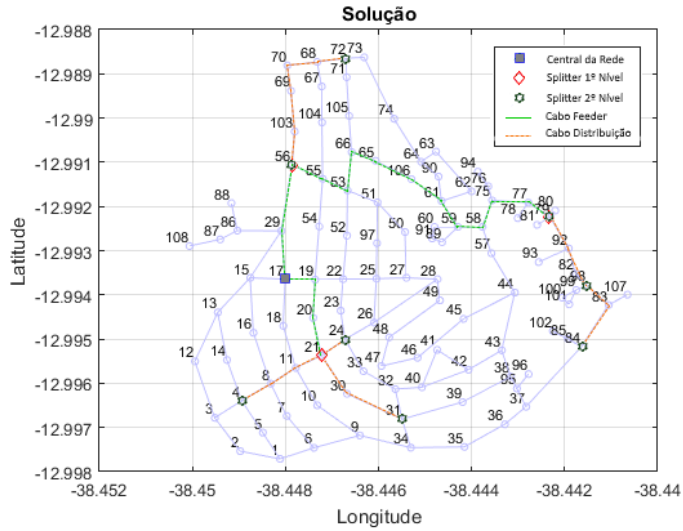


Figura 6.24 – Resultado gráfico gerado pelo método manual para Topologia Distribuída – Tipo 1.

Tabela 6.23 – Principais resultados obtidos com o método convencional (projetista) para a Topologia Distribuída – Tipo 1.

ITEM	VALOR
Tempo de execução total	~7200 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	5.165 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	1.625 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	1.392 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	8.182 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	11 unidades
Quant. total de caixas de emendas ópticas (CEO)	03 unidades
Custo da rede total	R\$ 191.725,74

Tabela 6.24 – Matriz de informação dos *splitters* de 2º nível (obtido com o método convencional para a Topologia Distribuída – Tipo 1).

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Disponíveis	Quant. de clientes atendidos	Localização do <i>Splitter</i> (nó)	Interligado a <i>Splitter</i> de 1º nível (nó)	Potência Recebida Ont (dBm)*
01	1x16	14	12	4	21	-22,8382
02	1x16	14	8	24	21	-23,0074
03	1x16	14	12	31	21	-22,8519
04	1x16	14	14	56	56	-22,7864
05	1x16	14	14	72	56	-22,9102
06	1x16	14	12	79	79	-23,1681
07	1x16	14	12	98	79	-23,2203
08	1x16	14	8	84	79	-23,2901

* Considerou-se 400m de cabo para atendimento de cliente (pior caso)

Tabela 6.25 – Matriz de informação dos *splitters* de 1º nível (obtido com o método convencional para a Topologia Distribuída – Tipo 1)

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Utilizadas	Localização do <i>Splitter</i> (nó)
01	1x4	3	21
02	1x4	2	56
03	1x4	3	79

6.2.3.4. Comparação Entre Solução do Algoritmo e Solução Manual

Para validar o algoritmo proposto, comparou-se os resultados obtidos pelo sistema computacional de otimização com a solução elaborada pelo método manual para a topologia distribuída – tipo 2. A Tabela 6.26 reproduz a comparação entre as soluções para os seguintes itens: tempo total necessário para conclusão da tarefa, quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO, quantidade de portas disponíveis em divisores ópticos (considerando as portas para reservadas para demandas futuras) e custo total da rede. A Figura 6.25 apresenta a comparação do custo total dividido em cinco categorias principais.

Tabela 6.26 – Comparação entre solução do AG e solução convencional – Topologia Distribuída (Tipo 1).

ITEM	SOLUÇÃO AG	SOLUÇÃO MANUAL
Tempo de execução total	180,32 segundos	~7200 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	5.341 metros	5.165 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	1.939 metros	1.625 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	1.093 metros	1.392 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	8.373 metros	8.182 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	11 unidades	11 unidades
Quantidade total de caixas de emendas ópticas (CEO)	03 unidades	03 unidades
Quantidade total de portas disponíveis em <i>splitters</i> (c/ reserva)	128	128
Quantidade total de portas utilizadas em <i>splitters</i>	92	92
Custo da rede total	R\$ 190.150,67	R\$ 191.725,74

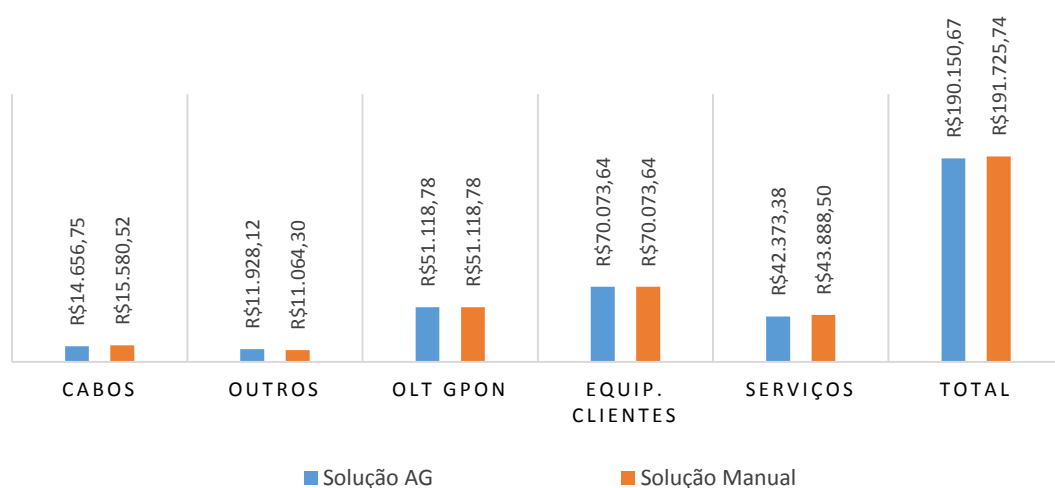


Figura 6.25 – Comparação por categoria (do custo total) para teste de validação da Topologia Distribuída – Tipo 1.

Com os resultados apresentados pode-se observar que a rede elaborada pelo algoritmo proposto, para a topologia distribuída do tipo 1, apresenta taxas de atenuação dentro do limite

esperado. Em relação ao custo total da rede nota-se uma redução de R\$ 1.575,07 no resultado do algoritmo proposto em relação à solução manual. Esta redução de custo representa um decréscimo de aproximadamente 0,82%. Entretanto, apesar de o algoritmo proposto ter obtido um menor custo para a rede, é importante destacar também que houve uma maior utilização de cabos ópticos em sua solução encontrada. Este fato pode ser justificado pois a função objetivo do algoritmo proposto é o custo total da rede e esta considera o custo individual de cada elemento que a compõe, fato que normalmente não ocorre em uma solução convencional. Outro fator a ser ressaltado é a drástica redução de tempo necessário para a execução da mesma tarefa. Para o cenário da região de interesse, o algoritmo genético necessita de aproximadamente 3 minutos para encontrar uma solução adequada para o problema, enquanto a solução elaborada por um projetista de rede demanda cerca de 2 horas, o que representa uma redução de tempo na ordem de 97,49%. Em relação ao custo por categoria não há diferenças significativas entre as soluções, conforme podemos notar na Figura 6.25. Portanto, pode-se concluir que o algoritmo proposto é capaz de gerar resultados satisfatórios para a topologia em questão em um curto período de tempo.

6.2.4. Topologia Distribuída – Tipo 2 (1×8 e 1×8)

O segundo tipo de topologia distribuída considerado neste trabalho utiliza dois níveis de divisores ópticos (conforme apresentado na Seção 5.4.2). A diferença entre esta topologia distribuída (tipo 2) e a topologia apresentada na seção anterior (tipo 1) está exclusivamente na razão de divisão dos divisores ópticos utilizados. Utiliza-se no primeiro nível divisores ópticos com razão de divisão de 1×8 (armazenados em CEOs). O segundo nível de divisores ópticos também possuem razão de divisão de 1×8 (armazenados em FDHs). O atendimento de cada cliente da rede é dado por meio de cada porta dos divisores ópticos 1×8 de segundo nível. Novamente foi estabelecido o comprimento máximo de 400 m para cabos do tipo *drop* utilizados em últimas milhas.

Para a simulação da topologia distribuída do tipo 2 utilizou-se mais uma vez o grafo ilustrado na Figura 6.14 e definiram-se as características iniciais do algoritmo (Tabela 6.27) bem como o estado inicial do problema (Figura 6.27). A disposição dos clientes da rede foi definida de forma que fosse facilitada a visualização dos resultados.

Tabela 6.27 – Características iniciais da rede definidas para a Topologia Distribuída – Tipo 2.

Característica	Valores
População Inicial (indivíduos)	100
Número de Gerações (iterações)	200
Porcentagem de Seleção	0.4
Reserva p/ futuros clientes (%)	0.125
Número de nós da rede	108
Número total de clientes atendidos	75
Número de nós com 2 clientes (verde)	23
Número de nós com 4 clientes (amarelo)	2
Número de nós com 7 clientes (vermelho)	3
Área do mapa (km ²)	0,64 km ²

6.2.4.1. Análise da Variabilidade do Resultado

Para conhecer a variabilidade do algoritmo proposto para esta topologia, foi simulado o mesmo estado inicial quatro vezes, obtendo os resultados contidos na Tabela 6.28.

Tabela 6.28 – Análise da variabilidade do algoritmo proposto para Topologia Distribuída – Tipo 2.

Simulação	Custo Total (R\$)	Varição em relação ao menor custo (%)	Tempo de execução (s)
S-01	185.283,74	-	260,20
S-02	186.616,34	0,7141%	238,87
S-03	187.032,76	0,9351%	239,03
S-04	187.402,06	1,1304%	208,10

Similarmente aos resultados encontrados para as demais topologias, a variação do custo total apresentada pelo algoritmo proposto a cada simulação é muito pequena. É possível notar na Tabela 6.28 que a variação, em relação ao menor custo encontrado, apresenta índices sempre menores que ~1%. A Figura 6.26 apresenta a evolução da redução do custo (em R\$) gerada pelo algoritmo genético para cada simulação realizada.

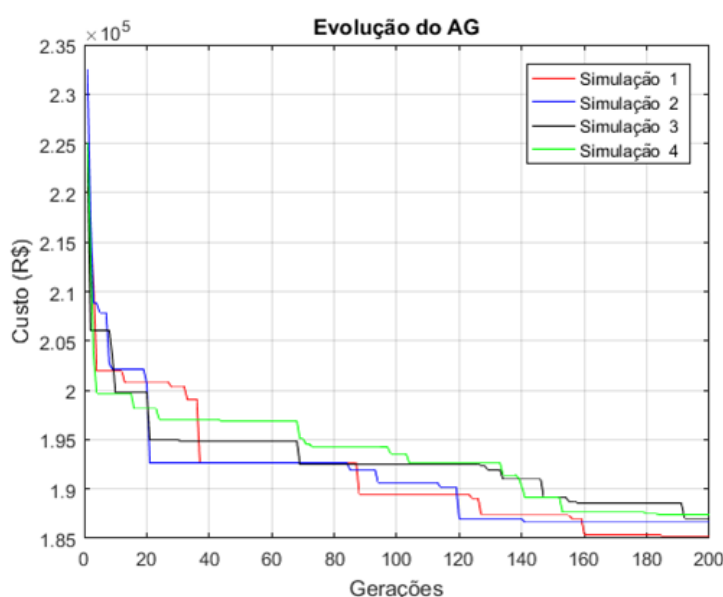


Figura 6.26 – Comparação da evolução do AG para quatro simulações com o mesmo estado inicial – Topologia Distribuída – Tipo 2.

6.2.4.2. Resultados Obtidos com a Utilização do Algoritmo Proposto

Para a simulação e obtenção dos resultados definiu-se o estado inicial da rede (Figura 6.27) e os parâmetros de acordo com a Tabela 6.29. Utilizou-se o algoritmo proposto para a topologia distribuída – tipo 2, e obtiveram-se os resultados a seguir. A Figura 6.28 ilustra a evolução da redução do custo em cada geração. Já a Figura 6.29 exhibe a distribuição dos elementos da rede. Na Tabela 6.29 estão reunidas as principais informações da rede construída pelo algoritmo. Na Tabela 6.30 estão descritas as informações dos divisores ópticos de segundo nível da rede e a perda estimada de potência óptica para os clientes atendidos por aquele determinado divisor óptico (em dBm). E, finalmente, na Tabela 6.31 são apresentadas as informações dos *splitters* de primeiro nível e na Figura 6.30 é apresentado o *link budget* da rede.

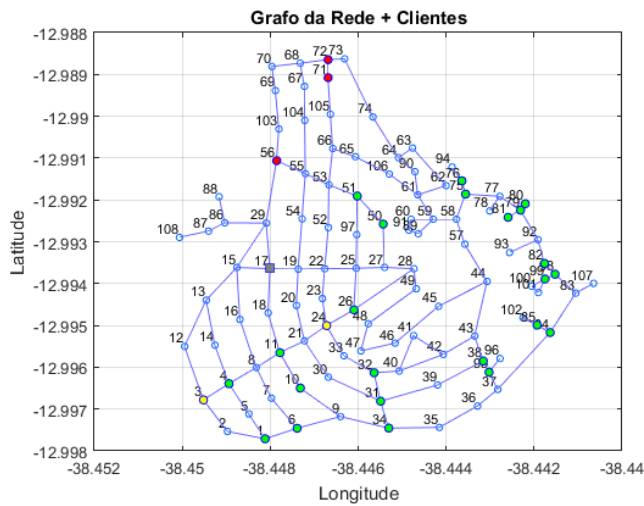


Figura 6.27 – Estado inicial para simulação da Topologia Distribuída – Tipo 2.

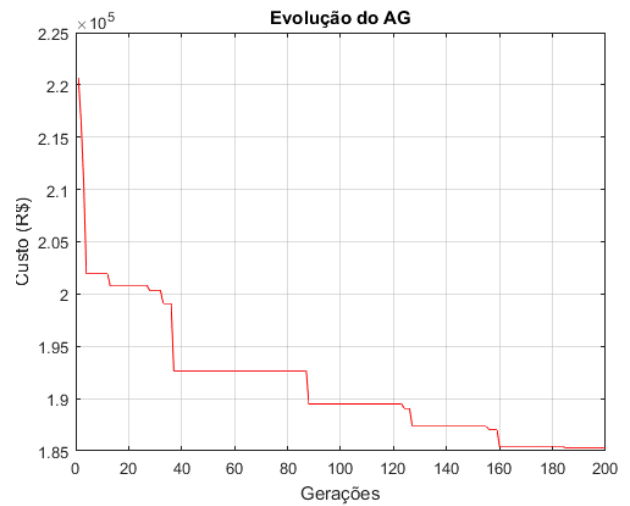


Figura 6.28 – Evolução do AG para o melhor resultado da Topologia Distribuída – Tipo 2.

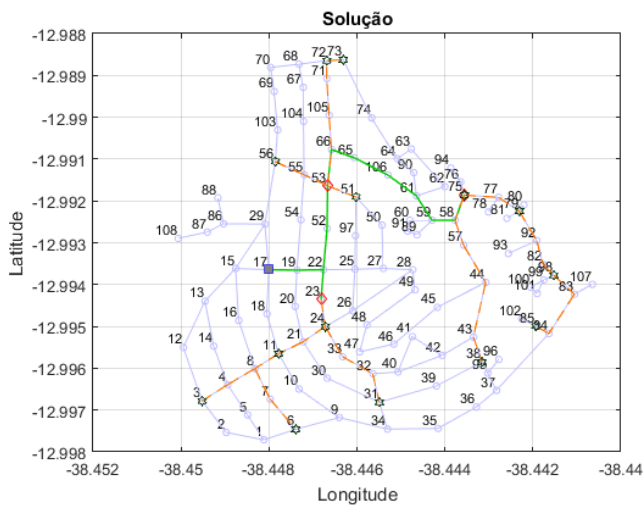


Figura 6.29 – Resultado gráfico gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 2.

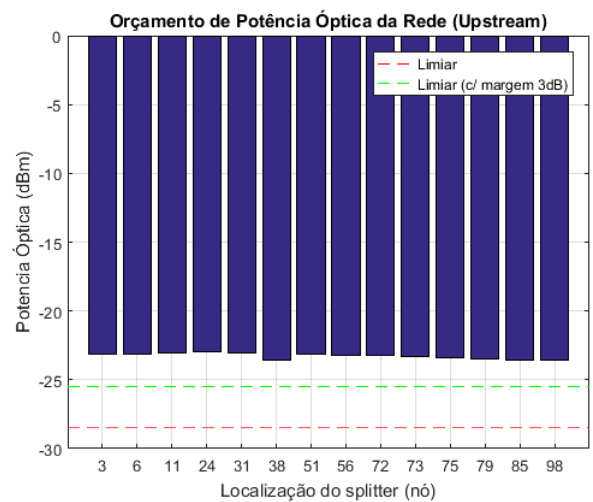


Figura 6.30 – Orçamento de potência óptica da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 2.

Tabela 6.29 – Principais resultados obtidos com o AG para a Topologia Distribuída – Tipo 2.

ITEM	VALOR
Tempo de execução total	260,20 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	3.925 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	4.047 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	1.066 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	9.038 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	17 unidades
Quant. total de caixas de emendas ópticas (CEO)	3 unidades
Custo da rede total	R\$ 185.283,74

Tabela 6.30 – Matriz de informação dos *splitters* de 2º nível (obtido com o AG para a Top. Distribuída – Tipo 2).

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Disponíveis	Quant. de clientes atendidos	Localização do <i>Splitter</i> (nó)	Interligado a <i>Splitter</i> de 1º nível (nó)	Potência Recebida Ont (dBm)*
01	1x8	7	6	3	23	-23,0998
02	1x8	7	4	6	23	-23,1128
03	1x8	7	4	11	23	-23,0177
04	1x8	7	6	24	23	-22,9680
05	1x8	7	6	31	23	-23,0606
06	1x8	7	4	38	75	-23,5780
07	1x8	7	4	51	53	-23,1586
08	1x8	7	7	56	53	-23,1830
09	1x8	7	7	72	53	-23,2514
10	1x8	7	7	73	53	-23,2662
11	1x8	7	4	75	75	-23,4258
12	1x8	7	6	79	75	-23,4610
13	1x8	7	4	85	75	-23,6151
14	1x8	7	6	98	75	-23,5312

* Considerou-se 400m de cabo para atendimento de cliente (pior caso)

Tabela 6.31 – Matriz de informação dos *splitters* de 1º nível (obtido com o AG para a Top. Distribuída – Tipo 2).

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Utilizadas	Localização do <i>Splitter</i> (nó)
01	1x8	5	23
02	1x8	4	53
03	1x8	5	75

6.2.4.3. Resultados Obtidos Pelo Método Convencional

Com o objetivo de analisar os resultados obtidos com o algoritmo proposto para a topologia distribuída do tipo 2 foi desenvolvida uma solução utilizando o mesmo cenário, estado inicial (Figura 6.27), topologia proposta e restrições. Após a conclusão da tarefa de elaboração da rede foram obtidos os resultados descritos a seguir. A Figura 6.31 apresenta graficamente a distribuição dos elementos da rede elaborada pelo método convencional. A Tabela 6.32 reúne

as principais informações da rede gerada: quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO e custo total da rede. Já na Tabela 6.34 e na Tabela 6.35 estão descritas as informações de cada divisor óptico de primeiro e segundo nível da rede gerada.

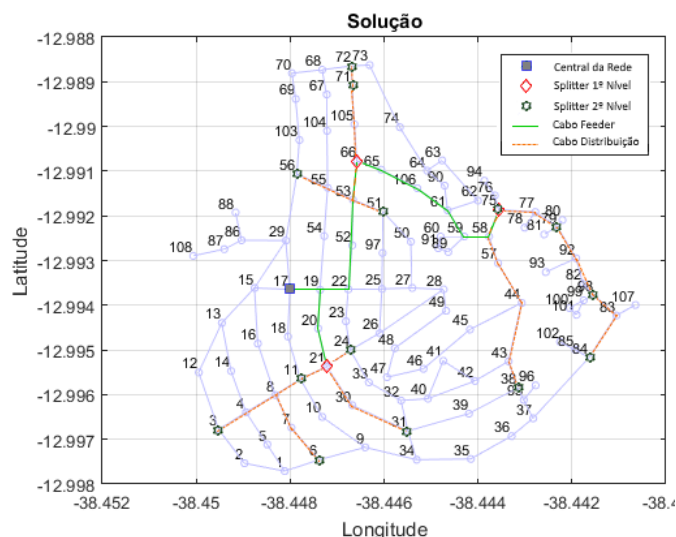


Figura 6.31 – Resultado gráfico gerado pelo método manual para Topologia Distribuída – Tipo 2.

Tabela 6.32 – Principais resultados obtidos com o método convencional para a Topologia Distribuída – Tipo 2.

ITEM	VALOR
Tempo de execução total	~7.200 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	4.018 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (<i>cabo de distribuição</i>)	3.384 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (<i>feeder cable</i>)	1.170 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (<i>feeder cable</i>)	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	8.572 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	17 unidades
Quant. total de caixas de emendas ópticas (CEO)	3 unidades
Custo da rede total	R\$ 186.109,51

Tabela 6.33 – Matriz de informação dos *splitters* de 2º nível (método convencional para a Top. Dist. – Tipo 2).

Id	Tipo do <i>Splitter</i>	Portas Disponíveis	Quant. de clientes atendidos	Localização do <i>Splitter</i> (nó)	Interligado a <i>Splitter</i> de 1º nível (nó)	Potência Recebida Ont (dBm)*
01	1x8	7	6	3	21	-23,0660
02	1x8	7	4	6	21	-23,0789
03	1x8	7	4	11	21	-23,2074
04	1x8	7	6	24	21	-23,2074
05	1x8	7	6	31	21	-23,0519
06	1x8	7	4	38	75	-23,4404
07	1x8	7	4	51	66	-23,0908
08	1x8	7	7	56	66	-23,1153
09	1x8	7	7	71	66	-23,0966
10	1x8	7	7	72	66	-23,1138
11	1x8	7	4	75	75	-23,2882
12	1x8	7	6	79	75	-23,3234
13	1x8	7	4	84	75	-23,4635
14	1x8	7	6	98	75	-23,3936

* Considerou-se 400m de cabo para atendimento de cliente (pior caso)

Tabela 6.34 – Matriz de informação dos *splitters* de 1º nível (método manual para a Top. Distribuída – Tipo 2)

Id	Tipo do Splitter	Portas Utilizadas	Localização do Splitter (nó)
01	1x8	5	21
02	1x8	4	66
03	1x8	5	75

6.2.4.4. Comparação Entre Solução do Algoritmo e Solução Convencional

Para validar o algoritmo proposto, comparou-se os resultados obtidos pelo sistema computacional de otimização com a solução elaborada pelo método convencional para a topologia distribuída – tipo 2. A Tabela 6.35 reproduz a comparação entre as soluções para os seguintes itens: tempo total necessário para conclusão da tarefa, quantidade de cabos (por tipo), quantidade de divisores ópticos, quantidade de CEO, quantidade de portas disponíveis em divisores ópticos (considerando as portas para reservadas para demandas futuras) e custo total da rede. A Figura 6.32 apresenta a comparação do custo total dividido em cinco categorias principais.

Tabela 6.35 – Comparação entre solução do AG e solução manual – Topologia Distribuída (Tipo 2).

ITEM	SOLUÇÃO AG	SOLUÇÃO MANUAL
Tempo de execução total	260,20 segundos	~7.200 segundos
Quantidade de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	3.925 metros	4.018 metros
Quantidade de cabo óptico 12FO (cabo de distribuição)	4.047 metros	3.384 metros
Quantidade de cabo óptico 48FO (cabo alimentador)	1.066 metros	1.170 metros
Quantidade de cabo óptico 144FO (cabo alimentador)	0 metros	0 metros
Quantidade total de cabos ópticos	9.038 metros	8.572 metros
Quantidade total de <i>splitters</i>	17 unidades	17 unidades
Quantidade total de caixas de emendas ópticas (CEO)	3 unidades	3 unidades
Quantidade total de portas disponíveis em <i>splitters</i> (c/ reserva)	112	112
Quantidade total de portas utilizadas em <i>splitters</i>	75	75
Custo da rede total	R\$ 185.283,74	R\$ 186.109,51

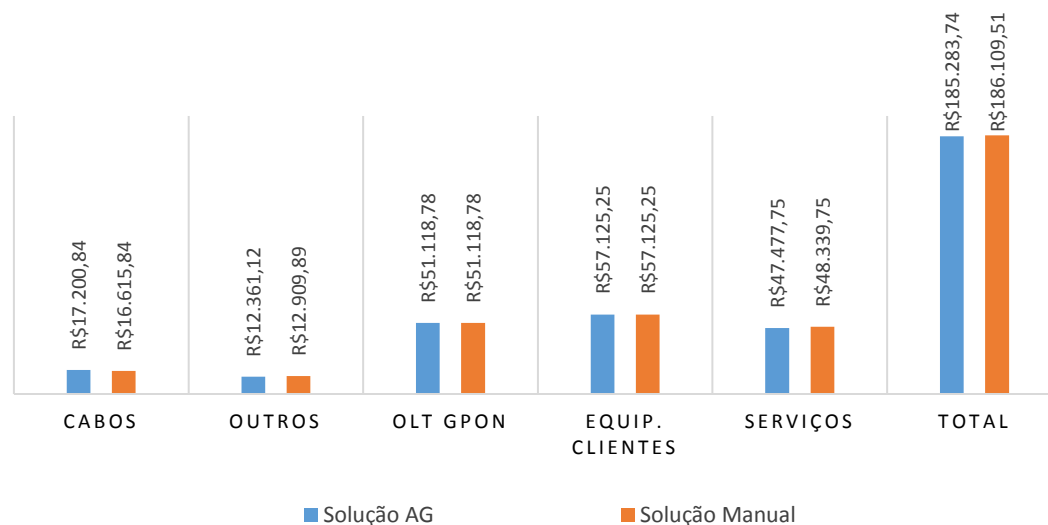


Figura 6.32 – Comparação por categoria (custo total) para teste de validação da Topologia Distribuída – Tipo 2.

Com os resultados apresentados pode-se observar que a rede elaborada pelo algoritmo proposto, para a topologia distribuída do tipo 2, apresenta taxas de atenuação dentro do limite esperado. Em relação ao custo total da rede nota-se uma redução de R\$ 825,77 no resultado do algoritmo proposto em relação à solução manual. Esta redução de custo representa um decréscimo de aproximadamente 0,44%. Entretanto, apesar de o algoritmo proposto ter obtido um menor custo para a rede, é importante destacar também que houve uma maior utilização de cabos ópticos na solução encontrada. Este fato pode ser justificado pois a função objetivo do algoritmo proposto é o custo total da rede e esta considera o custo individual de cada elemento que a compõe, fato que normalmente não ocorre em uma solução manual. Outro fator a ser ressaltado é a drástica redução de tempo necessária para a execução da mesma tarefa. Para o cenário da região de interesse, o algoritmo genético necessita de aproximadamente quatro minutos para encontrar uma solução adequada para o problema, enquanto a solução elaborada por um projetista de rede demanda cerca de duas horas, o que representa uma redução de tempo na ordem de 96,39%. Em relação ao custo por categoria não há diferenças significativas entre as soluções, conforme podemos notar na Figura 6.32. Portanto, pode-se concluir que o algoritmo proposto é capaz de gerar resultados satisfatórios para a topologia em questão em um curto período de tempo.

6.3. Outras simulações

Nesta etapa desta dissertação busca-se demonstrar o potencial da ferramenta em cenários maiores e também compreender como a escolha da topologia influencia no custo total da rede (em conjunto com a disposição dos clientes e a localização da CO). Para essa tarefa será utilizado o sistema computacional proposto para as quatro topologias pré-definidas. Serão adotados cenários relativamente grandes geograficamente o que aumenta a complexidade do problema e, conseqüentemente, o custo computacional envolvido para elaboração da solução.

6.3.1. Mapa com 314 nós

O cenário escolhido para este teste foi a região da Pituba, um bairro localizado na zona sul da cidade de Salvador. A região de interesse possui aproximadamente 1,85 km² de área e escolha deste cenário para a avaliação das topologias se dá pelo tamanho relativamente grande do bairro. As Figura 6.33 e Figura 6.34 apresentam o processo de importação do mapa com a plataforma *Open Street Map*. Este processo está descrito detalhadamente na Seção 5.6 deste

trabalho. A Figura 6.35, apresenta o grafo importado para o Matlab® (contendo os 314 nós da rede).



Figura 6.33 – Mapa da região de interesse (Bairro Pituba) com grafo sobreposto.

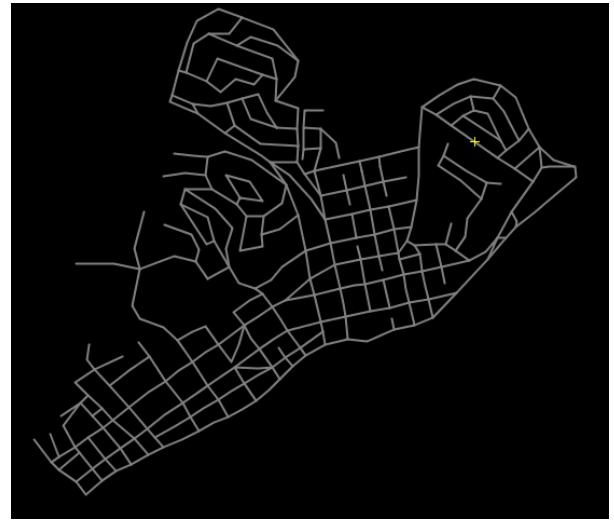


Figura 6.34 – Grafo do mapa da região de interesse à ser importado para Matlab®.

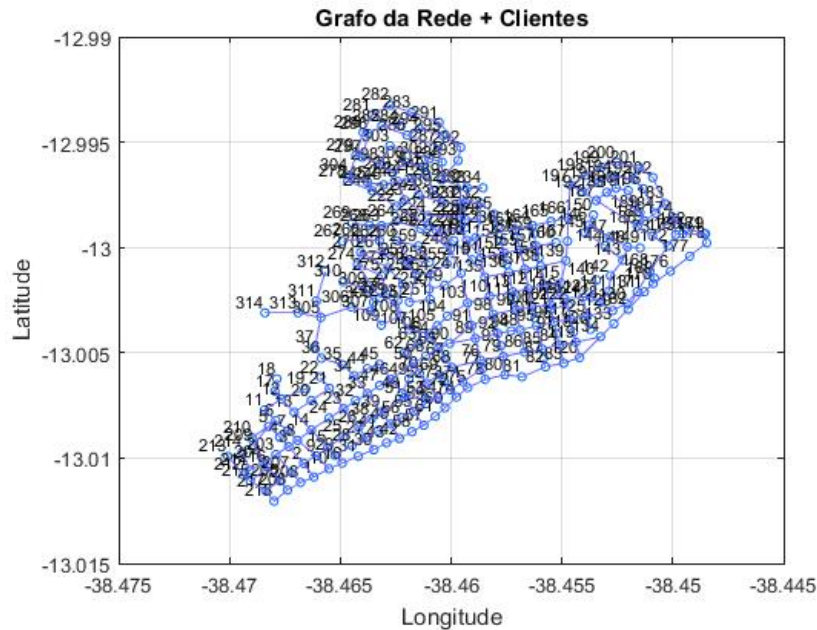


Figura 6.35 – Grafo da rede (bairro Pituba) importado para Matlab® contendo 314 nós.

6.3.1.1. Resultados para cenário não denso

O primeiro teste a ser realizado para este grafo (bairro Pituba – contendo 314 nós), consiste em um cenário não denso, ou seja, um cenário que possui os assinantes distribuídos de maneira dispersa na região de interesse. As definições das características iniciais do algoritmo

e do grafo para esta simulação estão descritas na Tabela 6.36. Deve-se ressaltar que a distribuição dos clientes no grafo foi feita de maneira aleatória e, para representar o cenário não denso, a incidência de nós com dois clientes foi predominante no estado inicial. Como média geral obteve-se um índice de aproximadamente 88 clientes por km².

Tabela 6.36 – Características iniciais da rede definidas para as simulações do Mapa de 314 nós – não denso.

Característica	Valores
População Inicial (indivíduos)	125
Número de Gerações (iterações)	750
Porcentagem de Seleção	0,4
Reserva p/ futuros clientes (%)	0,125
Número de nós da rede	314
Número total de clientes atendidos	164
Número de nós com 2 clientes (verde)	52
Número de nós com 4 clientes (amarelo)	8
Número de nós com 7 clientes (vermelho)	4
Área do mapa (km ²)	1,85
Clientes / km ²	~88

Com o estado inicial da rede determinado (conforme Figura 6.36), utilizou-se o sistema computacional proposto, para encontrar a solução para cada uma das quatro topologias consideradas nesta dissertação. Os resultados são apresentados na seguinte ordem: Figura 6.37 é descrita a evolução do custo total da rede para cada topologia. Nas Figuras 6.38, 6.39, 6.40 e 6.41 estão apresentadas as soluções encontradas (em forma gráfica) para cada topologia de rede. Nas Figuras 6.42, 6.43, 6.44 e 6.45 estão representados os gráficos do orçamento de potência óptica (*link budget*) para cada topologia da rede. Na Tabela 6.37 encontra-se a comparação das principais informações geradas pelo sistema computacional proposto para cada topologia de rede utilizada. Na Figura 6.46 encontra-se o gráfico de barras que apresenta a o custo de implantação por categoria de cada resultado obtido. É importante ressaltar que, nos mapas gerados pelo sistema computacional, a identificação de cada nó foi ocultada para facilitar a visualização dos resultados gerados (em função da escala reduzida).

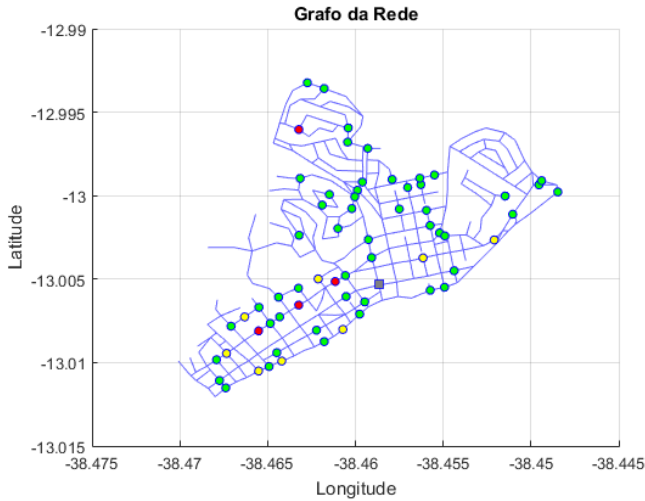


Figura 6.36 – Estado inicial da rede (com 314 nós) para cenário não denso.

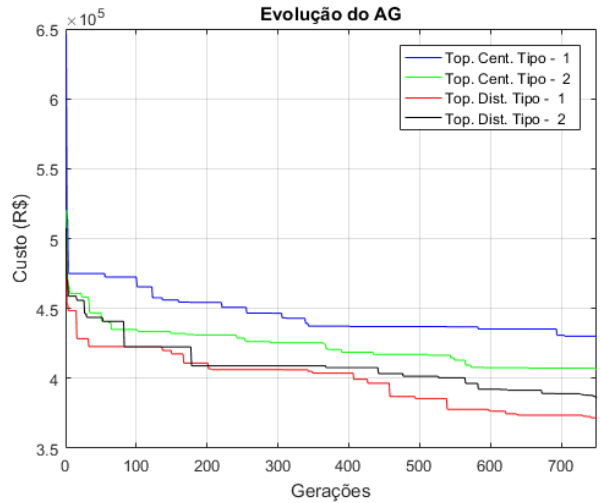


Figura 6.37 – Evolução do AG para cada Topologia para cenário não denso.



Figura 6.38 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 para cenário não denso.



Figura 6.39 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 para cenário não denso.

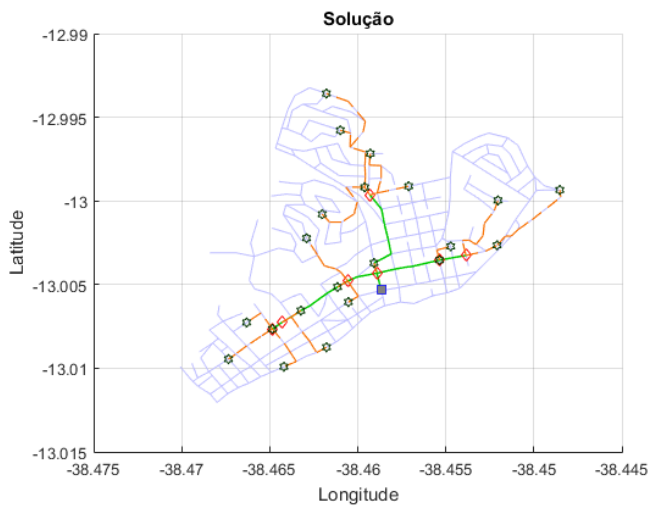


Figura 6.40 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 para cenário não denso.

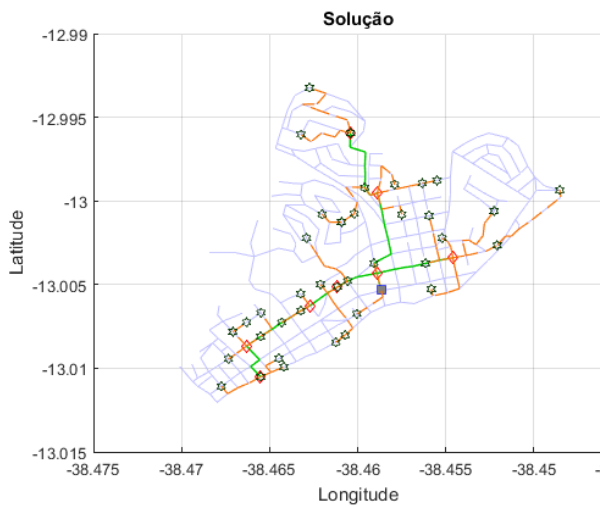


Figura 6.41 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 para cenário não denso.

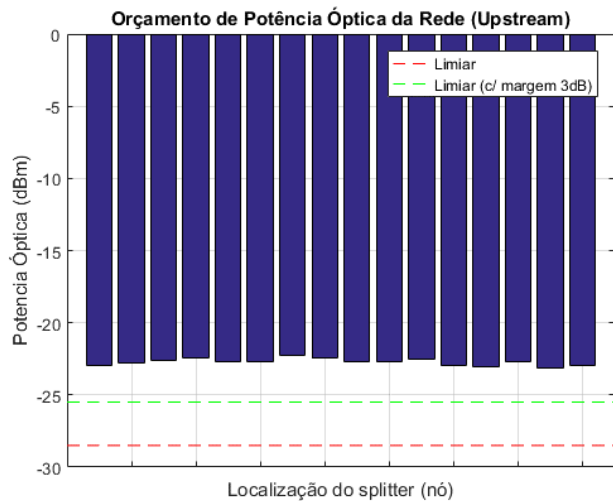


Figura 6.42 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 p/ cenário não denso.

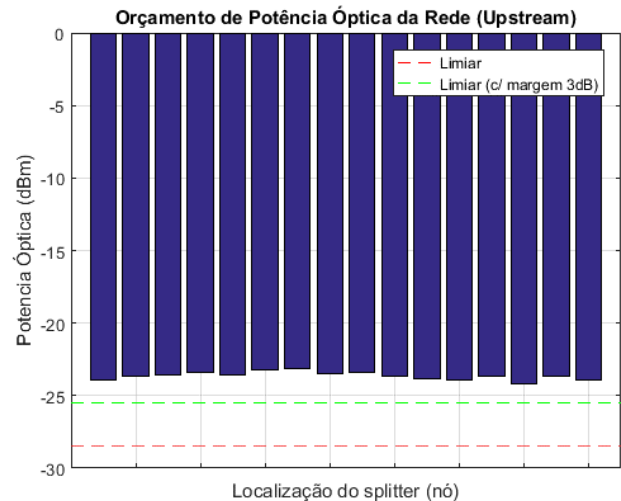


Figura 6.43 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 p/ cenário não denso.

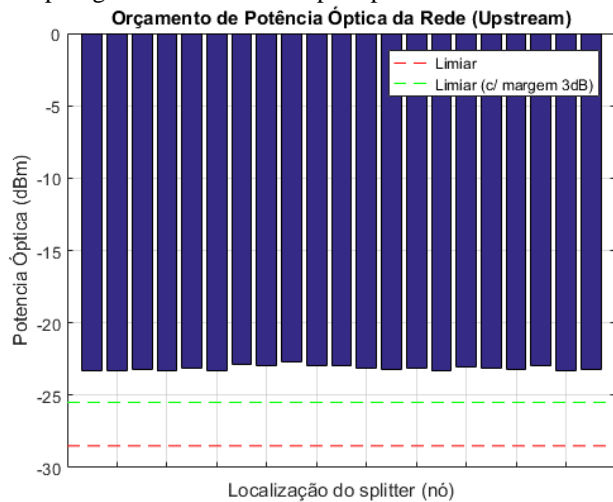


Figura 6.44 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 p/ cenário não denso.

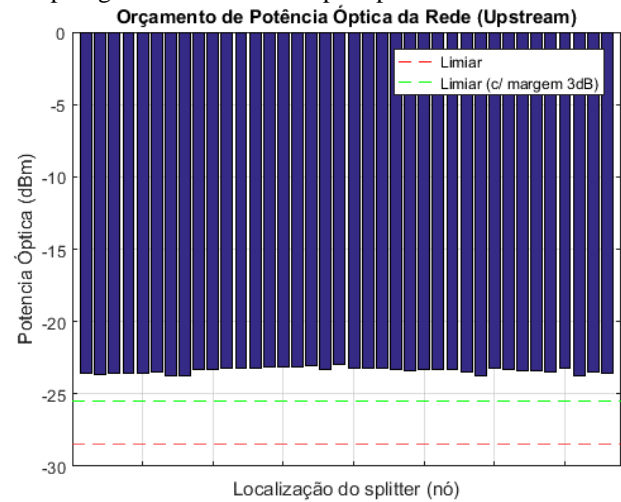


Figura 6.45 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 p/ cenário não denso.

Tabela 6.37 – Comparação entre as topologias para o mesmo estado inicial (cenário não denso – 314 nós).

ITEM	TOP. CENT. TIPO 1	TOP. CENT. TIPO 2	TOP. DIST. TIPO 1	TOP. DIST. TIPO 2
Tempo de execução total	1.508,29 s	1.891,02 s	1.627,66 s	2.017,34 s
Qtd. de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	26.978 m	26.459 m	21.653 m	12.782 m
Qtd. de cabo óptico 12FO (<i>distrib. cable</i>)	0 m	0 m	6.784 m	11.094 m
Qtd. de cabo óptico 48FO (<i>feeder cable</i>)	6.577 m	6.645 m	2.053 m	2.986 m
Qtd. de cabo óptico 144FO (<i>feeder cable</i>)	0 m	0 m	0 m	0 m
Qtd. total de cabos ópticos	33.555 m	33.104 m	30.490 m	26.862 m
Qtd. total de <i>splitters</i> de 1º nível	16 und	8 und	8 und	8 und
Qtd. total de <i>splitters</i> de 2º nível	-	16 und	21 und	38 und
Qtd. total de caixas de CEO's	16 und	16 und	7 und	8 und
Qtd. total de portas PON utilizadas	16 und	8 und	8 und	8 und
Custo total da rede	R\$ 430.122,88	R\$ 406.639,48	R\$ 371.720,02	R\$ 385.718,94
Aumento de custo (%)	13,58 %	8,59 %	-	3,63 %

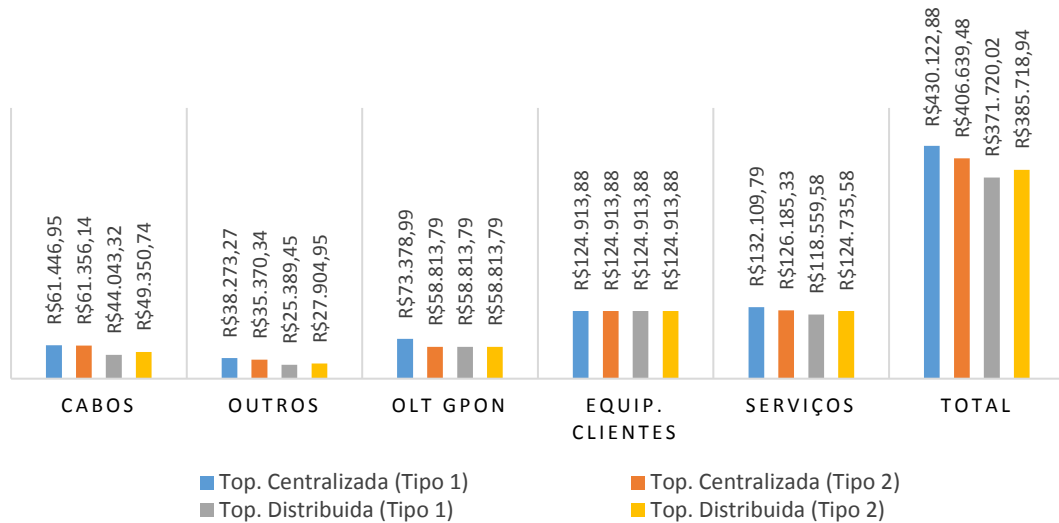


Figura 6.46 – Comparação por categoria (do custo total) para cenário não denso com 314 nós.

A partir dos resultados apresentados para o cenário proposto (pouco denso), pode-se concluir que a topologia adotada em cada projeto influencia diretamente no custo total de implantação da rede. Conforme observado na Figura 6.46, para o cenário considerado nesta seção, a topologia distribuída do tipo 1 apresentou o menor custo de implantação seguido pela topologia distribuída do tipo 2. Este fato se justifica, pois, devido à maior quantidade de divisores ópticos (de atendimento) utilizados na rede, diminui-se o tamanho dos cabos de última milha (elemento que sozinho representa uma considerável parte do custo total de implantação). Entretanto, divisores ópticos de grande capacidade possuem um custo elevado e precisam de uma grande concentração de clientes para que seu custo seja diluído entre eles. Portanto, a tendência é que, em cenários pouco denso, divisores ópticos de atendimento com capacidades menores possuam custos relacionados menores o que torna as soluções distribuídas mais adaptadas à estas situações. Nota-se então que existe uma clara relação entre disposição de clientes, divisores ópticos, portas utilizadas e cabos. Quanto ao orçamento óptico de potência todas as soluções encontradas estão acima do limiar de funcionamento adequado para o sistema GPON proposto.

Deve-se destacar também que topologias distribuídas apresentam uma maior quantidade de elementos dispostos na rede externa, o que significa que processos relacionados à manutenção e identificação de problemas na rede tornam-se mais complexos.

6.3.1.2. Resultados para cenário denso

O segundo teste a ser realizado para este grafo (bairro Pituba – contendo 314 nós), consistirá em um cenário denso, ou seja, um cenário que possui um considerável número assinantes distribuídos de uma maneira bastante próxima entre eles. As características iniciais do algoritmo e o grafo definidas para esta simulação estão descritas na Tabela 6.38. Deve-se ressaltar que a distribuição dos clientes no grafo foi novamente feita de maneira aleatória e, para representar o cenário denso, a incidência de nós com sete clientes foi predominante no estado inicial. Como média geral obteve-se um índice de aproximadamente 443 clientes por km², o que representa um forte aumento em relação ao cenário não denso considerado da seção anterior.

Tabela 6.38 – Características iniciais da rede definidas para as simulações do Mapa de 314 nós – Denso.

Característica	Valores
População Inicial (indivíduos)	100
Número de Gerações (iterações)	700
Porcentagem de Seleção	0,4
Reserva p/ futuros clientes (%)	0,125
Número de nós da rede	314
Número total de clientes atendidos	820
Número de nós com 2 clientes (verde)	11
Número de nós com 4 clientes (amarelo)	35
Número de nós com 7 clientes (vermelho)	94
Área do mapa (km ²)	1,85 km ²
Clientes / km ²	~443

Com o estado inicial da rede determinado (conforme Figura 6.47), novamente utilizou-se o sistema computacional proposto, para cada encontrar uma solução para cada uma das quatro topologias consideradas nesta dissertação. Os resultados são apresentados na seguinte ordem: na Figura 6.48 é descrita a evolução do custo total da rede para cada topologia. Nas Figuras 6.49, 6.50, 6.51, e 6.52 estão apresentadas as soluções encontradas (em forma gráfica) para cada topologia de rede. Nas Figuras 6.53, 6.54, 6.55 e 6.56 estão representados os gráficos do orçamento de potência óptica (*link budget*) para cada topologia da rede. Na Tabela 6.39 encontra-se a comparação das principais informações geradas pelo sistema computacional proposto para cada topologia de rede utilizada. Na Figura 6.57 encontram-se gráficos de barra que apresentam a proporção do custo por categoria de cada resultado obtido. É importante ressaltar que, nos mapas gerados pelo sistema computacional, a identificação de cada nó foi ocultada para facilitar a visualização dos resultados gerados (em função da escala reduzida).

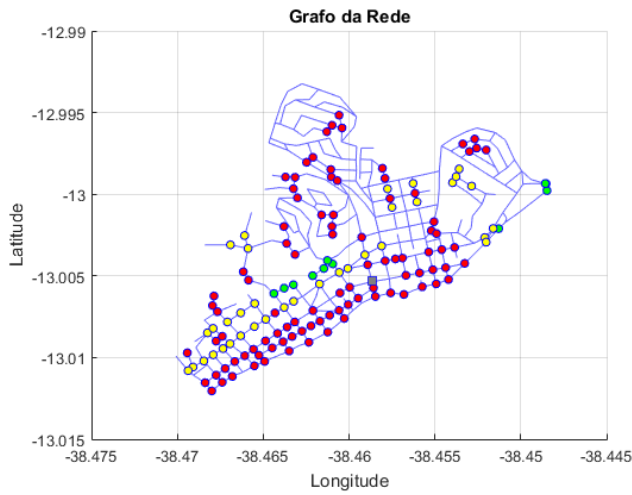


Figura 6.47 – Estado inicial da rede (com 314 nós) para cenário denso.

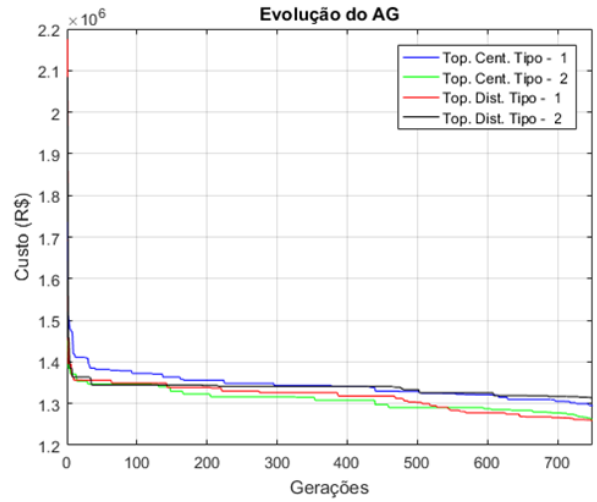


Figura 6.48 – Evolução do AG para cada Topologia para cenário denso.

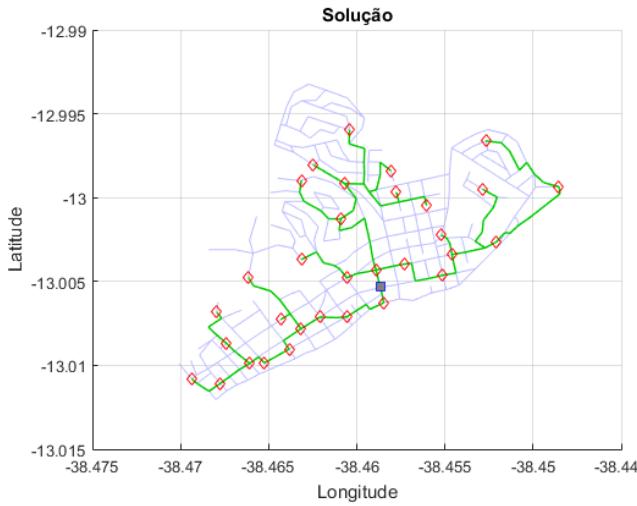


Figura 6.49 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 para cenário denso.

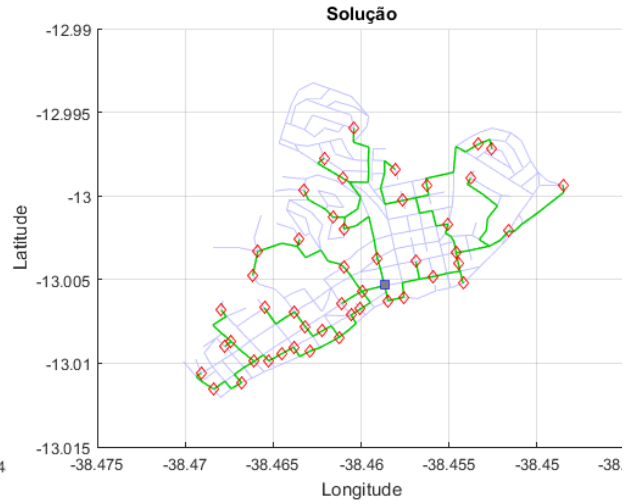


Figura 6.50 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 para cenário denso.

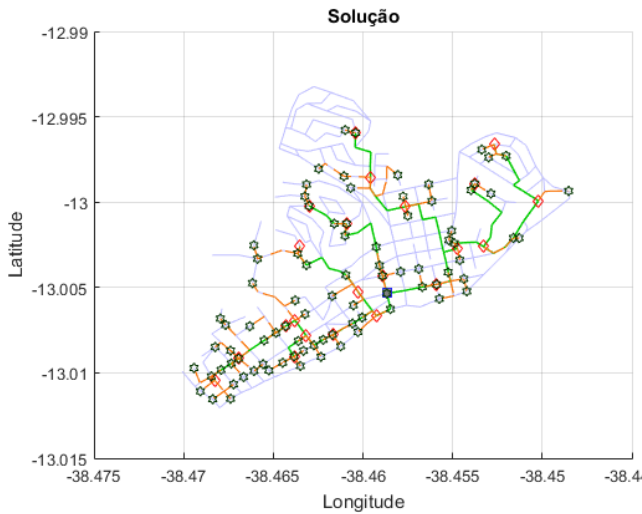


Figura 6.51 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 para cenário denso.

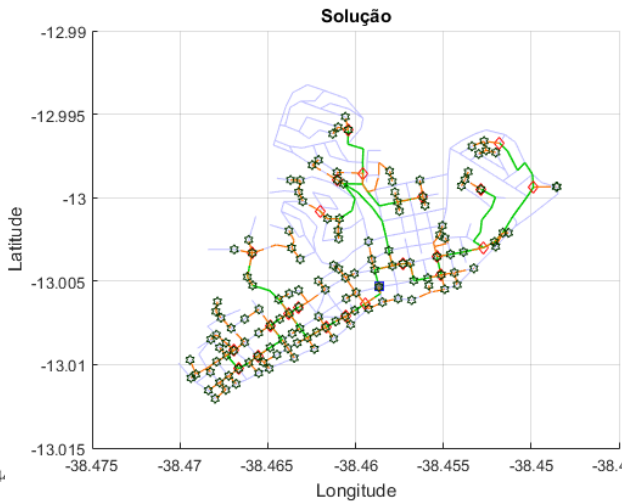


Figura 6.52 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 para cenário denso.

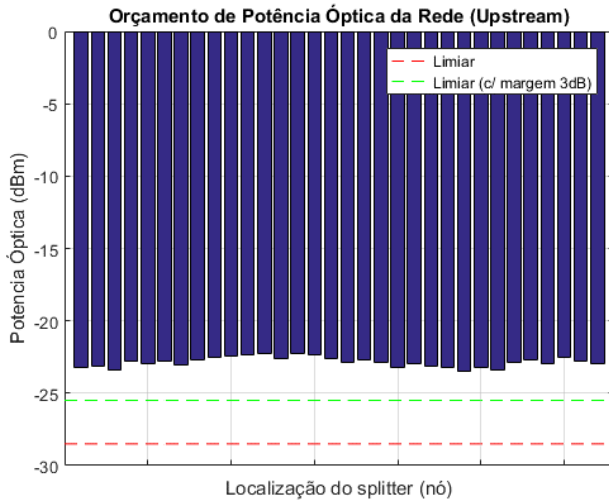


Figura 6.53 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 p/ cenário denso.

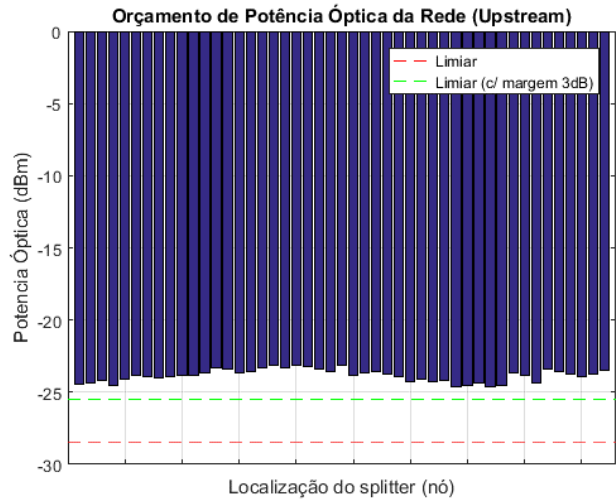


Figura 6.54 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 p/ cenário denso.

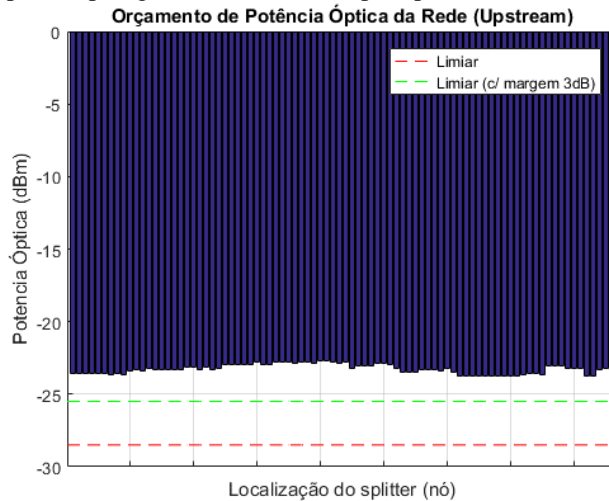


Figura 6.55 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 p/ cenário denso.

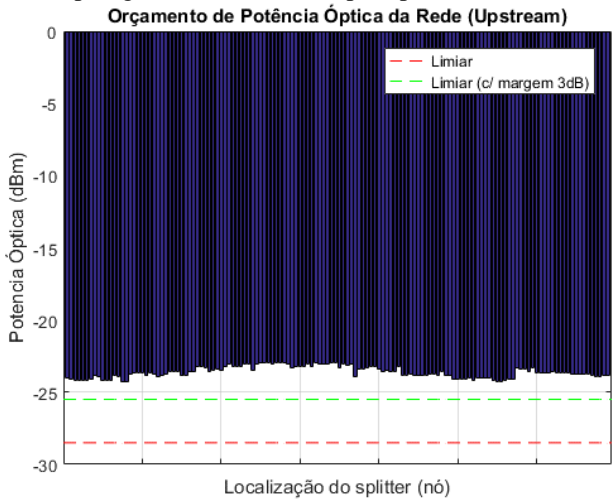


Figura 6.56 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 p/ cenário denso.

Tabela 6.39 – Comparação entre as topologias para o mesmo estado inicial (cenário denso – 314 nós).

ITEM	TOP. CENT. TIPO 1	TOP. CENT. TIPO 2	TOP. DIST. TIPO 1	TOP. DIST. TIPO 2
Tempo de execução total	1.152,51 s	2.107,32 s	1.628,27	1.741,02
Qtd. de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	78.090 m	60.992 m	48.669 m	40.346 m
Qtd. de cabo óptico 12FO (<i>distrib. cable</i>)	0 m	0 m	12.215 m	22.654 m
Qtd. de cabo óptico 48FO (<i>feeder cable</i>)	9.832 m	11.567 m	7.309 m	7.164 m
Qtd. de cabo óptico 144FO (<i>feeder cable</i>)	0 m	0 m	0 m	0 m
Qtd. total de cabos ópticos	87.922 m	72.559 m	68.193 m	70.164 m
Qtd. total de <i>splitters</i> de 1º nível	32 und	24 und	28 und	24 und
Qtd. total de <i>splitters</i> de 2º nível	-	47 und	86 und	138 und
Qtd. total de caixas de CEO's	32 und	47 und	22 und	22 und
Qtd. total de portas PON utilizadas	32 und	24 und	28 und	24 und
Custo total da rede	R\$ 1.294.399,87	R\$ 1.261.623,09	R\$ 1.259.180,97	R\$ 1.312.597,11
Aumento de custo (%)	2,7209%	0,1936%	-	4,0695%

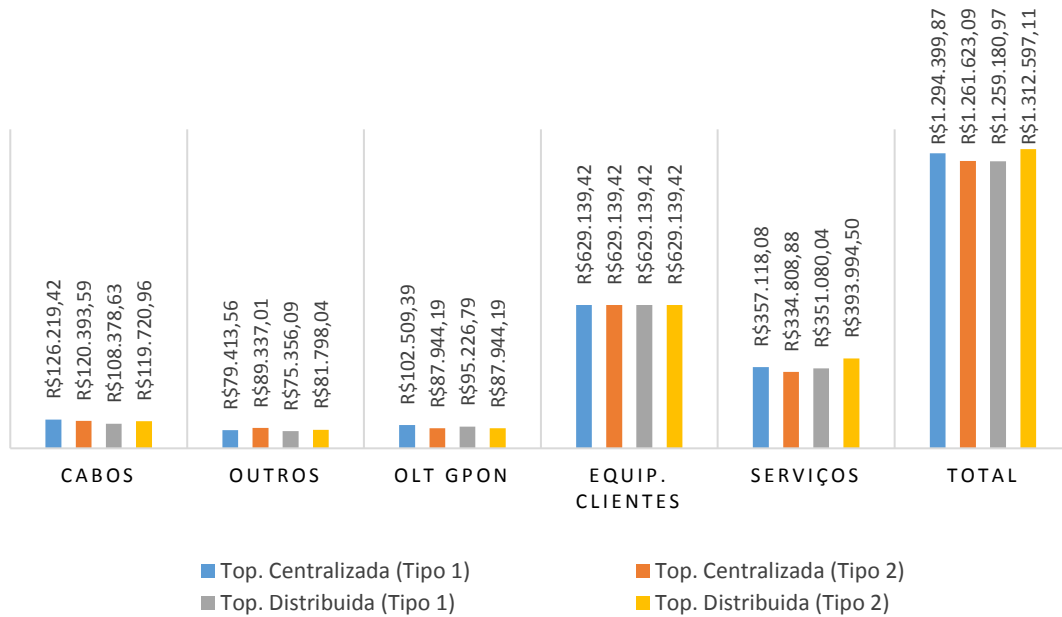


Figura 6.57 – Comparação por categoria (do custo total) para cenário denso com 314 nós.

Em relação ao cenário denso proposto, pode-se concluir que interferência do tipo da topologia adotada no custo total de implantação da rede é menor quando comparado ao cenário pouco denso analisado na seção anterior. Conforme se pode observar na Figura 6.57, para o cenário denso proposto nesta seção, as topologias que apresentaram menor custo foram, respectivamente, a topologia distribuída do tipo 1 e a topologia centralizada do tipo 2, havendo uma diferença desprezível entre ambas de cerca de 0,2%. A tendência é que, com o aumento do número de divisores ópticos na OSP, diminua-se o comprimento dos cabos de última milha (elemento que sozinho representa grande parte do custo total de implantação), porém demasiados divisores ópticos de atendimento resultam em grandes quantidades de cabos de distribuição. Outro fato relevante, é que a medida que a densidade de clientes por área aumenta, a tendência é que topologias que utilizem divisores ópticos de distribuição com maior capacidade apresentem uma redução no custo da implantação. Em relação ao orçamento óptico de potência todos as soluções encontradas estão acima do limiar de funcionamento adequado para o sistema GPON proposto.

6.3.2. Mapa com 714 nós

Com o objetivo de testar sob outras condições o sistema computacional proposto, nesta seção foi escolhido um outro cenário com uma maior área geográfica e, conseqüentemente, um maior número de nós da rede. Para este teste foi escolhida a região central do município de

Camaçari-BA. O cenário escolhido possui aproximadamente 5,7 km² de área e sua escolha se dá pelo tamanho do grafo resultante, além do fato dele representar uma cidade típica de médio porte do interior do Brasil. As Figura 6.58 e Figura 6.59 apresentam o processo de importação do mapa com a plataforma *Open Street Map*. Este processo está descrito detalhadamente na Seção 5.6 deste trabalho. A Figura 6.60, apresenta o grafo importado para o Matlab® (contendo os 714 nós da rede). Deve-se ressaltar que a identificação dos nós na figura foi ocultada com o objetivo de melhorar a visualização do mapa.

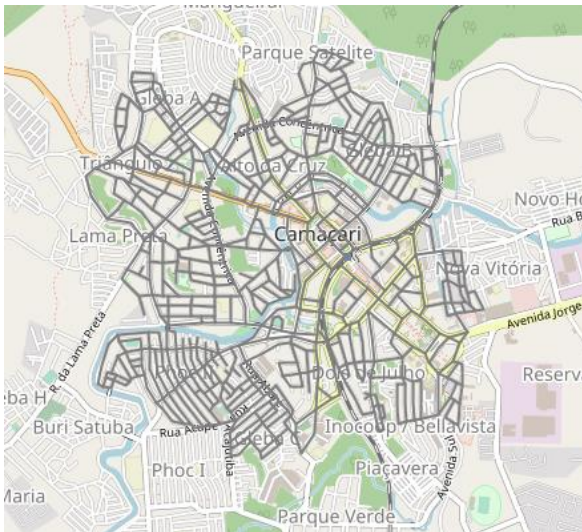


Figura 6.58 – Mapa da região de interesse (região central da cidade de Camaçari) com grafo sobreposto.



Figura 6.59 – Grafo do mapa da região de interesse (Camaçari) à ser importado para Matlab®.

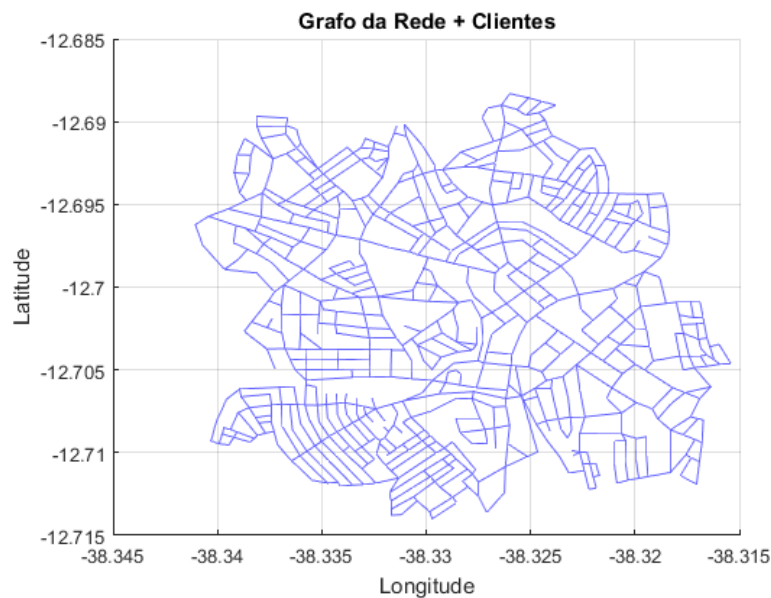


Figura 6.60 – Grafo da rede (região central da cidade de Camaçari) importado para Matlab® contendo 714 nós.

6.3.2.1. Resultados para cenário não denso

O primeiro teste a ser realizado para este grafo (município de Camaçari – contendo 714 nós), consiste em um cenário não denso, ou seja, um cenário que possui os assinantes distribuídos de maneira dispersa na região de interesse. As definições das características iniciais do algoritmo e do grafo para esta simulação estão descritas na Tabela 6.40. Deve-se ressaltar que a distribuição dos clientes no grafo foi feita de maneira aleatória e, para representar o cenário não denso, a incidência de nós com dois clientes foi predominante no estado inicial. Como média geral obteve-se um índice de aproximadamente 76 clientes por km².

Tabela 6.40 – Características iniciais da rede definidas para as simulações do Mapa de 714 nós – não denso.

Característica	Valores
População Inicial (indivíduos)	125
Número de Gerações (iterações)	1000
Porcentagem de Seleção	0,4
Reserva p/ futuros clientes (%)	0,125
Número de nós da rede	714
Número total de clientes atendidos	436
Número de nós com 2 clientes (verde)	151
Número de nós com 4 clientes (amarelo)	23
Número de nós com 7 clientes (vermelho)	6
Área do mapa (km ²)	~5,7 km ²
Clientes / km ²	~76

Com o estado inicial da rede determinado (conforme Figura 6.61), utilizou-se o sistema computacional proposto, para cada encontrar uma solução para cada uma das quatro topologias consideradas neste trabalho. Os resultados são apresentados na seguinte ordem: na Figura 6.62 é descrito a evolução do custo total da rede para cada topologia. Nas Figuras 6.63, 6.64, 6.65 e 6.66 estão apresentadas as soluções encontradas (em forma gráfica) para cada topologia de rede. Nas Figuras 6.67, 6.68, 6.69 e 6.70 estão representados os gráficos do orçamento de potência óptica (*link budget*) para cada topologia da rede. Na Tabela 6.41 encontra-se a comparação das principais informações geradas pelo sistema computacional proposto para cada topologia de rede utilizada. Na Figura 6.71 é apresentado um gráfico de barras que descreve a comparação por categoria (do custo total) de cada resultado obtido. É importante ressaltar que, nos mapas gerados pelo sistema computacional, a identificação de cada nó foi ocultada para facilitar a visualização dos resultados gerados (em função da escala reduzida do mapa).

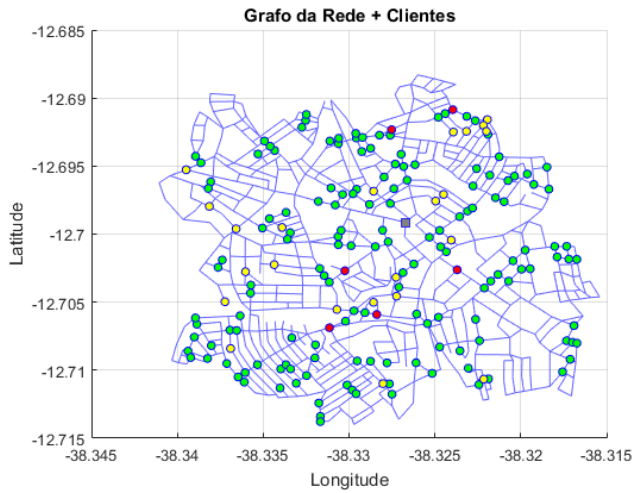


Figura 6.61 – Estado inicial da rede (com 714 nós) para cenário não denso.

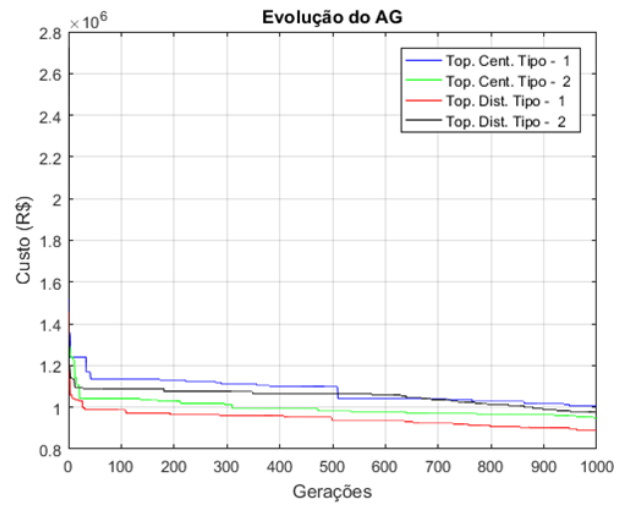


Figura 6.62 – Evolução do AG para cada Topologia para cenário não denso (com 714 nós).

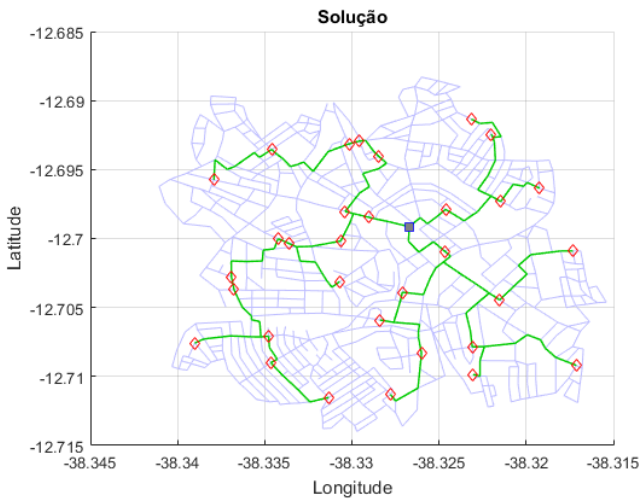


Figura 6.63 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 para cenário não denso (com 714 nós).

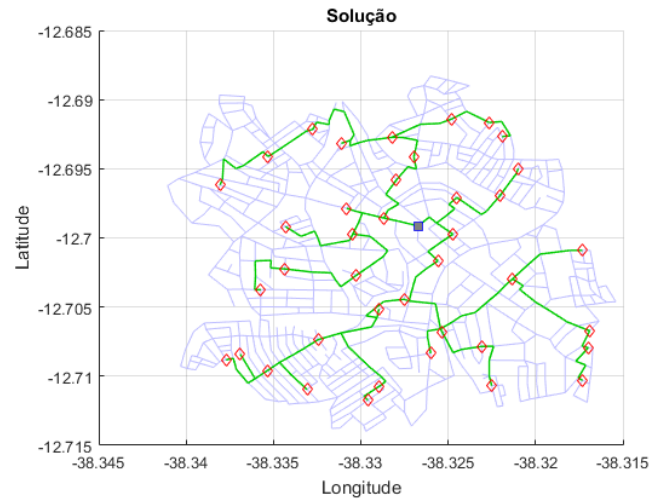


Figura 6.64 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 para cenário não denso (com 714 nós).

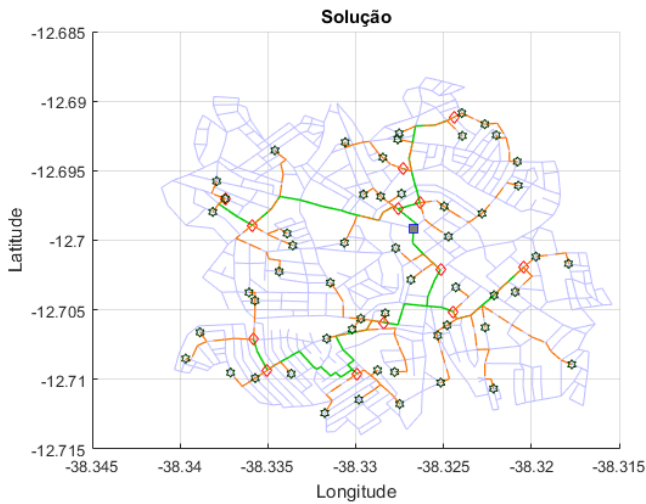


Figura 6.65 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 para cenário não denso (com 714 nós).

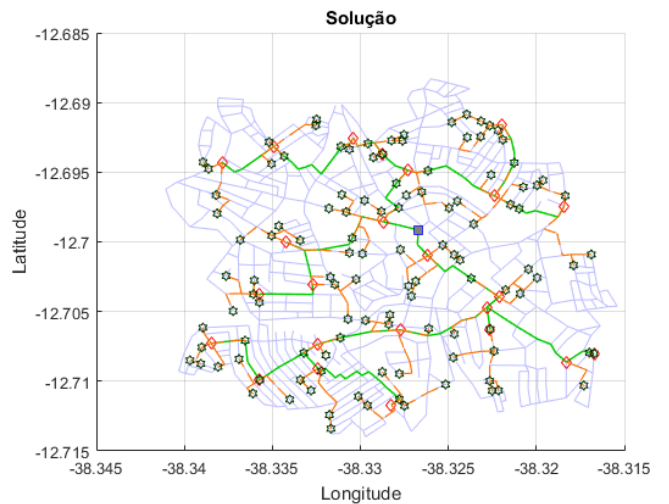


Figura 6.66 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 2 para cenário não denso (com 714 nós).

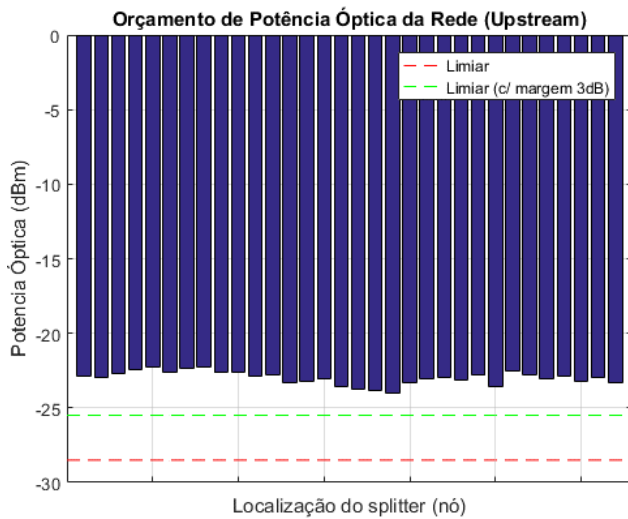


Figura 6.67 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Top. Centralizada – Tipo 1 p/ cenário não denso – 714 nós.

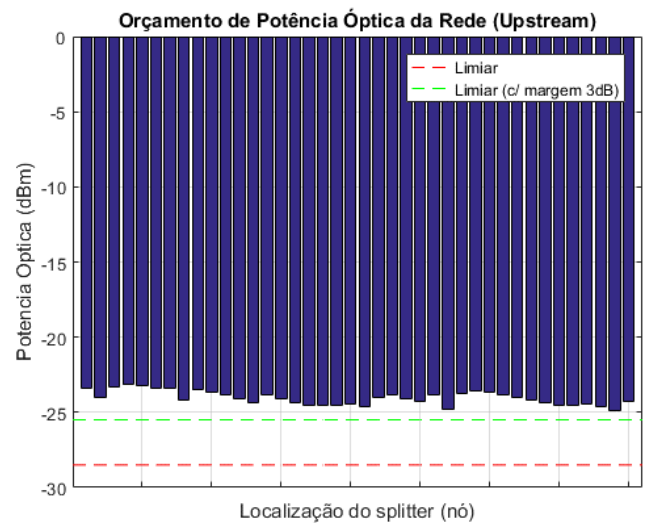


Figura 6.68 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Top. Centralizada – Tipo 2 p/ cenário não denso – 714 nós.

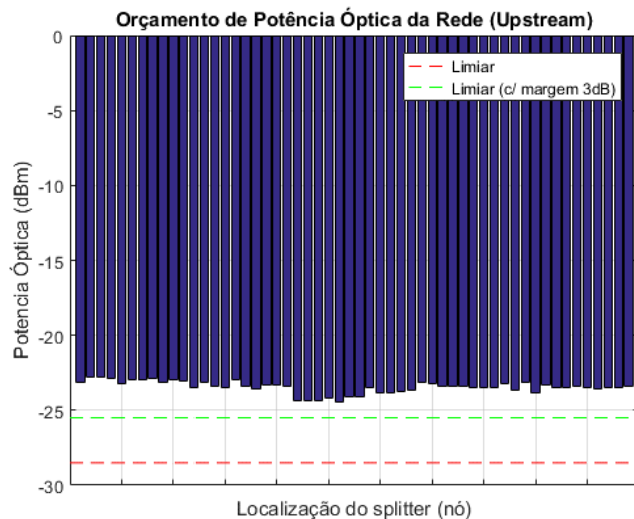


Figura 6.69 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Top. Distribuída – Tipo 1 p/ cenário não denso – 714 nós.

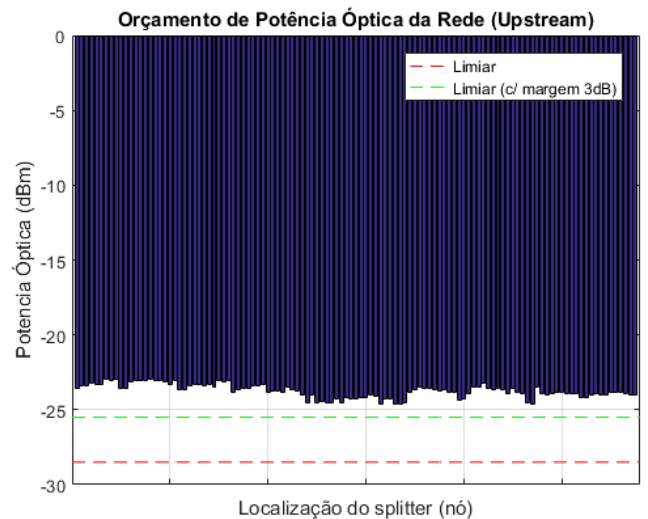


Figura 6.70 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Top. Distribuída – Tipo 2 p/ cenário não denso – 714 nós.

Tabela 6.41 – Comparação entre as topologias para o mesmo estado inicial (cenário não denso – 714 nós).

ITEM	TOP. CENT. TIPO 1	TOP. CENT. TIPO 2	TOP. DIST. TIPO 1	TOP. DIST. TIPO 2
Tempo de execução total	3.801 s	3.665 s	3.850 s	3.813 s
Qtd. de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	79.925 m	63.834 m	54.151 m	27.818 m
Qtd. de cabo óptico 12FO (<i>distrib. cable</i>)	0 m	0 m	19.656 m	29.066 m
Qtd. de cabo óptico 48FO (<i>feeder cable</i>)	13.950 m	16.159 m	6.688 m	11.093 m
Qtd. de cabo óptico 144FO (<i>feeder cable</i>)	0 m	0 m	0 m	0 m
Qtd. total de cabos ópticos	93.875 m	79.993 m	80.496 m	67.977 m
Qtd. total de <i>splitters</i> de 1º nível	32 und	20 und	16 und	24 und
Qtd. total de <i>splitters</i> de 2º nível	-	40 und	54 und	115 und
Qtd. total de caixas de CEO's	32 und	40 und	13 und	24 und
Qtd. total de portas PON utilizadas	32 und	20 und	16 und	24 und
Custo total da rede	R\$ 1.005.588,35	R\$ 945.542,69	R\$ 889.545,10	R\$ 971.691,88
Aumento de custo (%)	11,54 %	5,92 %	-	8,45 %

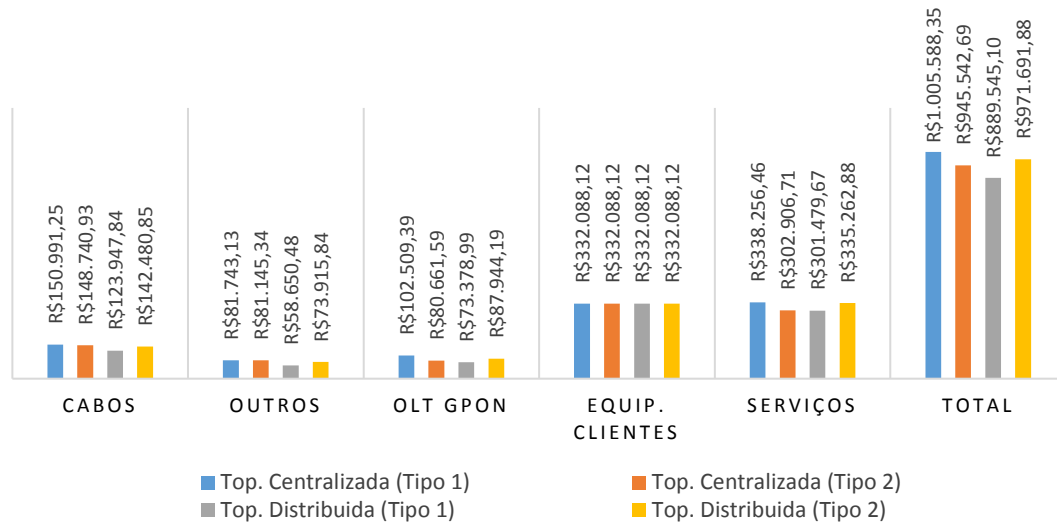


Figura 6.71 – Comparação por categoria do custo total (para cenário não denso – 714 nós).

Para o cenário considerado nesta seção, a topologia distribuída do tipo 1 apresentou o menor custo de implantação seguido pela topologia centralizada do tipo 2 e pela topologia distribuída do tipo 2. Diante dos resultados conclui-se que a topologia adotada influencia diretamente no custo total de implantação da rede. Este fato se justifica, pois, devido à maior quantidade de divisores ópticos (de atendimento) utilizados na rede, diminui-se o comprimento dos cabos de última milha e, conseqüentemente, o serviço de instalação (estes elementos representam uma considerável parte do custo total de implantação). Entretanto, divisores ópticos de grande capacidade possuem um custo elevado e precisam de uma grande concentração de clientes para que seu custo seja diluído entre eles. Portanto, a tendência é que, em cenários pouco denso, divisores ópticos de atendimento com capacidades menores possuam custos relacionados menores o que torna as soluções distribuídas mais adaptadas à estas situações. Nota-se então que existe uma clara relação entre disposição de clientes, divisores ópticos, portas utilizadas e cabos. Quanto ao orçamento óptico de potência todas as soluções encontradas estão acima do limiar de funcionamento adequado para o sistema GPON proposto.

Deve-se destacar também que topologias distribuídas apresentam uma maior quantidade de elementos dispostos na rede externa, o que significa que processos relacionados à manutenção e identificação de problemas na rede tornam-se mais complexos.

6.3.2.2. Resultados para cenário denso

O segundo teste realizado para este grafo (município de Camaçari – contendo 714 nós), consiste em um cenário denso, ou seja, um cenário que possui um considerável número assintantes distribuídos de uma maneira bastante próxima entre eles. As características iniciais do algoritmo para esta simulação estão descritas na Tabela 6.42. Deve-se ressaltar que a distribuição dos clientes no grafo foi novamente feita de maneira aleatória e, para representar o cenário denso, a incidência de nós com sete clientes foi predominante no estado inicial. Como média geral obteve-se um índice de aproximadamente 270,87 clientes por km², o que representa um considerável aumento em relação ao cenário não denso descrito na seção anterior.

Tabela 6.42 – Características iniciais da rede definidas para as simulações do Mapa de 714 nós – Denso.

Característica	Valores
População Inicial (indivíduos)	125
Número de Gerações (iterações)	1000
Porcentagem de Seleção	0,4
Reserva p/ futuros clientes (%)	0,125
Número de nós da rede	714
Número total de clientes atendidos	1544
Número de nós com 2 clientes (verde)	6
Número de nós com 4 clientes (amarelo)	19
Número de nós com 7 clientes (vermelho)	208
Área do mapa (km ²)	~5,7 km ²
Clientes / km ²	~270,87

Com o estado inicial da rede determinado (conforme Figura 6.72), novamente utilizou-se o sistema computacional proposto, para encontrar uma solução para cada uma das quatro topologias consideradas neste trabalho. Os resultados são apresentados na seguinte ordem: na Figura 6.73 é descrito a evolução do custo total da rede para cada topologia. Nas Figuras 6.74, 6.75, 6.76 e 6.77 estão apresentadas as soluções encontradas (em forma gráfica) para cada topologia de rede. Nas Figuras 6.78, 6.79, 6.80 e 6.81 estão representados os gráficos do orçamento de potência óptica (*link budget*) para cada topologia da rede. Na Tabela 6.43 encontra-se a comparação das principais informações geradas pelo sistema computacional proposto para cada topologia de rede utilizada. A Figura 6.82 apresenta o gráficos de barras que descrevem o custo por categoria de cada topologia utilizada. É importante ressaltar que, nos mapas gerados pelo sistema computacional, a identificação de cada nó foi ocultada para facilitar a visualização dos resultados gerados (em função da escala reduzida).

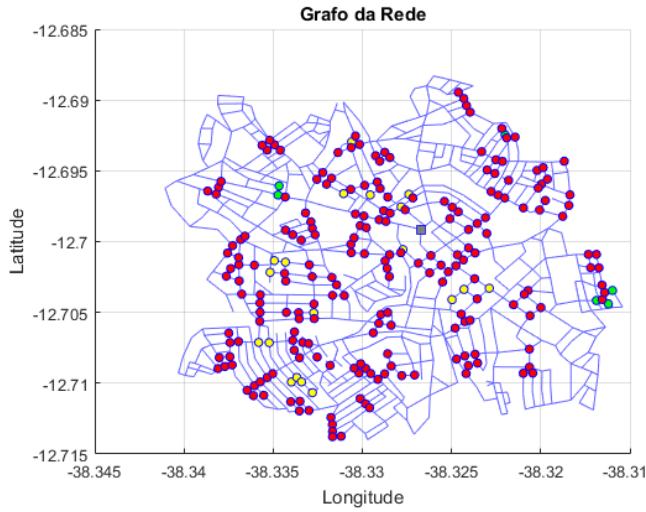


Figura 6.72 – Estado inicial da rede (com 714 nós) para cenário denso.

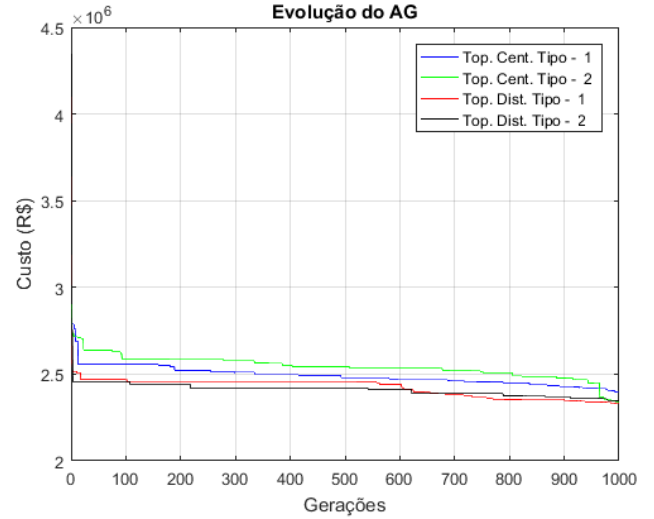


Figura 6.73 – Evolução do AG para cada topologia para cenário denso (com 714 nós).

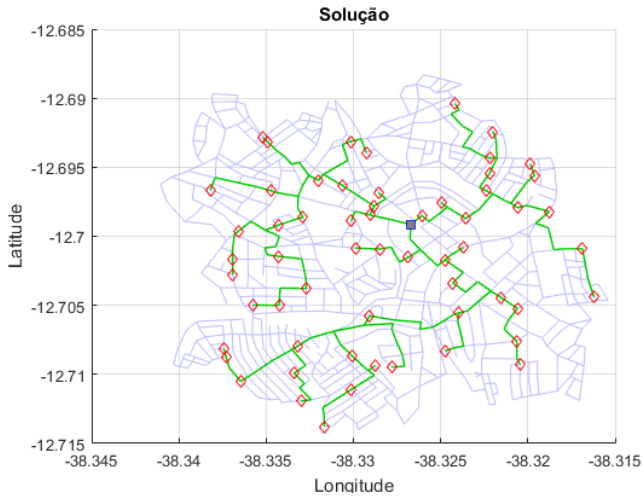


Figura 6.74 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 para cenário denso (com 714 nós).

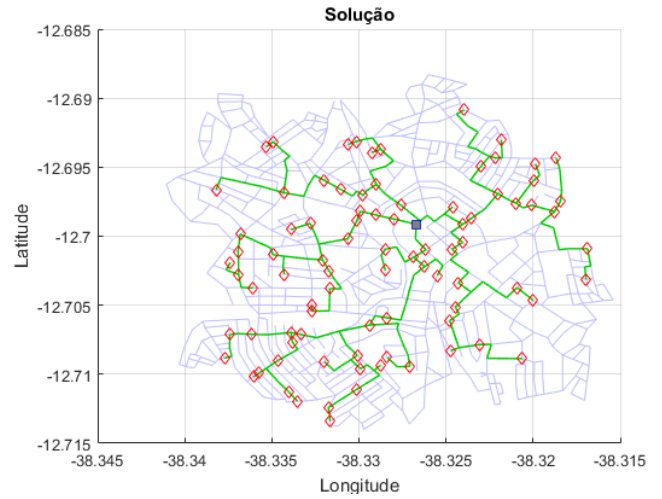


Figura 6.75 – Solução AG para Topologia Centralizada – Tipo 2 para cenário denso (com 714 nós).

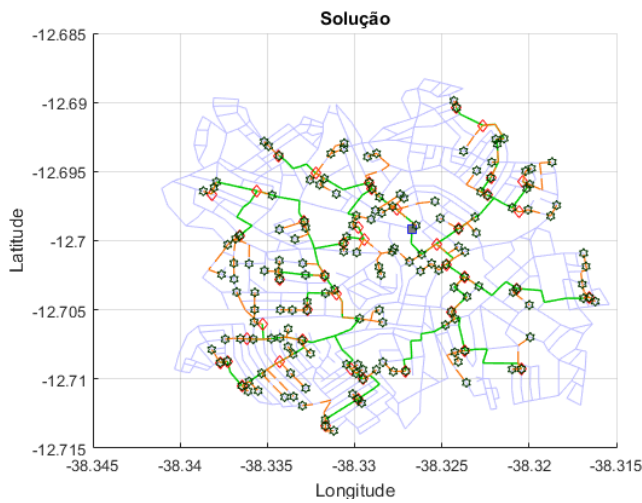


Figura 6.76 – Solução AG para Topologia Distribuída – Tipo 1 para cenário denso (com 714 nós).

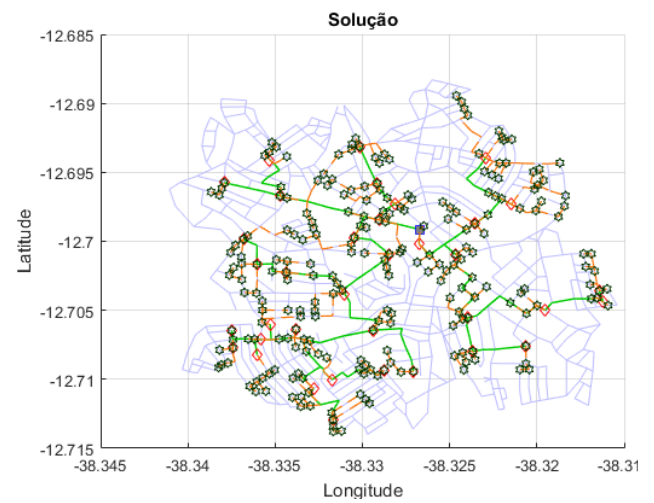


Figura 6.77 – Solução AG para Top. Dist. – Tipo 2 para cenário denso (com 714 nós).

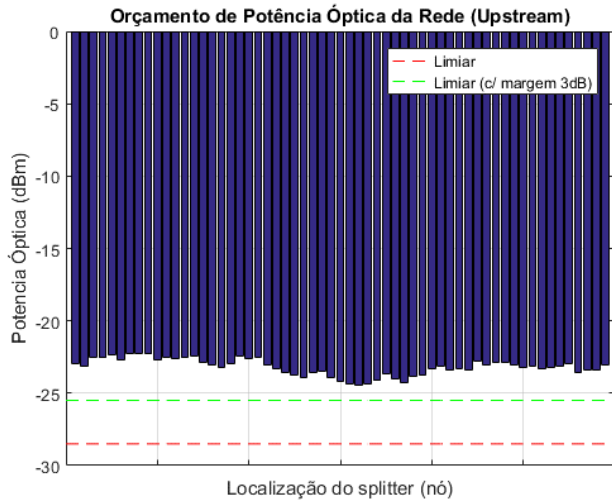


Figura 6.78 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Topologia Centralizada – Tipo 1 p/ cenário denso – 714 nós.

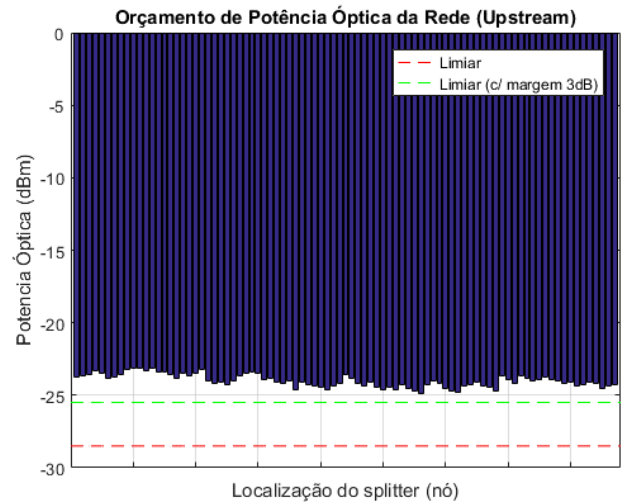


Figura 6.79 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Top. Centralizada – Tipo 2 p/ cenário denso – 714 nós.

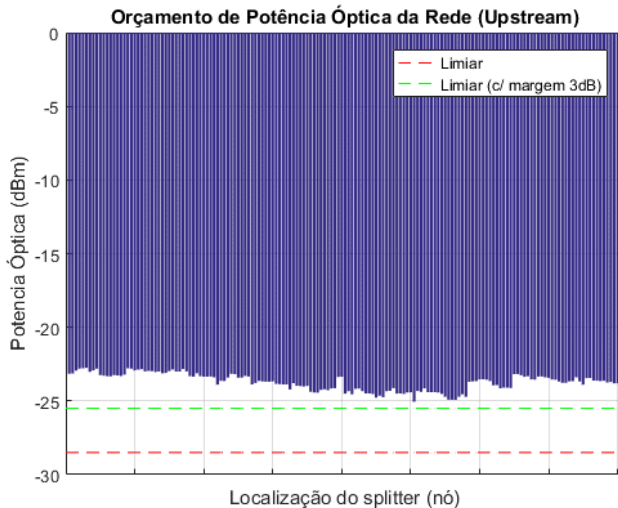


Figura 6.80 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Top. Distribuída – Tipo 1 p/ cenário denso – 714 nós.

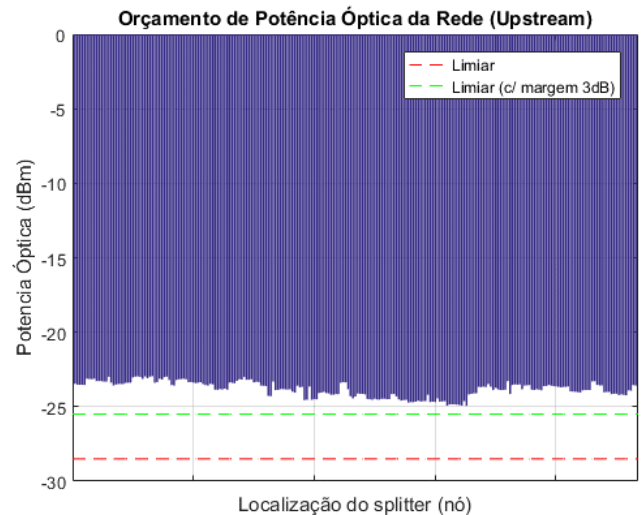


Figura 6.81 – *Link Budget* da rede gerado pelo AG para Top. Distribuída – Tipo 2 p/ cenário denso – 714 nós.

Tabela 6.43 – Comparação entre as topologias para o mesmo estado inicial (cenário denso – 714 nós).

ITEM	TOP. CENT. TIPO 1	TOP. CENT. TIPO 2	TOP. DIST. TIPO 1	TOP. DIST. TIPO 2
Tempo de execução total	4.594,94 s	4.203,10 s	4.004,15 s	4.336,01 s
Qtd. de cabo óptico 02FO (<i>drop cable</i>)	141.197 m	114.676 m	84.783 m	73.033 m
Qtd. de cabo óptico 12FO (<i>distrib. cable</i>)	0 m	0 m	23.318 m	42.168 m
Qtd. de cabo óptico 48FO (<i>feeder cable</i>)	17.733 m	19.635 m	14.156 m	13.010 m
Qtd. de cabo óptico 144FO (<i>feeder cable</i>)	0 m	0 m	0 m	0 m
Qtd. total de cabos ópticos	158.930 m	134.311 m	122.257 m	128.211 m
Qtd. total de <i>splitters</i> de 1º nível	59 und	44 und	51 und	39 und
Qtd. total de <i>splitters</i> de 2º nível	-	87 und	161 und	233 und
Qtd. total de caixas de CEO's	59 und	87 und	43 und	36 und
Qtd. total de portas PON utilizadas	59 und	44 und	51 und	39 und
Custo total da rede	R\$ 2.394.071,30	R\$ 2.337.337,33	R\$ 2.329.664,76	R\$ 2.345.312,70
Aumento de custo (%)	2,69 %	0,32 %	-	0,66%

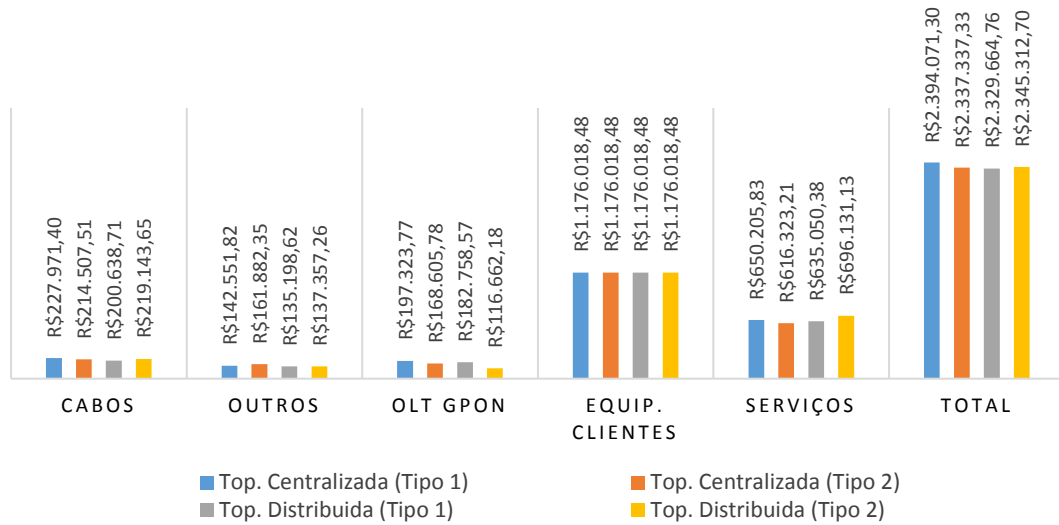


Figura 6.82 – Comparação por categoria do custo total (para cenário denso – 714 nós).

Diante dos resultados, nota-se que, para o cenário denso proposto, a interferência do tipo da topologia adotada no custo total de implantação da rede é menor quando comparado ao cenário pouco denso. Para o cenário denso proposto nesta seção o menor custo total foi obtido pela topologia distribuída do tipo 1. Entretanto deve-se destacar que a diferença de custo entre as soluções propostas para este cenário foi pequena, fato observado também no cenário denso de 314 nós da Seção 6.3.2.1. Nestas condições, à medida que os clientes estejam dispostos de forma mais densa, a tendência é que as topologias do tipo centralizadas apresentem custo cada vez menor. Em relação ao orçamento óptico de potência todos as soluções encontradas estão acima do limiar de funcionamento adequado para o sistema GPON proposto.

6.4. Conclusão

Esta etapa da dissertação descreveu o desenvolvimento de um sistema computacional de suporte a projetos de redes PON baseado no Algoritmo Genético (AG). O sistema proposto automatiza diversos processos envolvidos na elaboração de um projeto e indica a melhor posição dos equipamentos na região de interesse com o objetivo de se obter o menor custo possível de implantação. Na concepção do sistema, foram consideradas as quatro topologias de redes GPON mais utilizadas por empresas de telecomunicações em projetos de atendimento a clientes residenciais em grandes ou pequenas cidades. Outra grande vantagem do sistema é seu funcionamento simples, apresentando os resultados encontrados pelo algoritmo em forma gráfica, por

meio da localização dos equipamentos em mapas da região de interesse. Deve-se destacar também que todos os dispositivos utilizados na rede externa são devidamente georreferenciados o que aumenta a precisão do sistema proposto.

Inicialmente, o algoritmo foi validado em um cenário simplificado e reduzido, por meio da comparação com soluções obtidas manualmente para um mesmo estado inicial. Nos testes efetuados com o sistema computacional, foram obtidos sempre valores de custo de implantação próximos ou menores que neles encontrados com soluções tradicionais, o que comprova a eficácia do algoritmo proposto. Outra grande vantagem é a redução do tempo necessário para elaboração da solução (quando comparado ao método tradicional). Nos testes, foram obtidos índices de redução de tempo sempre superiores à 96%, permitindo que problemas que levassem horas para serem resolvidos fossem solucionados em alguns poucos minutos. Foram apresentados também exemplos de utilização do algoritmo em cenários de maior escala para ilustração da potencialidade da ferramenta de auxílio a planejamento de redes. Nesta etapa buscou-se também entender como a escolha da topologia adotada influencia no custo total de implantação do sistema e concluiu-se que existe uma clara relação entre topologia adotada, disposição de clientes, divisores ópticos, portas utilizadas, cabos e custo dos materiais envolvidos. De uma maneira geral, entre as topologias analisadas, a topologia distribuída do tipo 2 apresentou-se como a opção que possui menor custo de implantação para os cenários e materiais/serviços considerados neste trabalho.

A função objetivo, desenvolvida para a otimização do problema proposto, foi o custo total de implantação de uma rede GPON. Foram considerados na dissertação, além de cabos e divisores ópticos, todos os 48 principais itens (materiais e serviços) que usualmente são utilizados em sistemas de acesso GPON e estes foram divididos em sete categorias (para melhor entendimento dos resultados). Vale ressaltar que todos os parâmetros de custo dos equipamentos utilizados na rede são importados de planilhas em formato Excel®, o que confere versatilidade e facilidade na manipulação dos dados do algoritmo proposto. Destaca-se também a utilização de outros importantes parâmetros na elaboração da solução como: perda de potência óptica e reserva de portas nos divisores ópticos para novas demandas.

Dada a importância e a complexidade do problema descrito, pode-se concluir que ferramentas que auxiliem projetistas na elaboração de redes PON apresentam potencial, uma vez

que podem auxiliar engenheiros e técnicos em tomada de decisão, reduzir custos de implantação, permitir a análise de topologias de rede, reduzir o tempo necessário para elaboração de projetos e garantir o funcionamento adequado da rede proposta.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação teve como objeto de pesquisa dois problemas atuais e de grande relevância acadêmica e técnica, que estão relacionados a tecnologias de redes ópticas passivas (PON). São eles: (1) Análise técnico-econômica da proposta PON-LAN e (2) Otimização de redes de acesso PON. As seções a seguir apresentam as principais conclusões e sugerem recomendações para trabalhos futuros.

7.1. Conclusão – Problema Alvo 1

Nesta etapa do trabalho (Capítulo 4) foi realizada uma análise da proposta PON-LAN. Buscou-se entender os princípios de funcionamento da proposta, bem como analisar suas vantagens e desvantagens técnicas e econômicas. Concluiu-se que, tecnicamente, o sistema PON-LAN é capaz de atender a todos os requisitos de uma rede corporativa comum. No aspecto econômico, a partir de uma comparação realizada entre a solução PON-LAN e a solução metálica convencional em um cenário corporativo real (com 1.708 pontos de telecomunicações), observou-se uma redução de CAPEX de 18% e de OPEX de 32,87% (para um período de um ano). Em simulação para outros cenários, observou-se também que a redução no custo de implantação tende a se tornar cada vez maior à medida que o tamanho da rede aumenta. Diante dos resultados, concluiu-se que o sistema PON-LAN é, de fato, uma alternativa promissora aos difundidos sistemas de cabeamento metálico e sua adoção, em grandes corporações, tende a ser uma realidade cada vez maior com o passar dos anos.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Identificar as atuais aplicações mais utilizadas em ambientes corporativos e a banda necessária, utilizando dados de tráfego de rede obtidos em um cenário real que utilize o sistema PON-LAN. De posse destes dados, verificar a eficiência do uso compartilhado de banda no sistema com uma de profunda análise estatística;

- Analisar o impacto da alocação dinâmica de banda (utilizada em sistemas PON-LAN) em aplicações multimídia de alto desempenho que demandam transmissão em tempo real e baixa latência;
- Verificar o CAPEX e OPEX para sistemas PON-LAN que utilizem outras tecnologias PON (ex: 10-GPON ou WDM-PON) ou adotar outras topologias utilizando diferentes configurações de divisores ópticos.

7.2. Conclusão – Problema Alvo 2

Na segunda etapa deste trabalho foi desenvolvido um sistema computacional, baseado em algoritmos genéticos (AGs), que oferece suporte a projetos de redes de acesso PON (conforme descrito nos Capítulos 5 e 6). O sistema automatiza, de forma simples e amigável, todos os principais processos envolvidos na elaboração de redes de acesso PON, desde a importação de mapas reais à apresentação da solução encontrada em forma gráfica e georreferenciada. Informações importantes de atenuação óptica também são calculadas e consideradas, o que garante o correto funcionamento da rede proposta. Na concepção do sistema, foram considerados os 48 principais materiais e serviços (ver Apêndice A), que são comumente utilizados em projetos de redes PON, o que fornece informações completas e detalhadas sobre cada solução encontrada. Em relação às topologias, neste trabalho foram consideradas as quatro topologias de redes GPON mais utilizadas por empresas de telecomunicações, sendo duas topologias centralizadas e duas topologias distribuídas.

Para a validação do algoritmo proposto, as soluções encontradas com o sistema computacional foram comparadas com soluções obtidas com o método tradicional (para um mesmo cenário inicial). Os resultados mostram que o sistema proposto é bastante eficiente e os custos apresentados pelo sistema foram sempre menores ou muito próximos da solução manual. A principal vantagem se apresenta na drástica redução de tempo necessário para elaboração da solução e no alto nível de detalhe apresentado para cada solução encontrada. Percentuais de redução de tempo sempre superiores à 96% foram obtidos, permitindo que problemas que levassem horas para serem resolvidos fossem solucionados em alguns poucos minutos. Posteriormente, o sistema proposto também foi testado em cenários maiores e sua grande potencialidade como ferramenta de auxílio a planejamento de redes foi confirmada. Nesta etapa buscou-se também entender a influência da topologia adotada no custo total de implantação e concluiu-

se que existe uma clara relação entre topologia adotada, disposição de clientes, divisores ópticos, portas utilizadas, cabos e, obviamente, custo dos materiais envolvidos.

Levando em conta os bons resultados apresentados pelo algoritmo proposto, a complexidade do problema descrito e a potencialidade de crescimento das redes de acesso do tipo PON no Brasil e no mundo, pode-se concluir que o sistema proposto permite, com eficiência, auxiliar os projetistas na tarefa de planejamento de redes PON. Sendo assim, conclui-se que a ferramenta apresentada possui grande relevância do ponto de vista técnico, econômico e comercial.

Como atividades para futuros trabalhos pode-se destacar:

- Implementação de outras técnicas heurísticas para o mesmo problema, com o objetivo de comparar a eficiência entre os algoritmos propostos;
- Aprimoramento da eficiência do código desenvolvido, reduzindo o tempo necessário para convergência do sistema;
- Desenvolvimento de um método que, por meio da análise da disposição geográfica das demandas (clientes), defina ou sugira previamente a topologia mais adequada a ser utilizada para cada caso;
- Aprimoramento do processo de importação do mapa por meio do OSM, tornando esta etapa totalmente automática, dispensando a necessidade da tarefa de criação de um mapa sobreposto;
- Desenvolvimento de um método para inclusão de clientes por meio de uma interface gráfica, dispensando a necessidade de manipulação, por parte do usuário, de vetores matemáticos, tornando a ferramenta ainda mais simples e amigável;
- Implementação de uma versão do algoritmo que utilize um *software* livre.

REFERÊNCIAS

- [1] M. J. Barth, “Otimização multi-nível para projeto de redes híbridas (ópticas e sem fio) para implementação de cidades inteligentes,” em *Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos*, São Leopoldo, Brasil, 2016.
- [2] Cisco, “White Paper – The Zettabyte Era: Trends and Analysis,” Junho 2017. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>. [Acesso em Maio 2018].
- [3] FCC, “Household Broadband Guide,” FCE – Federal Communications Commission, 2017. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/research-reports/guides/household-broadband-guide>. [Acesso em Abril 2018].
- [4] M. Żotkiewicz e M. Mycek, “Impact of demand uncertainty models on FTTH network design,” em *18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, IEEE, Trento, Itália, p. 1-4, 2016.
- [5] S. C. N. Lopes, “Fibra Óptica na Rede de Acesso: Cenários de Evolução,” em *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletronica e Telecomunicações) – Universidade de Aveiro*, Aveiro, Portugal, 2011.
- [6] Anatel, “Brasil encerrou fevereiro de 2018 com 29,25 milhões de acessos em serviço na banda larga fixa,” ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações, 2018. [Online]. Available: <http://www.anatel.gov.br/dados/destaque-1/269-bl-acessos>. [Acesso em Abril 2018].
- [7] A. Elnashar, M. A. El-saidny e M. Sherif, “4G Advanced Features and Roadmap Evolutions from LTE to LTE-A,” em *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: A Practical Approach*, Chichester, Reino Unido: Wiley Telecom, p. 507-545, 2014.

- [8] M. Noes, “Recommendations for the Implementation of a Practical Spread Spectrum Communication System Robust Against Smart Jamming,” em *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, IEEE, Torino, Itália p. 209-214, 2017.
- [9] R. Jirachariyakool, N. Sra-ium e S. Lerkvaranyu, “Design and Implement of GPON-FTTH network for residential condominium,” em *14th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, IEEE, Nakhon Si Thammarat, Tailândia, p. 1-5, 2017.
- [10] T. Villalba, “Distribuição de Divisores de Potência em Redes Ópticas Passivas Utilizando Algoritmos Genéticos,” em *Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade de São Paulo*, São Carlos, Brasil, 2009.
- [11] M. Żotkiewicz, M. Mycek e A. Tomaszewski, “Profitable areas in large-scale FTTH network optimization,” em *Telecommunication Systems*, USA, Springer, vol. 61, n. 3, p. 591-608, 2016.
- [12] K. F. Poon, C. Andrej e A. Ouali, “Using Ant Colony Optimization to design GPON-FTTH networks with aggregating equipment,” em *IEEE Symposium on Computational Intelligence for Communication Systems and Networks (CICOMMS)*, IEEE, Singapura, p. 10-13, 2013.
- [13] T. Pehnelt e P. Lafata, “Optimizing of Passive Optical Network Deployment Using Algorithm with Metrics,” *Optics and Optoelectronics*, Ostrava, República Tcheca, vol. 15, n. 5, p. 866-876, 2018.
- [14] Y. Ruan, N. Anerousis, M. Srivatsa, J. Xiao, R. T. Christner, L. Farrolas e J. Short, “Measuring enterprise network usage pattern & deploying passive optical LANs,” em *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, IFIP/IEEE, Ottawa, Canadá, p. 890-893, 2015.
- [15] S. Milanovic, “Case Study for a GPON Deployment in the Enterprise,” em *Journal of Networks*, vol. 9, n. 1, p.42-47, 2014.

- [16] Nokia, “Passive optical LAN versus copper-based *Ethernet* – A Bell Labs financial analysis of the value of POL in a next-generation digital enterprise,” Setembro 2016. [Online]. Available: https://www.idgconnect.com/view_abstract/39344/passive-optical-lan-versus-copper-Ethernet. [Acesso em Maio 2018].
- [17] G. V. Arévaloa, R. C. Hincapiéb e R. Gaudino, “Optimization of multiple PON deployment costs and comparison between GPON, XGPON, NGPON2 and UDWDM PON,” *Optical Switching and Networking*, p. 80-90, 2017.
- [18] M. R. X. de Barros, S. M. Rossi, A. E. Reggiani, C. A. Hortêncio, J. G. D. Aguiar, D. C. Dini, P. C. L. d. Morais, M. L. C. Braga, M. R. Salvador, R. Bernardo, R. F. d. Silva, M. P. Mokarzel, R. A. Moreira e V. Corso, “Avaliação de topologia para redes GPON com distribuição assimétrica,” *CPqD Cadernos de Tecnologia*, São Paulo, Brasil, vol.3, n.2, p. 61-69, 2007.
- [19] J. M. Benzinho, “Avaliação Econômica de Redes FTTH em Diferentes Cenários Geográficos,” *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletronica e Telecomunicações) – Universidade de Aveiro*, Aveiro, Portugal, 2011.
- [20] M. Ramachandran e K. M. Sivalingam, “Power Efficient Resource Allocation Algorithms for Provisioning in SDH Networks,” em *9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, IEEE, Bangalore, India, p. 282-289, 2017.
- [21] S. Bindhaiq, A. S. M. Supa'at, N. Zulkifli, A. B. Mohammad, R. Q. Shaddad, M. A. Elmagzoub e A. Faisal, “Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2),” *Optical Switching and Networking*, vol. 15, p. 53–66, 2015.

- [22] A. D. D. S. Melo, “Análise Tecno-Econômica de Redes de Telecomunicações: Ferramentas Web,” em (*Mestrado em Engenharia de Eletrônica e Telecomunicações*) – *Universidade de Aveiro*, Aveiro, Portugal, 2013.
- [23] B. Yazar, O. Arslan, O. E. Karaşan e B. Y. Kara, “Fiber optical network design problems: A case for Turkey,” *Omega*, vol. 63, pp. 23-40, 2016.
- [24] F. J. Effenberger, K. McCammon e V. O'Byrne, “Passive optical network deployment in North America,” *Journal of Optical Networking*, vol. 6, n. 7, p. 808-818, 2007.
- [25] H. S. Abbas e M. A. Gregory, “The next generation of passive optical networks: A review,” em *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 67, p. 53-74, 2016.
- [26] L. P. Dias, G. L. J. Assis, A. F. Santos e K. D. R. Assis, “Redes Ópticas Passivas: Uma Nova Alternativa para as Redes Locais LAN,” *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, Campina Grande, Brasil, vol. 7, n. 2, p. 54-60, 2017.
- [27] “PON – Passive Optical Network,” [Online]. Available: <http://www.infocellar.com/networks/new-tech/PON/PON-real.htm>. [Acesso em Abril 2018].
- [28] B. Jaumard, S. Song e R. Chowdhury, “Design and dimensioning of hybrid PONs,” *Photonic Network Communication*, vol. 31, n.3, p. 466-482, 2016.
- [29] T. Tashiro, S. Kuwano, J. Terada, T. Kawamura e N. Tanaka, “A Novel DBA Scheme for TDM-PON based Mobile Fronthaul,” em *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, IEEE, San Francisco, USA, p. 1-3, 2014.
- [30] K. Grobe e J. Elbers, “PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, n.1, 2008.
- [31] FS.COM, “Do You Know All These Terminologies of WDM Technology?,” FS.COM, 2015. [Online]. Available: <http://community.fs.com/blog/do-you-know-all-these-terminologies-of-wdm-technology.html>. [Acesso em Maio 2018].

- [32] J. Salgado, R. Zhao, N. Monteiro e W. Fisher, “Novas Tecnologias e Soluções FTTH – A White Paper by the Deployment & Operations Committee, Fibre to the Home Council Europe,” Agosto 2015. [Online]. Available: http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/DandO_White_Paper_2015_2_P.pdf. [Acesso em Maio 2018].
- [33] ITU-T, “Recommendation G.989 : 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements,” ITU Telecommunication Standardization, Maio 2016. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.989-201510-I/en>. [Acesso em Maio 2018].
- [34] ITU-T, “Recommendation G.984.1 : Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics,” ITU Telecommunication Standardization Sector, Março 2003. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>. [Acesso em Maio 2018].
- [35] ITU-T, “Recommendation G.987.1 : 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems,” ITU Telecommunication Standardization Sector, Janeiro 2010. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987/en>. [Acesso em Maio 2018].
- [36] K. Wang, A. Gavler, C. M. Machuca, L. Wosinka, K. Brunnstrom e J. Chen, “Migration Strategies for FTTx Solutions Based on Active Optical Network,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, n. 2, p. 78-85, 2016.
- [37] P. S. Marin, *Cabeamento Estruturado – Desvendando cada passo: do projeto à instalação*, São Paulo, Brasil: Editora Érica, 2010.
- [38] APOLAN, “How Passive Optical LANs are Enlightening. Association for passive optical LAN,” Association for Passive Optical LAN, 2015. [Online]. Available: <http://apolanglobal.org/resources/white-papers/>. [Acesso em Maio 2018].

- [39] I. Keene e M. Fabbi, “Passive Optical LAN: Determine if it's suitable for Your LAN Infrastructure,” Gartner, Fevereiro 2016. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/doc/3203024/passive-optical-lan-determine-suitable>. [Acesso em Maio 2018].
- [40] FTTH Council, “FTTH Handbook ed. 8,” Fibre to the Home – Council Europe, Fevereiro 2018. [Online]. Available: <http://www.ftthcouncil.eu/EN/home/forms/form-handbook>. [Acesso em 2018 Maio].
- [41] C. O. C. Arbieto, “Alocação Dinamica de Largura de Banda em Redes PON,” em *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica: Telecomunicações) – Universidade de São Paulo*, São Carlos, Brasil, 2007.
- [42] J. Prat, "Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research Towards Unlimited Bandwidth Access", Springer Science & Business Media, vol. 5, 2008.
- [43] Commscope, “White Paper – Key technical decisions when planning fiber-to-the-home networks,” Commscope, Fevereiro 2017. [Online]. Available: https://www.commscope.com/Docs/Key_Technical_Decisions_When_Planning_FTTH_WP-110969-EN.pdf. [Acesso em Maio 2018].
- [44] OpenStreetMap, “OSM Contributors,” OpenStreetMap Foundation, [Online]. Available: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Contributors>. [Acesso em Maio 2018].
- [45] OpenStreetMap, “Copyright and License,” OpenStreetMap Foundation, [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org/copyright/en>. [Acesso em Maio 2018].
- [46] OpenStreetMap, “Cidades Mapeadas – Bahia,” OpenStreetMap Foundation, [Online]. Available: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Bahia#Cidades_bem_Mapeadas. [Acesso em Maio 2018].

- [47] ITU-T, “Recommendation G.671 : Transmission characteristics of optical components and subsystems,” ITU Telecommunication Standardization Sector, Fevereiro 2012. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.671/en>. [Acesso em Maio 2018].
- [48] J. H. Holland, “Genetic algorithms,” *Scientific American*, vol. 267, n. 1, p. 66-73, 1992.
- [49] P. Kumar, “Optimization of Optical Network using Genetic Algorithm,” *International Journal of Photonics and Optical Technology* , vol. 2, n. 1, p. 5-8, 2016.
- [50] X. Cheng, L. Feng, F. Zhou, P. Yu e W. Li, “Coverage-Oriented PON Planning with LTE Networks Deployed for Power Distribution Communication Network,” em *16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, IEEE, Wuzhen, China, p. 1-3, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Descrição completa dos materiais e serviços considerados nos projetos de rede de acesso PON

Este apêndice descreve, de maneira detalhada, os principais materiais e serviços considerados pelo sistema computacional proposto para solução de planejamento de redes GPON. Para o custo dos materiais, utilizou-se valores comumente praticados no mercado nacional de telecomunicações. Para a categoria de serviços de instalação e montagem, foram realizadas cotações com quatro diferentes empresas de Salvador-BA que prestam esses serviços, e obteve-se o valor final fazendo uma média aritmética. Todos os valores foram obtidos em 03/2018 e estão em reais (R\$).

Tabela Apêndice – Descrição completa dos materiais e serviços utilizados no sistema computacional proposto.

(Continua)

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E SERVIÇOS – REDE ÓPTICA GPON								
Categoria	Categoria – Tipo	ITEM	DESCRIÇÃO	REF	FABRICANTE	UND	R\$ UNIT.	ID MATLAB
Categoria 1	Cabos	01	CABO ÓPTICO DROP FIG.8 FTTH SM 02F COG PR	17042026	FURUKAWA	m	0,91	cabo_2F
		02	CABO ÓPTICO CFOA-SM-AS80 MINI-RA 12F NR	17045113	FURUKAWA	m	1,89	cabo_12F
		03	CABO ÓPTICO CFOA-SM-AS80-G 48F NR (ABNT)	17040049	FURUKAWA	m	5,61	cabo_48F
		04	CABO ÓPTICO CFOA-SM-AS80-G 144F NR (ABNT CL)	17040172	FURUKAWA	m	15,44	cabo_144F
Categoria 2	Equipamentos Passivos ODN – PON	05	FK-CTO-16MCII - CX TERM. OPTICA CONECT. - 1 BAND. EMENDA, 1 BAND. C/ 8 ADAP. SC-APC, 1 SPLITTER 1X8 NC/SC-APC	35520094	FURUKAWA	pç	347,82	fdh_1x8
		06	FK-CTO-16MCII - CX TERM. OPTICA CONECT. - 1 BAND. EMENDA, 1 BAND. C/ 16 ADAP. SC-APC, 1 SPLITTER 1X16 NC/SC-APC	35520167	FURUKAWA	pç	479,32	fdh_1x16
		07	OUTDOOR FDH 3000 MEDIUM (1 BANDEJA EMENDA, 1 BANDEJA C/ 32 ADAPTADORES SC-APC, 1 SPLITTER 1X32 NC/SC-APC)	310090.2-AE	COMSCOPE	pç	885,50	fdh_1x32
		08	OUTDOOR FDH 3000 MEDIUM (2 BANDEJA EMENDA, 1 BANDEJA C/ 64 ADAPTADORES SC-APC, 1 SPLITTER 1X64 NC/SC-APC)	310090.2-AE	COMSCOPE	pç	1.185,50	fdh_1x64
		09	FK-CEO-4M-144F (24F) (CONJUNTO DE EMENDA ÓPTICA AÉREO/SUBTERRANEO)	35520090	FURUKAWA	pç	252,98	ceo_144
		10	BANDEJA DE EMENDA 24F PARA FK-CEO	35520025	FURUKAWA	pç	21,05	band_ceo
		11	DIVISOR DE SINAL ÓPTICO PLC 1X4 G.657A NC/NC 2M/2M	35505000	FURUKAWA	pç	46,20	sp_1x4
		12	DIVISOR DE SINAL ÓPTICO PLC 1X8 G.657A NC/NC 2M/2M	35505001	FURUKAWA	pç	45,76	sp_1x8
Categoria 3	Acessórios Infraestrutura (ODN – Aérea)	13	PLAQUETA DE IDENTIFICAÇÃO	A121		pç	0,70	plaq_de_id
		14	KIT DE FERRAGENS PARA POSTE	-		pç	10,50	kit_de_ferr
		15	RESERVA TÉCNICA PARA CABOS ÓPTICOS EM ALUMINIO - OPTI LOOP	-		pç	59,90	reser_tec
Categoria 4	Custo – OLT GPON	16	SR30A/48V C/2UNID UR15A/48V 8100W - SR30A 8100W (RETIFICADOR)	57500320	PROTECO	pç	12.000,00	olt_1
		17	CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO GPON FK-OLT-G2500 (COM CAPACIDADE MAX PARA ATÉ 40 PORTAS PON)	35510205	FURUKAWA	pç	6.974,29	olt_2
		18	MÓDULO DE SWITCH E GERENCIAMENTO PARA CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO FK-OLT-G2500	35510206	FURUKAWA	pç	7.564,32	olt_3
		19	MÓDULO SFP GE LX10 1310 NM (10 KM) PARA CONCENTRADOR ÓPTICO	35510268	FURUKAWA	pç	76,22	olt_4
		20	MÓDULO DE UPLINK 2 PORTAS 10GE + 4 PORTAS GE SFP P/ CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO GPON 7U	35510185	FURUKAWA	pç	3.714,57	olt_5
		21	MÓDULO DE SERVIÇO 4 PORTAS GPON SFP PARA CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO GPON 7U	35510187	FURUKAWA	pç	5.632,96	olt_6
		22	TRANSCIVER SFP GPON OLT CLASSE B+ PARA CONCENTRADOR ÓPTICO	35510197	FURUKAWA	pç	412,41	olt_7
		23	FONTE DE ALIMENTAÇÃO DC PARA CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO GPON 7U	35510181	FURUKAWA	pç	1.282,04	olt_8

(Conclusão)

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E SERVIÇOS - REDE ÓPTICA GPON								
Categoria	Tipo	ITEM	DESCRIÇÃO	REF	FABRICANTE	UND	R\$ UNIT.	ID MATLAB
Categoria 5	Componentes e Acessórios – POP GPON	24	CORDÃO MONOFIBRA CONECTORIZADO BLI A/B G-657A SC-APC/SC-UPC 2.5M - LSZH - BRANCO - D3	33001097	FURUKAWA	pç	16,19	cord_con2
		25	RACK PISO 44UX870MM PRETO	RSE44	TRIUNFO	pç	2.800,00	rack_44u
		26	KIT 02 EXAUSTORES TETO PARA RACK PISO	10010	HI-TOP	pç	168,18	kit_ex_rack
		27	EXTENSÃO ÓPTICA CONECTORIZADA SM (KIT 12F BLI A/B G-657A SC-APC D0.9 ABNT ADAPTADOR COM SHUTTER ANGULAR)	35250045	FURUKAWA	pç	113,96	ext_dio
		28	DIO B144 - MÓDULO BÁSICO	35265051	FURUKAWA	pç	816,03	dio_144a
		29	KIT BANDEJA DE EMENDA STACK 36F	35265050	FURUKAWA	pç	50,88	dio_144b
		30	DIO BT 48 24F SM SC-APC - ABNT	35260493	FURUKAWA	pç	634,39	dio_48a
		31	KIT BANDEJA DE EMENDA STACK 24F	35260424	FURUKAWA	pç	37,58	dio_48b
		32	PATCH PANEL MODULAR LGX	35050806	FURUKAWA	pç	56,66	pp_mod
		33	SPLITTER ÓPTICO MODULAR LGX 1X2 50/50 G.657A SC-APC/SC-APC	35500159	FURUKAWA	pç	163,48	sp_1x2c
		Categoria 6	Equipamentos Cliente – GPON	34	CONECTORES ÓPTICOS DE CAMPO SM SC-APC EZI CONNECTOR PARA CABOS FLAT 1.6X2MM E 3X2MM	35400050	FURUKAWA	pç
35	U/UTP CAT.6 COOPER PATCH CORD GIGALAN			35123302	FURUKAWA	pç	15,99	patch_cor
36	CORDÃO MONOFIBRA CONECTORIZADO BLI A/B G-657A SC-APC/SC-APC 2.5M - LSZH - BRANCO - D3			33006401	FURUKAWA	pç	15,37	cord_con1
37	ADAPTADORES ÓPTICOS 01F SM SC-APC - VERDE			35260414	FURUKAWA	pç	1,89	adap_conec
38	PTO 2F (PONTO DE TERMINAÇÃO ÓPTICA 2 FIBRAS)			35250162	FURUKAWA	pç	12,73	pto_2f
39	ONT GPON FK-ONT-G421W	35510133	FURUKAWA	pç	680,92	ont_gpon		
Categoria 7	Serviços	40	CUSTO POR METRO INSTALADO DE CABO ÓPTICO	-	-	und	2,38	serv_cab
		41	CUSTO UNITÁRIO DE SERVIÇO DE FUSÃO	-	-	und	43,75	serv_fus
		42	CUSTO UNITÁRIO DE SERVIÇO DE FUSÃO MECANICA	-	-	und	22,50	serv_fusm
		43	CUSTO MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE CAIXA DE EMENDA	-	-	und	426,25	serv_ceo
		44	CUSTO INSTALAÇÃO FDH	-	-	und	755,00	serv_fdh
		45	CUSTO DE CERTIFICAÇÃO POR FIBRA	-	-	und	31,67	serv_cert
		46	CUSTO MONTAGEM E ARRUMAÇÃO DO RACK 42U	-	-	und	1.350,00	serv_rack
		47	CUSTO INSTALAÇÃO DE PTO E ONT	-	-	und	45,00	serv_pto_ont
48	CUSTO INSTALAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DE CADA PLACA PON E OLT	-	-	und	3.350,00	serv_olt		

ANEXOS

ANEXO A – Imagens dos materiais considerados nos projetos de rede de acesso PON

CATEGORIA 1: CABOS



01 - CABO ÓPTICO DROP
FIG.8 FTTH SM 02F COG PR



02 - CABO ÓPTICO CFOA-SM-
AS80 MINI-RA 12F NR



03 - CABO ÓPTICO CFOA-SM-
AS80-G 48F NR (ABNT)



04 - CABO ÓPTICO CFOA-SM-
AS80-G 144F NR (ABNT CL)

CATEGORIA 2: EQUIPAMENTOS PASSIVOS – ODN PON



05 - FK-CTO-16MCII - CAIXA
TERMINAL OPTICA CONEC-
TORIZADA - 1 BANDEJA
EMENDA, 1 BANDEJA C/ 8
ADAPTADORES SC-APC, 1
SPLITTER 1X8 NC/SC-APC



06 - FK-CTO-16MCII - CAIXA
TERMINAL OPTICA CONEC-
TORIZADA - 1 BANDEJA
EMENDA, 1 BANDEJA C/ 16
ADAPTADORES SC-APC, 1
SPLITTER 1X16 NC/SC-APC



07 - OUTDOOR FDH 3000
SMALL (COM 2 BANDEJA
EMENDA, 1 BANDEJA C/ 32
ADAPTADORES SC-APC, 1
SPLITTER 1X32 NC/SC-APC)



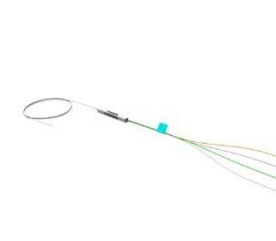
08 - OUTDOOR FDH 3000 ME-
DIUM (COM 4 BANDEJA
EMENDA, 1 BANDEJA C/ 64
ADAPTADORES SC-APC, 1
SPLITTER 1X64 NC/SC-APC)



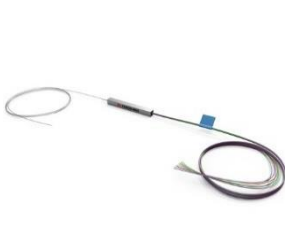
09 - FK-CEO-4M-144F (24F)
(CONJUNTO DE EMENDA ÓP-
TICA AÉREO/SUBTERRA-
NEO)



10 - BANDEJA DE EMENDA
24F PARA FK-CEO



11 - DIVISOR DE SINAL ÓP-
TICO PLC 1X4 G.657A NC/NC
2M/2M



12 - DIVISOR DE SINAL ÓP-
TICO PLC 1X8 G.657A NC/NC
2M/2M

CATEGORIA 3: ACESSÓRIOS INFRAESTRUTURA – ODN AÉREA



13 - PLAQUETA DE IDENTIFICAÇÃO PARA CABOS



14 - KIT DE FERRAGENS PARA POSTE



15 - RESERVA TÉCNICA PARA CABOS ÓPTICOS EM ALUMÍNIO - OPTI LOOP

CATEGORIA 4: CUSTO OLT – GPON



16 - SR30A/48V C/2UNID UR15A/48V 8100W - SR30A 8100W (RETIFICADOR)



17 - CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO GPON FK-OLT-G2500 (COM CAPACIDADE MAX PARA ATÉ 40 PORTAS PON)



18 - MÓDULO DE SWITCH E GERENCIAMENTO PARA CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO FK-OLT-G2500



19 - MÓDULO SFP GE LX10 1310 NM (10 KM) PARA CONCENTRADOR ÓPTICO



20 - MÓDULO DE UPLINK 2 PORTAS 10GE + 4 PORTAS GE SFP P/ CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO GPON 7U



21 - MÓDULO DE SERVIÇO 4 PORTAS GPON SFP PARA CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO GPON 7U

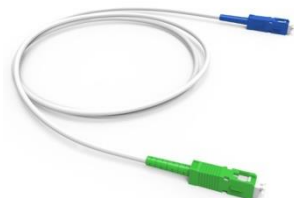


22 - TRANSCEIVER SFP GPON OLT CLASSE B+ PARA CONCENTRADOR ÓPTICO



23 - FONTE DE ALIMENTAÇÃO DC PARA CHASSI CONCENTRADOR ÓPTICO GPON 7U

CATEGORIA 5: COMPONENTES E ACESSÓRIOS – POP GPON



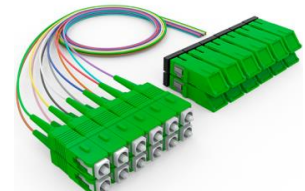
24 - CORDÃO MONOFIBRA CONECTORIZADO BLI A/B G-657A SC-APC/SC-UPC 2.5M - LSZH - BRANCO - D3



25 - RACK PISO 44UX870MM PRETO



26 - KIT 02 EXAUSTORES TETO PARA RACK PISO



27 - EXTENSÃO ÓPTICA CONECTORIZADA SM (KIT 12F BLI A/B G-657A SC-APC D0.9 ABNT ADAPTADOR COM SHUTTER ANGULAR)



28 - DIO B144 - MÓDULO BÁSICO



29 - KIT BANDEJA DE EMENDA STACK 36F



30 - DIO BT 48 24F SM SC-APC - ABNT



31 - KIT BANDEJA DE EMENDA STACK 24F



32 - PATCH PANEL MODULAR LGX



33 - *SPLITTER* ÓPTICO MODULAR LGX 1X2 50/50 G.657A SC-APC/SC-APC

CATEGORIA 6: EQUIPAMENTOS CLIENTES – GPON



34 - CONECTORES ÓPTICOS DE CAMPO SM SC-APC EZ! CONECTOR PARA CABOS FLAT 1.6X2MM E 3X2MM



35 - U/UTP CAT.6 CORDÃO DE MANOBRA GIGALAN



36 - CORDÃO MONOFIBRA CONECTORIZADO BLI A/B G-657A SC-APC/SC-APC 2.5M - LSZH - BRANCO - D3



37 - ADAPTADORES ÓPTICOS 01F SM SC-APC - VERDE



38 - PTO 2F (PONTO DE TERMINAÇÃO ÓPTICA 2 FIBRAS)



39 - ONT GPON FK-ONT-G421W