



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**FERRAMENTA PARA PROJETO DE REDES
ÓPTICAS PASSIVAS (PON)**

Leonardo Silveira Levay

Brasília, agosto de 2013.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FERRAMENTA PARA PROJETO DE REDES ÓPTICAS
PASSIVAS (PON)

Leonardo Silveira Levay

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento
de Engenharia Elétrica, como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Banca Examinadora

Darli Augusto de Arruda Mello, ENE/UnB
Orientador

Anderson Clayton Alves Nascimento, ENE/UnB
Examinador Interno

Paulo Eduardo Kapp, Telebras
Examinador Externo

FICHA CATALOGRÁFICA

LEVAY, LEONARDO SILVEIRA

Ferramenta para projeto de redes ópticas passivas (PON) [Distrito Federal] 2013.

xv, 76p. 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, 2013).

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Telecomunicações

2. Redes de Acesso

3. Projeto de Redes

4. Redes Ópticas Passivas (PON)

I. ENE/FT/UNB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEVAY, L. S. (2013). Ferramenta para projeto de redes ópticas passivas (PON). Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Leonardo Silveira Levay

TÍTULO: Ferramenta para projeto de redes ópticas passivas (PON)

GRAU: Engenheiro Eletricista.

ANO: 2013.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Leonardo Silveira Levay
Brasília – DF – Brasil



AGRADECIMENTOS

Ao Criador;

Aos pais, Mercia e Leonardo, aos irmãos, Alessandra e Vinícius e à família, pois ela está acima de tudo;

Aos amigos do curso de Engenharia Elétrica, pois só eles sabem a caminhada para chegar até aqui;

Aos amigos da Enetec, da Concentro e de todo o Movimento Empresa Júnior, pois conhecê-los fez toda a diferença;

Aos amigos do Ensino Médio, pois a nossa amizade se fortaleceu com o tempo;

Ao meu orientador, professor Darli, pela oportunidade e pela persistência;

Aos engenheiros que se dedicaram a projetos anteriores e tornaram possível este trabalho;

À Universidade de Brasília, por abrir as portas da minha carreira.

Leonardo Silveira Levay

*A good scientist is a person with original ideas.
A good engineer is a person who makes a design that works
with as few original ideas as possible.
There are no prima donnas in engineering.*

Freeman Dyson

RESUMO

As inovações tecnológicas surgidas nos últimos anos impulsionaram a criação de novos mercados e serviços. Novas estratégias vêm sendo adotadas para as redes de acesso e, dentre as mais proeminentes, estão as Redes Ópticas Passivas (PON). Baseadas em fibra óptica e utilizando divisores de potência não alimentados por energia elétrica, essas redes são uma alternativa economicamente viável. Uma etapa complexa no projeto dessas redes envolve a determinação do posicionamento dos equipamentos e dos cabos de fibra óptica. O objetivo desse trabalho é propor uma solução para esse problema. A ferramenta desenvolvida envolve um sistema de mapas, algoritmos de posicionamento de equipamentos, algoritmos de agrupamento e de caminhos de fibras. Com ela, é possível projetar uma rede visando minimizar os custos com equipamentos e fibras e que atenda aos requisitos do usuário. Um estudo de caso na cidade de Bonito-MS foi realizado a fim de demonstrar a ferramenta e comparar seu desempenho a estudos anteriores.

Palavras-chave: Telecomunicações; Fibra Óptica; Redes Ópticas; Redes de Acesso; Redes Ópticas Passivas (PON); Projeto de Redes; Planejamento de Redes.

ABSTRACT

The technological innovations that have arisen in recent years spurred the creation of new markets and services. New strategies have been adopted regarding access networks and among the technologies that are more prominent, there are the Passive Optical Networks (PON). Optical fiber-based and using power splitters not driven by electricity, these networks are an economically viable alternative. A complex step in the design of such networks involves determining the placement of equipment and optical fiber cables. The aim of this work is to propose a solution to the problem. The tool developed here involves a map system, equipment positioning algorithms, clustering algorithms and fiber paths plotting. With the tool, it possible to design a network aiming at cost minimization with equipment and fibers and also meeting the requirements of the user. A case study in the city of Bonito-MS, in Brazil, was performed in order to demonstrate the tool and compare the results with previous studies.

Keywords: Telecommunications; Optical Fiber; Optical Networks; Access Networks; Passive Optical Networks (PON); Network design; Network planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Exemplo de cabo de par trançado. [2]	2
Figura 1.2	Exemplo de <i>modem</i> DSL. [3]	2
Figura 1.3	Exemplo de um sistema CATV. [4]	5
Figura 1.4	Tráfego IP Global. [5]	7
Figura 1.5	CO, OLT, <i>splitters</i> e ONUs dispostas na rede.....	9
Figura 1.6	Esquema simplificado de uma rede PON TDM.	10
Figura 1.7	Esquemas de diferentes topologias de redes PON.....	11
Figura 3.1	Usuários registrados no <i>OpenStreetMap</i> . [12]	16
Figura 3.2	Exemplo de grafo simples.	18
Figura 3.3	Exemplo de problema do caixeiro-viajante. [17]	19
Figura 3.4	Exemplo de árvore com clusterização hierárquica.	21
Figura 4.1	Tela de edição de mapas do programa JOSM.	22
Figura 4.2	Criação/edição de um mapa a partir de uma imagem de satélite (<i>Bing Sat</i>). 23	
Figura 4.3	Representação visual de uma matriz de conectividade.	24
Figura 4.4	Exemplo de mapa plotado a partir da matriz de distâncias	25
Figura 4.5	Exemplo de mapa plotado com todos os nós identificados.	26
Figura 4.6	Exemplo de mapa com a OLT e as ONUs posicionadas.....	27
Figura 4.7	Exemplo de dendograma.	29
Figura 4.8	Exemplo de um agrupamento com sete grupos.	30
Figura 4.9	Ponto de corte da árvore de hierarquização.....	31
Figura 4.10	Exemplo com os <i>splitters</i> de 2º nível posicionados e os caminhos das fibras desenhados sobre o mapa.	33
Figura 4.11	Exemplo com 4 grupos de <i>splitters</i> de 2º nível.	34
Figura 4.12	Exemplo mostrando a posição dos <i>splitters</i>	35
Figura 4.13	Exemplo com 3 cabos partindo da OLT.....	37

Figura 4.14	Rede finalizada pela ferramenta.	39
Figura 5.1	Marca do Programa Cidades Digitais. [21]	41
Figura 5.2	Mapa de Bonito-MS com os pontos de atendimento.....	43
Figura 5.3	Mapa bruto de Bonito-MS, extraído do <i>OpenStreetMap</i>	44
Figura 5.4	Mapa de Bonito-MS editado utilizado no projeto.	44
Figura 5.5	Mapa de Bonito-MS importado para o MATLAB.	45
Figura 5.6	OLT e ONUs marcadas no mapa do MATLAB.....	46
Figura 5.7	Dendograma com as ONUs agrupadas.....	47
Figura 5.8	Variação do comprimento máximo do cabo <i>drop</i>	48
Figura 5.9	Comparação da aproximação com o resultado esperado.....	49
Figura 5.10	Mapa com os <i>splitters</i> posicionados.....	50
Figura 5.11	Quantidade de <i>splitters</i> x Comprimento total de fibra (km).....	51
Figura 5.12	Dendograma dos <i>splitters</i> de 2º nível.	52
Figura 5.13	Grupos de <i>splitters</i> de 2º nível.....	53
Figura 5.14	OLT, <i>splitters</i> de 1º nível e as direções das fibras mestre.	54
Figura 5.15	Caminhos das fibras mestre sobre o mapa.....	54
Figura 5.16	Agrupamentos de <i>splitters</i> de 1º nível.....	55
Figura 5.17	Agrupamento melhorado.	56
Figura 5.18	Rede finalizada com OLT, <i>splitters</i> e caminhos das fibras.	58
Figura 5.19	Dendograma dos <i>splitters</i> de 2º nível.	60
Figura 5.20	Grupos de <i>splitters</i> de 2º nível.....	60
Figura 5.21	OLT, <i>splitters</i> de 1º nível e as direções das fibras mestre.	61
Figura 5.22	Caminhos das fibras mestre sobre o mapa.....	62
Figura 5.23	Agrupamentos de <i>splitters</i> de 1º nível.....	63
Figura 5.24	Agrupamento melhorado.	63
Figura 5.25	Rede finalizada com OLT, <i>splitters</i> e caminhos das fibras.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Resumo do desempenho das principais tecnologias de DSL [1].....	3
Tabela 1.2	Velocidade de transmissão em diferentes protocolos DOCSIS [1].....	5
Tabela 5.1	Pontos de atendimento em Bonito-MS [11]	42
Tabela 5.2	Desempenho médio da ferramenta	66
Tabela 5.3	Comparação de resultados entre os dois trabalhos	67
Tabela 6.1	Resultados da simulação do 1º projeto	70
Tabela 6.2	Resultados da simulação do 2º projeto	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASDL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
BSD	<i>Berkeley Software Distribution</i>
CATV	<i>Community Access Television</i> ou <i>Community Antenna Television</i>
CO	<i>Central Office</i>
DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specification</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
ESnet	<i>Energy Sciences Network</i>
FSAN	<i>Full Service Access Network</i>
FTTC	<i>Fiber-to-the-curb</i>
FTTH	<i>Fiber-to-the-home</i>
FTTx	<i>Fiber-to-the-x</i>
GB	Gigabytes
Gbps	Gigabits por segundo
GHz	Gigahertz
GPS	<i>Global Positioning System</i>
H	Hora
HDSL	<i>High-Bit-Rate Digital Subscriber Line</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Número de Identificação
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
JOSM	<i>Java OpenStreetMap Editor</i>
Kbps	Quilobits por segundo
KHz	Quilohertz
Km	Quilômetro
KML	<i>Keyhole Markup Language</i>
M	Metro
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
Mbps	Megabits por segundo
MHz	Mega-hertz
MS	Mato Grosso do Sul
MSDSL	<i>Multi-Rate Symmetric Digital Subscriber Line</i>
NTT	<i>Nippon Telegraph and Telephone Corporation</i>

OLT	<i>Optical Line Termination ou Optical Line Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
P2MP	<i>Point-to-Multipoint</i>
P2P	<i>Point-to-Point</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PNBL	Programa Nacional de Banda Larga
PON	<i>Passive Optical Network</i>
RADSL	<i>Rate-Adaptive Digital Subscriber Line</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
REID	Rede Estadual de Inclusão Digital
RF	Radiofrequência
RT	<i>Remote Terminal</i>
SDSL	<i>Symmetric Digital Subscriber Line</i>
TDM	<i>Time-Division Multiplexing</i>
TV	Televisão
VDSL	<i>Very-High-Bit-Rate Digital Subscriber Line</i>
VoD	<i>Video on Demand</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
XLSX	Excel Binary File Format
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - TECNOLOGIAS DE ACESSO TRADICIONAIS	2
1.1.1 - Digital Subscriber Line (DSL)	2
1.1.2 - Cabo Modem	3
1.2 - TECNOLOGIAS DE ACESSO COM FIBRA ÓPTICA	5
1.3 - CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS.....	6
1.4 - VISÃO GERAL DE REDES PON	8
1.5 - TOPOLOGIAS DE REDES PON	10
1.6 - OBJETIVOS DO TRABALHO.....	12
2 - TRABALHOS ANTERIORES	13
3 - TÉCNICAS PARA PROJETO DE REDES PON.....	15
3.1 - SISTEMAS CARTOGRÁFICOS.....	15
3.2 - ALGORITMOS DE MENOR CAMINHO	17
3.3 - PROBLEMA DO CAIXEIRO-VIAJANTE	19
3.4 - AGRUPAMENTO (CLUSTERIZAÇÃO).....	20
3.5 - LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO.....	21
4 - PROPOSTA DE FERRAMENTA.....	22
4.1 - ENTRADAS DE DADOS DO PROJETO	22
4.1.1 - Criação e edição de mapas	22
4.1.2 - Importação dos mapas.....	24
4.1.3 - Posicionamento de OLT e ONUs	26
4.2 - PROJETO DA REDE PON	28
4.2.1 - Agrupamento de ONUs	28
4.2.2 - Posicionamento de <i>splitters</i> de 2º nível	31
4.2.3 - Agrupamento de <i>splitters</i> de 1º nível	33

4.2.4 - Posicionamento de <i>splitters</i> de 1º nível	34
4.2.5 - Determinação dos caminhos das fibras mestres.....	36
4.2.6 - Reagrupamento de <i>splitters</i> de 1º nível.....	37
4.2.7 - Finalização do projeto	38
5 - ESTUDO DE CASO	41
5.1 - ASPECTOS DEMOGRÁFICOS	41
5.2 - DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE ATENDIMENTO	42
5.3 - CRIAÇÃO E IMPORTAÇÃO DO MAPA.....	43
5.4 - POSICIONAMENTO DE ONUS	45
5.5 - AGRUPAMENTO DE ONUS.....	46
5.6 - POSICIONAMENTO DE <i>SPLITTERS</i> DE 2º NÍVEL.....	49
5.7 - <i>SPLITTERS</i> DE 1º NÍVEL E FIBRAS MESTRE.....	50
5.8 - CASO 1: 6 <i>SPLITTERS</i> DE 1º NÍVEL E 4 CABOS NA SAÍDA DA OLT.....	52
5.8.1 - Agrupamento e posicionamento de <i>splitters</i> de 1º nível.....	52
5.8.2 - Determinação dos caminhos das fibras mestre	53
5.8.3 - Reagrupamento de <i>splitters</i> de 1º nível.....	55
5.8.4 - Finalização do projeto	56
5.8.5 - Análise do projeto	58
5.9 - CASO 2: 11 <i>SPLITTERS</i> DE 1º NÍVEL E 5 CABOS NA SAÍDA DA OLT....	59
5.9.1 - Agrupamento e posicionamento de <i>splitters</i> de 1º nível.....	59
5.9.2 - Determinação dos caminhos das fibras mestre	61
5.9.3 - Reagrupamento dos <i>splitters</i> de 1º nível.....	62
5.9.4 - Finalização do projeto	64
5.9.5 - Análise do projeto	65
5.10 - CONSIDERAÇÕES SOBRE DESEMPENHO.....	65
5.11 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	67

6 - CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 - INTRODUÇÃO

A indústria de comunicações ópticas vem passando por uma grande revitalização com os novos serviços que demandam altas taxas de banda e disponibilidade como vídeo sob demanda em alta definição, jogos *on-line* e trocas de arquivos P2P. Após mais de 20 anos de pesquisas, redes de acesso baseadas em equipamentos ópticos passivos finalmente começaram a se tornar realidade e, cada vez mais, são vistas como soluções viáveis pelas operadoras no Brasil e no mundo.

As redes de acesso, também chamadas de redes de última milha, são assim denominadas porque são responsáveis por prover a conexão entre o escritório central da operadora e o usuário final. Por muitos anos, estas redes foram montadas quase que exclusivamente sob uma infraestrutura de elementos metálicos, como o par trançado ou o cabo coaxial. Ocasionalmente, tecnologias de rádio também são usadas para prover tal acesso. Tecnologias baseadas em fibra óptica foram tradicionalmente destinadas a redes de *backbone*, devido a sua altíssima banda, disponibilidade e alto custo. Apesar de ser vista como a tecnologia de acesso do futuro há muito tempo, somente nos últimos anos viu-se a utilização de fibra óptica em redes de acesso.

Redes de telecomunicações se desenvolveram e cresceram voltadas para serviços de comunicações de voz analógica. Durante muito tempo, 4 kHz era a banda necessária para conectar os usuários e, por isso, operadoras de telefonia encheram as cidades com cabos de par trançado, otimizados para comunicação nessa banda. O fator relevante para digitalização das telecomunicações e, conseqüentemente, evolução das redes, foi a *Internet*. Surgida na década de 60 e dedicada durante anos a fins acadêmicos, somente na década de 90 viu-se a popularização da *World Wide Web*. Com ela, surgiram serviços de DSL (xDSL), ainda baseados em par trançado, CATV, baseados em cabos coaxiais e, finalmente, serviços baseados em fibra óptica.

1.1 - TECNOLOGIAS DE ACESSO TRADICIONAIS

1.1.1 - Digital Subscriber Line (DSL)

Digital Subscriber Line (DSL ou xDSL) compreende uma coleção de tecnologias de comunicação digital baseadas em infraestrutura de cabos de par trançado. Elas fazem uso do espectro de frequências mais alto para transmissão de dados, com geralmente 25 a 160 kHz para o canal de *upstream* e 240 a kHz a 1.5 MHz para o canal de *downstream* [1]. A qualidade da transmissão está diretamente relacionada à qualidade dos elementos da rede e as diferentes variações de tecnologias DSL surgiram visando explorar ao máximo a capacidade. A transmissão ocorre em uma banda ponto-a-ponto dedicada entre a operadora e o usuário. Além do meio de transporte de dados (o cabo de par trançado), também são necessários um *modem* DSL de acesso por usuário e um filtro para separar o sinal de dados e de telefonia. A Figura 1.1 ilustra um cabo de par trançado e a Figura 1.2 ilustra um *modem* DSL, ambos disponíveis no mercado.

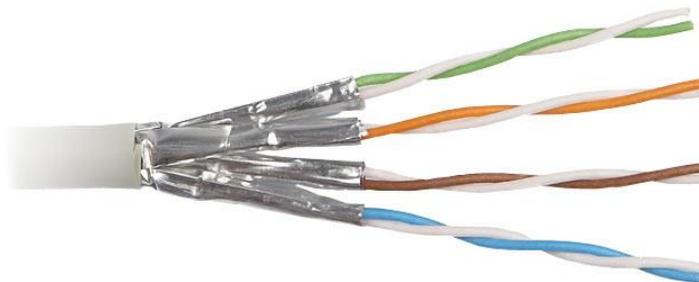


Figura 1.1 Exemplo de cabo de par trançado. [2]



Figura 1.2 Exemplo de *modem* DSL. [3]

A Tabela 1.1 resume alguns parâmetros de desempenho de tecnologias baseadas em DSL.

Tabela 1.1 Resumo do desempenho das principais tecnologias de DSL [1]

Tipo de DSL	Velocidade Máxima		Máxima distância de transmissão
	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>	
<i>ASDL</i>	8 Mbps	800 kbps	5 500 m
<i>HDSL</i>	1,54 Mbps	1,54 Mbps	3 650 m
<i>MSDSL</i>	2 Mbps	2 Mbps	10 700 m
<i>RADSL</i>	7 Mbps	1 Mbps	5 500 m
<i>SDSL</i>	2,3 Mbps	2,3 Mbps	6 700 m
<i>VDSL</i>	52 Mbps	16 Mbps	1 200 m

1.1.2 - Cabo Modem

Sistemas de transmissão de CATV (*Cable TV*) se baseiam em infraestrutura de cabos coaxiais que, comparadas às redes com cabo de par trançado, apresentam desempenho superior, com frequências utilizáveis de até 1 GHz. Tradicionalmente, estas redes eram vistas como unidirecionais, com a operadora entregando conteúdo de vídeo (TV por assinatura) para o usuário, em uma rede com arquitetura do tipo árvore. A partir do final dos anos 90, algumas operadoras de TV por assinatura se tornaram prestadoras de outros serviços, como, por exemplo, dados (*Internet*), voz sobre IP (VoIP) e vídeo sob demanda (VoD), aproveitando-se da infraestrutura de cabos coaxiais existente. Nos Estados Unidos, essa indústria teve grande desenvolvimento, em função do contexto do país (redes de par trançado antigas, padronização de equipamentos, popularidade dos serviços de CATV, etc.), chegando ao ponto de se tornar a maior fornecedora de serviços de acesso de telecomunicações [1].

Em um sistema de cabo *modem*, os usuários compartilham o meio de transmissão. Os sinais da operadora para o usuário são transmitidos por meio de *broadcast* e

identificados por meio de um ID nos pacotes de dados. Os sinais do usuário para a operadora são multiplexados no tempo (TDM), onde a central determina os espaços de tempo para cada usuário. Esse esquema é bem diferente dos sistemas DSL, onde há uma linha dedicada para cada atendimento. Devido às características dos cabos coaxiais e outros elementos da rede, é possível atingir taxas de transmissão de até 38 Mbps no canal de *download* e 10 Mbps no canal de *upload* no padrão 1.0 do DOCSIS, protocolo utilizado pelas operadoras, conforme exemplificado na Tabela 1.2. Entretanto, devido à natureza compartilhada desses serviços, as operadoras disponibilizam geralmente conexões de 3 a 8 Mbps aos usuários. É possível que haja oferta de uma banda maior, desde que a arquitetura da rede seja montada pensando-se nisso.

Sistemas de cabo *modem* são sistemas híbridos de fibra óptica e cabo coaxial. Isso porque uma parte do caminho entre o escritório central e o usuário é composta por fibra óptica, a fim de maximizar o uso e reduzir custos. Reduzir os trechos com cabos coaxiais e aumentar os trechos de fibra óptica são algumas das estratégias utilizadas para melhorar a disponibilidade de banda. Também é possível reduzir o número de usuários por grupo de atendimento, por exemplo. Atualmente, as operadoras atendem de 50 a 100 usuários por fibra óptica [1].

É interessante a análise dos sistemas de cabo *modem* porque eles compartilham muitas similaridades com sistemas de redes PON. Ambos os sistemas trabalham com topologias do tipo árvore (*point-to-multipoint* - P2MP), apesar de o meio de transmissão ser diferente. A multiplexação no tempo (TDM) é utilizada para o múltiplo acesso. Há também uma relação mestre-escravo entre os equipamentos nas centrais das operadoras e os equipamentos dos usuários, com alocação dinâmica de banda. A Figura 1.3 ilustra um sistema de acesso do tipo CATV.

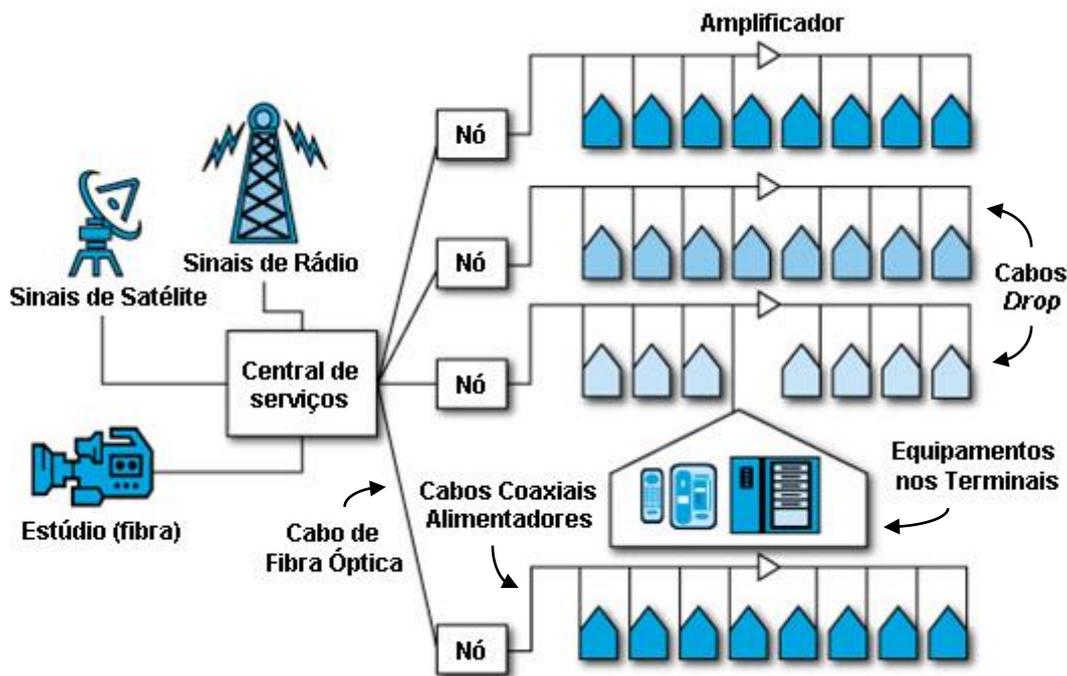


Figura 1.3 Exemplo de um sistema CATV. [4]

Tabela 1.2 Velocidade de transmissão em diferentes protocolos DOCSIS [1]

Versão do DOCSIS	Velocidade Máxima	
	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>
1.0	38 Mbps	10 Mbps
2.0	40 Mbps	30 Mbps
3.0	160 Mbps	120 Mbps

1.2 - TECNOLOGIAS DE ACESSO COM FIBRA ÓPTICA

Nos últimos anos, as tecnologias de acesso com fibra óptica deixaram de ser assunto de pesquisa e começaram a ser aplicadas de fato em redes comerciais. As redes desse tipo são chamadas de FTTx (*fiber-to-the-x*), onde o *x* representa até onde a fibra óptica é entregue: FTTH (*fiber-to-the-home*), FTTC (*fiber-to-the-curb*), etc. A fibra óptica possui uma grande vantagem sobre os sistemas de par trançado ou coaxiais: menor perda.

Isso se traduz em maior banda, menos ruído, maior alcance. Além disso, praticamente não sofrem interferências eletromagnéticas. Comparada às redes de cabos coaxiais, por exemplo, redes de fibra óptica não requerem amplificadores RF em cascata. Isso as torna muito menos custosas em termos de manutenção e menos propensas a falhas.

Redes com fibra óptica podem ter diferentes topologias e, inclusive, ter elementos como cabos de par trançado em sua composição. Redes FTTC, por exemplo, entregam fibra óptica nas proximidades do usuário e o restante do trajeto é completado por uma rede de par trançado. É possível ainda ter esquemas de distribuição ponto-a-ponto ou ponto-multiponto. Outra variação refere-se à presença ou não de elementos ativos na rede. Neste trabalho, o foco do estudo é em redes do tipo PON, ou seja, redes de múltiplo acesso (ponto-multiponto) com elementos passivos, sem a necessidade de serem alimentados por energia elétrica.

As redes de acesso por fibra óptica começaram a receber atenção só partir da segunda metade da década de 90. Até então, não havia a necessidade de grande banda para os usuários e os custos de equipamentos ópticos eram elevados. Em 1995, o consórcio FSAN (*Full Service Access Network*) foi formado por diversas operadoras globais de telecomunicações, entre elas a *British Telecom*, a *NTT*, e a *Bell South*, visando padronizar equipamentos e serviços para redes de acesso do tipo PON. Algumas recomendações desse consórcio foram posteriormente adotadas pela ITU. Entre os diversos padrões que se desenvolveram no mundo, aquele que teve maior destaque no ocidente foi o padrão G-PON (*Gigabit-capable PON*). Este padrão é descrito na série G.984 da ITU e prevê velocidades de 2,5 Gbps para o canal de *downstream* e 1,25 ou 2,5 Gbps para o canal de *upstream*. Este padrão foi adotado pela *Verizon*, *AT&T* e *Bell South* nos Estados Unidos [1].

1.3 - CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS

O setor de telecomunicações vem passando por uma revolução nos últimos anos e a demanda por banda tem dado saltos significativos. Esse aumento vem sendo o grande motivador para investimentos no desenvolvimento e implantação de redes de acesso com fibra óptica, particularmente, redes PON.

Diversas novas tecnologias causaram esse aumento na demanda por banda, entre elas: *downloads peer-to-peer*, compartilhamento de vídeos e músicas, jogos *on-line*, VoIP, *smartphones* e vídeo em alta definição sob demanda. Esta última tem sido a grande responsável pelo aumento na banda necessária. Aplicações como *Youtube* e *Netflix* se tornaram tecnicamente possíveis devido aos avanços nas técnicas de compressão de vídeos, redução dos custos de armazenamento e de transmissão de dados. O surgimento dessas aplicações impulsionou serviços de vídeo sob demanda pelas operadoras de TV por assinatura, o que aumenta ainda mais a necessidade por banda. Alguns dados abaixo ilustram essa situação.

A expectativa é que o tráfego IP global cresça a uma taxa de aproximadamente 23% ao ano pelos próximos 5 anos, conforme mostra a Figura 1.4.

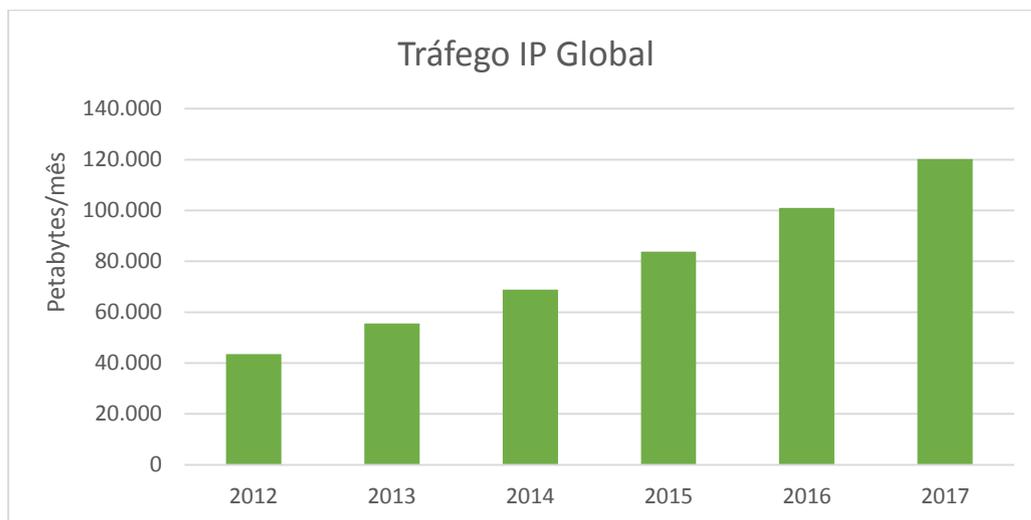


Figura 1.4 Tráfego IP Global. [5]

No âmbito acadêmico, tem-se o exemplo da ESnet, órgão norte-americano responsável por prover serviços de telecomunicações para pesquisadores e colaboradores do Departamento de Energia dos Estados Unidos. O relatório do planejamento estratégico 2014-2023 mostra que desde 1990, o tráfego em sua rede vem aumentando em um ritmo de 10 vezes a cada 48 meses [6].

No setor financeiro, a situação também é parecida: o número de mensagens por segundo relacionadas ao mercado de ações para compra, venda e outras negociações saltou de 500.000 mensagens por segundo em 2007 para quase 5.000.000 em 2010, em um perfil exponencial [7].

Algumas estatísticas do *Youtube*, maior portal de vídeos sob demanda do mundo reforçam o crescimento do volume do tráfego na Internet [8]:

- 6 bilhões de horas de exibição de vídeos mensalmente (crescimento de 50% em relação a 2012);
- 100 horas de vídeo carregadas em seu servidores a cada minuto;
- Mais de 1 bilhão de visitantes únicos por mês.

Todos os dados acima dão um resumo de como a demanda por conteúdo e, conseqüentemente, por banda tem crescido nos últimos anos e como o mercado de redes de acesso de alta velocidade pode se beneficiar disso.

Diante desse cenário, é natural que operadoras invistam cada vez mais em redes de acesso com fibra óptica, arquiteturas FTTx. Com o objetivo de minimizar custos, as operadoras procuram compartilhar conexões: ao invés de lançar fibras dedicadas para cada usuário, utiliza-se um meio comum, com a entrega da fibra óptica na porta de um edifício residencial. Assim, os custos de implantação são compartilhados e os usuários têm acesso a uma rede de alta qualidade a um preço acessível. Como redes de acesso estão sempre relacionadas a produções em escala para atendimento a muitos usuários, é primordial que seus custos de implantação sejam razoáveis, sendo este um dos principais fatores que viabilizaram a adoção de redes FTTx nos últimos anos. Além disso, investimentos em redes de fibra óptica são considerados investimentos com grande perspectiva de futuro, uma vez que a tecnologia de equipamentos ópticos está longe de se tornar obsoleta.

1.4 - VISÃO GERAL DE REDES PON

Redes PON são compostas por alguns elementos, dentre os principais:

- CO (*central office*), escritório central da operadora, ponto do qual a rede parte;
- OLT (*optical line terminal*), equipamento geralmente localizado no CO que concentra e distribui a rede;
- RT (*remote terminal*), equipamento com funções de multiplexação instalados ao longo da rede para minimizar o uso de fibra. Assim, um trecho pode ser

compartilhado pelos usuários e os custos são reduzidos. No caso das redes PON, os RTs são representados pelos divisores de potência (*splitters*) passivos;

- ONU (*optical network unit*), equipamento que termina a rede, podendo ser instalado na casa do usuário, por exemplo. É o último ponto do atendimento da rede de fibra óptica e faz a interface entre a fibra e o equipamento elétrico do usuário [1].

A Figura 1.5 exemplifica a disposição desses elementos em uma rede.

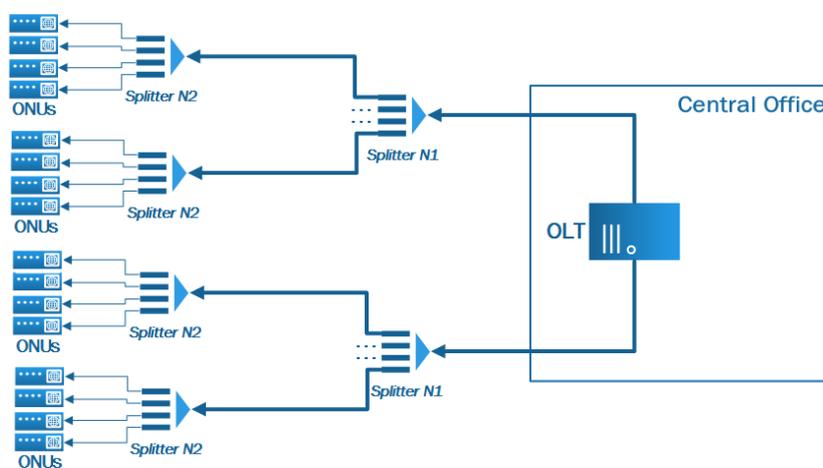


Figura 1.5 CO, OLT, *splitters* e ONUs dispostas na rede.

Atualmente, o esquema de multiplexação de pacotes adotado pela indústria é do tipo TDM, onde todos os pacotes de dados são igualmente entregues a todos os usuários e então, na ONU, é feita a identificação do pacote pertencente a cada um. No canal do usuário para a operadora, os pacotes são enviados em intervalos de tempos específicos para evitar colisões. A Figura 1.6 ilustra o Também é possível um sistema de multiplexação no comprimento de onda (WDM), onde diferentes comprimentos de onda são enviados pela OLT e o *splitter* é responsável por direcionar cada um deles para seu usuário, criando-se assim um canal dedicado. A vantagem desse sistema está em questões de segurança e escala, porém, seus altos custos fazem com que ainda não seja adotado comercialmente.

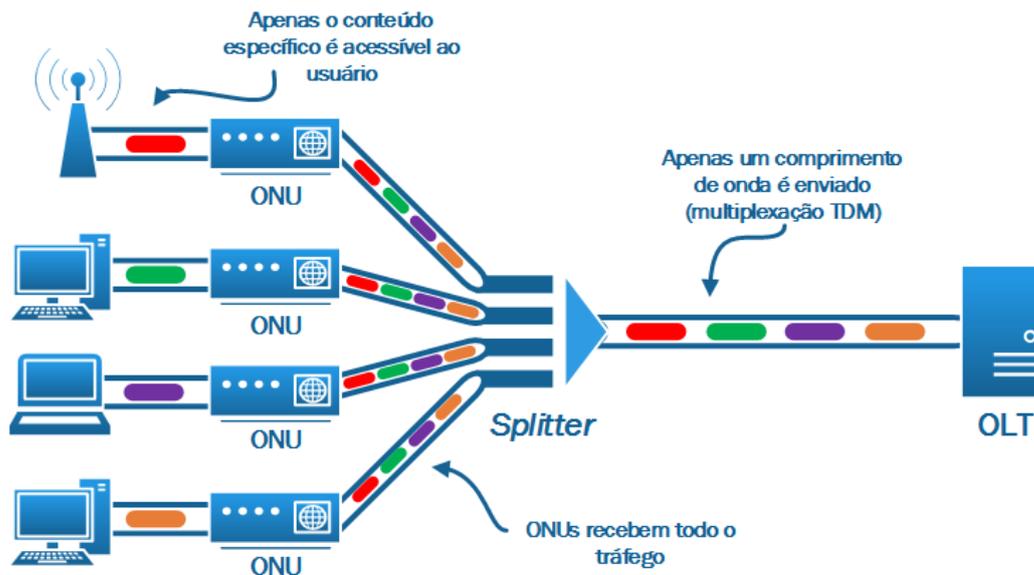
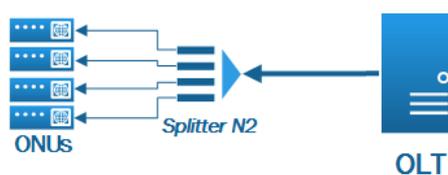


Figura 1.6 Esquema simplificado de uma rede PON TDM.

1.5 - TOPOLOGIAS DE REDES PON

Em uma rede PON, é interessante que haja divisores de potência entre a OLT as ONU's visando compartilhar custos e reduzir a quantidade de fibra instalada. Três esquemas básicos de divisão de potência em uma rede PON são possíveis:

- Divisão de um estágio, onde o sinal da OLT passa por um divisor de potência e nele são conectadas as fibras que irão até as ONU's;
- Divisão de múltiplos estágios, onde o sinal passa por divisores em diferentes níveis antes de chegar até as ONU's. Também conhecida como árvore;
- Barramento, onde as ONU's são conectadas em diferentes pontos da fibra óptica partindo da OLT.



1 nível de divisão de potência

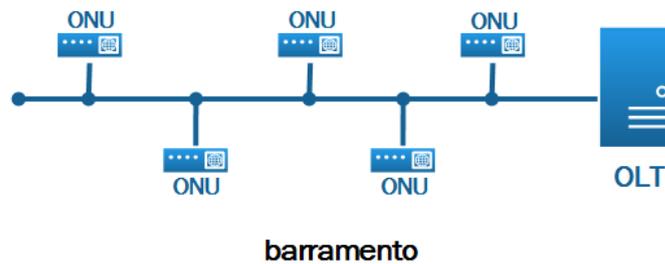
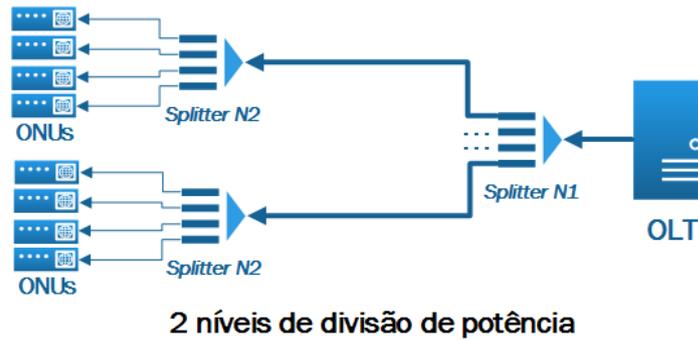


Figura 1.7 Esquemas de diferentes topologias de redes PON.

Ainda é possível uma combinação das diferentes topologias da Figura 1.7. A escolha por uma ou outra irá depender principalmente da demografia dos usuários e os custos de implantação e manutenção da rede.

Outro fator relevante no projeto de redes PON é a taxa de divisão dos sinais. Comercialmente, a maioria das redes PON opera com taxas de 1:16 ou 1:32 (eventualmente, outras taxas são utilizadas) [1]. Um aumento nessa taxa significa mais usuários compartilhando os mesmos recursos, o que por outro lado implica na diminuição da taxa de transmissão por usuário. Assim, a decisão da operadora nesse quesito deve sempre levar em consideração essa relação de compromisso.

Em sistemas práticos, a distância máxima de alcance da transmissão é em torno de 10 a 20 km. O tráfego no canal de *downstream* é feito no comprimento de onda de 1,49 μm e no canal de *upstream* em 1,3 μm . Múltiplas OLTs são instaladas no CO da operadora e interconectadas e conectadas ao *backbone* por *switches*. A porção da rede entre a OLT e as ONUs é a rede PON. A partir da ONU, os dados são entregues aos usuários e o padrão de interface hoje é o *Ethernet* [1].

1.6 - OBJETIVOS DO TRABALHO

Neste trabalho, visa-se desenvolver uma ferramenta para projetos de topologia de redes PON. Conforme explicado anteriormente, em uma rede de acesso o custo por usuário constitui um fator muito relevante para a viabilização ou não de sua implantação. Assim, é essencial que o projeto da rede vise minimizar os custos e manter os requisitos de qualidade.

Buscou-se desenvolver uma ferramenta capaz de lidar com situações reais de planejamento, flexível o bastante para permitir diferentes topologias e com resultados satisfatórios, facilitando o planejamento da rede e visando minimizar o uso dos recursos (fibra óptica, OLTs, *splitters* e ONUs). Para isso, a ferramenta desenvolvida busca otimizar o posicionamento dos elementos da rede e os caminhos das fibras ópticas. Ela ainda deve permitir o escalonamento para aplicação em sistemas maiores. Em um projeto de rede, é importante levar em consideração diferentes fatores:

- Geografia e infraestrutura existente no local;
- Localização da OLT;
- Localização e quantidade de ONUs;
- Níveis e taxas de divisão de potência;
- Previsão de futuras instalações;
- Limites de potência e distância;
- Capacidades dos equipamentos;
- Custos dos equipamentos.

Esses fatores combinados irão determinar se um projeto foi bem planejado e se sua execução será possível. A ferramenta aqui desenvolvida se propõe a trabalhar com toda as variáveis acima, de maneira a se obter um projeto adequado à realidade. A única ressalva é quanto ao custo de implementação da rede, que é trabalhado de maneira indireta, sem valores monetários. A redução de custos se dá com a otimização da posição dos equipamentos e das fibras.

2 - TRABALHOS ANTERIORES

Diversas soluções para projetos de redes PON já foram sugeridas em trabalhos anteriores. Uma das soluções propostas visa aperfeiçoar o projeto de uma rede PON por meio da resolução do problema da mínima estrela [9]. Esse artigo explora a capacidade do problema da mínima estrela ser adaptável para diferentes situações. Assim, o autor utiliza um algoritmo de agrupamento para os *splitters* e então aplica uma técnica de solução do problema da mínima estrela para cada um dos grupos. Encontrando o centro da estrela, a posição do *splitter* é encontrada. Porém, o artigo não trabalha sobre mapas reais. As soluções propostas trabalham sobre um plano cartesiano onde é possível posicionar equipamentos em qualquer ponto e conectá-los em linha reta. Assim, a natureza puramente teórica da solução a inviabiliza para ser aplicada em projetos reais. As ressalvas do autor quanto a esse problema são expressas no artigo e são reservadas para trabalhos futuros.

Outra solução proposta para projetos de redes PON utiliza essencialmente algoritmos genéticos para todo o projeto [10]. Neste trabalho, são propostas soluções diferentes para 3 topologias de rede: anel, barramento e árvore. O algoritmo genético é então responsável por determinar os agrupamentos, as posições dos equipamentos e os caminhos das fibras. A característica iterativa do algoritmo genético faz com que a cada ciclo de execução tenha um o resultado melhor. Essa ferramenta trabalha sobre mapas, porém, não são dados maiores detalhes de seu funcionamento. Por fim, estudos de caso são realizados a fim de verificar a aplicabilidade da solução. A ferramenta também propõe uma análise do orçamento de potência e dos custos de implementação dos projetos.

Outro trabalho busca resolver o problema de planejamento de redes PON utilizando uma combinação de algoritmos genéticos com algoritmos de menor caminho [11]. Essa combinação tem por objetivo otimizar o algoritmo proposto em [10] e, por isso, o primeiro estudo de caso é realizado de maneira a comparar os resultados dos trabalhos. Ao término do projeto foi possível obter uma redução no comprimento total de fibra no projeto em 8,2 km, a redução no número de *splitters* em 8 unidades e o custo da rede em \$ 193 176,88. O segundo estudo de caso é realizado na cidade de Bonito/MS, a fim de explorar as capacidades da ferramenta. A técnica de clusterização utilizada foram círculos de raios pré-definidos, porém são necessários ajustes manuais após o agrupamento. Além disso, a ferramenta se propõe a projetar uma rede com apenas um nível de derivação e sem

restrições quanto ao comprimento do cabo *drop*. Também não são desenvolvidas funções complementares para o processamento de mapas, de maneira que as entradas do projeto tem que ser manuais. Por isso, os resultados do projeto não são georeferenciados e os parâmetros da rede são identificados apenas com um ID e não com coordenadas reais. Ainda, não são exploradas soluções para automatizar o processo de plotagem dos mapas e dos elementos da rede. Por fim, o tempo médio de execução do algoritmo é de 1,7 h. Este trabalho utiliza o mesmo cenário de Bonito/MS para fins de comparação.

A ferramenta desenvolvida e descrita no atual trabalho se propõe a realizar um projeto de redes PON de maneira diferente das soluções propostas acima. A técnica para o projeto envolve algoritmos de agrupamento automáticos, posicionamento de *splitters* com busca da melhor posição e distâncias reais sobre o mapa, com todo o projeto georeferenciado. As restrições impostas para o projeto também são mais rígidas. Além disso, ainda foram desenvolvidas funções complementares para plotagem do mapa e elementos da rede e o tempo de processamento foi reduzido significativamente.

3 - TÉCNICAS PARA PROJETO DE REDES PON

3.1 - SISTEMAS CARTOGRÁFICOS

Em um projeto de rede PON, é essencial que se considere a geografia e a infraestrutura existente no local [1]. Assim, será possível dizer os pontos nos quais a OLT, os *splitters* e as ONUs podem ser instalados. Também será possível traçar caminhos para as fibras ópticas levando-se em conta as ruas da cidade, por exemplo. Com isso, o projeto será adequado ao local. Portanto, o projeto de uma rede PON necessita do mapa de uma cidade como ponto de partida.

Atualmente, há diversos serviços de mapeamento digital de cidades disponíveis. Muitas dessas aplicações têm interesses voltados para sistemas de posicionamento global, com descrição de ruas, avenidas, esquinas, pontos de interesse, visualização de imagem de satélite, vista da rua, prédios 3D, entre outros.

Para este trabalho, foi escolhido o sistema de mapas *OpenStreetMap*. Este sistema faz parte de um projeto colaborativo que visa mapear o mundo todo e disponibilizar os mapas de forma gratuita e editável para qualquer pessoa que queira utilizá-los. O *OpenStreetMap* possui seu acervo cartográfico disponível sob licença *Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0*, o que significa que os mapas podem ser usados livremente, inclusive para uso comercial, desde que seja citada a fonte. Diferentemente de sistemas de mapas proprietários, como o *Google Maps* ou *Bing Maps*, os mapas do *OpenStreetMap* são disponibilizados com os dados brutos originais, sem qualquer restrição. Essa natureza aberta do *OpenStreetMap* fez com que uma grande comunidade de colaboradores e desenvolvedores surgisse ao redor dele e, com isso, diversas aplicações derivadas voltadas para os mais diversos fins surgiram.

A Figura 3.1 mostra o crescimento da comunidade de usuários em torno do *OpenStreetMap*.

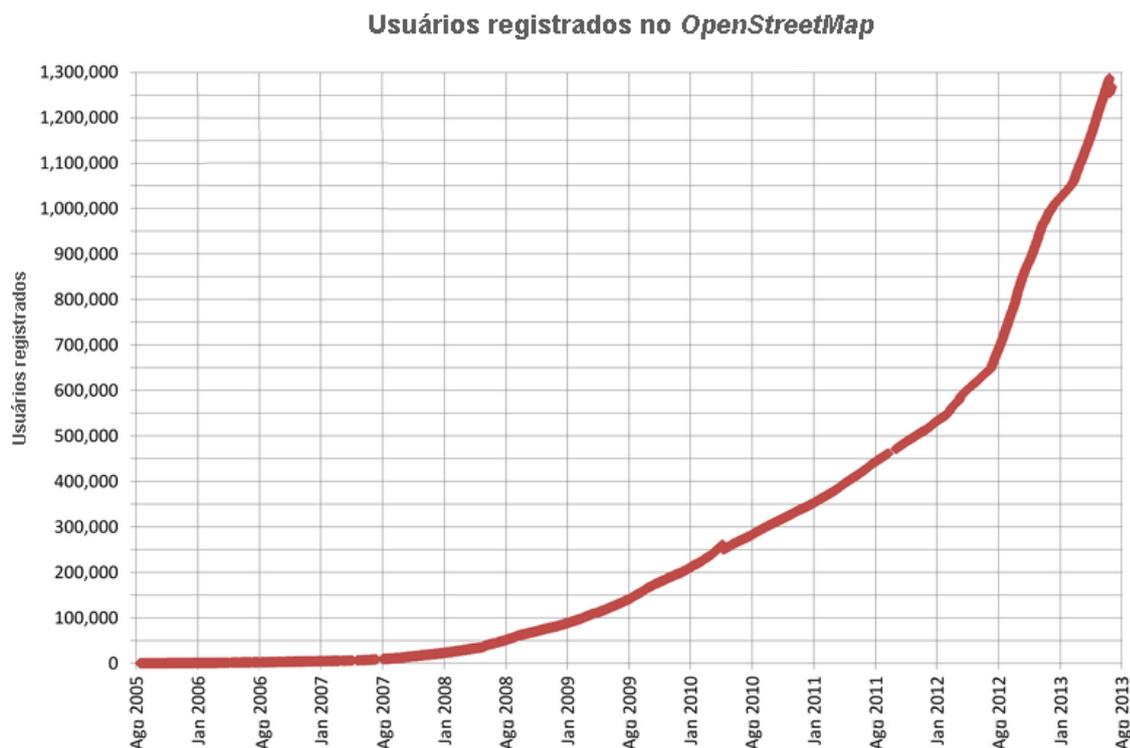


Figura 3.1 Usuários registrados no *OpenStreetMap*. [12]

No Brasil, os projetos de mapeamentos não contam com a mesma adesão dos projetos nos Estados Unidos e Europa. Apesar disso, atualmente já existem 238 cidades mapeadas no território brasileiro e continuamente esses mapas são melhorados e novos mapas adicionados [13].

A comunidade desenvolvedora ao redor do *OpenStreetMap* também criou diversas ferramentas que facilitam a criação de novos mapas. É possível mapear uma cidade com um GPS, caminhando pelas ruas de uma cidade ou ainda utilizar imagens de satélite livremente disponíveis para que se faça o mapeamento sobre tais imagens, com *softwares* específicos para esse fim. Essas ferramentas tornam o *OpenStreetMap* ainda mais atrativo e reduzem as dificuldades de projetos de redes PON em cidades que ainda não estejam mapeadas.

Por todos os motivos apresentados acima, escolheu-se por esse sistema de mapas digitais. A natureza aberta do conteúdo; a grande comunidade de desenvolvedores; as diversas ferramentas adicionais existentes para criação e edição de mapas; as aplicações adicionais para se trabalhar com os mapas em outras plataformas. Esse conjunto de fatores motivou a adoção de tal plataforma para este projeto. Dentre as soluções já propostas

anteriormente, a deste trabalho possui o diferencial de trabalhar com mapas prontos, automaticamente importados para a ferramenta, sem a necessidade de se criar matrizes de adjacências manuais, por exemplo.

Os mapas são definidos basicamente por quatro elementos: nós, caminhos, relações e *tags* [14].

- Nós: são pontos geoespaciais definidos por suas coordenadas de latitude e longitude. Também é possível adicionar uma 3ª coordenada, de altitude. Cada nó em um mapa possui um número de identificação único. Nós podem compor estradas, ruas, lagoas, parques, definir pontos de interesse, entre outros.
- Caminhos: são formados pela composição ordenada de nós. Podem ser interpretados como um conjunto de linhas, sendo este fechado (com ponto inicial igual ao ponto final) ou aberto (ponto inicial e final diferentes);
- Relações: são utilizadas para dar sentido aos elementos anteriores (nós e caminhos). Com as relações, é possível atribuir, por exemplo, um conjunto de caminhos como parte de um parque e não de uma estrada;
- *Tags*: funcionam como as relações, definindo o tipo de elemento. Um caminho, por exemplo, pode ter *tags* que o descrevem como uma estrada e relações que o colocam como parte de uma rodovia.

3.2 - ALGORITMOS DE MENOR CAMINHO

Os fatores econômicos possuem grande relevância em um projeto de redes PON [1]. Por isso, é importante que o projeto minimize os custos de instalação, viabilizando-o. Uma das maneiras de diminuir tais custos é optar por caminhos ótimos pelos quais as fibras ópticas irão passar nas cidades. Isso é possível com a utilização de algoritmos capazes de traçar rotas entre dois pontos em um mapa, de maneira a minimizar a distância total entre eles. Tais problemas são conhecidos como problema do caminho mínimo e há diversos algoritmos bastante populares que os resolvem. Esse tipo de problema é comum em aplicações de engenharia, por exemplo, transporte, logística, design de circuitos impressos e, principalmente, determinação de menor rota em um mapa.

O algoritmo de menor caminho escolhido para utilização no projeto de redes PON deste trabalho é o algoritmo de *Dijkstra*. A resolução do problema baseia-se na determinação de menores caminhos intermediários, a partir da origem. Sua estrutura de dados é um grafo com arestas ponderadas. Grafos são representações de conjuntos de objetos com ligações entre si, onde os objetos são representados por vértices e as ligações, por arestas. A tais ligações podem ser atribuídos pesos, conforme ilustrado na Figura 3.2.

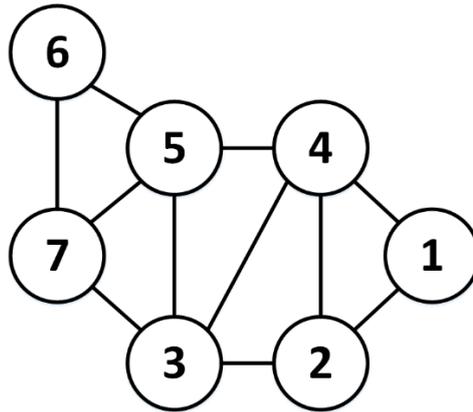


Figura 3.2 Exemplo de grafo simples.

A utilização de uma estrutura de grafo é interessante porque sua analogia com um sistema de mapas é facilmente perceptível: em um mapa, as esquinas podem ser representadas pelos vértices e as ruas que as conectam podem ser representadas pelas arestas. Já as distâncias entre as ruas podem ser representadas pelos pesos dados a cada aresta. O algoritmo de *Dijkstra* possui a seguinte execução:

1. Para cada nó é atribuído um valor, correspondente à distância calculada da origem até ele. Os valores iniciais são de 0 para o nó de origem e infinito para outros nós;
2. Todos os nós são marcados como “não visitados”. O nó inicial é marcado como “atual”. É criado um conjunto de nós não visitados consistido de todo os nós, com exceção do nó inicial;
3. Para o nó atual, todos os nós adjacentes são visitados e é atribuído a eles o valor do nó atual mais a distância do nó atual até o nó adjacente. Por exemplo, caso o nó atual (A) tenha um valor de 3 e a distância até o nó B seja de 4, o valor atribuído a B será de $3 + 4 = 7$, desde que ele seja menor que o valor atual do nó B. Caso seja maior, o valor de B será mantido. O nó B ainda não será marcado como “não-visitado”;

4. Após a repetição do passo acima para todos os nós adjacentes ao nó atual, o nó atual é marcado como “visitado” e não será checado novamente;
5. O nó não visitado com o menor valor é marcado como “atual” e o algoritmo se repete a partir do passo 3;
6. Quando o nó de destino for marcado como visitado, algoritmo é encerrado.

3.3 - PROBLEMA DO CAIXEIRO-VIAJANTE

Outro problema comum relacionado a menores caminhos é o problema do caixeiro-viajante. Dado um conjunto de cidades que devem ser visitadas por um caixeiro-viajante, a melhor rota é determinada, considerando-se que cada cidade deve ser visitada ao menos uma vez. O problema possui algumas variações, como, por exemplo, o retorno ou não ao ponto de origem. É um problema do tipo *NP-Hard* [15], o que significa que não existem algoritmos de tempo polinomial para sua resolução, e em termos práticos quer dizer que a solução ótima só é encontrada após todas as possíveis soluções existentes serem verificadas. Apesar dessa aparente dificuldade, existem técnicas que resolvem o problema buscando uma solução sub-ótima.

Uma das heurísticas que encontram uma solução para o problema utiliza algoritmos genéticos [16]. Esta técnica baseia-se no mimetismo de processos de natureza evolutiva como mutação, cruzamento, combinação e seleção. Com isso, uma população inicial (conjunto de soluções) é gerada aleatoriamente e a cada iteração o algoritmo irá buscar uma resposta melhor que a anterior, gerada a partir das melhores soluções.

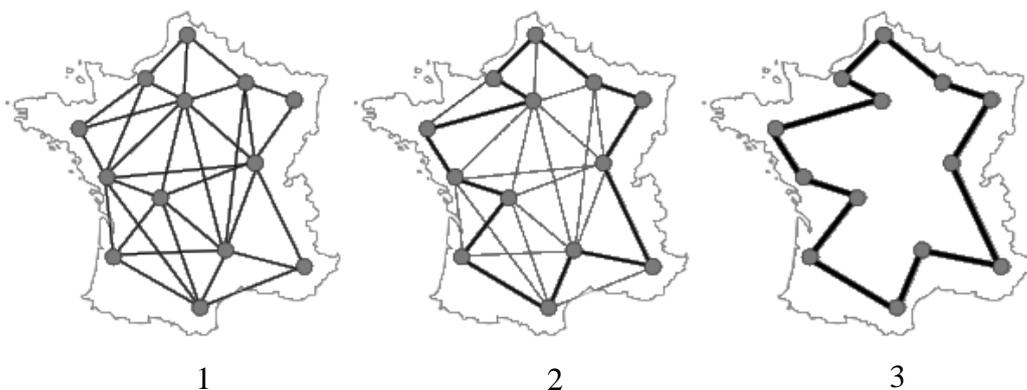


Figura 3.3 Exemplo de problema do caixeiro-viajante. [17]

Na Figura 3.3, o primeiro passo mostra diversas alternativas de caminho que resolvem o problema. No segundo passo, as alternativas que resultam em maiores distância são descartadas. Por fim, o melhor resultado é exibido. No projeto de redes PON, a resolução do problema do caixeiro-viajante é complementar ao problema do menor caminho na determinação do caminho das fibras ópticas. Mais à frente neste trabalho sua aplicação será explicada com maiores detalhes.

3.4 - AGRUPAMENTO (CLUSTERIZAÇÃO)

Em um projeto de rede PON, busca-se reduzir a quantidade de fibra óptica utilizada por meio do agrupamento de ONUs com a utilização de *splitters*. Assim, é possível compartilhar trechos de fibra com vários usuários, em vez de utilizar fibras dedicadas para cada usuário. Essa topologia de divisão de potência é a que consegue viabilizar economicamente a implantação de uma rede PON.

Diante desse cenário, de projetos com ONUs agrupadas e trechos compartilhados, faz-se necessário um algoritmo capaz colocar ONUs e *splitters* em grupos semelhantes, automatizando esta etapa do projeto. Neste trabalho, foi abordada a técnica chamada de *clusterização* hierárquica.

A *clusterização* hierárquica baseia-se na criação de uma árvore de *clusters* ou grupos. O algoritmo funciona da seguinte forma: dentro do conjunto de todos os elementos, os dois mais próximos são agrupados e formam um *cluster*. Esse novo *cluster* é tratado como um novo elemento dentro do conjunto. Novamente, os dois elementos mais próximos são agrupados e o processo se repete até que todos os elementos estejam agrupados. Ao longo da execução do algoritmo, a árvore de hierarquização é criada. A partir daí, pode-se cortar a árvore em um local desejado, baseando-se na quantidade de *clusters* desejada. Com isso, o resultado serão os grupos de elementos, agrupados por menor distância.

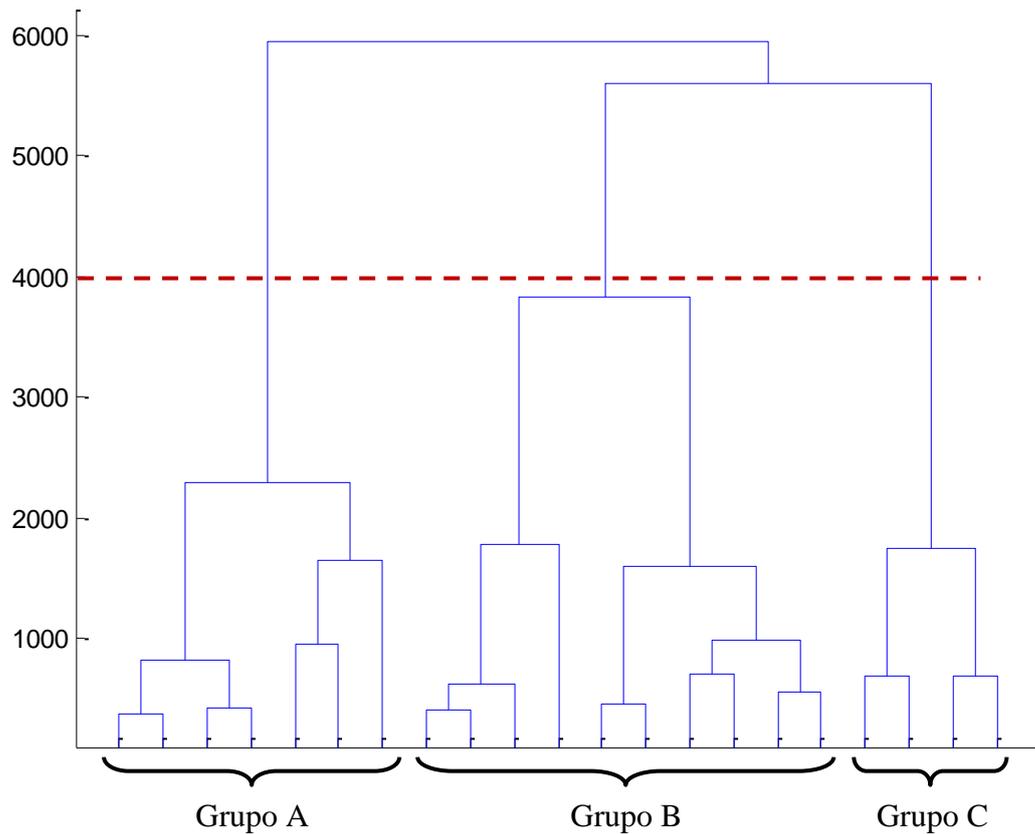


Figura 3.4 Exemplo de árvore com clusterização hierárquica.

O gráfico na Figura 3.4 se chama dendograma e é uma representação dos agrupamentos feitos pela técnica. O corte no ponto 4000, por exemplo, resulta em três grupos formados.

3.5 - LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

Para a ferramenta de projeto de redes PON foi utilizado o MATLAB. Esta é uma ferramenta computacional que permite a manipulação de matrizes, dados, desenho de gráficos, implementação de algoritmos e criação de uma interface para o usuário. Sua aplicação em diversos problemas de engenharia, em pesquisas acadêmicas e industriais faz com que haja uma extensa documentação de suas funções e diversas funções adicionais criadas por uma comunidade de desenvolvedores.

4 - PROPOSTA DE FERRAMENTA

4.1 - ENTRADAS DE DADOS DO PROJETO

4.1.1 - Criação e edição de mapas

Conforme mencionado anteriormente, foi escolhido o sistema de mapas digitais do *OpenStreetMap*. Por meio do portal *on-line* do *OpenStreetMap* é possível exportar os dados brutos dos mapas, compostos pela descrição dos nós, caminhos, relações e *tags*. Esses dados são editáveis por meio do *software* JOSM. Com ele, é possível abrir os dados brutos em um formato de fácil edição visual. A Figura 4.1 exemplifica a tela de edição do JOSM.

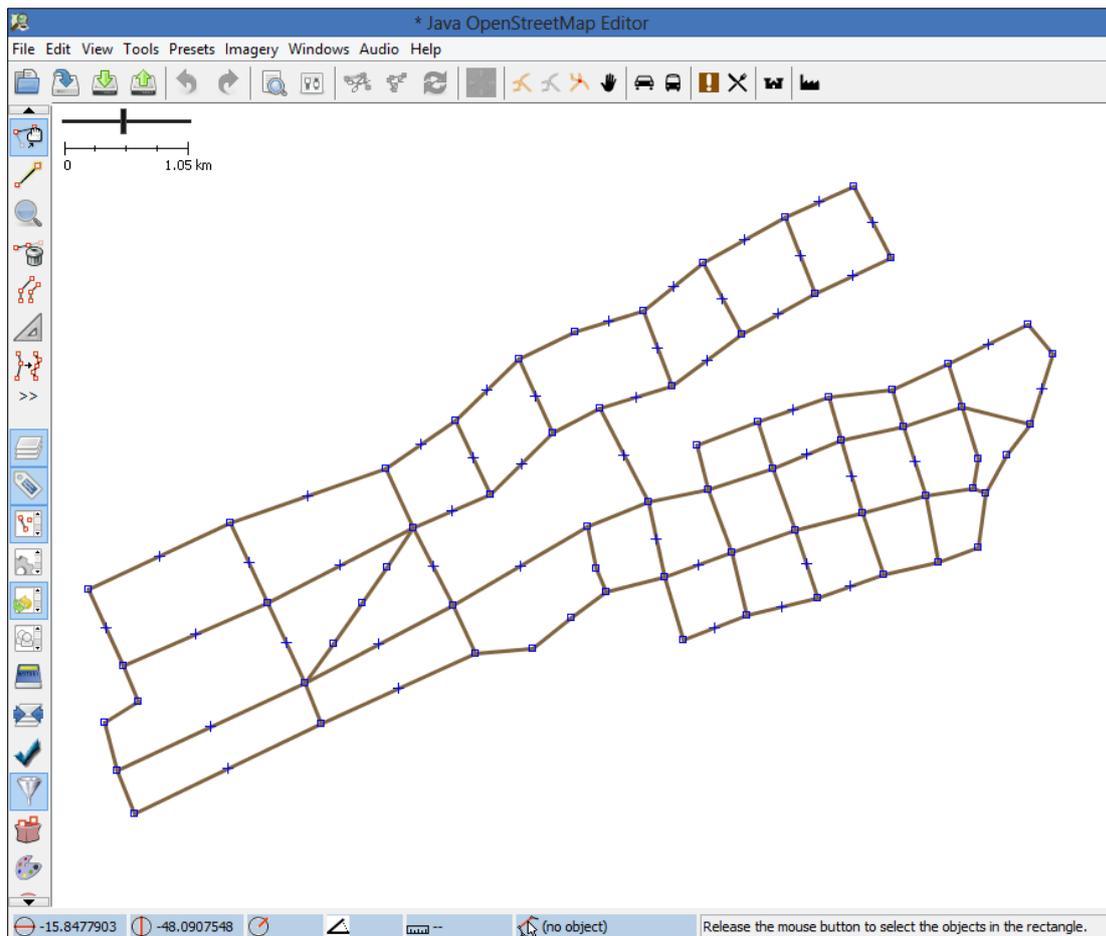


Figura 4.1 Tela de edição de mapas do programa JOSM.

Antes de utilizar os dados brutos exportados do *OpenStreetMap* recomenda-se que elementos que não farão parte do projeto da rede PON, como parques, lagos, reservas florestais e outros sejam excluídos do mapa para reduzir o gasto computacional no projeto.

No caso de cidades em que não haja os mapas disponíveis, é possível criá-los com o JOSM a partir de uma imagem de satélite. Diversos bancos de imagens de satélite estão disponível diretamente no JOSM, bastando ao usuário desenhar as linhas das ruas ao longo do mapa. A Figura 4.2 ilustra o processo de criação de um novo mapa a partir de uma imagem de satélite.

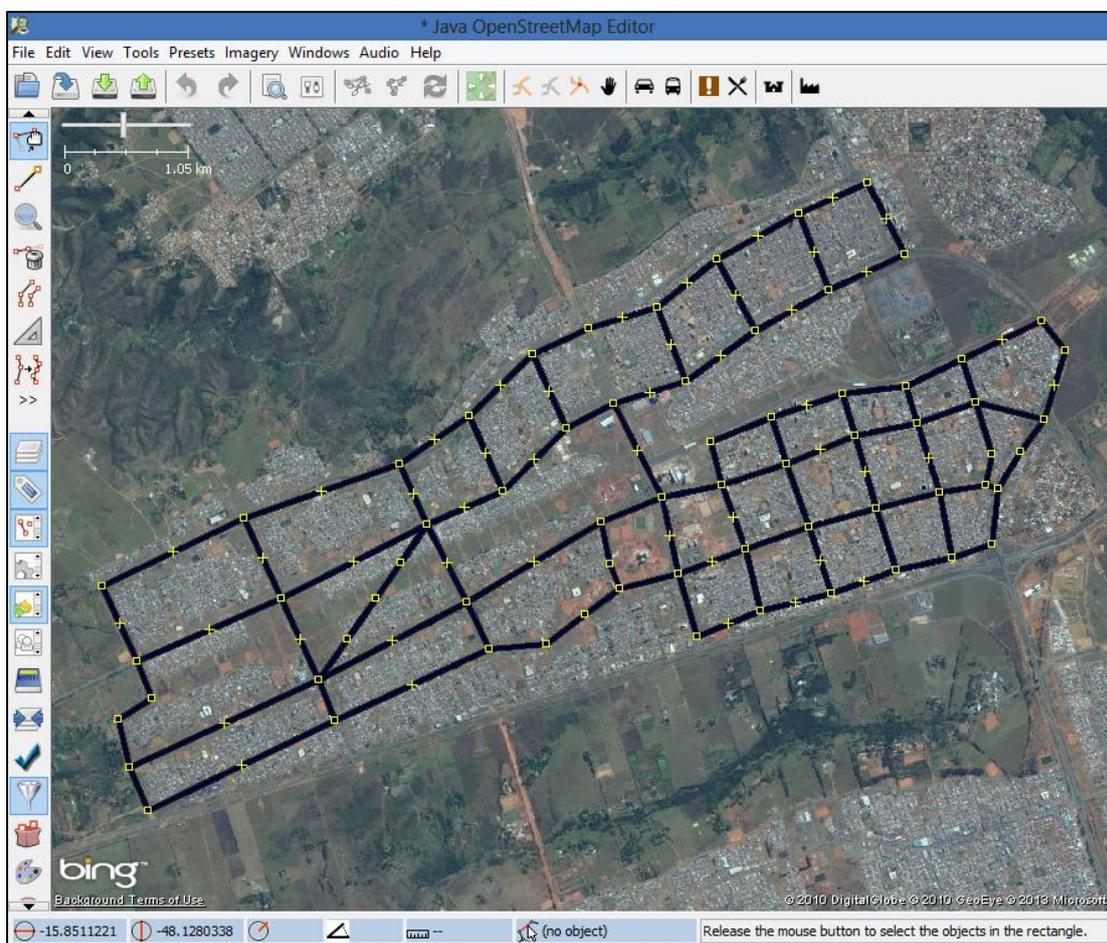


Figura 4.2 Criação/edição de um mapa a partir de uma imagem de satélite (*Bing Sat*).

Antes da importação do mapa para o MATLAB, são necessários alguns ajustes nos elementos: atribuição de *tags* que especifiquem que os caminhos são de fato ruas e não apenas arestas; divisão de caminhos com vários nós em caminhos menores de apenas 2 nós e, como mencionado, remoção de elementos não desejados para diminuir o gasto computacional.

4.1.2 - Importação dos mapas

O arquivo editado no JOSM pode ser exportado em um arquivo no formato .xml. Este arquivo é importado por meio de um pacote de funções desenvolvidas para o MATLAB [18]. Tal pacote de funções é distribuído sob a licença BSD, que, em resumo, permite a livre utilização e incorporação do código a outros projetos, isentando o autor de responsabilidades sobre ele [19].

Os dados brutos do arquivo .xml importados para o MATLAB resultam nas estruturas de dados essenciais para serem trabalhadas no projeto da rede. Entre elas, as mais significativas são:

- Matriz com as coordenadas de latitude e longitude de todos os nós do mapa;
- Matriz de conectividade $n \times n$, onde n é o número de nós do mapa. Nesta matriz, nós que estão conectados por uma aresta serão representados pelo elemento 1 na matriz. Por exemplo, um nó i conectado a um nó j no mapa resultará nos elementos i, j e j, i da matriz de adjacência terem o valor 1. É importante que essa matriz seja simétrica, significando que o mapa não é direcional.

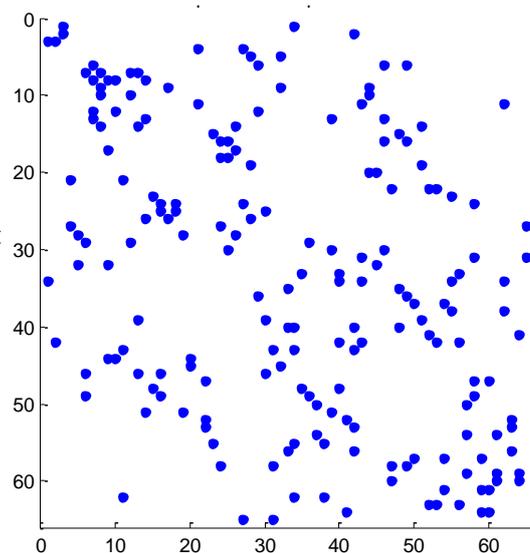


Figura 4.3 Representação visual de uma matriz de conectividade.

A Figura 4.3 propõe uma representação visual da matriz de conectividade. Os eixos x e y representam os nós do mapa, como os elementos de uma matriz. Os pontos em

azul representam nós conectados, ou seja, os elementos da matriz de adjacência marcados com o valor 1. Com os dados acima, é possível ponderar a matriz de conectividade de acordo com as distâncias entre os pontos. Assim, um elemento i, j da matriz deixará de ter o valor 1 ou 0 e passará a ter o valor da distância real entre os pontos i e j . Também é possível plotar o mapa, conforme demonstra a Figura 4.4.

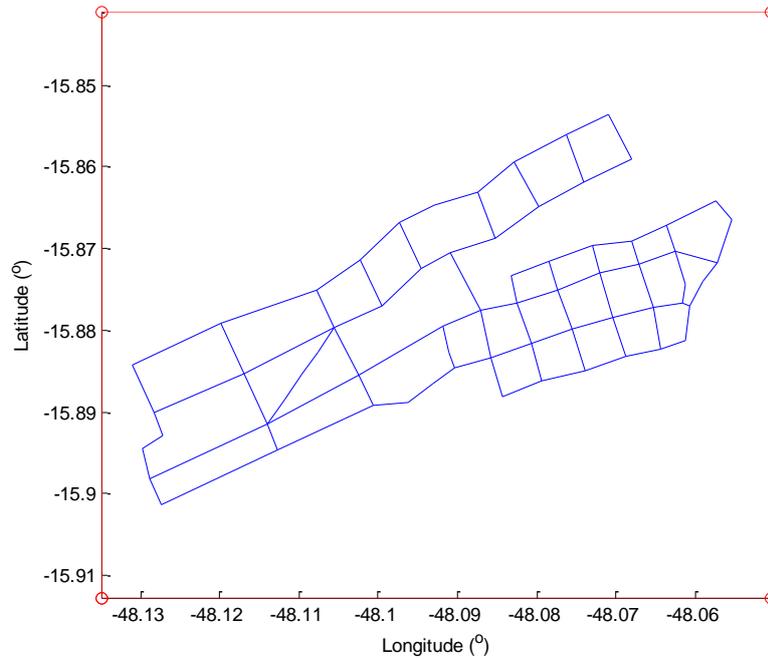


Figura 4.4 Exemplo de mapa plotado a partir da matriz de distâncias

Cada nó também é identificado com um ID único, conforme a Figura 4.5.

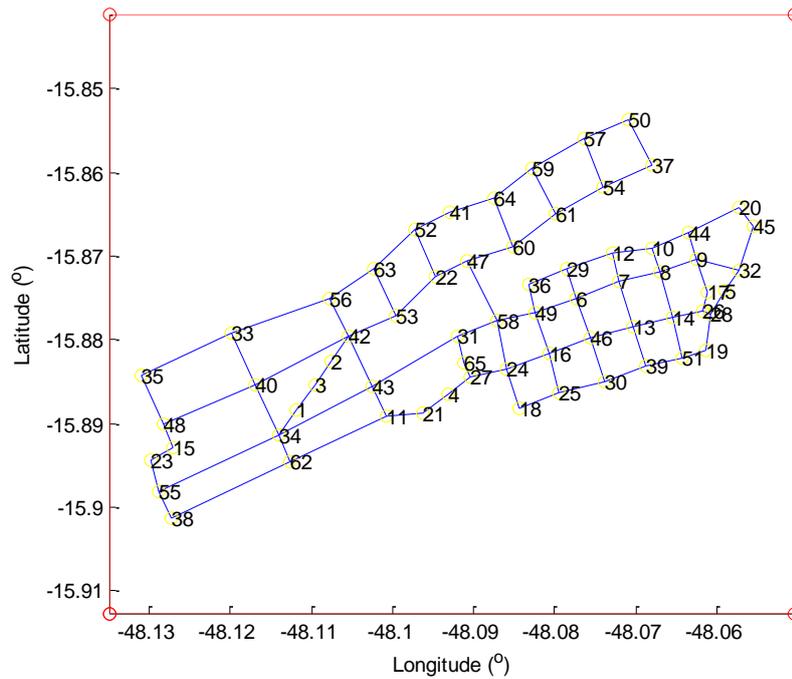


Figura 4.5 Exemplo de mapa plotado com todos os nós identificados.

4.1.3 - Posicionamento de OLT e ONUs

Em um projeto de rede PON, as localizações da OLT e das ONUs são conhecidas, sendo estas um dos dados de entrada do problema. A OLT é identificada como o ponto central da rede, geralmente localizada no escritório da operadora. Pode ser ainda localizada em um ponto estratégico, como por exemplo, a prefeitura de um município. As ONUs são os clientes a serem atendidos. Podem ser desde escolas, hospitais, prédios residenciais, comerciais, hotéis e outros pontos de interesse da operadora. Eles podem ser definidos também se prevendo novas demandas futuras, dando assim margem para um projeto de rede PON com reserva para novas instalações.

É importante então que o *software* de projeto consiga lidar com esses dados adequadamente e os encaixem dentro da estrutura de mapas utilizada. Neste trabalho, foram consideradas duas possibilidades de entrada de dados de localização de OLT e ONUs:

1. Entrada a partir de uma tabela com as coordenadas da OLT e ONUs: por meio de um arquivo do *Excel*, com as coordenadas de latitude e longitude da OLT e das ONUs, o *software* atribui à OLT e a cada uma das ONUs um nó no mapa. Este é o método mais flexível de entrada de dados, uma vez que as

coordenadas da OLT e das ONUs podem ser oriundas das mais diversas fontes, sejam de outros sistema de mapas digitais, como *Google Maps* e *Google Earth* sejam de dados vindos de uma agência governamental, entre outros;

2. Entrada manual de dados, indicando diretamente os nós aos quais as ONUs e OLT estão ligados. Esse método é mais restrito e permite que o usuário entre com um vetor com os índices dos nós das ONUs e OLT.

Independente do caso, com ambos os métodos o resultado é o mesmo: a OLT e as ONUs são identificadas no mapa, conforme a Figura 4.6.

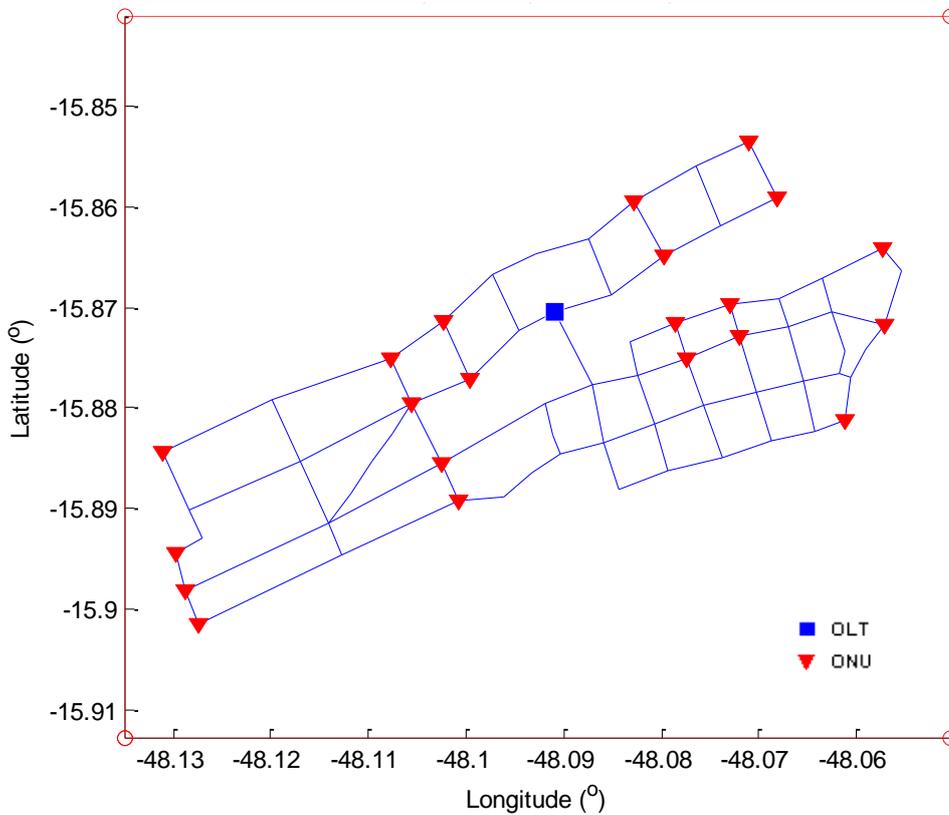


Figura 4.6 Exemplo de mapa com a OLT e as ONUs posicionadas.

4.2 - PROJETO DA REDE PON

Uma vez que os dados iniciais do projeto foram definidos (mapa e posições da OLT e ONUs), é possível dar início à resolução do problema. Nesta Seção, as etapas do projeto são detalhadas.

4.2.1 - Agrupamento de ONUs

A primeira etapa do projeto da rede PON consiste em agrupar as ONUs, de modo a definir quantos grupos diferentes e, conseqüentemente, quantos *splitters* de 2º nível haverá no projeto. Aqui, cada ONU já está associada a um nó do mapa, com seu próprio ID. Para o agrupamento das ONUs, é necessário que se conheça as distâncias entre elas.

A ferramenta então calcula uma matriz de distâncias $n \times n$, onde n é o ID de maior número dentre as ONUs. Um elemento i, j será a distância entre a ONU de ID i e a ONU de ID j . Outros elementos da matriz terão valor igual à zero. Essa distância é calculada por meio do algoritmo de *Dijkstra*, ou seja, é a distância real sobre o mapa e não uma distância em linha reta.

Com as distâncias calculadas, a ferramenta cria um dendograma das ONUs. Esse tipo de gráfico consiste de muitas linhas que conectam elementos (no caso, ONUs) em uma árvore hierárquica. A altura de cada linha representa a distância entre os dois elementos que ela conecta. A técnica utilizada para o agrupamento é a clusterização hierárquica, cujos aspectos teóricos foram explicados anteriormente.

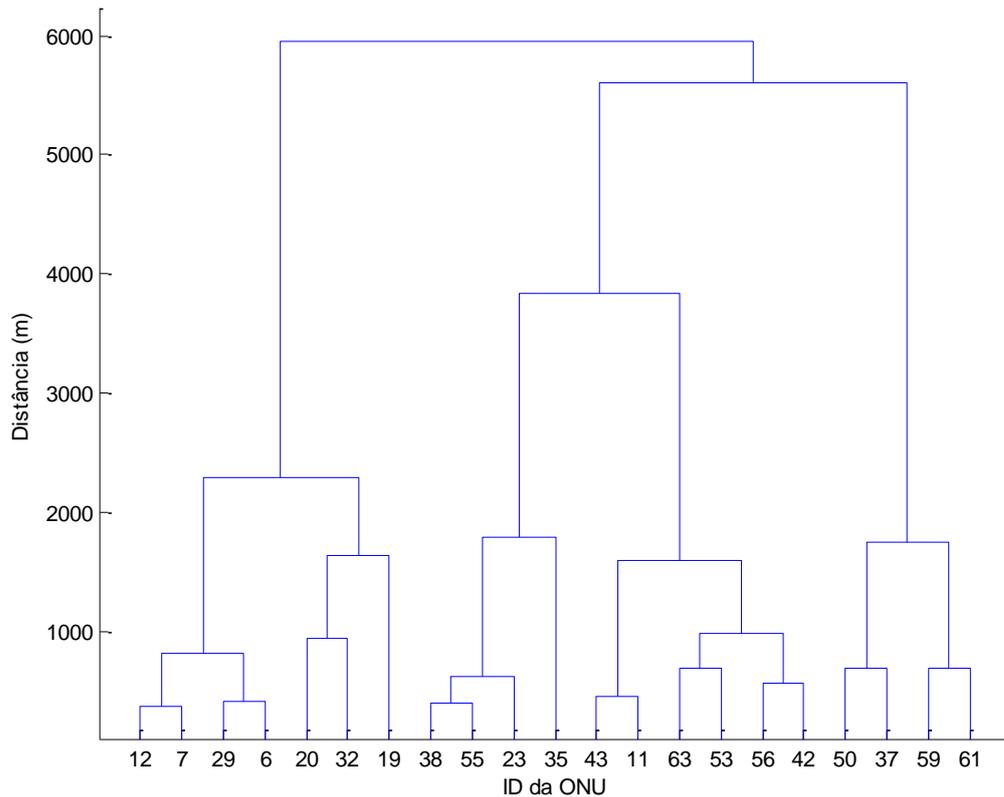


Figura 4.7 Exemplo de dendograma.

A partir do dendograma na Figura 4.7, é possível determinar os grupos de ONUs. Para isso, é necessário decidir em que altura a árvore acima deve ser cortada. Um corte na horizontal irá formar uma quantidade de grupos igual à quantidade de ramificações cortadas. Os elementos de cada grupo estarão então identificados no eixo horizontal embaixo do gráfico. A decisão pela quantidade de grupos é do usuário e ele pode utilizar diferentes critérios para determinação dos grupos. O dendograma funciona como elemento de suporte. A análise do mapa e outros fatores também podem ser levados em consideração. Um critério mais simples é determinar quantos grupos ele deseja em seu projeto. A partir disso, o algoritmo de clusterização irá determinar em que altura a árvore hierárquica será cortada, para que se tenha a quantidade de grupos desejada.

Outro critério de decisão, mais próximo da realidade de um projeto de rede PON, é por meio do fator limitante de comprimento do cabo *drop*, aquele que liga o *splitter* à ONU. Para se garantir um balanço de potência adequado no projeto, geralmente se impõe uma distância máxima em que a ONU ficará do *splitter* de 2º nível. A ferramenta então solicita essa distância máxima e ela será utilizada para estimar a altura em que o dendograma será cortado. Essa estimativa é deve-se ao dendograma representar distâncias

entre ONUs e não entre ONUs e *splitters*, pois, nesse ponto, não se tem a posição do *splitter*.

Assim, independentemente do critério do usuário, os grupos (ou clusters) de ONUs são formados. Esses grupos são representados por uma matriz $n \times m$, onde n é a quantidade de grupos e m é a quantidade de ONUs no grupo. A Figura 4.8 ilustra um exemplo de agrupamento com a ferramenta.

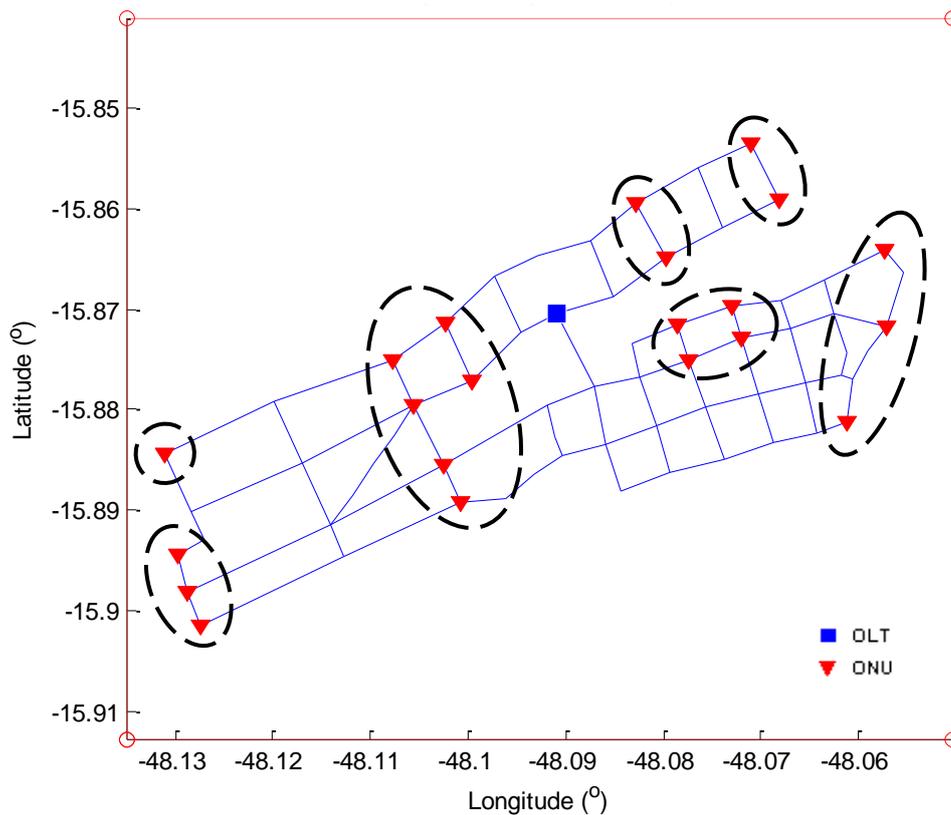


Figura 4.8 Exemplo de um agrupamento com sete grupos.

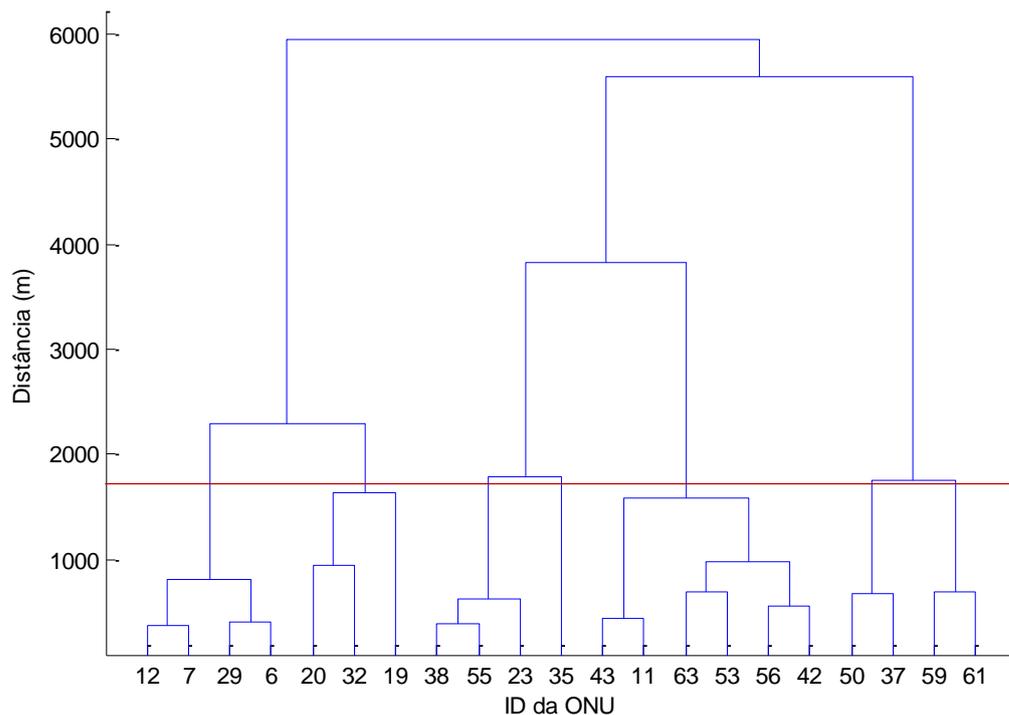


Figura 4.9 Ponto de corte da árvore de hierarquização.

Na Figura 4.9, é possível observar que a quantidade de ramos da árvore cortados irá determinar os 7 grupos formados. As ramificações abaixo da linha de corte são os grupos. A taxa de divisão dos *splitters* irá ser determinada automaticamente de acordo com a quantidade de elementos em cada grupo.

4.2.2 - Posicionamento de *splitters* de 2º nível

Com os agrupamentos de ONUs definidos, é necessário agora alocar um *splitter* de 2º nível para cada um dos grupos. Esse *splitter* será responsável por receber a potência vinda de uma fibra óptica e dividi-la em n vezes, sendo n a quantidade de ONUs no grupo.

Seu posicionamento em um local adequado é essencial para que o balanço de potência do projeto atenda satisfatoriamente a todas as ONUs. Conforme explicado anteriormente, a restrição de distância entre o *splitter* e as ONUs é o fator mais limitante nesta etapa. Portanto, esse será o critério utilizado para atribuir um nó no mapa a um *splitter* de 2º nível. O algoritmo se dá da seguinte forma:

1. Para cada grupo de ONUs, são calculadas as distâncias entre as ONUs e todos os nós do mapa. O resultado será uma matriz $n \times m$, onde n é a

quantidade de ONUs no grupo e m é a quantidade de nós do mapa. Um elemento i, j indica que a ONU i do grupo está a uma distância x do nó j do mapa. Essa distância é calculada com o algoritmo de *Dijkstra*;

2. Cada coluna da matriz acima representa então as distâncias entre as ONUs do grupo para um dos nós. Em cada coluna da matriz acima, é selecionado o elemento de maior valor, ou seja, a ONU mais afastada do ponto relativo a essa coluna do nó. Uma nova matriz $1 \times m$ é gerada assim;
3. Na nova matriz $1 \times m$, é selecionado o menor valor encontrado. A coluna desse menor valor será a posição do *splitter* de 2º nível desse grupo;
4. O procedimento acima é repetido para todos os outros grupos de ONUs. Assim, todas as posições de *splitters* de 2º nível são definidas.

Em resumo, o que o código acima faz é encontrar a posição no mapa na qual a maior distância de atendimento a uma ONU do grupo seja a menor possível. Com isso, todas as posições, de todos os *splitters* de 2º nível são definidas. É gerada uma matriz com todas as distâncias entre ONUs e *splitters* de 2º nível e o usuário pode conferir se a estimativa inicial de limitação de distância foi cumprida. Por fim, o algoritmo encontra o menor caminho entre o *splitter* e as ONUs com *Dijkstra* (conforme acima) e, então, essa etapa da rede é exibida, conforme a Figura 4.10.

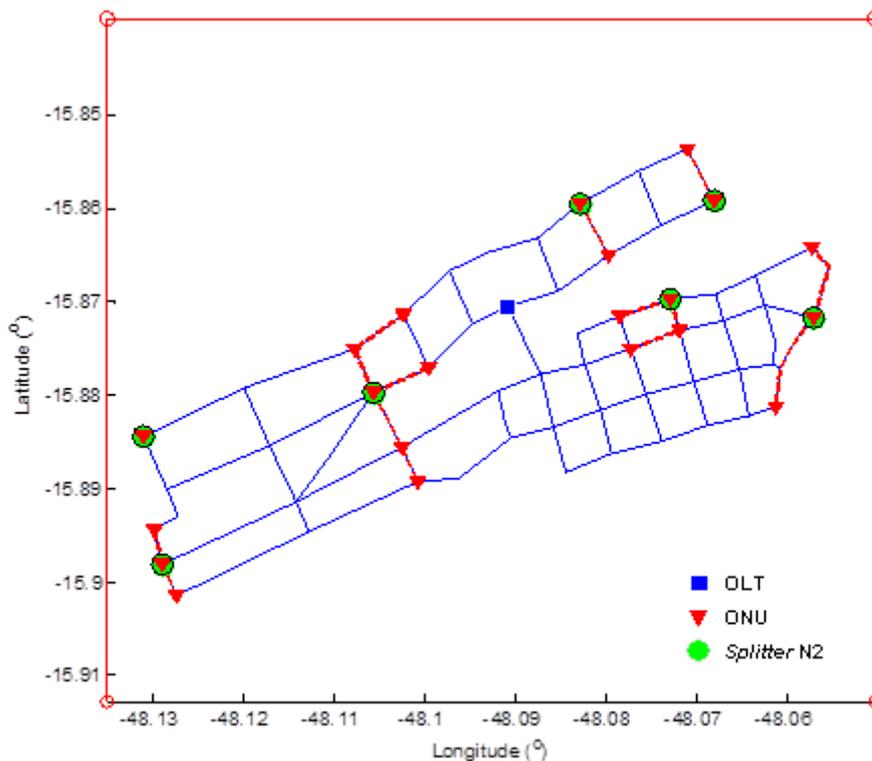


Figura 4.10 Exemplo com os *splitters* de 2º nível posicionados e os caminhos das fibras desenhados sobre o mapa.

Na Figura 4.10 é possível ver que no caso dos grupos com 3 ONUs, a escolha óbvia de posicionar o *splitter* entre elas foi automaticamente encontrada pela ferramenta.

4.2.3 - Agrupamento de *splitters* de 1º nível

É necessário agrupar os *splitters* de 2º nível, para que seja possível dizer quais deles serão atendidos pelos *splitters* de 1º nível. O mesmo algoritmo de agrupamento utilizado anteriormente mostra um novo dendograma. Porém, aqui fica a critério do usuário definir quantos grupos ele deseja na rede. Assim como anteriormente, é possível realizar os agrupamentos de acordo com a distância máxima. Porém, nessa etapa, esse critério não é mais um fator tão relevante, de maneira que a ferramenta deixa para o usuário a análise visual do mapa, do dendograma e outros fatores subjetivos do projetista para que ele possa determinar quantos grupos de *splitters* de 2º nível haverá.

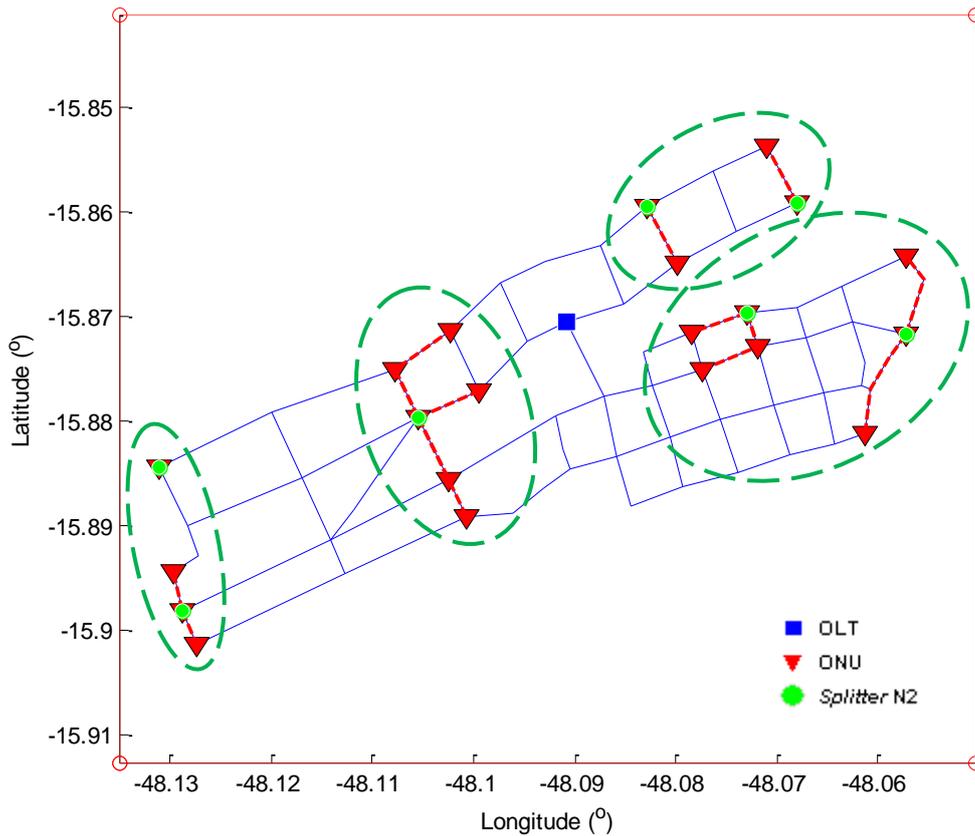


Figura 4.11 Exemplo com 4 grupos de *splitters* de 2º nível.

4.2.4 - Posicionamento de *splitters* de 1º nível

O próximo passo do projeto da rede PON consiste em posicionar um *splitter* de 1º nível para cada grupo de *splitters* de 2º nível definido anteriormente. Para isso, a ferramenta parte do princípio da minimização do uso total de fibra no projeto.

1. Uma matriz de distâncias entre a OLT e todos os nós do mapa é gerada. A matriz tem dimensões $1 \times n$, onde n é a quantidade de nós do mapa. Um elemento $1, j$ indica que a OLT está a uma distância x do nó j do mapa
2. Para cada grupo de *splitters* de 2º nível, são calculadas as distâncias entres esses *splitters* e todos os nós do mapa. O resultado será uma matriz $m \times n$, em que m é a quantidade de *splitters* no grupo e n é a quantidade de nós do mapa. Um elemento i, j indica que o *splitter* i do grupo está a uma distância x do nó j do mapa. Essa distância é calculada com o algoritmo de *Dijkstra*;

3. As linhas da matriz acima são somadas à matriz de distâncias da OLT, obtida no passo 1, de modo a ter-se uma matriz $1 \times n$, onde cada elemento j representa a soma dos elementos na coluna j da matriz do passo 1 e da matriz do passo 2;
4. Na nova matriz com os valores de distância somados, é selecionado o menor valor encontrado. A coluna desse menor valor será a posição do *splitter* de 1º nível desse grupo;
5. Caso haja dois ou mais pontos com menor valor igual nos passos acima, o algoritmo irá selecionar aquele cujo somatório total de distâncias aos *splitters* de 2º nível é o menor possível.

Como se pode ver, o algoritmo acima busca a posição no mapa na qual o somatório das fibras entre o *splitter* de 1º nível à OLT e aos *splitters* de 2º nível seja o menor possível. Com isso, todas as posições, de todos os *splitters* de 1º nível são definidas. Por fim, o algoritmo encontra o menor caminho entre o *splitter* de 1º nível e os *splitters* de 2º nível com *Dijkstra* e então, essa etapa da rede é exibida, como ilustrado na Figura 4.12.

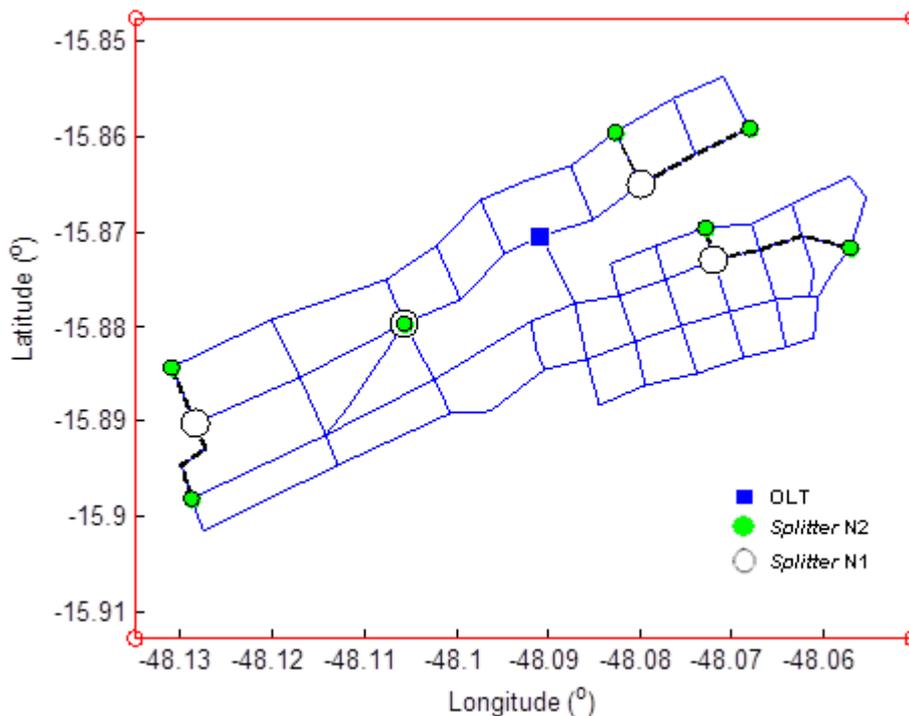


Figura 4.12 Exemplo mostrando a posição dos *splitters*.

4.2.5 - Determinação dos caminhos das fibras mestres

A última etapa do projeto da rede PON consiste em conectar os *splitters* de 1º nível à OLT. Para isso, é assumido que o esse caminho pode ser feito por diversos cabos de fibra óptica partindo da OLT e que *splitters* podem ser derivados desses cabos ao longo de todo o caminho dele. Essa ideia é condizente com o que é executado em projetos reais de redes PON. Geralmente, utilizam-se cabos de fibra óptica ao longo da cidade e, ainda que o resultado não seja puramente baseado no caminho de menor comprimento total, essa técnica permite criar uma rede com capacidade de ser ampliada no futuro. Basta que o cabo lançado possua mais fibras do que a quantidade de *splitters* de 1º nível. Assim, caso seja necessária uma expansão da rede em algum ponto, é possível adicionar um novo *splitter* de 1º nível em um ponto desse cabo, derivando uma das fibras dele e elaborar a nova parte da rede a partir daí.

O primeiro passo dessa etapa consiste em determinar quantos cabos sairão da OLT. Para isso, utiliza-se novamente o algoritmo de agrupamento, desta vez, aplicado aos *splitters* de 1º nível. A ferramenta disponibiliza novamente o dendograma e o mapa com elementos plotados, de maneira a auxiliar a decisão. Geralmente, aqui, pode-se utilizar a análise visual do mapa, dependendo da posição da OLT na cidade. Com a OLT no centro, por exemplo, é interessante que haja ramificações para cada um dos cantos da cidade. Uma vez que o usuário definiu a quantidade de agrupamentos dos *splitters* de 1º nível, ou seja, quantos cabos haverá na saída da OLT, o algoritmo irá encontrar o caminho desses cabos.

O problema agora está em definir o trajeto do cabo, com a ordem de quais *splitters* ele vai atender ao longo do caminho, pois um mesmo cabo pode atender diversos *splitters* de 1º nível ao longo do caminho. Este problema aproxima-se do problema do caixeiro-viajante e é resolvido aqui com um algoritmo genético. A OLT é definida como o ponto inicial a ser visitado. Cada um dos *splitters* de 1º nível será um dos outros pontos que deve ser visitado. O ponto final do trajeto é deixado livre, para que o algoritmo decida. Como se trata de um trajeto simples (o número de pontos a serem visitados é pequeno), a ferramenta encontra a solução ótima com poucas iterações. Assim, o *software* irá definir, para cada um dos cabos da OLT, qual a ordem dos *splitters* a serem atingidos. Uma vez

que essa ordem esteja definida, agora sim o problema se resume apenas a traçar os menores caminhos entre todos os elementos da rede.

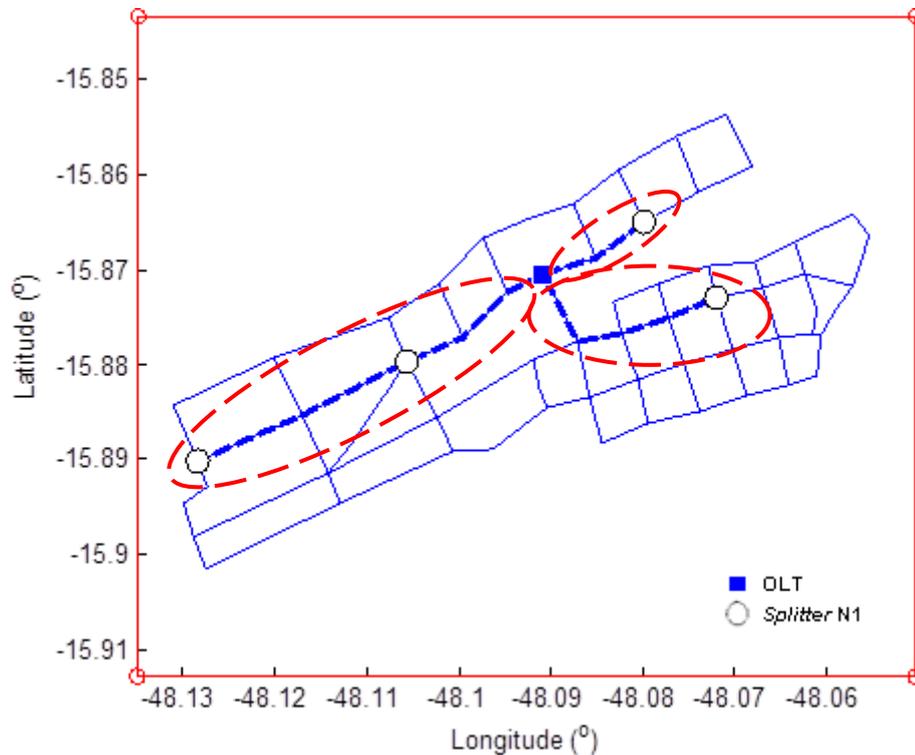


Figura 4.13 Exemplo com 3 cabos partindo da OLT.

4.2.6 - Reagrupamento de *splitters* de 1º nível

Na solução apresentada, inicialmente são definidos os grupos de *splitters* de 1º nível e, em seguida, as fibras mestres são traçadas. Em alguns casos, pode ocorrer de algum *splitter* do agrupamento A estar próximo à fibra do agrupamento B, por exemplo. Quando isso acontecer, o projeto da rede pode ser otimizado trocando o *splitter* para o grupo B e, assim, aproveitar a fibra mestre próxima para que ele seja conectado nela.

Pensando nisso, foi implementada uma função adicional na ferramenta, visando automatizar esse rearranjo de grupos. Ela funciona da seguinte maneira:

1. É avaliada a distância do *splitter* para todos os pontos nos quais as outras fibras mestre (que não a dele) passam;

2. Caso em algum ponto do caminho dessas fibras a distância seja menor do que um limite estabelecido pelo usuário (usualmente, entre 50 e 100 m), o *splitter* é então realocado para o outro grupo;
3. Um novo projeto é feito com base no novo agrupamento;
4. Os passos acima são repetidos para outros *splitters* até que não haja mais *splitters* para serem trocados de grupos ou até que uma troca não favoreça o projeto, diminuindo o comprimento total de fibra.

Com essa função, o projeto da rede ganha características de recursividade, com elementos sendo reposicionados e o projeto refeito. A cada passo, a tendência é que o comprimento total de fibra seja reduzido. No estudo de caso da Seção 5 - , essa função é utilizada e os resultados são discutidos.

4.2.7 - Finalização do projeto

Com as etapas anteriores, conclui-se o projeto da rede PON. Os seguintes elementos foram determinados:

- Agrupamentos de ONUs;
- Quantidade e posição dos *splitters* de 2º nível;
- Caminho das fibras entre ONUs e *splitters* de 2º nível;
- Agrupamentos de *splitters* de 2º nível;
- Quantidade e posição dos *splitters* de 1º nível;
- Caminho das fibras entre *splitters* de 2º nível e *splitters* de 1º nível;
- Agrupamentos de *splitters* de 1º nível;
- Quantidade de cabos na saída da OLT;
- Caminho dos cabos na saída da OLT.

A ferramenta disponibiliza então um mapa com todos os elementos e caminhos das fibras da rede, como ilustrado na Figura 4.14.

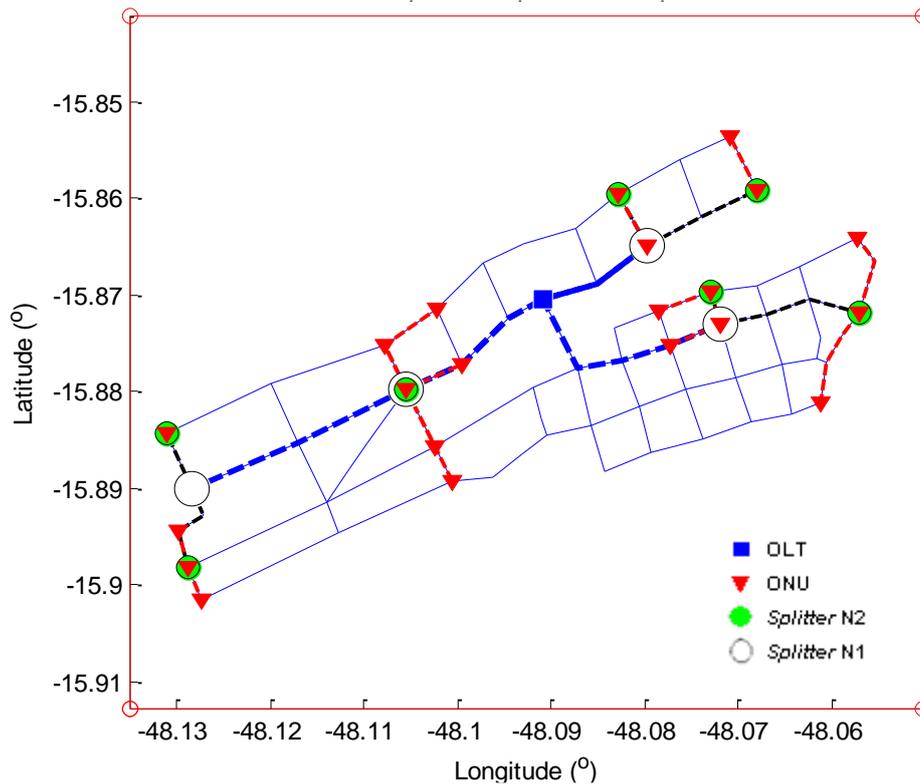


Figura 4.14 Rede finalizada pela ferramenta.

Todas as informações referentes às saídas do projeto são armazenadas em variáveis do MATLAB, devidamente organizadas e um relatório resumindo a rede é exibido ao usuário.

```

=====
Rede com criada com sucesso!
=====
Posição da OLT: 47
Coordenadas da OLT: -15.870481 -48.090879
=====
Quantidade de splitters de 1º nível: 4
Posição dos splitters de 1º nível: 42 48 7 61
Coordenadas dos splitters de 1º nível:
42: -15.879627 -48.105515
...(continua)...
=====
Quantidade de splitters de 2º nível: 7
Posição dos splitters de 2º nível: 37 59 35 55 12 32 42
Coordenadas dos splitters de 2º nível:
37: -15.859093 -48.068052
...(continua)...
=====
Quantidade de cabos na saída da OLT: 3

```

Splitters conectados ao cabo 1 da OLT: 42

...(continua)...

Caminho do cabo 1 da OLT: 47 22 53 42

...(continua)...

Comprimento do cabo 1: 1.894 km

...(continua)...

=====

Splitters de 2º nível

...(continua)...

Comprimento total dos cabos partindo do splitter 48: 1.792 km

...(continua)...

=====

ONUs conectadas ao splitter de 2º nível 37: 50 37

...(continua)...

Comprimento total dos cabos drop partindo do splitter 37: 683.71 m

...(continua)...

=====

Comprimento total de fibra no projeto: 28.454 km

=====

5 - ESTUDO DE CASO

5.1 - ASPECTOS DEMOGRÁFICOS

Para o estudo de caso de um projeto de rede PON, foi escolhido o município brasileiro de Bonito, no Mato Grosso do Sul. Conforme foi dito anteriormente, em 2 - um dos trabalhos analisados realiza um estudo de caso nessa mesma localidade [11]. A fim de comparar o desempenho das duas ferramentas e validar os resultados, a mesma cidade foi escolhida.

Esta cidade se caracteriza por um grande potencial turístico, sendo a principal no complexo turístico do Parque Nacional da Serra da Bodoquena. Sua população é de aproximadamente 20.000 habitantes, com mais de 6.000 domicílios permanentes, mas menos de 20% deles atendidos com internet [20]. Essa carência em atendimentos e o grande potencial turístico da cidade faz que existam programas de incentivo do Governo Federal.

O primeiro deles é o Plano Nacional de Banda Larga (PNBL), que visa ampliar o acesso à internet banda larga no Brasil, massificando e popularizando a internet principalmente em regiões carentes. O segundo projeto de incentivo está incluso no Programa Cidades Digitais. Concebido pelo Ministério das Comunicações, este programa prevê, entre outros: conexão entre os órgãos públicos; acesso da população aos serviços de governo eletrônico; pontos de acesso público à internet em praças, rodoviária e outros espaços; instalação de câmeras de segurança em pontos estratégicos [21]; Em Bonito, ele se traduz no Programa Bonito Digital, da REID (Rede Estadual de Inclusão Digital) [22].



Figura 5.1 Marca do Programa Cidades Digitais. [21]

5.2 - DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE ATENDIMENTO

Como explicado acima, o projeto de ampliação da banda larga em Bonito prevê que diversos órgãos e instituições sejam atendidos. Assim, para esse estudo de caso, foram considerados atendimentos à prefeitura, secretarias, hospitais, escolas, hotéis e pousadas, entre outros pontos de interesse. Na Tabela 5.1 se encontra a lista dos pontos de atendimentos.

Tabela 5.1 Pontos de atendimento em Bonito-MS [11]

1	A.A.B.B.	24	Pousada Carandá
2	Banco do Brasil	25	Pousada Chamamé
3	Bonito Convention & Visitors Bureau	26	Pousada Chão de Pedra
4	Centro de Saúde Padre José Ferrero	27	Pousada do Peralta
5	Correios	28	Pousada Galeria Artes
6	Delegacia de Polícia	29	Pousada Moinho de Vento
7	Eco Pousada Villa Verde	30	Pousada Olho d' Água
8	ENERSUL-Empresa Energética	31	Pousada Recanto dos Pássaros
9	Escola	32	Pousada Segredo
10	Escola Estadual Bonifácio Camargo	33	Pousada Sucuri
11	Escola Municipal João Alves da Nóbrega	34	Pousada Surucúá
12	Escola M. Manoel Inácio de Farias	35	Praça Pública
13	Hospital Darci João Bigaton	36	Prefeitura Municipal
14	Hotel Bonsai	37	Sanesul - Empresa de Saneamento
15	Hotel Cabanas	38	Sec. de Estado de Receita e Controle
16	Hotel Pousada Águas De Bonito	39	Secretaria Municipal de Educação
17	Hotel Pousada Araúna	40	Secretaria Municipal de Obras
18	Hotel Praia Parque	41	Secretaria Municipal de Saúde
19	Hotel Refúgio	42	Secretaria Municipal de Turismo
20	Marruá Hotel	43	Setor de Controladoria
21	Ministério Público Estadual	44	Solar do Cerrado Hotel Pousada
22	Polícia Militar	45	Wetiga Hotel
23	Posto de Saúde		

Os pontos acima foram retirados do mesmo trabalho que propôs o estudo de caso na cidade de Bonito/MS [11], com adaptações. Além desses 45 pontos, foram adicionados mais 25 outros de atendimento na cidade, visando diversificar a rede e alcançar pontos mais distantes daqueles citados. Assim, no total, foram definidos 70 pontos de atendimento.

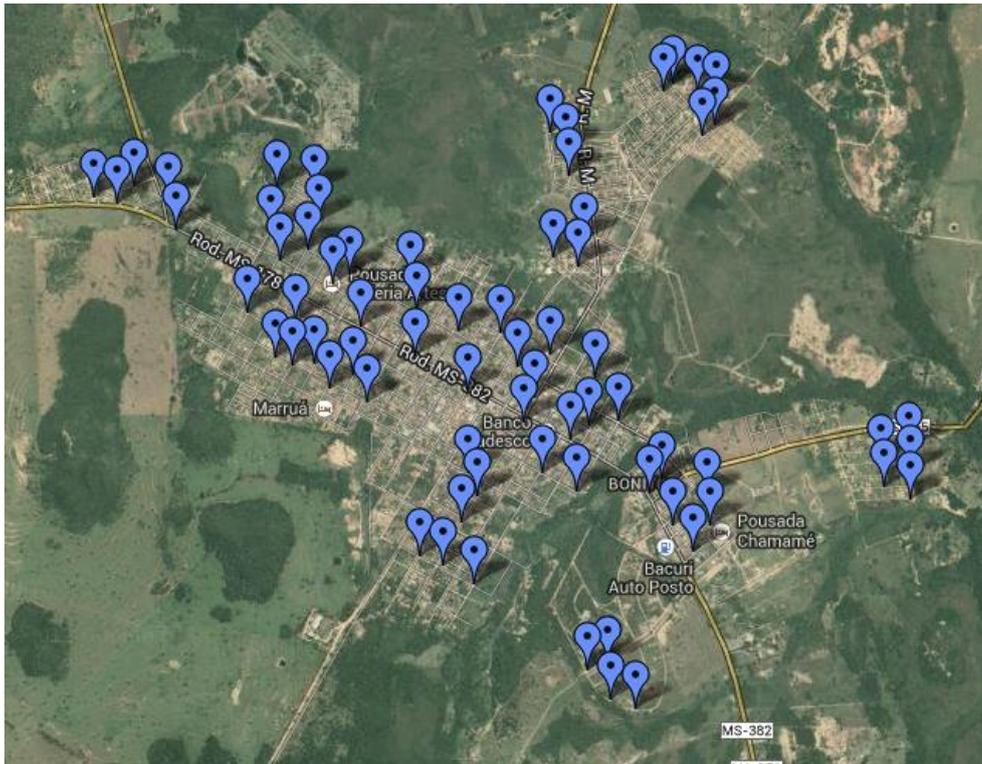


Figura 5.2 Mapa de Bonito-MS com os pontos de atendimento.

A Figura 5.2 corresponde a uma imagem do *Google Maps*, o que mostra a flexibilidade do software em trabalhar com dados oriundos de diferentes fontes. A OLT é definida como sendo na Prefeitura Municipal. Essa é uma decisão comum em projetos de redes PON. Com mesmo ponto de partida e a maioria dos pontos de atendimento definidos da mesma maneira [11], será possível comparar e validar os resultados da ferramenta proposta com o trabalho.

5.3 - CRIAÇÃO E IMPORTAÇÃO DO MAPA

Para dar início ao projeto, é necessário o mapa da cidade de Bonito-MS. O *OpenStreetMap* possui em seu acervo cartográfico tal mapa, o que elimina a necessidade de ter que se desenhar um novo mapa a partir de uma imagem de satélite. Porém, nesse caso, o mapa de Bonito-MS, com os dados brutos, possui 2.785 nós, incluindo aí referências a lagoas, parques, área de preservação nos arredores da cidade, entre outras que são irrelevantes no projeto da rede PON. Por isso, optou-se por editar o mapa bruto, retirando os nós desnecessários e ajustando algumas vias de maneira a reduzir o número total de nós e melhorar o tempo de processamento da ferramenta. Outros ajustes também foram feitos, como por exemplo, alteração nos limites do mapa, para que a visualização

fosse melhorada. Em aproximadamente 1h30 realizaram-se os ajustes citados, corrigindo e simplificando o mapa, de maneira que ao final, foi possível descrever Bonito com 507 nós, 853 arestas e uma área em torno de 25 km². Cada nó representa uma esquina do mapa (cruzamento entre ruas) e cada aresta corresponde a uma rua (ou trecho de rua).



Figura 5.3 Mapa bruto de Bonito-MS, extraído do *OpenStreetMap*.

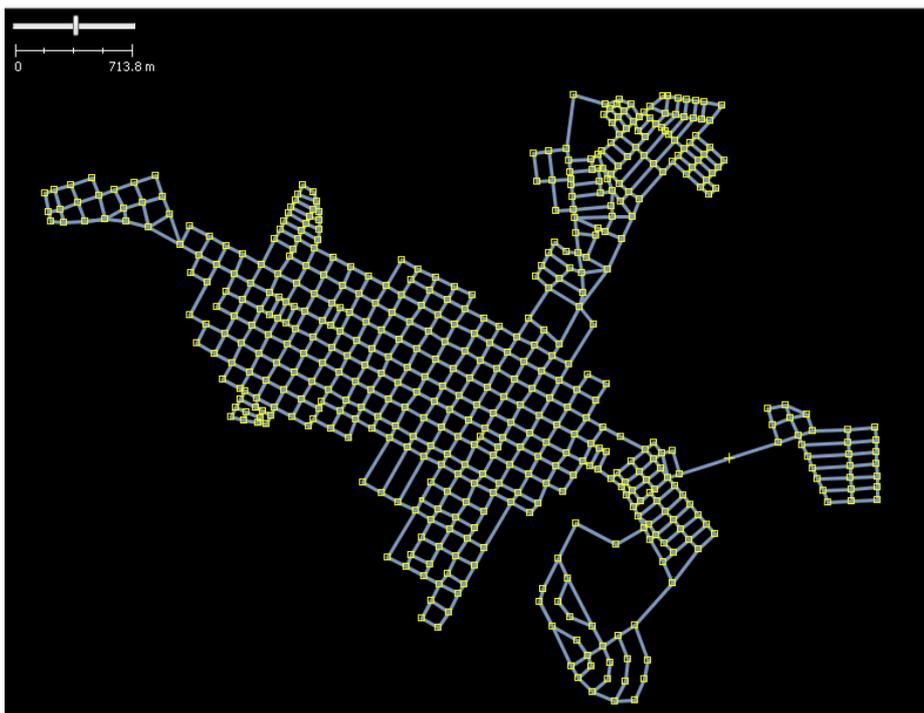


Figura 5.4 Mapa de Bonito-MS editado utilizado no projeto.

Esse mapa, no formato .osm, é importado então para o MATLAB, onde para cada nó é atribuído um ID único de 1 a 507.

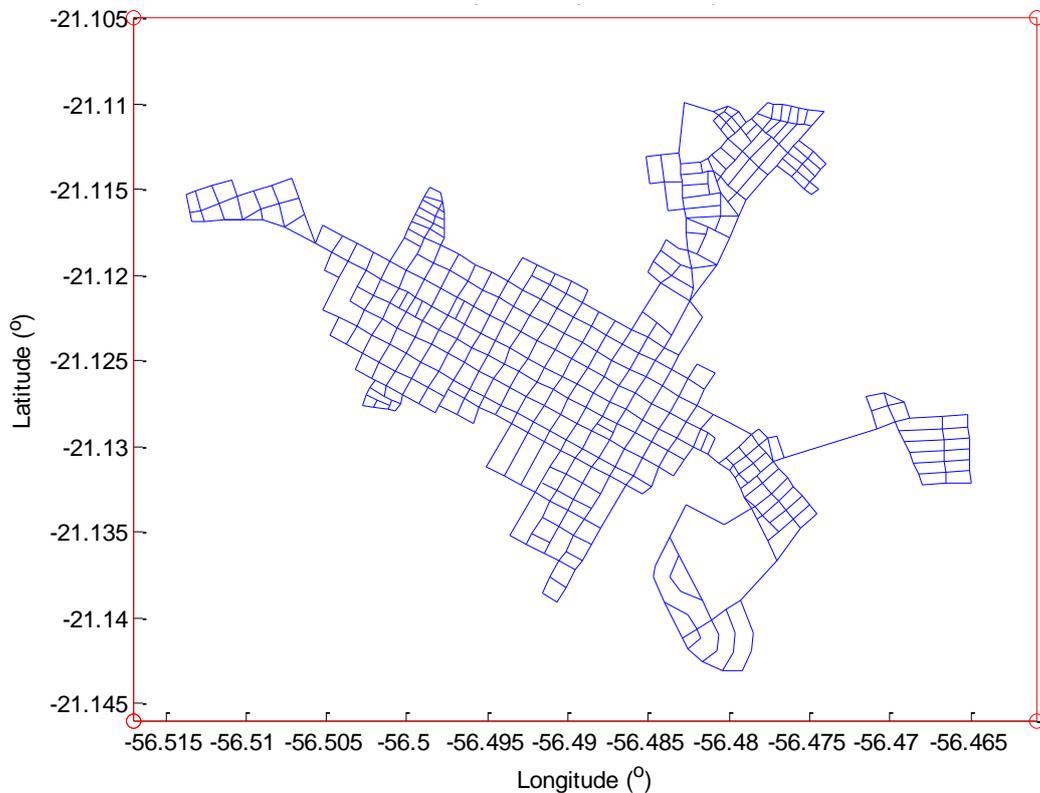


Figura 5.5 Mapa de Bonito-MS importado para o MATLAB.

5.4 - POSICIONAMENTO DE ONUS

Com os pontos de atendimento marcados no *Google Maps*, um arquivo .kml é obtido. Esse arquivo descreve os pontos marcados no mapa, com suas coordenadas. Esse arquivo é então aberto no Excel e uma tabela 2×71 é extraída dele, com as coordenadas de latitude e longitude de todas as ONUs e da OLT. Essa tabela, em formato .xlsx é importada para o MATLAB. A ferramenta então aloca uma ONU para cada ponto de atendimento da tabela do Excel e marca também a posição da OLT, conforme ilustrado na Figura 5.6.

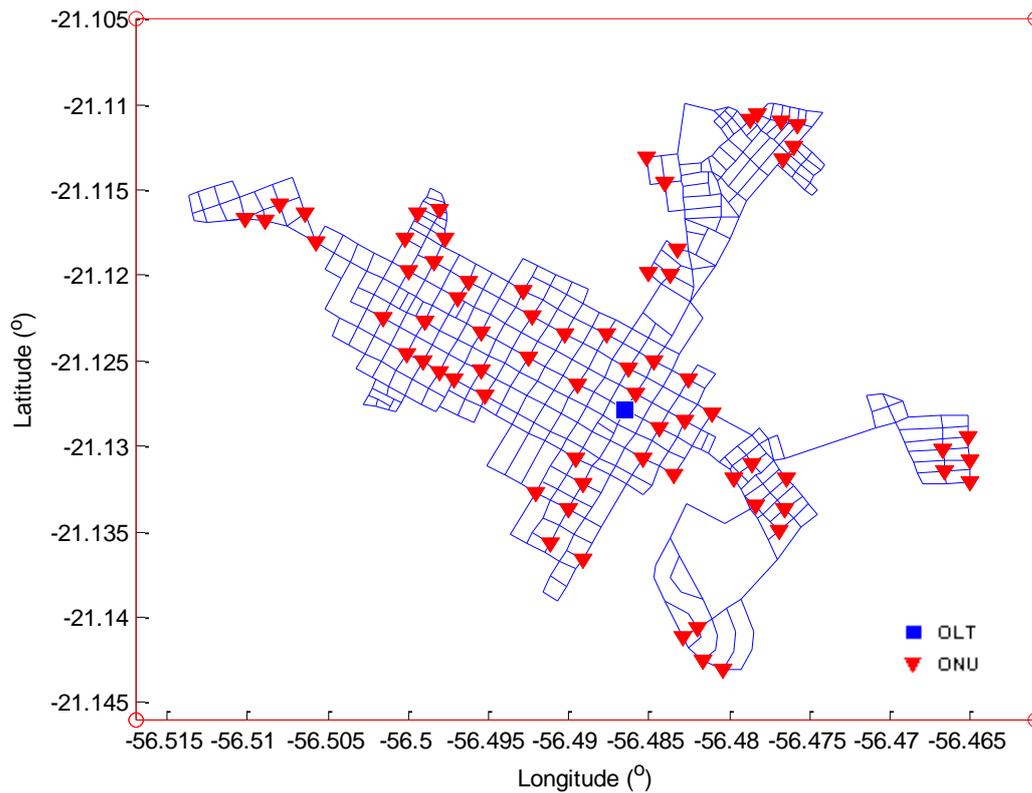


Figura 5.6 OLT e ONUs marcadas no mapa do MATLAB.

5.5 - AGRUPAMENTO DE ONUS

Conforme explicado anteriormente, a primeira etapa do projeto da rede PON consiste em clusterizar as ONUs, de modo a definir quantos *splitters* de 2º nível haverá no projeto.

A ferramenta agrupa as ONUs com a técnica de clusterização hierárquica e o dendograma das ONUs na Figura 5.7 é exibido.

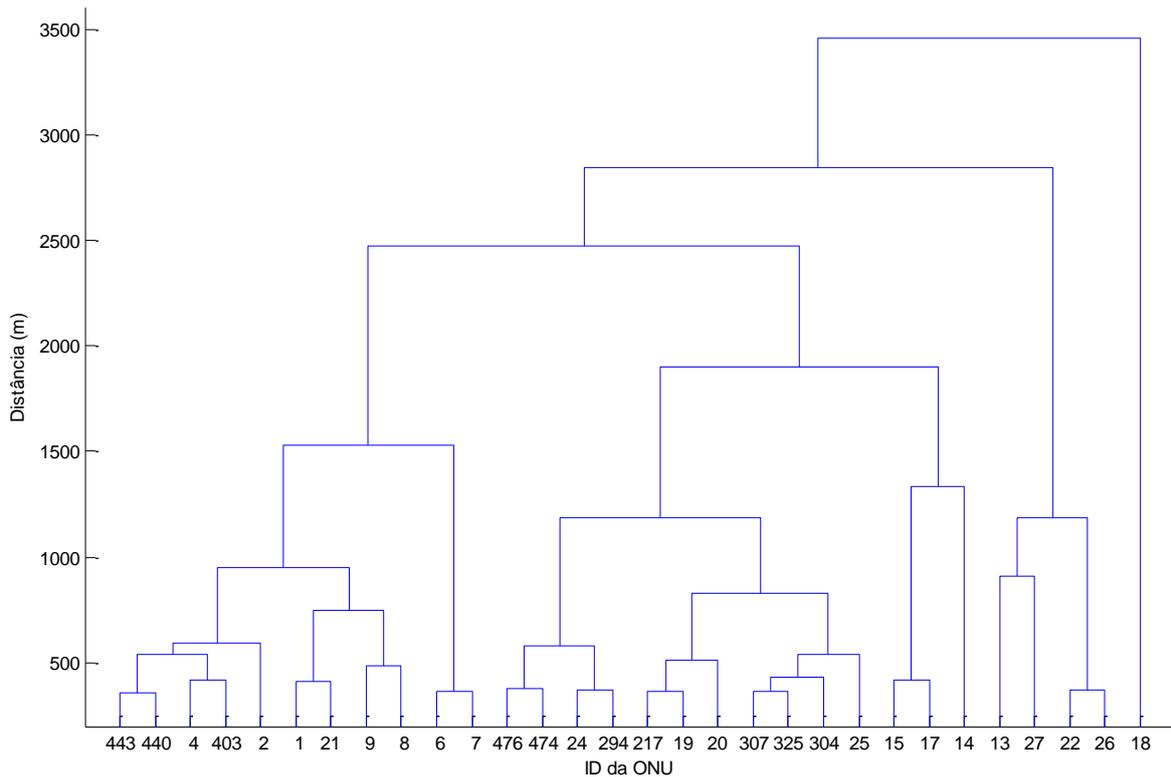


Figura 5.7 Dendrograma com as ONUs agrupadas.

Para se determinar a quantidade de grupos de ONUs, foi utilizado o critério da distância máxima entre uma ONU e seu *splitter* de 2º nível. Determinou-se que 250 m seria o limite, baseado em projetos reais de redes PON. Esse valor mantém um balanço de potência adequado para atendimento ao cliente. Então, com técnica de aproximação de distância, explicada anteriormente, foi encontrada a quantidade de 39 *splitters*. Com esse valor, a distância máxima de uma ONU a seu *splitter* foi de 237 m, o que mostra como a aproximação conseguiu atender ao limite estabelecido.

A fim de verificar se a quantidade de 39 *splitters* estava realmente próxima do ponto ótimo, foram realizadas diversas simulações, com quantidades de grupos variando de 1 a 70 e a distância máxima entre uma ONU e seu *splitter* foi calculada. Como esperado, a curva na Figura 5.8 apresenta um comportamento decrescente, pois, à medida que mais *splitters* são adicionados à rede, mais próximos eles estarão de suas ONUs, até o máximo de 1 *splitter* por ONU, onde a distância será 0 m para todos. A Figura 5.8 demonstra isso.

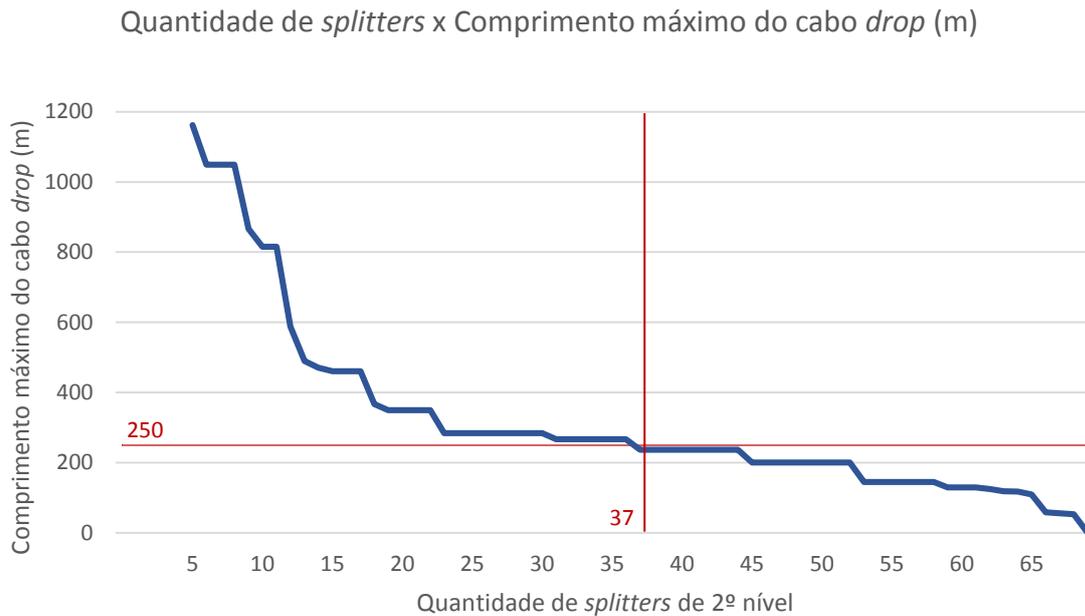


Figura 5.8 Variação do comprimento máximo do cabo *drop*.

O ponto ótimo, onde o comprimento máximo do cabo *drop* está abaixo de 250 m e a quantidade de *splitters* é a menor possível, ocorre em 37. Isso mostra que a aproximação inicial foi efetiva e pouco se distanciou do real. Para analisar o comportamento da aproximação, foram novamente realizadas diversas simulações. Dessa vez, era simulada uma entrada de distância máxima, definida pelo usuário, variando de 50 a 500 m, em passos de 50 m e foi analisada a distância máxima real encontrada. Como é possível ver na Figura 5.9, o resultado encontrado manteve-se bastante próximo do esperado e, tão importante quanto, manteve-se sempre abaixo do limite, exceto por dois nos extremos. Nos pontos em a máxima distância encontrada superou o limite estabelecido pelo usuário, a diferença ficou em 6 m, para o caso da simulação com limite de 50 m e, a partir daí, em no máximo 2,4 %, o que reforça a boa aproximação.

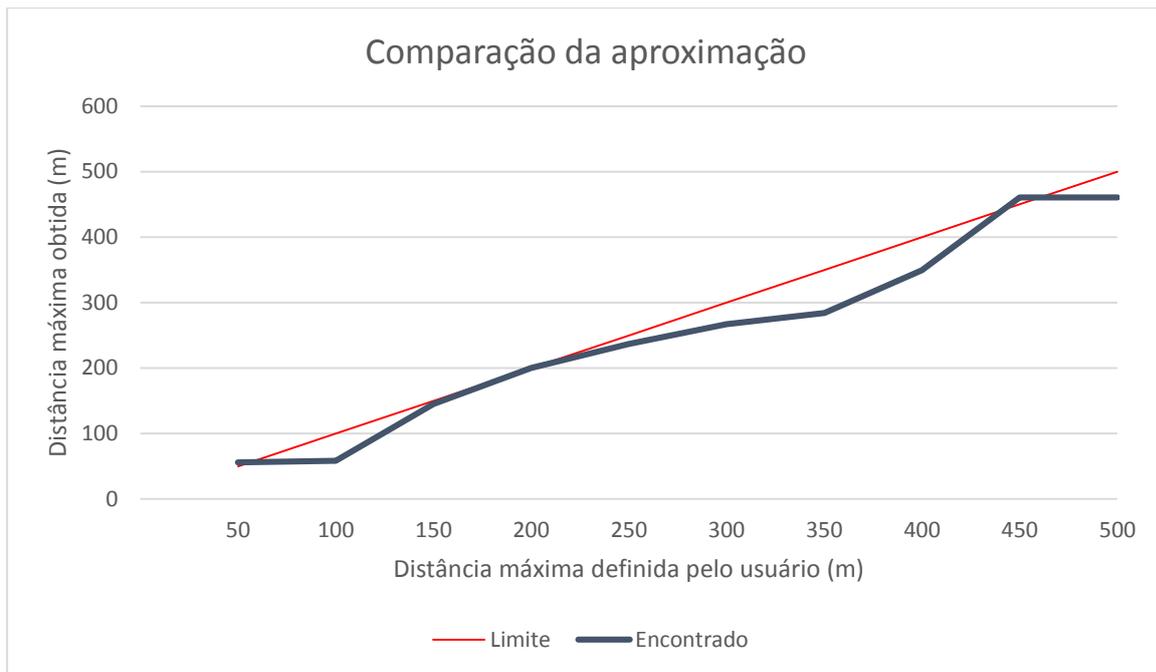


Figura 5.9 Comparação da aproximação com o resultado esperado.

Relembrando, a aproximação acima existe porque o algoritmo de agrupamento trabalha sobre distâncias entre ONUs e o limite do usuário é sobre distâncias entre ONUs e *splitters*. A posição do *splitter* só é definida no passo seguinte, por isso, há a necessidade de se realizarem várias simulações (que incluam o passo seguinte) para se obterem os resultados na Figura 5.9.

Com o ponto ótimo de 37 grupos de ONUs encontrado, esse foi o valor utilizado nesse projeto.

5.6 - POSICIONAMENTO DE *SPLITTERS* DE 2º NÍVEL

Para os 70 pontos de atendimento, com 37 grupos consegue-se manter a distância máxima entre ONU e *splitter* de 2º nível em menos de 250 m (restrição do projeto). A ferramenta agora define a posição desses 37 *splitters*, baseada na explicação da Seção 4.2.2

-

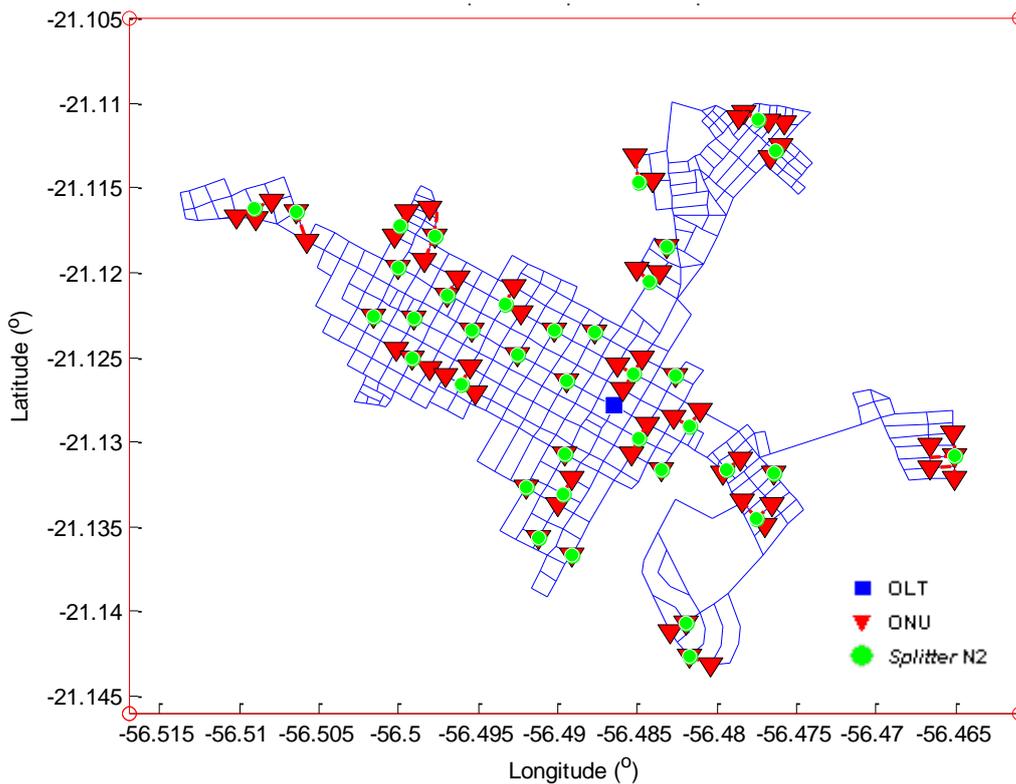


Figura 5.10 Mapa com os *splitters* posicionados.

É possível observar na Figura 5.10 que várias ONUs foram alocadas com um *splitter* dedicado exclusivamente para ela. Esse resultado se deve à restrição de 250 m e ao fato de as ONUs estarem bastante dispersas no mapa. Em uma cidade com maior densidade demográfica e, conseqüentemente, pontos de atendimento mais próximos, provavelmente o resultado teria grupos com mais ONUs.

5.7 - SPLITTERS DE 1º NÍVEL E FIBRAS MESTRE

Com os grupos de ONUs e as posições dos *splitters* de 2º nível definidas, o próximo passo é determinar a quantidade de *splitters* de 1º nível. A partir disso, será possível determinar os caminhos das fibras mestres.

Duas variáveis precisam ser definidas pelo usuário: a quantidade de *splitters* de 1º nível e a quantidade de cabos na saída da OLT (fibras mestre). Podem-se combinar as variáveis acima centenas de vezes e cada uma delas resultará em um projeto de rede diferente. Diante de tantas possibilidades, optou-se por realizar um estudo dos projetos resultantes das combinações e assim, escolher o mais adequado.

O primeiro passo consistiu em simular diversos projetos com combinações de *splitters* de 1º nível variando de 1 a 30 e cabos na saída da OLT variando de 1 a 5. O parâmetro de comparação das simulações foi o comprimento total de fibra no projeto. Com isso, a Figura 5.11 foi obtida.

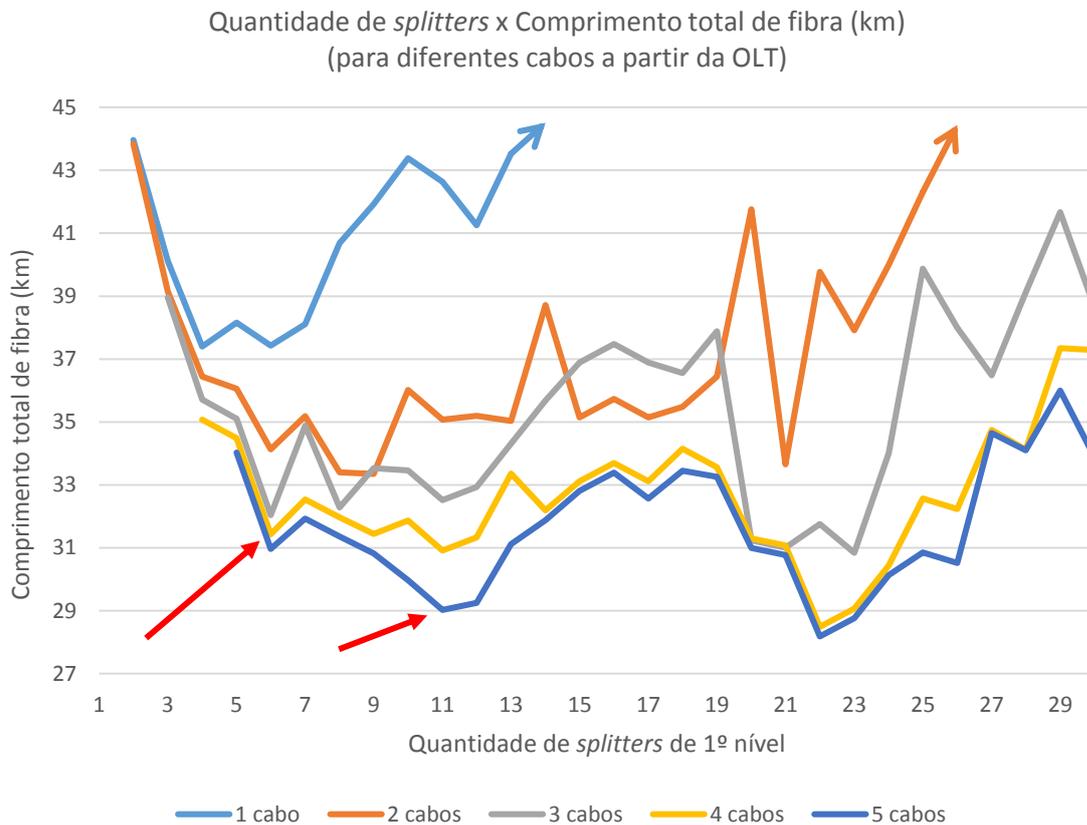


Figura 5.11 Quantidade de *splitters* x Comprimento total de fibra (km).

Analisando a Figura 5.11 acima, optou-se por dois pontos. Foram eles:

- 6 *splitters* de 1º nível e 4 cabos na saída da OLT (31,44 km);
- 11 *splitters* de 1º nível e 5 cabos na saída da OLT (29,25 km).

Resultados para quantidades de *splitters* acima de 15 não são interessantes, pois é possível obter comprimentos totais aproximados com uma quantidade bem menor de *splitters*. Já os dois pontos selecionados representam projetos com reduzido comprimento total de fibra e reduzido número de *splitters*. A Figura 5.11 possui aproximadamente 150 pontos e para cada um deles foi necessária uma simulação de projeto diferente. Em torno de 1h30 de processamento foi necessária para se obter todos os pontos do gráfico. Porém,

em um projeto real, não seriam necessárias essa grande quantidade de simulações e o tempo de processamento poderia ser reduzido consideravelmente.

Como dito, cada um desses pontos resulta em projetos de rede com características distintas e, por isso, eles serão analisados separadamente.

5.8 - CASO 1: 6 *SPLITTERS* DE 1º NÍVEL E 4 CABOS NA SAÍDA DA OLT

Nesse projeto, os 37 *splitters* de 2º nível são agrupados em 6 grupos. Para cada um dos grupos, um *splitter* de 1º nível será alocado. Posteriormente, eles 6 serão agrupados novamente em 4 grupos, um para cabo na saída da OLT. Os caminhos das fibras serão definidos e a rede estará projetada. A seguir, esses passos serão detalhados.

5.8.1 - Agrupamento e posicionamento de *splitters* de 1º nível

A função de clusterização hierárquica retorna o dendograma da Figura 5.12. Para se obter os 6 grupos definidos, a árvore será cortada na altura 1441,3 m.

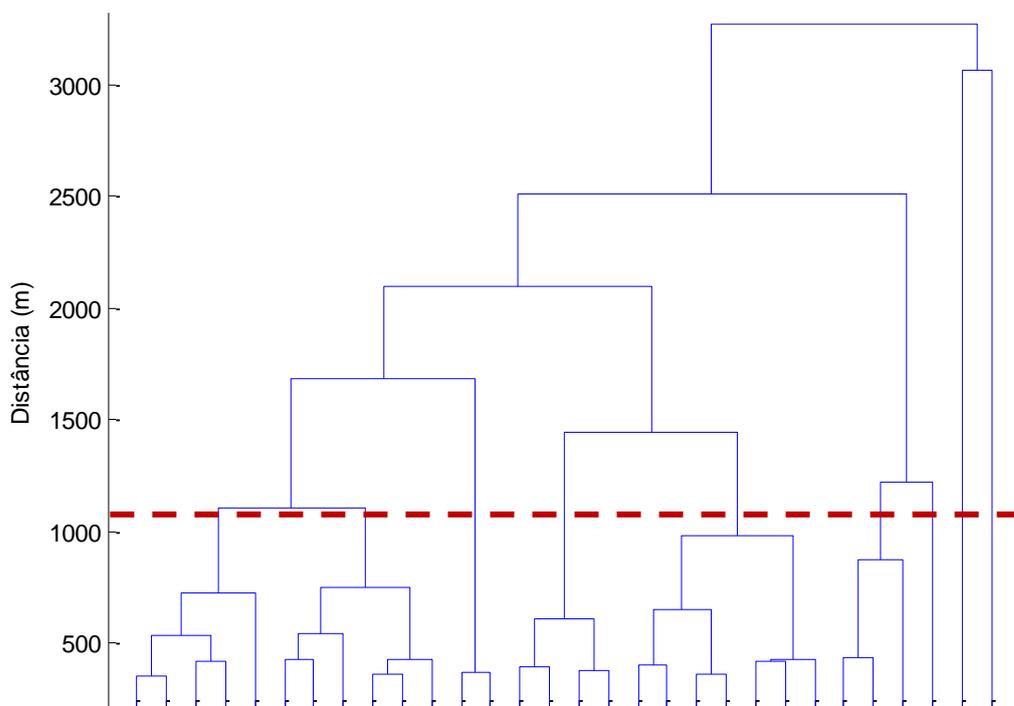


Figura 5.12 Dendograma dos *splitters* de 2º nível.

A ferramenta irá agora alocar um *splitter* de 1º nível para cada um desses grupos. Para isso, ela irá procurar, dentre todas as posições possíveis no mapa, aquela que resultará no menor comprimento de fibra. O resultado é apresentado na Figura 5.13.

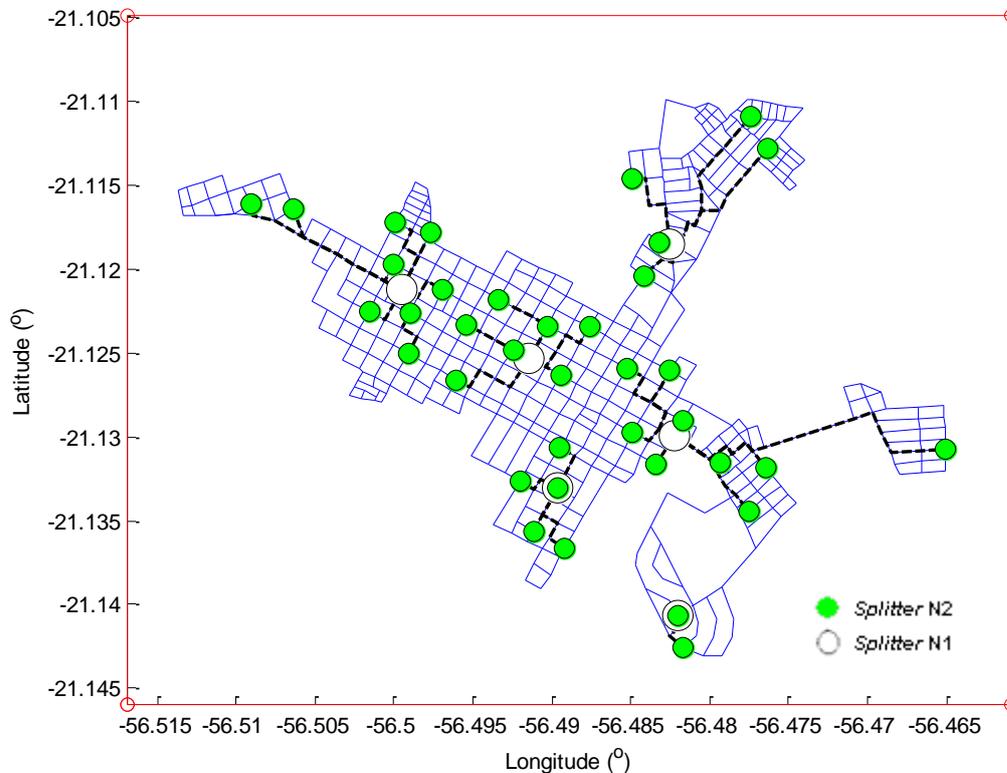


Figura 5.13 Grupos de *splitters* de 2º nível

Na Figura 5.13, é possível identificar os 6 splitters de 1º nível, os 37 splitters de 2º nível e os caminhos das fibras que os conectam.

5.8.2 - Determinação dos caminhos das fibras mestre

Para determinar os caminhos das fibras mestre, primeiramente, é necessário definir quantas delas haverá na saída da OLT. Como simulado, o projeto terá 4 cabos, ou seja, 4 grupos de *splitters* de 1º nível. A ferramenta irá então agrupá-los por meio da clusterização hierárquica e determinar a ordem de atendimento pelas fibras mestres por meio do algoritmo genético.

A escolha por 4 cabos na saída da OLT é óbvia quando se observa a Figura 5.14.

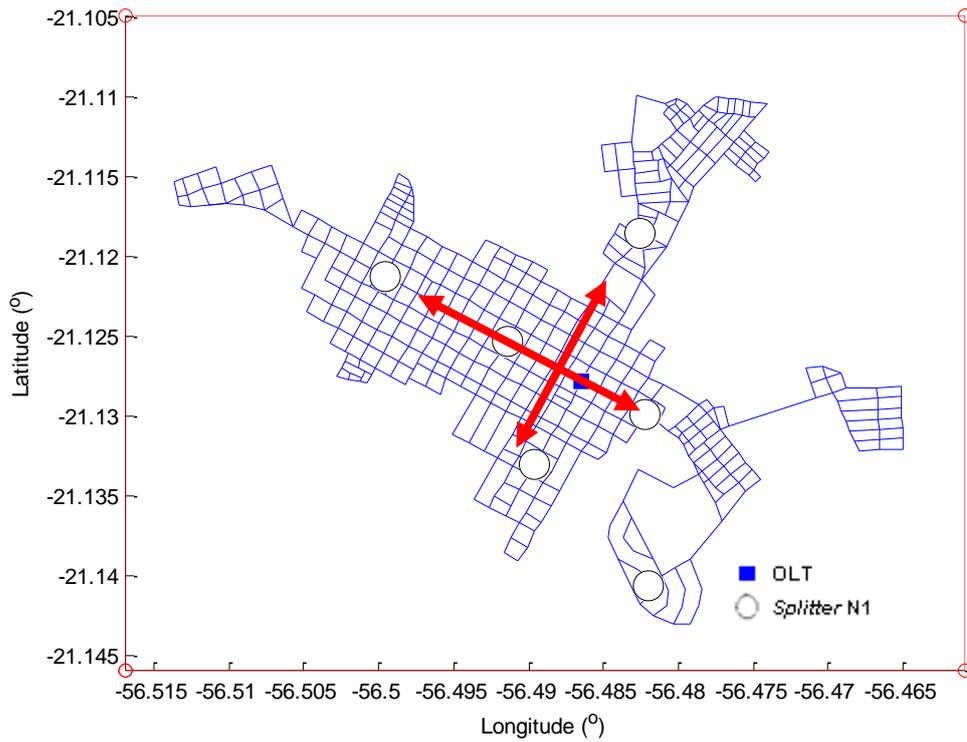


Figura 5.14 OLT, *splitters* de 1º nível e as direções das fibras mestre.

As setas em vermelho na Figura 5.14 indicam as 4 direções nas quais os *splitters* de 1º nível se dispersam no mapa, o que justifica os 4 cabos na saída da OLT. O resultado da clusterização hierárquica e do algoritmo genético é exibido na Figura 5.15.

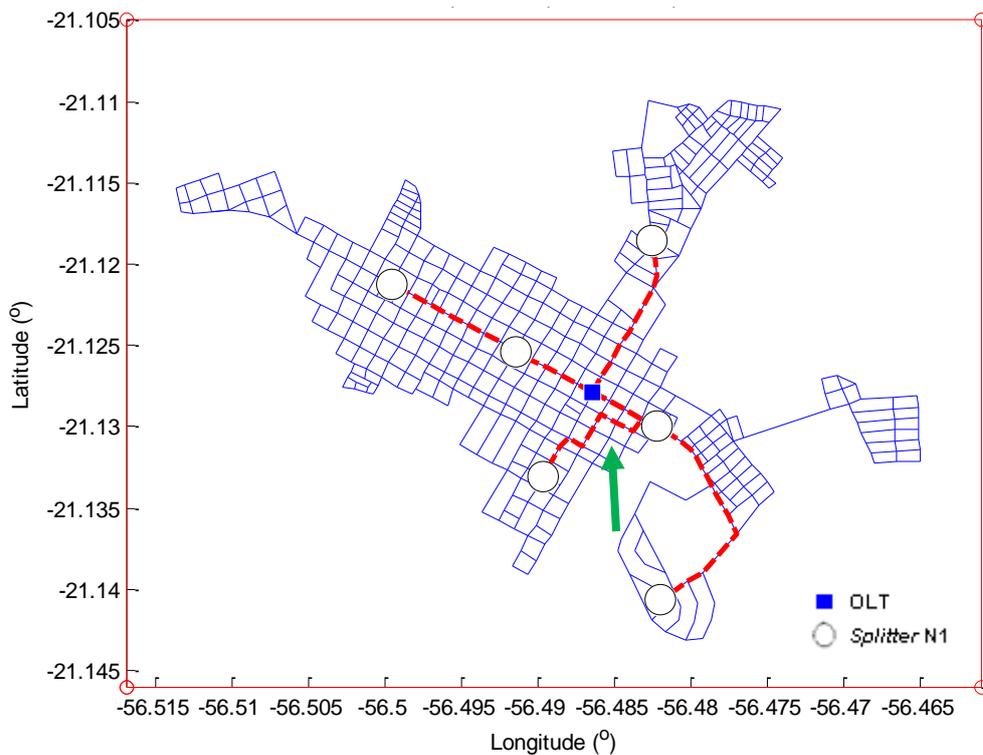


Figura 5.15 Caminhos das fibras mestre sobre o mapa.

É possível observar na Figura 5.15 que a ferramenta cumpriu o esperado, com os cabos nas 4 direções comentadas anteriormente.

5.8.3 - Reagrupamento de *splitters* de 1º nível

Uma análise mais detalhada da Figura 5.15 revela que um dos cabos (marcado com a seta verde) não está exatamente como se espera. Ocorre que o algoritmo de agrupamento selecionou os grupos baseados na distância entre os *splitters* de 1º nível. Posteriormente, as fibras mestre foram lançadas e então, a fibra de um grupo passa muito próximo a um *splitter* de outro grupo, conforme ilustrado na Figura 5.16.

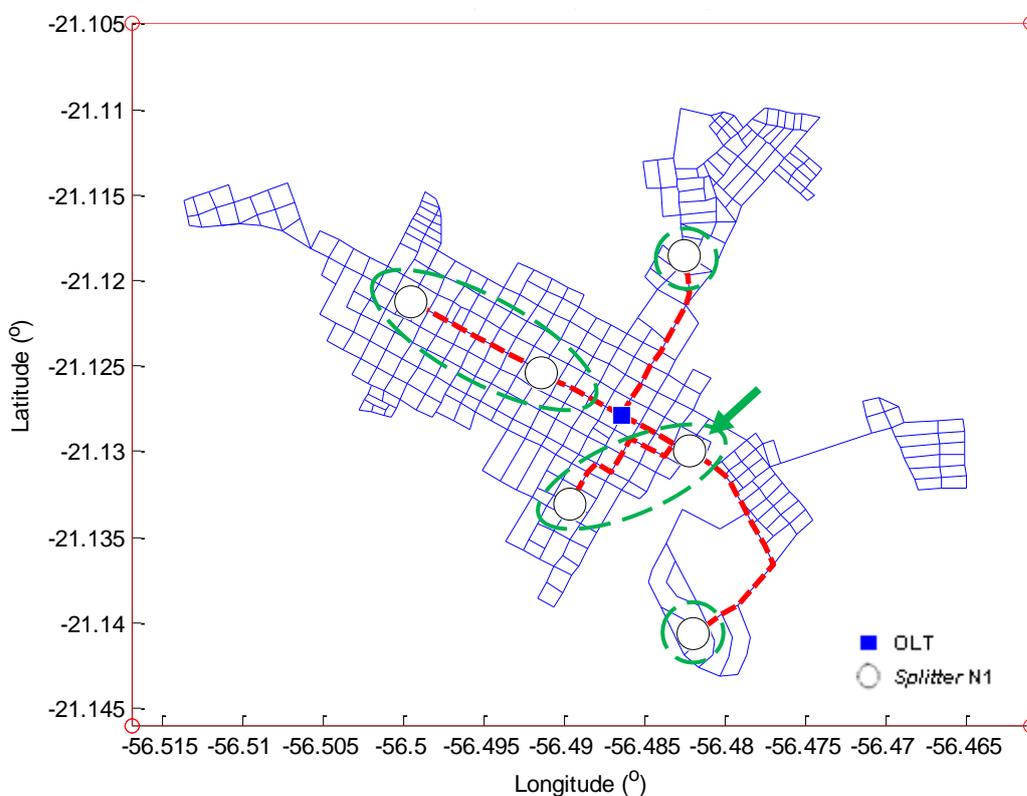


Figura 5.16 Agrupamentos de *splitters* de 1º nível.

O *splitter* marcado com a seta verde na Figura 5.16 demonstra como o algoritmo de agrupamento cumpriu seu papel, agrupando os *splitters* mais próximos, porém, após o lançamento das fibras, esse agrupamento poderia ser melhorado.

Então, a função de reagrupamento é utilizada a fim de melhorar o projeto da rede. Conforme explicado, esta função busca automaticamente *splitters* próximos aos cabos mestres e então, caso seja detectado algum, ele é reagrupado para o grupo do cabo

próximo. Para esse projeto, foi estabelecido 100 m como a menor distância na qual a ferramenta irá reagrupar. Dessa maneira, a ferramenta irá buscar *splitters* de 1º nível a menos de 100 m de qualquer ponto do cabo e trocá-los de grupo.

Após o reagrupamento, a rede é novamente projetada e o resultado é exibido na Figura 5.17.

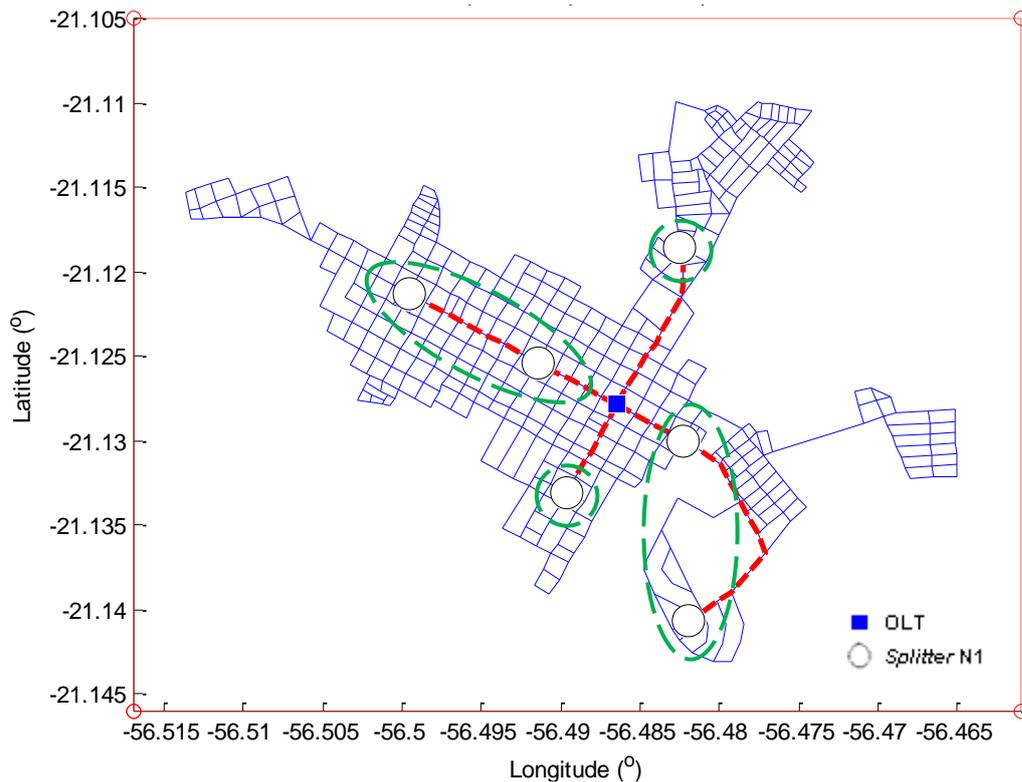


Figura 5.17 Agrupamento melhorado.

Após a melhoria do agrupamento, é possível ver na Figura 5.17 que os novos grupos fazem mais sentido e está mais de acordo com o esperado. O comprimento total de fibra foi reduzido de 31,44 km para 30,47 km.

5.8.4 - Finalização do projeto

Com a etapa de reagrupamento, conclui-se o projeto da rede PON. A ferramenta então exibe a nova rede finalizada e os resultados, com as posições dos elementos, os grupos e os caminhos e comprimentos das fibras. A Figura 5.18 ilustra a rede finalizada.

```

=====
Rede com criada com sucesso!
=====
Posição da OLT: 241
Coordenadas da OLT: -21.127860 -56.486454
=====
Quantidade de splitters de 1º nível: 6
Posição dos splitters de 1º nível: 323 413 19 207 247 199
Coordenadas dos splitters de 1º nível:
323: -21.125345 -56.491431
...
=====
Quantidade de splitters de 2º nível: 37
Posição dos splitters de 2º nível: 19 1 465 425 282 247...
Coordenadas dos splitters de 2º nível:
19: -21.140627 -56.481977
...
=====
Quantidade de cabos na saída da OLT: 4
Splitters conectados ao cabo 1 da OLT: 199
...
Caminho do cabo 1 da OLT: 241 240 239 238 283 284 196 197 198 199
...
Comprimento do cabo 1: 1.152 km
...
=====
Splitters de 2º nível conectados ao splitter de 1º nível 323: 362 332...
...
Comprimento total dos cabos partindo do splitter 323: 2.981 km
...
=====
ONUs conectadas ao splitter de 2º nível 19: 26 19
...
Comprimento total dos cabos drop partindo do splitter 19: 118.28 m
...
=====
Comprimento total de fibra no projeto: 30.471 km
=====
>>

```

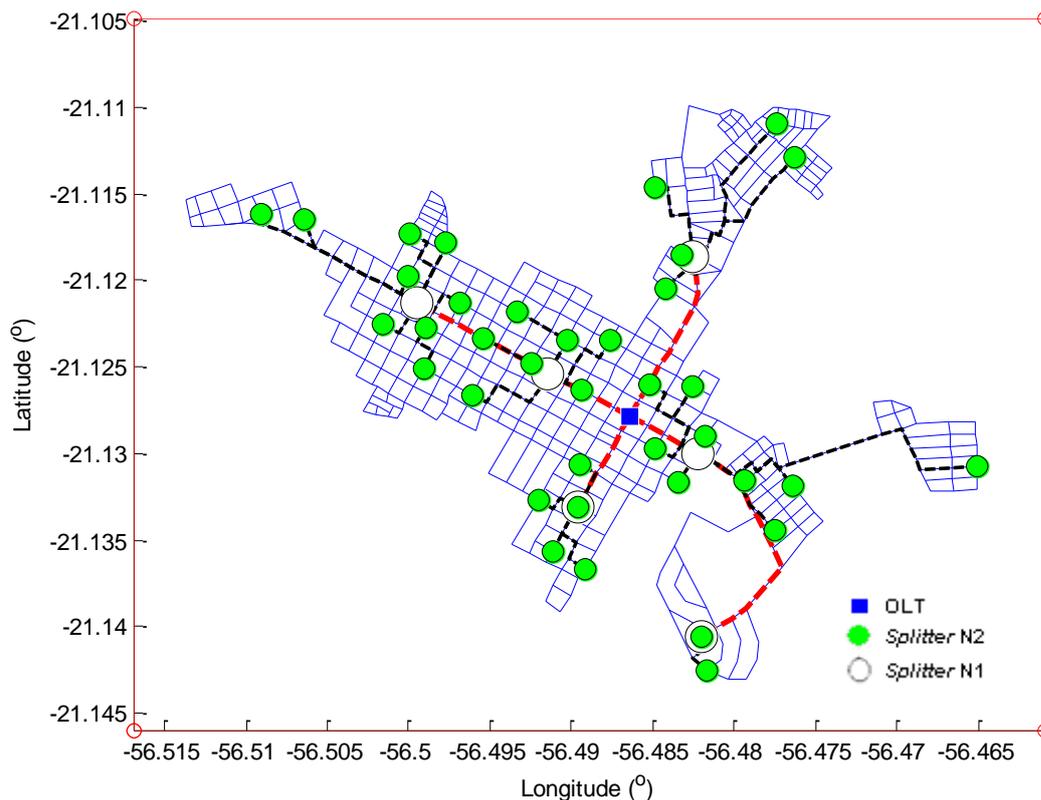


Figura 5.18 Rede finalizada com OLT, *splitters* e caminhos das fibras.

5.8.5 - Análise do projeto

O resultado do projeto da rede é considerado satisfatório. É possível ver que houve uma otimização no total de fibra utilizado, pois diversos trechos agora são compartilhados. A adoção de *splitters* se mostrou eficiente.

A escolha por este ou pelo projeto que será apresentado na próxima Seção se dará pela previsão de novos pontos de atendimentos na rede. Há algumas maneiras de se expandir a rede:

1. Novas ONUs conectadas aos *splitters* de 2º nível existentes. Nesse caso, os novos pontos de atendimento devem estar a no máximo a 200 m do *splitter*. Também deve ser observado o limite da taxa de divisão do *splitter*;
2. Novos *splitters* de 2º nível conectados aos *splitters* de 1º nível existentes. Essa opção é interessante caso haja novas ONUs que não podem ser atendidas pelo método anterior, mas que estejam próximas aos *splitters* de 1º nível;

3. Novos *splitters* de 1º nível conectados a uma fibra mestre existente. Nesse caso, o projeto é limitado pela fibra mestre. Primeiramente, o cabo deve ter reserva de fibra para derivação. Em segundo lugar, os novos *splitters* devem estar próximos à fibra mestre e, portanto, é necessário que a fibra mestre esteja passando pela nova região a ser atendida;
4. Por fim, a opção mais custosa seria o lançamento de novos cabos de fibra mestre, o que só seria justificável caso houvesse uma grande expansão da rede em uma região não atendida.

É observável que na Figura 5.17 que as fibras mestres se concentram na região central do mapa de Bonito-MS. A escolha por esse projeto é a mais adequada caso a perspectiva de novos pontos de atendimento seja maior na região central. Assim, as opções 1 e 2 provavelmente seriam as mais utilizadas. As fibras mestre não alcançam as regiões mais afastadas da cidade, de maneira que a expansão da rede nesse sentido seria dificultada.

5.9 - CASO 2: 11 SPLITTERS DE 1º NÍVEL E 5 CABOS NA SAÍDA DA OLT

Conforme a análise anterior, a escolha por um projeto ou por outro irá depender da previsão de futuros novos pontos de atendimento. Assim, essa segunda opção é oferecida. As seções a seguir irão descrever as etapas do projeto e, ao fim, será apresentada a análise que justificará porque esse projeto é mais adequado caso sejam previstas novas expansões nas regiões mais afastadas da cidade.

5.9.1 - Agrupamento e posicionamento de *splitters* de 1º nível

Para se obter 11 grupos de *splitters* de 1º nível, o corte da árvore de hierarquização se dá em 876 m. No dendograma da Figura 5.19 é possível observar que abaixo da linha de corte, 11 grupos de *splitters* de 2º nível serão formados.

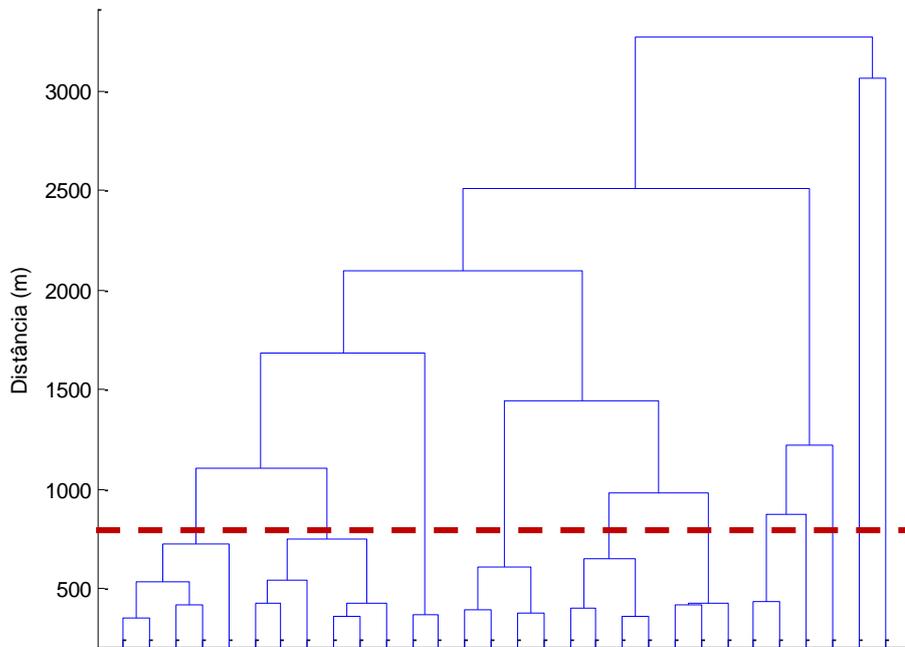


Figura 5.19 Dendrograma dos *splitters* de 2º nível.

Novamente, 1 *splitter* de 1º nível será alocado para grupo. O posicionamento dele seguirá a diretriz de reduzir o comprimento total de fibra. O resultado é apresentado na Figura 5.20.

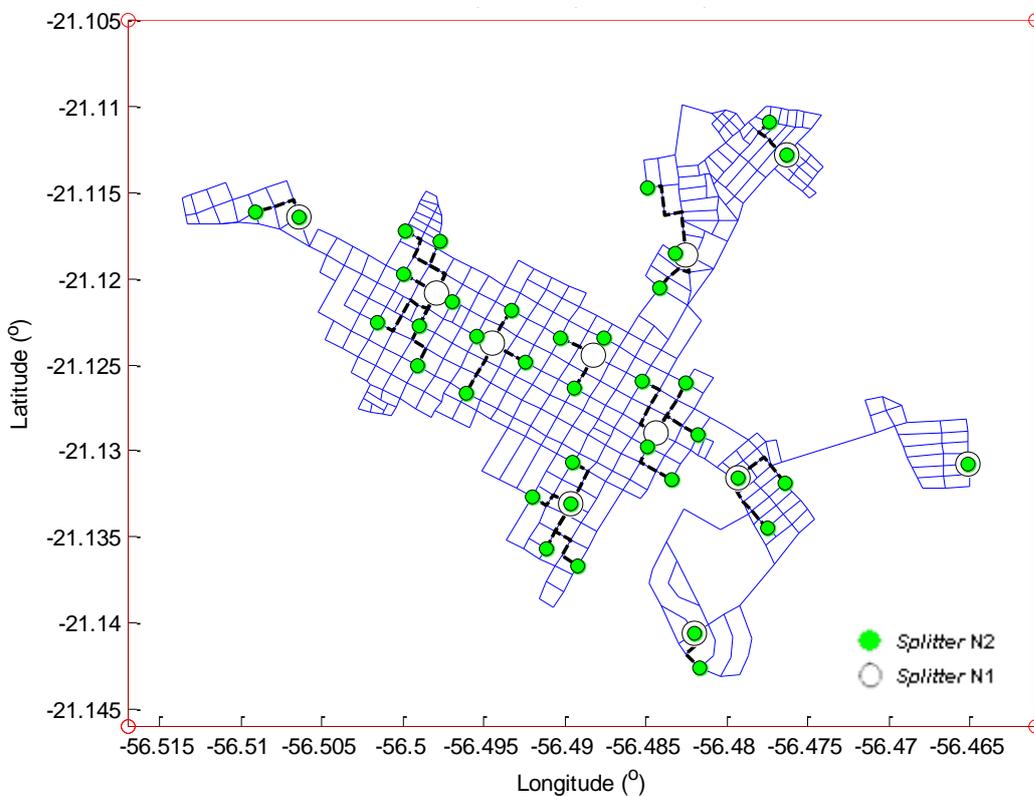


Figura 5.20 Grupos de *splitters* de 2º nível.

Comparada à Figura 5.13, é possível observar que nesse projeto há mais *splitters* nas regiões mais afastadas do centro, o que irá implicar em fibras mestres passando por essas regiões, como será apresentado nas seções seguintes.

5.9.2 - Determinação dos caminhos das fibras mestre

Para este projeto, foram definidos 5 cabos na saída da OLT, o que significa 5 grupos de *splitters* de 1º nível. Mais uma vez, a clusterização hierárquica é responsável por formar os 5 grupos e o algoritmo genético irá determinar a ordem de atendimento, para passagem das fibras mestres.

Como se pode ver na Figura 5.22, 5 direções na saída da OLT é uma escolha lógica.

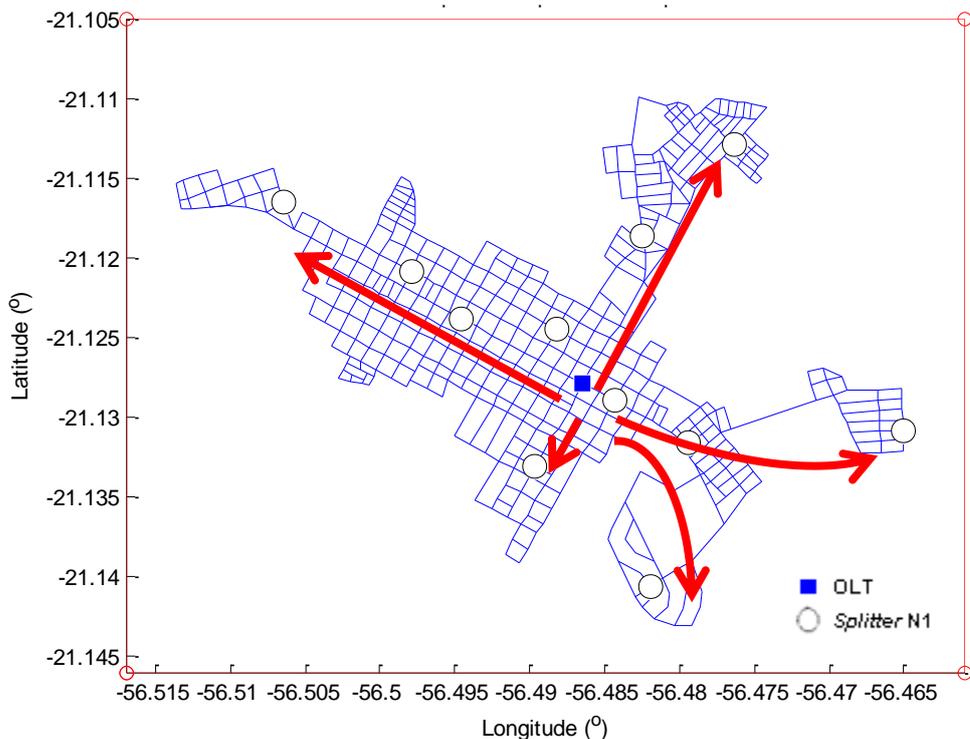


Figura 5.21 OLT, *splitters* de 1º nível e as direções das fibras mestre.

As setas em vermelho na Figura 5.21 indicam as 5 direções nas quais os *splitters* de 1º nível se dispersam no mapa, o que justifica os 5 cabos na saída da OLT. O resultado da clusterização hierárquica e do algoritmo genético é exibido na Figura 5.22.

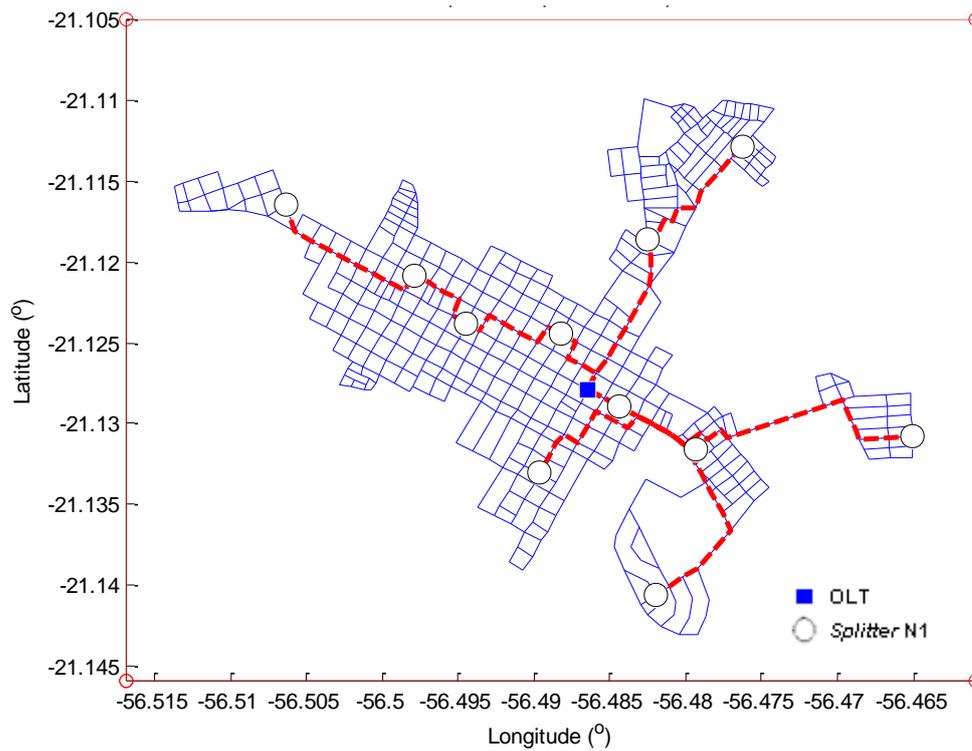


Figura 5.22 Caminhos das fibras mestre sobre o mapa.

5.9.3 - Reagrupamento dos *splitters* de 1º nível

Assim como no projeto com 6 *splitters* de 1º nível e 4 cabos na saída da OLT, é possível que haja uma nova solução melhor caso os grupos sejam reordenados de modo a aproveitarem fibras que estejam perto.

A Figura 5.23 ilustra como os grupos foram determinados com a clusterização hierárquica baseada na distância.

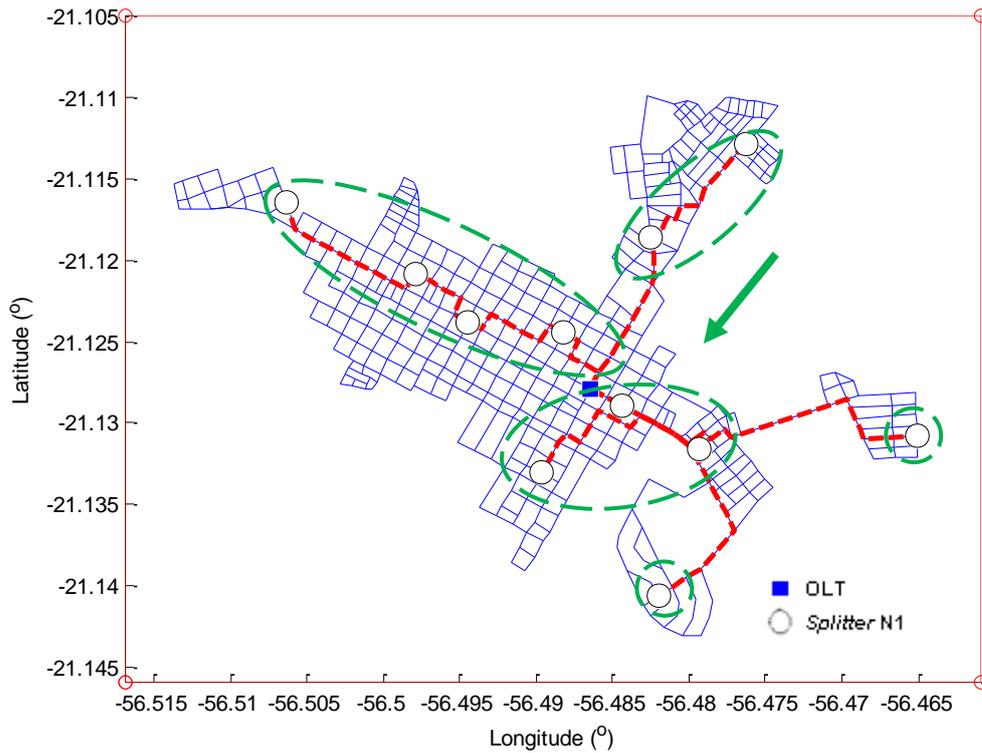


Figura 5.23 Agrupamentos de *splitters* de 1º nível.

O grupo apontado pela seta verde na Figura 5.23 pode ser realocado de modo a que alguns de seus *splitters* possam ser atendidos com outras fibras mestres. O algoritmo de reagrupamento é então utilizado e, assim como no projeto anterior, um novo agrupamento de *splitters* de 1º nível é feito e o projeto é exibido, conforme a Figura 5.24.

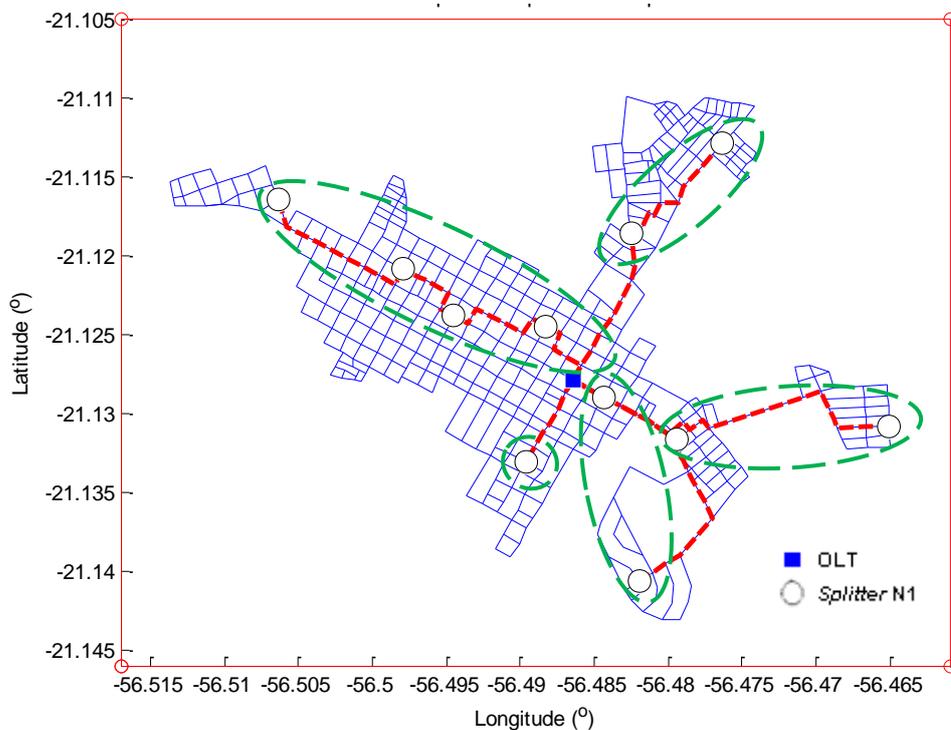


Figura 5.24 Agrupamento melhorado.

Após a melhoria do agrupamento, o comprimento total de fibra foi reduzido de 29,25 km para 27,37 km.

5.9.4 - Finalização do projeto

O projeto da rede PON é então concluído com a exibição da nova rede finalizada e os resultados, com as posições dos elementos, os grupos e os caminhos e comprimentos das fibras. A Figura 5.25 ilustra a rede finalizada.

```
=====
Rede criada com sucesso!
=====
Posição da OLT: 241
Coordenadas da OLT: -21.127860 -56.486454
=====
Quantidade de splitters de 1º nível: 11
Posição dos splitters de 1º nível: 306 353 185 199 54...
Coordenadas dos splitters de 1º nível:
306: -21.124422 -56.488236
...
=====
Quantidade de splitters de 2º nível: 37
Posição dos splitters de 2º nível: 19 1 465...
Coordenadas dos splitters de 2º nível:
19: -21.140627 -56.481977
...
=====
Quantidade de cabos na saída da OLT: 5
Splitters conectados ao cabo 1 da OLT: 19 54
...
Caminho do cabo 1 da OLT: 241 228 220 212 207 204...
...
Comprimento do cabo 1: 2.209 km
...
=====
Splitters de 2º nível conectados ao splitter de 1º nível 306: 307 325 304
...
Comprimento total dos cabos partindo do splitter 306: 0.608 km
...
=====
ONUs conectadas ao splitter de 2º nível 19: 26 19
...
Comprimento total dos cabos drop partindo do splitter 19: 118.28 m
...
=====
Comprimento total de fibra no projeto: 27.374 km
=====
>>
```

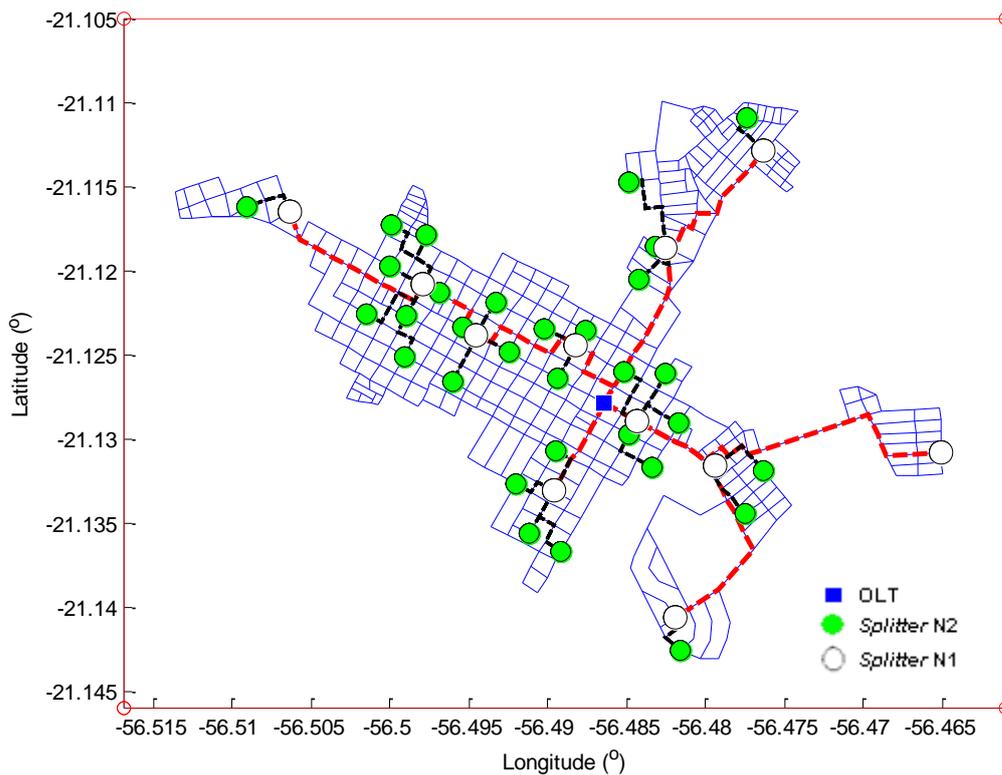


Figura 5.25 Rede finalizada com OLT, *splitters* e caminhos das fibras.

5.9.5 - Análise do projeto

Conforme foi abordado anteriormente, este projeto é mais aplicável caso se deseje expandir a rede em regiões fora do centro da cidade. Isso porque há *splitters* de 1º nível nessa região e, conseqüentemente, fibras mestres. Com isso, podem-se derivar novos *splitters* de 1º nível, desde que os cabos das fibras mestres tenham fibras de reserva.

Em comparação com o projeto com 6 *splitters* de 1º nível e 4 cabos na saída da OLT, houve uma redução de aproximadamente 2 km no total de fibra. O custo total, porém, provavelmente seria mais alto, devido aos *splitters* adicionais e à utilização de mais cabo de fibra-mestre.

5.10 - CONSIDERAÇÕES SOBRE DESEMPENHO

No design de um *software*, é importante considerar o gasto computacional na resolução dos diversos problemas para os quais ele é desenvolvido. O programador deve visar aperfeiçoar as rotinas e algoritmos. Neste trabalho, buscaram-se soluções que

trouxessem resultados adequados em um tempo de execução razoável, da ordem de minutos.

Na Tabela 5.2 são apresentados alguns resultados para ilustrar o tempo de execução. Os números são referentes à simulação do projeto da rede de Bonito-MS, no último caso analisado (mapa com 507 nós, 70 ONUs, 37 *splitters* de 2º nível, 11 *splitters* de 1º nível e 5 cabos a partir da OLT):

Tabela 5.2 Desempenho médio da ferramenta

Função	Tempo de Execução (s)	Detalhamento
Importar mapa	18.53	Importa o arquivo .osm do OpenStreetMap e retorna a estrutura de dados do MATLAB.
Plotar mapa	3.48	Plota o mapa a partir da estrutura de dados acima.
Importar OLT e ONUs	5.24	Importa uma tabela do Excel com as coordenadas da OLT e das ONUs e define a posição no mapa de cada um desses elementos.
Projetar rede	54.48	Define as posições ótimas dos splitters de 1º e 2º nível e os caminhos para atendimento a todas as ONUs, desde a OLT.
Plotar rede	2.83	Plota o mapa com a rede, com todos os elementos e caminhos.

A máquina utilizada para simulação foi um PC com processador *Intel Core 2 Duo* E7400, a 2,80 GHz, 4,00 GB de memória RAM e rodando *Windows Vista SP2* 32 bits, com *MATLAB r2013a*. Como se pode ver não se trata de um computador estado da arte, mas sim de uma máquina com um processador lançado há mais de 4 anos e um sistema operacional atrasado em 2 gerações. Isso apenas ressalta o bom desempenho da ferramenta e sua possibilidade de utilização mesmo em sistemas menos potentes.

É interessante ressaltar que os tempos medidos acima referem-se ao tempo de execução para 1 (um) projeto de redes PON. Ao longo desse trabalho, em algumas seções foi necessário realizar diversas comparações de projetos, o que exigiu um tempo de processamento consideravelmente maior do que o representado acima.

5.11 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Conforme foi dito anteriormente, este trabalho escolheu o caso de Bonito/MS para fins de comparação com trabalho anterior [11]. O mapa utilizado possui 233 nós, 4 *splitters* e o comprimento total de fibra ficou em 27,3 km. Também é realizado um estudo de custo de implementação da rede que determina o valor de R\$ 523 914,40 ou \$ 261 957,20. Essa rede possui apenas um nível de derivação, de maneira que não há restrições de comprimento máximo do cabo *drop*, por exemplo. Além disso, apesar de a técnica de agrupamento com círculos de raios pré-definidos utilizada no trabalho ter resultado em 11 grupos, esse número foi ajustado posteriormente para 4, visando otimizar o projeto da rede, mas sem informações da técnica utilizada.

Neste trabalho, um dos estudos de caso na mesma cidade resultou em 37 *splitters* de 2º nível, 6 *splitters* de 1º nível e 4 cabos na saída da OLT, com um comprimento total de 30,47 km. O segundo estudo de caso utilizou 37 *splitters* de 2º nível, 11 *splitters* de 2º nível e 5 cabos na saída da OLT. O comprimento total de fibras no projeto ficou em 27,374 km.

A Tabela 5.3 resume as diferenças dos resultados obtidos nos dois estudos de caso analisados neste trabalho e no estudo de caso do trabalho relacionado [11].

Tabela 5.3 Comparação de resultados entre os dois trabalhos

Parâmetros	Estudo de Caso 1	Estudo de Caso 2	Trabalho Relacionado
<i>Localidade</i>	Bonito/MS		
<i>Nós no mapa</i>	507		233
<i>Arestas no mapa</i>	853		Não informado
<i>ONUs</i>	70		
<i>Níveis de derivação</i>	2		1
<i>Restrição para cabo drop</i>	250 m		Não há
<i>Splitters de 2º nível</i>	37		-
<i>Splitters de 1º nível</i>	6	11	4
<i>Cabos na saída da OLT</i>	4	5	-
<i>Comprimento total de fibras</i>	30,471 km	27,374 km	27,3 km

<i>Tempo de execução médio</i>	1,5 min ¹	1,7 h
--------------------------------	----------------------	-------

As abordagens de projeto desse trabalho e do trabalho que analisou a cidade de Bonito/MS resultam em topologias de redes bem diferentes, com níveis de derivação distintos, técnicas de agrupamento diferentes e algoritmos de posicionamento de *splitters* com abordagens díspares. Além disso, nesse projeto foi imposta uma restrição no comprimento do cabo *drop*, o que elevou a quantidade de *splitters* consideravelmente caso não houvesse essa restrição.

Por fim, o trabalho aqui desenvolvido fornece funções complementares que automatizam o projeto da rede, entre elas, funções de importação automática de mapas e de pontos; georeferenciamento para todo o projeto, o que torna possível identificar nós e equipamento por suas coordenadas cartográficas reais e não apenas por ID no mapa; interface gráfica de mapeamento, posicionamento de *splitters* e de caminhos de fibras.

¹ Para um mapa com 507 nós, 70 ONUs e dois níveis de derivação.

6 - CONCLUSÃO

A indústria de telecomunicações tem passado por um momento de crescimento nos últimos anos. A demanda por serviços e banda vem aumentando e as redes PON são uma evolução natural dos tradicionais sistemas de acesso. Com elas, é possível levar Internet banda larga de qualidade a custo reduzido, alavancar programas de inclusão social e promover o desenvolvimento do país. A adoção crescente de redes PON em projetos no Brasil e no mundo confirma essa tendência e, por isso, a necessidade de se ter ferramentas de apoio a esses projetos é evidente.

Neste trabalho, buscou-se desenvolver uma ferramenta de suporte a projetos de rede PON que automatizasse parte do trabalho, dando indicações para o projetista. A ferramenta possui funções para a solução de diversos problemas em cada etapa do projeto:

- Criação e edição de mapas;
- Importação de dados do *Excel*;
- Plotagem de elementos da rede no mapa;
- Agrupamento de *splitters*;
- Posicionamento de *splitters*;
- Determinação de caminhos de fibras;
 - Menor caminho (*Dijkstra*);
 - Algoritmo genético;
- Reagrupamento de *splitters*.

As funções acima são personalizadas para cada um dos níveis de derivação da rede, atendendo às particularidades deles. Ao término da execução, o usuário tem a sua disposição os resultados:

- Coordenadas (latitude e longitude) reais de todos os elementos (ONUs, *splitters*, OLT e fibras);
- ID de todos os elementos, baseados nos IDs dos nós do mapa;
- Grupos de ONUs e grupos de *splitters*;
- Caminhos das fibras;
- Comprimento das fibras.

Foi feito um estudo de caso na cidade de Bonito-MS, onde foram apresentadas duas propostas de solução com dois níveis de derivação, levando-se em conta padrões adotados em projetos práticos. Os resultados apresentados foram bastante satisfatórios. A simulação em Bonito-MS atendeu às expectativas e forneceu soluções que minimizaram o gasto de fibra e *splitters*, ao mesmo tempo em conseguiu atender a todas as restrições impostas pelo usuário.

O primeiro projeto simulado neste trabalho (CASO 1: 6 *SPLITTERS* DE 1º NÍVEL E 4 CABOS NA SAÍDA DA OLT) resultou nos números abaixo, na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Resultados da simulação do 1º projeto

<i>ONUs</i>	70
<i>Splitters de 1º nível</i>	37
<i>Splitters de 2º nível</i>	6
<i>Cabos na saída da OLT</i>	4
<i>Comprimento total de fibras</i>	30 471 m

Este projeto se mostrou mais adequado para futuras expansões na região central de Bonito-MS. Provavelmente, seu custo de implantação seria menor.

Os resultados do segundo projeto simulado (CASO 2: 11 *SPLITTERS* DE 1º NÍVEL E 5 CABOS NA SAÍDA DA OLT) se encontram abaixo, na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Resultados da simulação do 2º projeto

<i>ONUs</i>	70
<i>Splitters de 1º nível</i>	37
<i>Splitters de 2º nível</i>	11
<i>Cabos na saída da OLT</i>	5
<i>Comprimento total de fibras</i>	27 374 m

Este segundo projeto da rede alcançou regiões mais afastadas do centro com *splitters* de 1º nível. Assim, as fibras mestres chegaram até esses locais e expansões futuras serão menos custosas. Porém, o custo de implantação do projeto provavelmente será mais alto do que o projeto anterior.

O foco da otimização do problema foi a redução na quantidade total de fibra e de *splitters* utilizados no projeto. É importante ressaltar que em projetos reais, esses fatores são importantes, mas não são os únicos na tomada de decisões. O projetista deve considerar a infraestrutura existente, que pode ir desde trechos de fibra óptica já implantados, postes, dutos, caixas de passagem, abrigos, entre outros. O balanço de potência é outro fator que deve ser mais bem analisado, levando-se em conta fatores como a taxa de divisão dos *splitters* e distância máxima. Também há de se considerar com mais detalhes a previsão no aumento da demanda no futuro, com um estudo demográfico e econômico da região atendida. Uma rede bem projetada deve atender seus consumidores existentes e suportar a inclusão de novos outros por anos. Os fatores acima foram considerados nesse trabalho, mas poderiam ser tema de futuros trabalhos que venham a acrescentar funções na ferramenta aqui apresentada.

Além das considerações de projeto acima, também são propostas análises mais aprofundadas sobre a complexidade do problema. Com isso, será possível determinar como um projeto de redes PON tende a se tornar computacionalmente mais oneroso à medida em que a quantidade de nós em um mapa cresce. Além disso, também é proposta uma análise mais aprofundada das técnicas e dos algoritmos utilizados. Diferentes heurísticas são capazes de resolver problemas de menor caminho e caixeiro-viajante além das técnicas de *Dijkstra* e algoritmos genéticos. Essa análise mais aprofundada poderia revelar outros algoritmos mais eficientes e velozes do que os propostos.

Como foi informado, é possível utilizar diretamente os mapas do *OpenStreetMap* ou criar novos mapas a partir de imagens de satélite. Os testes mostraram que muitas vezes utilizar os mapas prontos é mais difícil do que criar um mapa, por conta da qualidade das informações dos mapas prontos. Com certa frequência, o mapa pronto não possui algumas ruas conectadas, por exemplo. Outro problema é que os mapas prontos contêm informações que são irrelevantes no projeto da rede PON, como lagos, prédios, parques, entre outros. A consequência disso é que a quantidade de nós tende a ser muito maior do que em um mapa criado. O detalhamento, nesse caso é prejudicial, pois o gasto computacional para o processamento de muitos nós pode aumentar consideravelmente o tempo da simulação. Outras vezes, é necessário editar o código fonte do mapa pronto para ajustar algum parâmetro que não esteja de acordo com o MATLAB. Para Bonito-MS, um mapa novo foi criado sobre o mapa original em aproximadamente 1h30.

Em resumo, a ferramenta desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada como um guia para um projetista de redes PON. Ela fornece informações relevantes que irão apoiar o projeto definitivo. Pode-se dizer que para um “pré-projeto” a ferramenta fornece resultados excelentes. Seus resultados são adequados à realidade, o custo do projeto é minimizado e o tempo de execução é rápido.

Projetos de engenharia são uma importante parte do trabalho de um engenheiro e, quanto mais informações e sistemas de apoio ele tiver disponível, melhores tendem a serem as decisões. Uma ferramenta de apoio a projetos de rede PON possui relevância do ponto de vista técnico e do ponto de vista comercial e este trabalho encontrou uma solução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LAM, C. F. **Passive Optical Networks: Principles and Practice**. London: Academic Press, 2007. 324 p.
2. HYPERLINE CABLING SYSTEMS. Shielded Twisted Pair Cable (USTP). **Hyperline**, 2013. Disponível em: <www.hyperline.com/catalog/cable/ustp4_c6a_solid_indoor.shtml>. Acesso em: 13 ago. 2013.
3. D-LINK. Products. **ADSL2+ Ethernet Modem**, 2013. Disponível em: <<http://www.dlink.com/uk/en/home-solutions/connect/modems-and-gateways/dsl-320b-adsl-2-ethernet-modem>>. Acesso em: ago. 2013.
4. CABLELABS. Cable System Primer. **CableLabs**, 2013. Disponível em: <http://www.cablelabs.com/news/primers/cable_system_primer.html>. Acesso em: 27 ago. 2013. Modificado.
5. CISCO VNI. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012–2017. **CISCO**, maio 2013. Disponível em: <http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2013.
6. ESNET NETWORK ENGINEERING GROUP. Data Intensive Science Impact on Networks. **IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee**, 13 dez. 2011. Disponível em: <http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/bwa/public/dec11/dart_01a_1211.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2013.

7. NYSE EURONEXT. Bandwidth Demand in the Financial Bandwidth Demand in the Financial. **IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee**, 29 jun. 2011. Disponível em: <http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/bwa/BWA_Report.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2013.
8. YOUTUBE, LCC. Statistics. **YouTube**, 2013. Disponível em: <<http://www.youtube.com/yt/press/statistics.html>>. Acesso em: 27 jul. 2013.
9. LAFATA, P. Advanced Algorithm for Optimizing the Deployment Cost of Passive Optical Networks. **OPTICS AND OPTOELECTRONICS**, Prague, 11, n. 1, Março 2013. 10p.
- 10 VILLALBA, T. V. **Distribuição de Divisores de Potência em Redes Ópticas . Passivas Utilizando Algoritmos Genéticos**. Universidade de São Paulo - USP, Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Departamento de Engenharia Elétrica. São Carlos, p. 104. 2009. Dissertação de Mestrado.
- 11 PINTO, P. D.; ALMEIDA, S. C. D. **Planejamento de Rede GPON Utilizando . Algoritmo de Menor Caminho**. Centro Universitário IESB. Brasília, p. 66. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso.
- 12 OPENSTREETMAP. Stats. **OpenStreetMap's Wiki**, jul. 2013. Disponível em: . <<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Stats>>. Acesso em: 27 jul. 2013.
- 13 OPENSTREETMAP. Cities in Brazil. **OpenStreetMap's Wiki**, 2013. Disponível em: . <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Category:Cities_in_Brazil>. Acesso em: 27 jul. 2013.

- 14 OPENSTREETMAP. Elements. **OpenStreetMap's Wiki**, abr. 2013. Disponível em: . <<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Elements>>. Acesso em: 23 jul. 2013.
- 15 BENEVIDES, P. F. **Aplicação de Heurísticas e Metaheurísticas para o Problema do Caixeiro Viajante em um Problema Real de Roteirização de Veículos**. Universidade Federal do Paraná, Departamentos de Construção Civil e de Matemática. Curitiba, p. 157. 2011. Dissertação de Mestrado.
- 16 BRYANT, K. **Genetic Algorithms and the Traveling Salesman Problem**. Harvey Mudd College, Department of Mathematics. Claremont, p. 30. 2000. Thesis.
- 17 DRÉO, J. Travelling salesman problem. **Wikipedia**, ago. 2006. Disponível em: . <http://en.wikipedia.org/wiki/Travelling_salesman_problem>. Acesso em: 20 ago. 2013. Adaptado.
- 18 FILIPPIDIS, I. OpenStreetMap Functions. **MATLAB Central**, mar. 2012. Disponível em: . em: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35819-openstreetmap-functions>>. Acesso em: fev. 2013.
- 19 OPEN SOURCE INITIATIVE. Open Source Initiative. **The BSD 3-Clause License**, 1999. Disponível em: <<http://opensource.org/licenses/BSD-3-Clause>>. Acesso em: jul. 2013.
- 20 IBGE. Mato Grosso do Sul - Bonito. **Censo 2010**, 2010. Disponível em: . <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 27 jul. 2013.

- 21 MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES. Cidades Digitais. **Ministério das Comunicações**, 2012. Disponível em: <<http://www.mc.gov.br/inclusao-digital/acoes-e-programas/cidades-digitais>>. Acesso em: jul. 2013.
- 22 GOVERNO DO ESTADO DO MATO GROSSO DO SUL. Bonito recebe projeto . Cidade Digital do Ministério da Integração Nacional. **JusBrasil**, 2009. Disponível em: <<http://gov-ms.jusbrasil.com.br/politica/3102730/bonito-recebe-projeto-cidade-digital-do-ministerio-da-integracao-nacional>>. Acesso em: jul. 2013.
- 23 VETTER, C. **Fast en Exact Mobile Navigation with OpenStreetMap Data**. . University of the Baden-Wuerttemberg and National Laboratory of the Helmholtz Association, Faculty of Computer Science, Institute for Theoretical Computer Science, Algorithmics II. Karlsruhe, p. 72. 2010. Diploma Thesis.
- 24 CASTRO, É. L. D. **Desenvolvimento de uma interface homem-máquina para projetos de redes GPON**. Universidade São Paulo - USP, Escola de Engenharia. São Carlos, p. 61. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso.