



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FRANCISCO JONAS SILVA PINTO

OTIMIZAÇÃO DE REDE GPON UTILIZANDO COLÔNIA DE FORMIGAS

SOBRAL

2022

FRANCISCO JONAS SILVA PINTO

OTIMIZAÇÃO DE REDE GPON UTILIZANDO COLÔNIA DE FORMIGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo

Coorientador: Eng. Adail Moreira Albuquerque

SOBRAL

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S58o Silva Pinto, Francisco Jonas.
Otimização de Rede GPON Utilizando Colônia de Formigas / Francisco Jonas Silva Pinto. – 2022.
88 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo.
Coorientação: Prof. Adail Moreira Albuquerque.
1. Rede Óptica Passiva. 2. Metaheurística. 3. Colônia de Formigas. 4. Otimização. I. Título.
CDD 621.3
-

FRANCISCO JONAS SILVA PINTO

OTIMIZAÇÃO DE REDE GPON UTILIZANDO COLÔNIA DE FORMIGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Adail Moreira Albuquerque (Coorientador)

Prof. Dr. Wendley Souza da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Me. Antônio Alan Rodrigues de Araújo
Ágil Engenharia de Telecomunicações

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela dádiva da vida e por estar comigo todos os dias me dando força e perseverança nessa árdua caminhada.

À minha família, em nome de meu pai Adroval Ricardo Pinto, minha mãe Maria Alzerina Silva Pinto e minha avó Maria José Silva que sempre acreditaram em mim e fizeram o possível e o impossível para que chegasse até aqui.

À minha linda namorada Maria Natália Dutra Silva que sempre me apoiou e me motivou durante esse período.

Ao professor Dr. Yuri Lima Victor de Melo que aceitou o desafio de me orientar. Quando não sobrou tempo nos dias úteis da semana ele sacrificou horas de seus dias de folga para me ajudar, com ele tive aprendizados que levarei para a vida toda, mais do que um orientador, foi um amigo e de quem para sempre guardarei o exemplo do é ser um professor.

Ao Engenheiro da Computação Adail Albuquerque que me ensinou e auxiliou, de forma voluntária, nas partes mais técnicas de uma rede óptica.

Aos meus colegas Brizamar, Geilson e Lucas que me ajudaram em aspectos práticos como o mapeamento dos postes de Sobral, além de desenvolverem os projetos manuais.

A todos meus amigos e colegas dos cursos de graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC) de Sobral, sempre unidos, compartilhando conhecimentos e aprendizados.

Aos amigos que conquistei durante essa jornada de estudos na universidade, sendo estes, amigos da Engenharia da Computação, Economia e Música.

Aos meus amigos e colegas de quarto com quem convivi durante os anos da graduação Victor Carvalho, Lucas Sousa, Vagner Osterno, Emanuel Lima, João Victor, Davi dos Santos, Mateus Araújo, Milton Xavier, Alecivando e Iury. Enquanto estávamos longe de nossas famílias uns ajudavam dos outros, passamos por dificuldades juntos, trabalhamos juntos, estudamos juntos, rimos juntos e agora, quero compartilhar essa conquista com vocês.

A todos os meus amigos da banda de música municipal de Marco que sempre estiveram comigo e me alegraram nos dias mais felizes e tristes, lá eu sempre me senti em casa.

Agradeço a todos os professores desta universidade por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

“Um barco ancorado é seguro, mas não é para
isso que os barcos foram feitos.”

(John A. Shedd)

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o processo de implementação da metaheurística Colônia de Formigas (CF) para a criação de uma rede *Gigabit Passive Optical Network* (GPON) localizada no Centro de Sobral-CE, utilizando arquitetura *Fiber To The Home* (FTTH) com topologia mista. Vale a pena destacar que o planejamento de uma rede GPON é uma tarefa árdua e complexa, que envolve a determinação geográfica do posicionamento de diferentes equipamentos, cabos de fibra óptica e de diversos outros parâmetros relevantes para o funcionamento adequado da rede. Dessa forma, CF é usado para minimizar os custos de implantação. Duas outras técnicas foram adotadas afim de comparar a solução proposta pelo CF. A técnica randômica que gera soluções aleatórias; e uma chamada de manual na qual a solução é elaborada pelo projetista. Como conclusão, observou-se que o CF reduz o custo final da rede, em relação as outras duas soluções expostas, além de manter viabilidade técnica.

Palavras-chave: Rede Óptica Passiva. Metaheurística. Colônia de Formigas. Otimização.

ABSTRACT

The following term paper presents the implementation process of a metaheuristic algorithm, the ant colony optimization algorithm (ACO), for the creation of a gigabit-capable passive optical network (GPON) in Sobral downtown by using fiber to the home (FTTH) architecture with mixed topology. It is worth pointing out that planning a GPON network is an arduous and complex task that involves the geographical determination of the positioning of different types of equipment, fiber optic cables, and several other relevant parameters for the proper functioning of the network. Therefore, the ACO minimizes the implementation costs. The use of two techniques served to compare the proposed ACO solution. The random assignment generates random solutions and the so-called manual technique, in which the designer elaborates the solution. Finally, the ACO reduces the network final cost concerning the other two exposed solutions besides maintaining technical viability.

Keywords: Passive Optical Network. Metaheuristic. Ant Colony. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Acesso à internet nos domicílios brasileiros em 2019.	17
Figura 2 – Pilares da monografia.	21
Figura 3 – Pilares da monografia com referências.	24
Figura 4 – Refração e reflexão.	27
Figura 5 – Perspectiva de uma fibra óptica.	28
Figura 6 – Camadas da rede de telecomunicações.	31
Figura 7 – OLT.	33
Figura 8 – DIO.	34
Figura 9 – CEO.	34
Figura 10 – CTO.	35
Figura 11 – <i>Splitter</i>	36
Figura 13 – ONU.	37
Figura 14 – Estrutura da fibra óptica.	39
Figura 15 – Topologia do tipo barramento.	40
Figura 16 – Topologia do tipo anel.	41
Figura 17 – Topologia do tipo árvore.	42
Figura 18 – Troca de dados entre OLT e ONU.	44
Figura 19 – Problema das pontes de Konisberg representado por um grafo.	44
Figura 20 – Representação de um grafo por uma matriz adjacência.	45
Figura 21 – Segunda forma de montar uma matriz adjacência.	46
Figura 22 – Liberação de feromônio.	47
Figura 23 – Lógica de execução do algoritmo.	48
Figura 24 – Localização do bairro Centro na cidade de Sobral-CE.	50
Figura 25 – Tipos de zonas no bairro Centro.	51
Figura 26 – Área de atendimento.	52
Figura 27 – Topologia mista centralizada.	53
Figura 28 – Principais etapas do processo de importação da região geográfica do projeto.	54
Figura 29 – Marcação dos postes na região de atendimento.	54
Figura 30 – Ligação entre os postes na região de atendimento.	55
Figura 31 – Apresentação dos caminhos na área de atendimento pelo JOSM.	55
Figura 32 – Organização dos dados fornecido pelo GPSvisualizer.	56

Figura 33 – Grafo fornecido pelo simulador da área de atendimento.	57
Figura 34 – Ferramentas e seus objetivos no processo de importação dos dados.	57
Figura 35 – Número de possíveis soluções em relação ao número de postes e equipamentos.	64
Figura 36 – Grafo minimalista para exemplificação.	65
Figura 37 – Novo grafo criado com as ligações entre P1 e os demais pontos.	67
Figura 38 – Generalização do grafo final para qualquer rede, com todas as ligações.	68
Figura 39 – Fluxograma da execução do algoritmo.	69
Figura 40 – Curva do custo para 400 gerações.	72
Figura 41 – Curvas do custo médio para 120, 80, 60 e 40 formigas.	73
Figura 42 – Curvas do custo médio para $\alpha = 0,1$, $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 0,9$	74
Figura 43 – Curvas do custo médio para $\sigma = 0,01$, $\sigma = 0,05$ e $\sigma = 0,1$	75
Figura 44 – Custo mínimo, médio e máximo da solução randômica com 500 gerações.	78
Figura 45 – Comparação entre os menores custos.	79
Figura 46 – Posição dos equipamentos no mapa fornecido pelo algoritmo CF de menor custo.	80
Figura 47 – Potência de recepção para cada ONU fornecido pelo algoritmo CF.	81
Figura 48 – Posição dos equipamentos no mapa fornecido pela solução manual.	81
Figura 49 – Potência de recepção para cada ONU da solução manual.	82
Figura 50 – Posição dos equipamentos no mapa fornecido pela solução randômica.	82
Figura 51 – Potência de recepção para cada ONU da solução randômica.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos transmissores ópticos.	29
Tabela 2 – Características dos receptores ópticos.	30
Tabela 3 – Pontos da curva do custo médio com 400 gerações.	72
Tabela 4 – Principais valores das simulações com 120, 80, 60 e 40 formigas.	73
Tabela 5 – Características das curvas do custo médio para $\alpha = 0,1$, $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 0,9$	74
Tabela 6 – Características das curvas do custo médio para $\sigma = 0,01$, $\sigma = 0,05$ e $\sigma = 0,1$	76
Tabela 7 – Dados de cada solução manual.	78
Tabela 8 – Curvas de custo da solução randômica.	79
Tabela 9 – Média de preço dos produtos.	89
Tabela 10 – Média de preço dos serviços.	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFC	Universidade Federal do Ceará
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
Gbps	Giga bits por segundo
ISP	Provedor de Acesso à Internet
CF	Colônia de Formigas
QoE	Qualidade de Experiência
QP	Questão de Pesquisa
Mbps	Mega bits por segundo
SA	<i>Simulated Annealing</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
APD	<i>Avalanche Photo Diode</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
CEO	Caixa de Emenda Óptica
CTO	Caixa de Terminação Óptica
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
DIO	Distribuidor Interno Óptico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
FTTX	<i>Fiber To The x</i>
FTTN	<i>Fiber to the node</i>
FTTC	<i>Fiber to the curb</i>
FTTB	<i>Fiber to the building</i>
MP	Margem de proteção

S-CF	Adaptação da Colônia de Formigas
ENEL	<i>Ente nazionale per l'energia elettrica</i>
FDH	<i>Fiber Distribution Hub</i>
JOSM	<i>Java OpenStreetMap Editor</i>
POP	Ponto de Presença
MC	Monte Carlo
RAM	<i>Random Access Memory</i>
HD	<i>Hard Disk</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização	17
1.2	Motivação e Escopo da Monografia	19
1.3	Estado da Arte	20
1.4	Objetivos	24
1.5	Estrutura do Trabalho	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	Princípios das Comunicações Ópticas	26
2.1.1	<i>Índice de refração</i>	<i>26</i>
2.1.2	<i>Refração e reflexão</i>	<i>26</i>
2.1.3	<i>Princípio de funcionamento da fibra óptica</i>	<i>28</i>
2.1.4	<i>Transmissor óptico</i>	<i>28</i>
2.1.5	<i>Receptores ópticos</i>	<i>29</i>
2.1.6	<i>Divisor óptico</i>	<i>30</i>
2.2	Estrutura Das Redes de Telecomunicações	31
2.3	Redes Ópticas Passivas	32
2.3.1	<i>Principais Componentes da Rede GPON</i>	<i>32</i>
2.3.1.1	<i>OLT</i>	<i>33</i>
2.3.1.2	<i>DIO</i>	<i>33</i>
2.3.1.3	<i>CEO</i>	<i>34</i>
2.3.1.4	<i>CTO</i>	<i>35</i>
2.3.1.5	<i>Splitter</i>	<i>35</i>
2.3.1.6	<i>Conectores</i>	<i>36</i>
2.3.1.7	<i>ONU</i>	<i>36</i>
2.3.1.8	<i>Fibra Óptica</i>	<i>37</i>
2.4	Arquitetura FTTX	38
2.5	Topologias	40
2.5.1	<i>Topologia em barramento</i>	<i>40</i>
2.5.2	<i>Topologia em anel</i>	<i>40</i>
2.5.3	<i>Topologia em árvore</i>	<i>41</i>

2.5.4	<i>Topologia mista</i>	41
2.6	Métrica de Desempenho da Rede GPON	42
2.6.1	<i>Orçamento de potência</i>	42
2.7	Teoria dos Grafos	43
2.7.1	<i>Matriz Adjacência</i>	45
2.8	Colônia de Formigas	46
2.8.1	<i>Feromônio</i>	46
2.8.2	<i>Algoritmo</i>	47
2.8.3	<i>Adaptação S-CF</i>	49
3	METODOLOGIA	50
3.1	Região Geográfica do Projeto	50
3.2	Topologia adotada para otimização GPON	52
3.3	Processo de importação da região geográfica do projeto	53
3.3.1	<i>Coleta de postes e criação das ligações</i>	53
3.3.2	<i>Junção das bifurcações</i>	54
3.3.3	<i>Conversão dos dados</i>	56
3.3.4	<i>Importação para o MATLAB e criação do grafo</i>	56
3.4	Modelagem do Sistema	58
3.4.1	<i>Conjuntos</i>	58
3.4.2	<i>Definições</i>	59
3.4.3	<i>Restrições</i>	62
3.4.4	<i>Parâmetros do projeto</i>	63
3.5	Implementação do Algoritmo Colônia de Formigas	64
4	RESULTADOS	70
4.1	Técnicas para Comparação de Desempenho	70
4.2	Parametrização do CF	70
4.2.1	<i>Número de Gerações</i>	71
4.2.2	<i>Quantidade de Formigas</i>	72
4.2.3	<i>Constante de Peso do Feromônio α</i>	74
4.2.4	<i>Taxa de Evaporação do Feromônio σ</i>	75
4.2.5	<i>Quantidade de Feromônio Depositado Por Cada Formiga $\Delta\tau$</i>	76
4.3	Resultados Comparativos	77

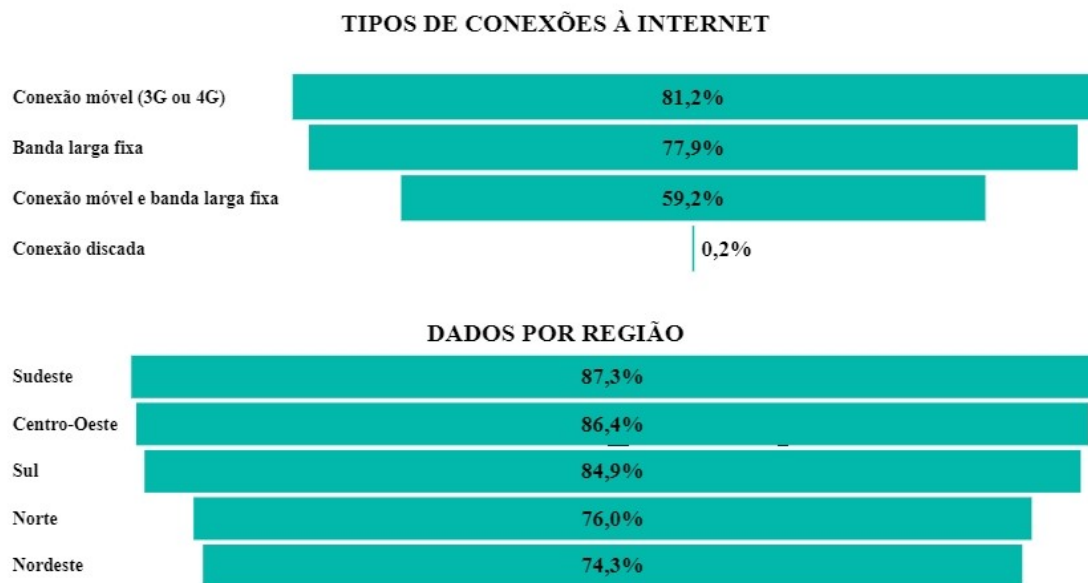
4.3.1	<i>Manual</i>	77
4.3.2	<i>Randômico</i>	78
4.3.3	<i>Melhores Resultados</i>	79
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS	86
	ANEXOS	88
	ANEXO A–TABELA DE PREÇOS	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A cada ano, a necessidade das pessoas por acesso à internet vem aumentando, seja para lazer ou trabalho, o que está gerando uma elevação no consumo de dados. De acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), entre 2018 e 2019 o acesso à banda larga móvel nos lares brasileiros aumentou de 80,2% para 81,2%, a banda larga fixa passou de 75,9% para 77,9% e os domicílios que têm ambas conexões foram de 53,3 % para 59,2% (IBGE, 2019). Para mostrar mais sobre o assunto, a Figura 1 apresenta algumas informações sobre acesso à internet em domicílios brasileiros, tais como: tipos de conexões mais utilizadas e dados por região. Pela imagem, verifica-se que ainda existe muito espaço para evolução de alguns serviços de internet, principalmente em regiões como o Nordeste.

Figura 1 – Acesso à internet nos domicílios brasileiros em 2019.



Fonte: (IBGE, 2019).

Ademais, em relação a pandemia do COVID-19, verificou-se o aumento de consumo de internet consideravelmente, tanto no Brasil quanto em outras partes do mundo (BULHÕES, 2021). No Brasil, o isolamento social provocou um aumento de 3h e 41min para 6h e 44min do consumo diário de internet, por usuário. Levando isso em consideração, notou-se que os usuários estão mais exigentes em relação a velocidade de internet, cobertura e estabilidade de conexão (BULHÕES, 2021). Em relação a Europa, também foi vista uma elevação no consumo de dados e países como Alemanha, Reino Unido, França e Itália, registraram aumento de até

40% (NOVADC, 2020).

Para que todos esses dados possam chegar até os dispositivos finais, os mesmos passam por três camadas, independentemente do tipo de tecnologia que será utilizado para a transmissão; a primeira é o núcleo de onde saem os dados, em seguida passa pela camada de distribuição que é a que controla o fluxo de tráfego da rede, a terceira camada é a de acesso que é formada pelos consumidores finais (DIAS, 2012).

Vale ressaltar que existem diversos tipos de tecnologias que podem ser usadas para transmitir dados de um ponto ao outro e na maioria das vezes, o que determina qual a melhor a ser usada é o tipo de necessidade de cada consumidor, cada uma tem seus prós e contras. Dentre as tecnologias mais utilizadas está a rede móvel de Quarta Geração (4G), na qual é possível ter uma maior quantidade de dispositivos conectados à rede sem sobrecarregar a mesma, além de possuir uma latência¹ consideravelmente mais baixa que as gerações anteriores (BRAGA, 2018). Recentemente, a rede móvel de Quinta Geração (5G) foi lançada no mercado, porém ainda não tem uma grande cobertura. Essa tecnologia tem um desempenho consideravelmente maior do que a 4G, podendo conectar 1 milhão de dispositivos por quilômetro quadrado e velocidades de transmissão superiores a 1 Giga bits por segundo (Gbps). Tanto a 4G quanto 5G tem seus pontos positivos, dentre eles estão a possibilidade de transmitir e receber dados com alta velocidade sem um ponto de conexão fixo, no entanto, um dos seus pontos negativos é a estabilidade que pode variar muito, dependendo da posição geográfica do usuário e condições climáticas do local (BRAGA, 2018). Outra tecnologia bastante utilizada é a de cabos metálicos, que em 2011 chegou a transmitir cerca de 70% de toda banda larga fixa no Brasil (ANATEL, 2020). Esse tipo de cabo, embora possa ter um baixo custo, em relação a outros meios de transmissão, está sujeito a interferência eletromagnética devido ao seu material. Nos últimos anos, a utilização dessa tecnologia no Brasil vem decrescendo e em meados 2019 foi ultrapassada pela fibra óptica (ANATEL, 2020).

Ao contrário dos cabos metálicos, a utilização da fibra óptica para transmissão de dados vem crescendo cada vez mais, com ela é possível obter uma elevada taxa de transmissão com estabilidade visto que, a informação é transmitida na forma de luz através de filamentos de vidro com camada de proteção.

A fibra óptica foi uma das tecnologias que mais cresceu nos últimos cinco anos, tendo como principal impulsionador o Provedor de Acesso à Internet (ISP) de característica regional,

¹ O tempo que leva para uma solicitação ser transferida de um ponto a outro, ou seja, se refere a quantidade de atraso (G., 2019).

que disponibilizou internet para regiões que antes não tinham cobertura de rede. Até o segundo semestre de 2020, a fibra óptica era o tipo de tecnologia mais utilizada para a transmissão de banda larga fixa no Brasil, chegando a mais de 50 %. Diante disso, a expectativa é que essa porcentagem aumente, visto que, com sua evolução é possível transmitir mais dados, com melhor qualidade e custo-benefício (ANATEL, 2020).

Todo esse crescimento se deve ao fato de que cada vez mais a fibra óptica chega a regiões de difícil acesso, na maioria das vezes por ISP de pequeno porte, por um valor acessível, até mesmo para as classes mais baixas. Aos poucos, tais ISPs vêm aumentando a participação no mercado (FONTES, 2021).

Em síntese, existem muitos desafios para implementar essa tecnologia, tais como: diversidades topográficas, infraestrutura pública, renda salarial dos usuários, entre outros. Em outras palavras, um projeto não pode ser único, mas sim moldado para uma determinada região. Para problemas de engenharia com muitas variáveis, a otimização através de metaheurísticas é bem difundido, uma vez que, tais métodos aplicados a este tipo de problema conseguem resultados que se aproximam bastante de uma solução ótima em um menor tempo (CECCON, 2020). Dentre as inúmeras metaheurísticas na literatura é possível citar a Colônia de Formigas (CF) que se inspira no comportamento das formigas ao escolher o caminho até sua fonte de alimento usando conceito de feromônio, um sinal químico liberado por um animal que dispara uma resposta natural em outros membros da mesma espécie. Tal metaheurística possui a vantagem de ser adaptada para diversos problemas, por meio de alterações na maneira estocástica como as formigas se movimentam e como o feromônio evapora (GOMES, 2009).

1.2 Motivação e Escopo da Monografia

Toda a popularidade da fibra óptica proporcionou uma grande oportunidade para os ISPs (BULHÕES, 2021). Contudo, determinado ISP só consegue aumentar sua fatia no mercado de forma prudente, se for criada uma rede óptica de baixo custo e que assegure uma Qualidade de Experiência (QoE) aceitável para o usuário.

Diante dessa problemática, essa monografia criou Questão de Pesquisas (QPs) que serviram de guia para o desenvolvimento da monografia:

- **QP 1** : Dada à concorrência crescente dos ISPs, como tornar o projeto de rede óptica economicamente mais barato e tecnicamente aceitável?
- **QP 2** : A CF pode ser aplicada para aperfeiçoar economicamente e tecnicamente o projeto

de rede óptica?

- **QP 3** : Quais os fatores que possuem influência nos resultados do projeto de rede óptica usando CF?
- **QP 4** : Qual a diferença econômica e técnica entre um projeto com CF quando comparado a um projeto manual?

Para responder todos estes questionamentos, foram levantadas as seguintes hipóteses:

- **Hipótese da QP 1** : Com a concorrência entre os ISP aumentando é necessário que os projetos desenvolvidos sejam melhor elaborados, tendo o menor custo possível, mas tecnicamente aceitáveis; para isso algumas exigências devem ser atendidas. Quanto mais otimizado for a posição dos equipamentos, menor será o caminho percorrido pela fibra óptica até o cliente final e maior será a economia com material e mão de obra, além disso, a perda do sinal durante o percurso irá diminuir.
- **Hipótese da QP 2** : Como se pode observar, existe um problema de otimização na posição dos equipamentos e, conseqüentemente, no percurso da fibra óptica até o cliente, diante disso, a CF pode ser capaz de solucionar esse tipo de problema, gerando uma provável economia no preço de implementação do projeto e uma melhora na transmissão do sinal.
- **Hipótese da QP 3** : Acredita-se que os principais influenciadores serão o número de emendas da fibra e tamanho da mesma, visto que, esses dois fatores são os que mais provocam a redução no sinal até o cliente final.
- **Hipótese da QP 4** : Enquanto o algoritmo CF compara várias soluções, busca a melhor entre elas e tenta melhora-la para encontrar a ideal, o projeto manual é elaborado com base nos conhecimentos técnicos do projetista, mas devido a fatores adversos, pode ser que somente a aplicação desses conhecimentos não seja o suficiente para encontrar a melhor solução.

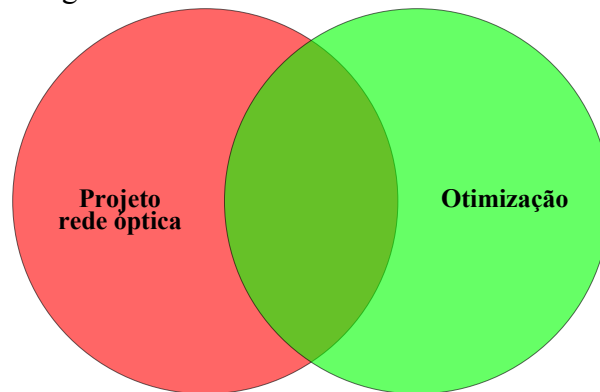
1.3 Estado da Arte

A monografia desenvolveu um estado da arte sobre dois pilares, projetos de redes ópticas ou otimização, e suas interseções, como ilustrado na Figura 2.

Atualmente existem diversos estudos que envolvem o desenvolvimento de projetos de redes ópticas, alguns destes são apresentados a seguir.

Albuquerque (2018) realizou o projeto de uma rede óptica de banda larga, com velocidade de transmissão de dados acima de 1 Gbps, também conhecida como GPON, na

Figura 2 – Pilares da monografia.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

cidade de Moraújo no Ceará. Utilizando procedimentos clássicos de projetos ópticos, tais como: coleta dos postes, previsão do número de clientes atendidos, tamanhos das regiões de cobertura, quantidade e localização dos divisores ópticos e todo plano de fusão do projeto. Segundo os autores, tal projeto está preparado para o crescimento da demanda pelos próximos 20 anos com operação sem gargalo devido a características (e.g. taxa de transmissão e alcance na comunicação) de uma rede GPON. Vale a pena mencionar, que a monografia não realizou o cálculo da potência que será recebida pelo cliente e o custo de implementação da rede GPON.

Pacífico (2018) dimensionou um sistema GPON onde a fibra óptica vai até a casa do cliente, FTTH, para atender uma cidade situada no interior do Piauí. O autor demonstrou cada etapa da elaboração do projeto, apresentando cada elemento utilizado e analisando a viabilidade econômica. Neste trabalho, foi observado a importância de conhecer o local de implementação do sistema, uma vez que, facilita no dimensionamento. No que tange à parte econômica, o tempo de retorno desde o investimento inicial até o momento em que os rendimentos acumulados tornam-se iguais ao valor desse investimento é em torno de 3 anos.

Araújo (2019) projetou uma GPON para cidade de Santana do Acaraú, mostrando cada etapa da elaboração, juntamente com os materiais que foram utilizados. O autor enfatizou que GPON é uma ótima solução para a crescente demanda de clientes dos últimos anos, fornecendo uma conexão de qualidade e que atenda as mais diversas necessidades. Vale a pena enfatizar, que o autor elaborou um projeto de energia fotovoltaica para alimentar a rede.

Filho (2018), elabora um projeto de rede óptica FTTH para uma cidade de Caraúbas no estado do Rio Grande do Norte, mostrando todas as técnicas que foram utilizadas para o dimensionamento, tais como: previsão do número de clientes atendidos, tamanhos das regiões de cobertura, quantidade e localização dos divisores ópticos, além disso, foram desenhadas as redes primária e secundária utilizando *Google Earth Pro*. Através do estudo realizado pelo autor,

foi calculada a velocidade adequada para suprir toda a cidade e descobriu que esse valor seria 10 Mega bits por segundo (Mbps) por residência, com isso, concluiu-se que a rede projetada seria capaz de suprir as necessidades dos usuários da região e caso haja um aumento na demanda, ainda sim essa rede seria capaz de suportar esse aumento e não precisaria de grandes alterações.

Dias (2017) realiza um estudo sobre a possibilidade da substituição do cabeamento metálico por fibras ópticas em uma rede local de computadores, para isso foi utilizado um corporativo real onde foi feita a implementação do novo cabeamento. Após vários testes, foi comprovado que o novo sistema conseguiu suprir todas as necessidades do ambiente corporativo, também houve uma redução no consumo de energia elétrica trazendo retorno financeiro. Vale ressaltar que, cada caso deve ser bem analisado, visto que, para ambientes que requer grandes alterações em sua estrutura, talvez essa mudança não compense.

No segundo pilar, que é a parte de otimização, existem vários estudos que aplicam diferentes tipos de técnicas para conseguir otimizar diferentes problemas de engenharia. A metaheurística CF foi usada para restabelecer cargas após faltas em redes de distribuição de energia elétrica, calculando como deve ser feita a sequência de chaveamento para a religação da rede, visto que, isso é um processo muito complexo e deve ser realizada o mais rápido possível. Foi realizada uma simulação através de um *software* e os resultados foram comparados com outros, obtidos usando diferentes métodos. O CF apresentou melhor solução dentre os métodos comparados (SILVA, 2016).

A metaheurística chamada *Simulated Annealing* (SA) foi empregada no estudo de mecânica estatística e como pode ser utilizada para a resolução de problemas complexos. O autor conseguiu aplicar SA para resolver situações práticas de otimização combinatória. Através do estudo realizado, foi visto que métodos teóricos e computacionais inspirados em fenômenos físicos podem ser aplicados para solucionar problemas de otimização (MONTEIRO, 2019).

Barros (2016) mostrou como os algoritmos de otimização podem ser aplicados na geração de energia eólica. Nesse estudo, são utilizados algoritmos para obter, através de simulações dinâmicas, parâmetros ótimos que possam ser usados no acionamento de um gerador a relutância variável, melhorando sua performance. As simulações trouxeram resultados muito positivos, encontrando parâmetros para o gerador que aumentasse o rendimento e diminuísse a oscilação do torque, gerando a potência desejada.

Já o processo de otimização aplicando o princípio Darwiano da evolução e na genética, conhecido como algoritmo genético, foi usado na otimização do modelo matemático

que representa um sistema de energia, onde esse sistema é composto por materiais que geram energia elétrica quando deformados, materiais piezoelétricos. O autor realizou três simulações que conseguiram entregar um resultado muito próximo do valor ideal, no terceiro caso essa proximidade foi de 99%, com isso, foram obtidos parâmetros relacionados a massa e rigidez dos materiais que conseguiram otimizar o sistema de geração e, segundo o autor, aumentou a eficiência para 99% (PIRES, 2019).

Santana (2018) usou um algoritmo evolutivo para otimizar sistemas de refrigeração de margarina industrial. Para desenvolver esse sistema de otimização foi necessário colher informações sobre os ingredientes da margarina e os dados de placa dos compressores, dessa forma, foram calculados parâmetros como calor específico e de fusão que serviram de base para o algoritmo. No estudo, o autor conseguiu ótimos resultados com redução do consumo médio em 3% , no entanto, os testes só forma realizados durante uma semana, não sendo possível avaliar o grau de confiabilidade do algoritmo.

O intuito desta monografia é realizar um estudo que englobe tanto projetos de redes ópticas quanto otimização, como outros trabalhos que serviram de referência. Dias (2018) analisou de forma técnica-econômica, a rede *Passive Optical Network* (PON) e em seguida aplicou algoritmo genético para otimizar a mesma. Aqui, foram realizados estudos para desenvolver uma ferramenta computacional capaz de reduzir a implementação de uma rede PON, mas que não comprometa a sua eficiência. Foram feitos vários testes e comprovado que com o algoritmo em questão houve uma redução no custo e a qualidade da conexão se manteve em níveis aceitáveis.

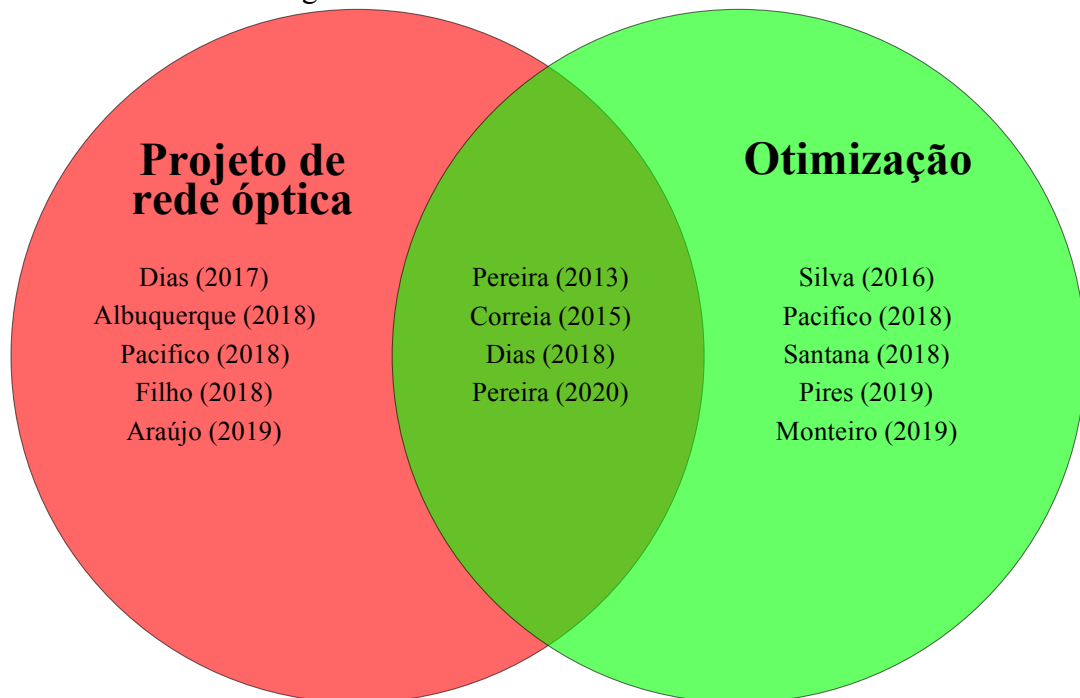
Pereira (2013) com muita propriedade elaborou um estudo para otimizar o dimensionamento de uma rede GPON, levando em consideração aspectos como: distância, quantidade de divisão da fibra e largura de banda do sinal. Com os resultados obtidos através de simulações, foi encontrado uma melhor e mais rápida solução, referente aos custos de planejamento, quando comparado com um projeto realizado manualmente.

Métodos heurísticos foram aplicados sobre problemas de projeto e otimização de redes ópticas para otimizar o roteamento e alocação do comprimento de onda com o intuito de minimizar aplicação de recursos na transmissão do sinal. O algoritmo utiliza a multiplexação para fazer com que a rede possa receber sinais com diferentes tipos de frequência no mesmo canal. Após alguns testes, foi constatado que o algoritmo de relaxamento pode ser usado para resolver tais problemas (CORREIA, 2015).

O algoritmo genético foi aplicado para tentar otimizar o trajeto de redes PON, o que facilita o planejamento, reduz os custos da implementação e promovendo o acesso a essa tecnologia. Com os resultados obtidos, foi visto que não somente houve uma redução na distância percorrida pela fibra óptica até chegar o cliente quanto também diminuiu o número de divisão da fibra, o que deixa a rede com uma melhor qualidade de sinal e mais barata (PEREIRA, 2020).

Após as devidas explicações dos trabalhos citados elaborou-se um diagrama de Venn, onde os trabalhos com as mesmas características foram agrupados, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Pilares da monografia com referências.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

1.4 Objetivos

Os principais objetivos dessa monografia são apresentados abaixo:

1. Modelar um problema de otimização para projeto FTTH;
2. Minimizar custo de implementação da rede FTTH;
3. Garantir condições mínimas de funcionamento adequado da rede FTTH;
4. Comparar projeto manual e o fornecido pela CF.

1.5 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é dividida em cinco capítulos, incluindo o capítulo de introdução.

Um breve resumo dos quatro capítulos restantes é apresentado a seguir:

- **Capítulo 2** : Apresenta toda formulação matemática necessária para aplicar o CF ao problema exposto;
- **Capítulo 3** : Mostra como foi realizada a implementação do algoritmo, detalhando cada uma das etapas utilizadas;
- **Capítulo 4** : Expõe os principais resultados, tais como, custo final da rede, tempo de processamento, além de fazer comparações entre o projeto feito utilizando CF, randômico e o manual;
- **Capítulo 5** : Conclui se vale ou não a pena a utilização do CF para resolver tal tipo de problema, ponderando os prós e contra para avaliar o custo-benefício.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será exposto os principais conceitos aplicados na monografia, tais como: comunicação óptica, grafos e a metaheurística CF. Mais especificamente, neste capítulo, será apresentado os princípios básicos das comunicações ópticas, como: reflexão, refração e a lei de Snell. Em seguida, é apresentado a estrutura das redes de telecomunicações. Uma vez munido desses conhecimentos, será apresentado o conceito de redes ópticas passivas juntamente com suas principais arquiteturas e métrica de desempenho. O restante deste capítulo é organizado da seguinte forma. A Seção 2.7 apresentará os conceitos de grafos que foram empregadas nesta monografia. Por fim, a Seção 2.8 apresentará sobre a metaheurística CF.

2.1 Princípios das Comunicações Ópticas

2.1.1 Índice de refração

Quando a luz viaja no vácuo sua velocidade é de 3×10^8 m/s, no entanto, quando a luz muda para um meio dielétrico ou não condutor, sua velocidade é alterada devido as características deste meio (KEISER, 2015). O parâmetro óptico fundamental que representa de forma matemática a alteração na velocidade da luz devido ao ambiente onde ela se propaga é chamado de índice de refração, ou índice refrativo, como mostra a Equação 2.1:

$$n_{rf} = \frac{c_{lv}}{s_{nm}} \quad (2.1)$$

Onde n_{rf} é o índice de refração, c_{lv} é a velocidade de propagação da luz no vácuo 3×10^8 m/s e s_{nm} é a velocidade de propagação da luz no novo meio (KEISER, 2015).

2.1.2 Refração e reflexão

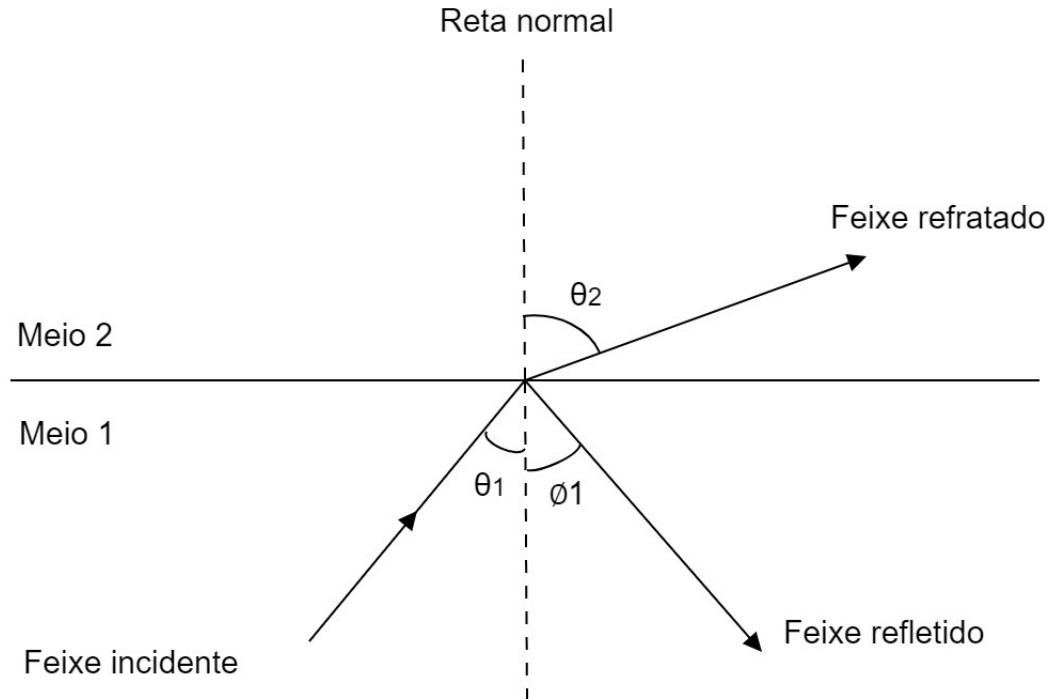
Quando a luz muda de um determinado meio óptico para outro ocorre um fenômeno chamado de refração, que, nada mais é do que a mudança na velocidade da propagação da onda eletromagnética (KEISER, 2015). Além da refração, ocorre também a reflexão que faz com que a luz mude sua direção, mas não mude de meio óptico, essa reflexão pode ser de forma parcial¹ ou completa², como ilustrado na Figura 4. É possível observar três ângulos formados entre o

¹ Quando parte dos raios de luz são refletidos e a outra parte é refratada (TEIXEIRA, 2020).

² Quando todos os raios de luz são refletidos (TEIXEIRA, 2020).

raio de luz e a reta normal, são eles: θ_1 ângulo de incidência, θ_2 ângulo de refração e φ ângulo de reflexão.

Figura 4 – Refração e reflexão.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

O ângulo θ_1 é igual ao φ , além disso, θ_1 , θ_2 e o índice de refração de cada um dos meios se relacionam através da lei de Snell, como mostra a Equação 2.2:

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2) \quad (2.2)$$

Onde n_1 e n_2 corresponde ao índice de refração do meio 1 e 2, respectivamente.

É possível notar que quanto maior o ângulo de incidência maior também será o de refração, dessa forma, existe um valor de θ_1 que faz com que θ_2 seja igual a 90° , esse valor é chamado de ângulo limite, caso θ_1 seja maior do que o ângulo limite θ_2 será maior que 90° , nesse caso não haverá feixe refratado e toda a luz será refletida (KEISER, 2015). Caso o índice de refração de cada um dos meios seja conhecido, utilizando a Equação 2.2, é possível calcular o ângulo de incidência mínimo para que toda a luz seja refletida, como mostra a Equação 2.3:

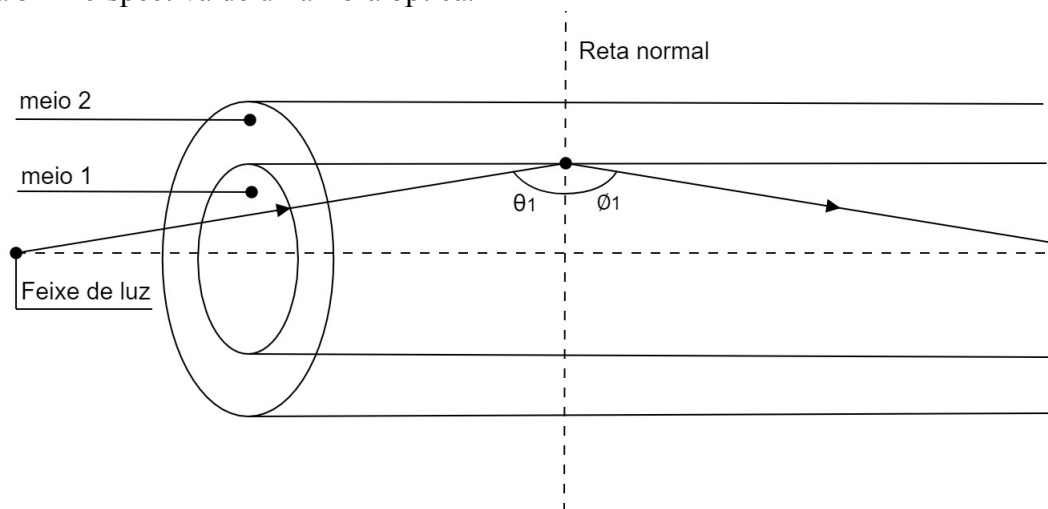
$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

Vale ressaltar que só é possível que ocorra a reflexão total sen_2 for menor que n_1 , caso contrário, analisando a Equação 2.3, é possível perceber que $\text{sen}(\theta_1)$ seria maior que 1, o que não pode acontecer, visto que, a função seno é limitada em 1.

2.1.3 Princípio de funcionamento da fibra óptica

A fibra óptica é uma espécie de filamento constituído por vidro ou plástico extremamente fino e bastante flexível, sua função é conduzir informação em forma de luz de uma das suas extremidades até a outra, utilizando o fenômeno da reflexão (PERON, 2009). O princípio de funcionamento da fibra óptica baseia-se nos argumentos apresentados até aqui, para se ter uma melhor ideia desses princípios pode-se observar a Figura 5.

Figura 5 – Perspectiva de uma fibra óptica.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Pela Figura 5, é possível observar que o feixe de luz é introduzido na fibra óptica com um ângulo de incidência θ_1 suficientemente grande para que o ângulo de refração seja maior que 90° . No caso em questão, não haverá refração da luz, apenas reflexão, permitindo que o feixe possa percorrer grandes distâncias sem muitas perdas. Caso a reflexão não seja total ainda é possível transmitir dados através da reflexão parcial, no entanto, haverá perdas no sinal, assim, será necessário um equipamento que repita o sinal após certa distância, quando ele estiver com pouca intensidade (GOMES, 2018).

2.1.4 Transmissor óptico

Para que seja possível a transmissão de dados através da fibra óptica é necessário um equipamento que converta o sinal elétrico em um sinal luminoso e o insira dentro da fibra, tal ferramenta deve possuir algumas características para que a transmissão seja viável. Por exemplo, frequência de operação, acopladores, entre outros, esse equipamento é chamado de transmissor óptico ou foto transmissor (MAURÍCIO, 2021).

Existem dois tipos de transmissores ópticos convencionais, são eles o *Light Emitting Diode* (LED) e o *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER), ambos têm suas vantagens e desvantagens, para efeito de comparação a Tabela 1 mostra algumas características.

Tabela 1 – Características dos transmissores ópticos.

CARACTERÍSTICAS	LASER	LED
Potência Óptica	Alta	Baixa
Custo	Alto	Baixo
Utilização	Complexa	Simples
Largura de Espectro	Estreita	Larga
Vida Útil	Menor	Maior
Velocidade de Resposta	Rápido	Lento
Divergência na Emissão	Menor	Maior
Acoplamento	Melhor	Pior
Sensibilidade Térmica	Maior	Menor

Fonte: (MAURÍCIO, 2021).

Analisando a comparação, mostrada na Tabela 1, é possível notar que o LASER apresenta uma maior potência óptica e uma menor largura de espectro, esses dois fatores fazem com que ele seja amplamente utilizado em circuitos ópticos que necessitam de uma maior precisão na emissão de luz e alto alcance (MAURÍCIO, 2021).

2.1.5 Receptores ópticos

Após o sinal de luz ser inserido em uma das extremidades da fibra ele vai percorrer todo a sua extensão até chegar a outra extremidade, para que esse sinal seja processado é necessário um equipamento que receba o feixe de luz e o converta em sinais elétricos, esses equipamentos são chamados de receptores ópticos ou fotodetectores (MAURÍCIO, 2021).

Os receptores ópticos devem ser capazes de detectar sinais de luz com os menores níveis de potência óptica possível e converte-lo em sinais elétricos com baixo nível de distorção. O equipamento consegue processar dados que foram enviados de grandes distâncias e tiverem perdas no percurso (MAURÍCIO, 2021). Tais pré-requisitos tornam os receptores ópticos bem mais complexos de serem desenvolvidos do que os transmissores, além disso existem parâmetros que medem o quão bom o equipamento é, são eles:

- **Sensibilidade:** Indica o nível mínimo de potência que um sinal necessita fornecer para poder ser decodificado com um número limitado de erros;

- **Bit Error Rate (BER):** É o número máximo de erros que podem ocorrer entre o transmissor e o receptor;
- **Campo de Variação Dinâmico:** Define a máxima potência média recebida dentro do BER do detector. Caso o receptor detecte uma potência excessiva irá ocorrer uma distorção no sinal.

Existem dois tipos de receptores ópticos convencionais, são eles o PIN e o *Avalanche Photo Diode* (APD), ambos têm suas vantagens e desvantagens, para efeito de comparação a Tabela 2 mostra algumas características dos dois (MAURÍCIO, 2021).

Tabela 2 – Características dos receptores ópticos.

CARACTERÍSTICAS	PIN	APD
Sensibilidade	Menor	Maior
Linearidade	Maior	Menor
Relação Sinal/Ruído	Pior	Melhor
Custo	Baixo	Alto
Vida Útil	Maior	Menor
Tempo de Resposta	Maior	Menor
Sensibilidade Térmica	Menor	Maior
Utilização	Simples	Complexa

Fonte: (MAURÍCIO, 2021).

Uma das vantagens do PIN é sua melhor adaptação as condições climáticas e maior vida útil, além de possuir um menor custo, já o APD possui um custo maior, no entanto, ele tem um melhor desempenho em relação a ruído (MAURÍCIO, 2021).

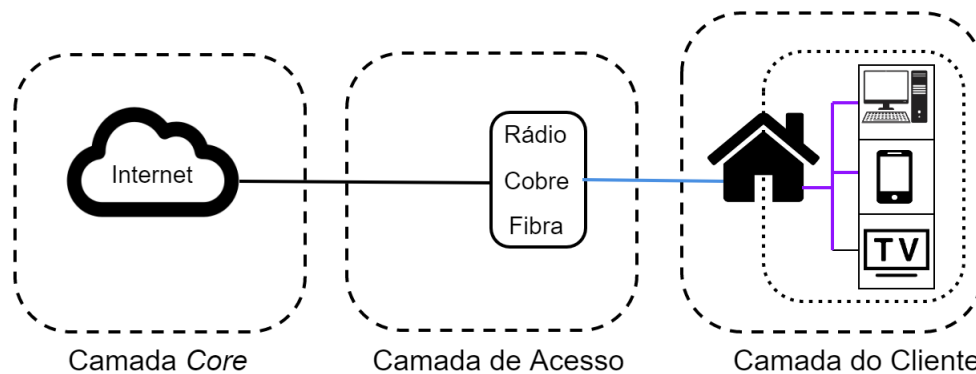
2.1.6 Divisor óptico

O divisor óptico, também conhecido por *splitter*, é um componente capaz de fazer várias ramificações na fibra e conseqüentemente dividir o sinal de luz em várias partes. Essa divisão pode ocorrer de forma balanceada, que é quando todas as partes recebem a mesma fração de potência do sinal, ou de forma desbalanceada, que é quando essa fração de potência é diferente entre as divisões. Esse equipamento é de extrema importância para os ISP, visto que, com ele é possível fornecer dados a vários usuários diferentes a partir de um único ponto transmissor (DIAS, 2018).

2.2 Estrutura Das Redes de Telecomunicações

As redes de telecomunicações são compostas por três diferentes camadas chamadas *core*, de acesso e do cliente, elas desempenham funções distintas, sendo assim, é necessário a utilização de diversos tipos de tecnologia para que juntas essas camadas possam transmitir, comutar e encaminhas dados (DIAS, 2018). A Figura 6 mostra como as três camadas citadas formam a rede de telecomunicações, em seguida será explicada cada uma delas.

Figura 6 – Camadas da rede de telecomunicações.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

A camada *Core* é encarregada de interligar as redes de acesso, elas operam de forma nacional ou continental e atende a uma gigantesca demanda, sendo assim, ela deve percorrer grandes distâncias e possuir uma elevada taxa de transmissão de dados, chegando a *gigabits* ou *terabits* por segundo (DIAS, 2018).

A rede de acesso é a segunda camada, ela é responsável por ligar os ISPs aos clientes, inicialmente, a mesma foi construída com a finalidade, exclusivamente, de manter o tráfego de voz por meio das redes telefônicas públicas comutáveis. Com o passar do tempo a mesma foi adaptada para atuar também com sinal de internet. A tecnologia de transmissão empregada nessa rede pode ser tanto do tipo fixa, através de cabos de fibra ópticas, como móvel, através do 4G ou 5G (DIAS, 2018). Vale ressaltar que é justamente nessa camada da rede de telecomunicações que este trabalho está focado, tentando melhorar o desempenho e diminuir os custos dessa etapa.

A rede do cliente é a terceira e última camada, ela é responsável por ligar a rede de acesso ao usuário final e encontra-se na propriedade do cliente, esta é bem menor quando comparado com as outras duas anteriores. Essa rede estabelece o tráfego de dados entre os dispositivos conectados, podendo ser do tipo residencial ou comercial, com isso, o número de dispositivos conectados e seu tamanho podem ser variáveis (DIAS, 2018).

2.3 Redes Ópticas Passivas

Uma das formas de transmitir um sinal óptico com boa qualidade é através das redes PON, uma vez que, essa tecnologia se destaca por sua facilidade na instalação, alto alcance e capacidade de transmitir voz e vídeo. Trata-se de uma rede que não necessita de energia elétrica em sua transmissão, o que deixa sua utilização mais barata, por isso é denominada de passiva (FERRAUDO, 2021).

Na transmissão, o sinal de luz sai de um terminal óptico chamado de *Optical Line Terminal* (OLT) que está localizado na ISP, é conduzido pela fibra até equipamentos que realizam a divisão do mesmo, chamados de Caixa de Emenda Óptica (CEO) e Caixa de Terminação Óptica (CTO) e em seguida chega até o cliente que possui uma *Optical Network Unit* (ONU). Vale ressaltar que o sinal óptico é capaz de trafegar em dois sentidos diferentes através de um mesmo canal, ou seja, pela mesma fibra, esses sentidos são:

- ***Downstream***: Os dados saem da OLT e vão para ONU;
- ***Upstream***: Os dados saem da ONU e vão para OLT.

Desde a sua criação, a rede PON foi por diversas vezes aprimorada dando início a outras tecnologias de transmissão como EPON, GPON, 10GE-PON, entre outros, que nada mais são do que a evoluções da PON. Cada um dos meios de transmissão citados possui características diferentes como velocidade de transmissão, número de clientes que podem ser atendidos, distância de alcance, eficiência, custo, entre outros, cada um com seus pros e contras.

Este trabalho irá focar na rede GPON, devido sua maior utilização pelos ISP. Essa rede recebe esse nome devido sua capacidade de transmitir dados com velocidade superior a 1 Gbps, outras de suas características são:

- **Velocidade Máxima de *Downstream***: 2,5 Gbps;
- **Velocidade Máxima de *Upstream***: 1,25 Gbps;
- **Distância Máxima entre OLT e Cliente**: 60 km;
- **Número Máximo de Cliente por Porta da OLT**: 128.

2.3.1 Principais Componentes da Rede GPON

Para implementar uma rede GPON é necessário a utilização de vários equipamentos que possam desempenhar algumas das funções que já foram explicadas anteriormente como, transmitir, receber e dividir o sinal, no entanto, existem diversos tipos de aparelhos no mercado

capazes de executar a mesma tarefa, assim, cabe ao projetista conhecer e analisar esses equipamentos que estão a sua disposição no mercado, para que ele possa atender todas as necessidades da rede gastando o mínimo possível, alguns desses dispositivos serão explicados abaixo.

2.3.1.1 OLT

A OLT é o equipamento responsável pela conexão entre o servidor e todos os usuários, ele é capaz enviar e receber dados de voz e vídeo, dentre suas principais funções estão, controlar a largura de banda que é fornecida a cada usuário, gerenciar o fluxo de dados, processar os sinais GPON, sincronizar as ONUs, entre outros (ALBUQUERQUE, 2018). A Figura 7 mostra uma OLT do modelo OLT-GPON-3016 com as seguintes características: até 128 usuários por interface GPON, Velocidade de 2.5 Gbps em downstream e 1.25 Gbps em upstream, 20 km de faixa de transmissão.

Figura 7 – OLT.

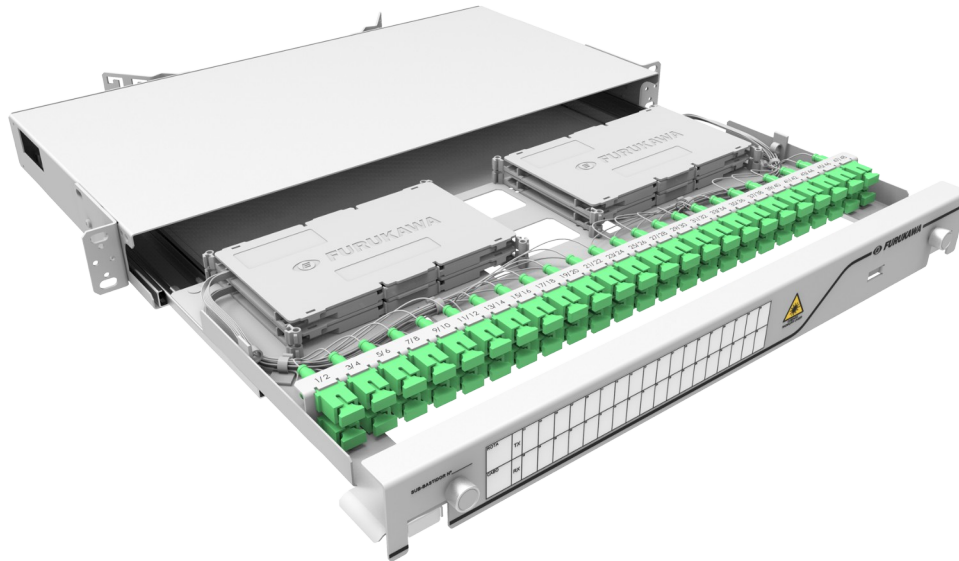


Fonte: <https://www.efurukawa.com/br/p/concentrador-optico-standalone-olt-gpon-3016/35510448>

2.3.1.2 DIO

O Distribuidor Interno Óptico (DIO) é o equipamento responsável por armazenar de forma segura os cabos de fibra óptica que saem da OLT, esses cabos, por possuírem muitos filamentos ópticos, são bem rígidos, o que dificulta seu manuseio, assim, eles podem ser armazenados de maneira organizada e segura dentro do DIO e em seguida distribuídos na rede (ALBUQUERQUE, 2018). A Figura 8 mostra um DIO do modelo BT48 com capacidade para 48 emendas por fusão.

Figura 8 – DIO.



Fonte: <https://www.furukawatam.com/pt-br/catalogo-de-produtos-detalhes/distribuidor-interno-optico-bt48>

2.3.1.3 CEO

A CEO tem como função proteger e acomodar as emendas ópticas feitas por fusão entre o cabo que sai da OLT, também chamado de *backbone*, e os cabos de distribuição. Essas emendas são bastantes sensíveis e devem ficar protegidas do meio externo, pois o calor e umidade podem levar a sua deterioração (ALBUQUERQUE, 2018). A Figura 9 mostra uma CEO do modelo FK-CEO-4M-144F com as seguintes características: compatível com vias aéreas ou subterrâneas, capacidade para até 144 fibras, bandejas com capacidade de 24 fusões.

Figura 9 – CEO.



Fonte: <https://www.efurukawa.com/br/p/fk-ceo-4m-144f-24f-ceo-modulo-basico/35520389>

2.3.1.4 CTO

A CTO tem como função proteger e acomodar as emendas ópticas feitas por fusão entre os cabos de distribuição e os cabos que vai para cada usuário, também conhecidos como cabos *drop*. Esse equipamento possui gavetas, que pode variar de um modelo para outro, cada uma dessas gavetas é capaz de comportar várias emendas, essas caixas também abrigam os *splitters* que fazem a derivação do sinal (ALBUQUERQUE, 2018). Na Figura 10 é possível observar uma CTO do modelo FK-CTO-16 MT com as seguintes especificações: capacidade de até 24 emendas por fusão, 2 emendas por fusão para os *splitters* e até 16 conexões para assinantes através de conector óptico e capacidade de alocar até dois *splitters* ópticos.

Figura 10 – CTO.



Fonte: <https://www.efurukawa.com/br/p/caixa-terminal-optica-conectorizada-fk-cto-16-mt-1x8-grommet-6-9/35520555?catId=cat530099>

2.3.1.5 Splitter

O divisor óptico, também conhecido como *splitter*, é responsável por fazer a divisão do sinal com fator de $2n$, onde n é o número de divisões. O equipamento é de total importância para a implementação de uma rede PON, visto que, com ele é possível criar uma rede ponto-multiponto. Existem dois tipos de divisores ópticos, o balanceado e o desbalanceado, no primeiro tipo o sinal é dividido igualmente e todos os pontos de saída recebem a mesma potência, já no segundo tipo os pontos de saída podem ter potências diferentes. Vale ressaltar que, cada divisor desse irá causar uma perda no sinal que é relativamente pequena, mas que deve ser considerado na hora de projetar uma rede (ALBUQUERQUE, 2018). A Figura 11 mostra um *splitter* óptico com capacidade de dividir um sinal em até 16 partes iguais. Vale a pena ressaltar

que o *splitter* fica alocado nas CEOs e CTOs pois são nessas caixas que ocorrem a divisão do sinal, sendo assim, é comum encontrar *kits* completos não havendo necessidade da compra do *splitter* separadamente.

Figura 11 – *Splitter*.



Fonte: <https://www.efurukawa.com/br/p/divisor-optico-plc-1x16-bli-ab-g-657a-ncsc-apc-15d0906d09-kit-com-2-unidades/35500093>

2.3.1.6 Conectores

Existem diferentes tipos de fibra óptica e durante a implementação de uma rede, por muitas vezes, surge a necessidade de juntar duas fibras com características iguais ou até mesmo diferentes fazendo uma emenda, com isso foram desenvolvidas equipamentos capazes de suprir essa necessidade. Existem dois tipos de emendas, por fusão e por conectorização, no primeiro tipo é utilizado uma máquina de fusão, como mostrado na Figura 12a. Vale ressaltar que cada fusão terá uma perda associada (ALBUQUERQUE, 2018). No segundo tipo de emenda, por conectorização, são utilizados conectores para fazer a junção das fibras, embora essa seja uma alternativa mais barata a perda associada a esse tipo é maior (ALBUQUERQUE, 2018). A Figura 12b mostra alguns conectores bastante utilizados em redes PONs.

2.3.1.7 ONU

A ONU é um dispositivo que fica instalado na residência do cliente e tem como finalidade processar os sinais ópticos e converte-los em sinais elétricos, formando assim uma interface óptica-elétrica para disponibilizar serviços de comunicação de dados, telefonia e televisão. Outra função deste equipamento é enviar dados pra a OLT, visto que, em uma rede GPON o usuário e o servidor estão constantemente trocando informações (ALBUQUERQUE, 2018). A Figura 13 mostra uma ONU GPON modelo 421-21W com capacidade de *downstream* de 2,5 Gbps e *upstream* de 1,25 Gbps.



(a) Equipamento para realizar fusão.
 Fonte: <https://www.efurukawa.com>.



(b) Conectores.

Figura 13 – ONU.



Fonte: <https://www.efurukawa.com/br/p/modem-optico-gpon-421-21w/35510440>

2.3.1.8 Fibra Óptica

Os cabos de fibra óptica são responsáveis por conduzir e proteger o sinal de luz por toda a rede, eles são constituídos por várias camadas, como mostra a Figura 14a, são elas:

- **Núcleo da fibra:** É composto por vidro de sílica (SiO_2) com alta pureza, é aqui que a luz vai de fato penetrar (ALBUQUERQUE, 2018);
- **Camada de proteção da fibra:** Protege o núcleo da fibra, evitando que a luz escape e ocorra perdas (ALBUQUERQUE, 2018);
- **Revestimento interno:** É responsável de proteger a fibra contra impactos externos o que poderia causar interferência durante a transmissão do sinal (ALBUQUERQUE, 2018);
- **Fibra de fortalecimento:** Evita rupturas na fibra, visto que, existem pontos na rede em que a fibra é esticada ou torcida (ALBUQUERQUE, 2018);
- **Proteção de plástico :** Protege a fibra contra fatores adversos do ambiente, como umidade

e calor (ALBUQUERQUE, 2018).

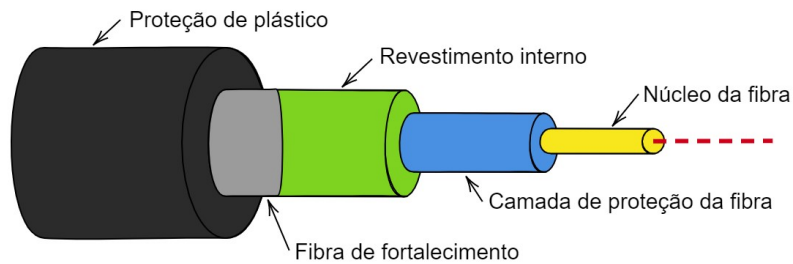
Os cabos ópticos podem possuir um ou mais filamento óptico, além disso, existem diferentes tipos específicos para vários ambientes e aplicações diferentes, assim, a fim de definir requisitos mínimos de qualidade e padroniza-los, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) definiu algumas normas chamadas de Norma Brasileira (NBR) (ALBUQUERQUE, 2018). A Figura 14b mostra alguns cabos com diferentes quantidades de filamentos ópticos, tais como:

- **Cabos ópticos externos:** Estes tipos de cabos são utilizados em ambientes externo sendo responsáveis por ligar a DIO a CEO e a CEO a CTO, com isso, eles são bastante robustos, possuem forte proteção contra a ação do sol e boa impermeabilidade para proteger contra a chuva. Pelo fato de serem robustos e possuírem grandes quantidades de filamento óptico, são também mais difíceis de manusear, quando comparado a outros tipos (ALBUQUERQUE, 2018).
- **Cabos ópticos de terminação:** Esse tipo de cabo pode ser utilizado tanto em ambientes externo quanto em ambientes internos, assim, eles atendam as mesmas exigências de flamabilidade que os cabos internos, pois com isso são capazes de evitar a propagação de incêndios e a liberação de gases tóxicos em ambientes fechados (ALBUQUERQUE, 2018).
- **Cabos ópticos de acesso:** São conhecidos também como cabos *drop*, eles são utilizados na última parte do percurso da fibra, ligando a CTO até a ONU, por este motivo, estes cabos devem possuir proteção contra a ação do sol (ALBUQUERQUE, 2018).
- **Cabos ópticos internos:** São utilizados em ambientes fechados, pois, caso contrário, seriam danificados. Esse tipo de cabo possui subdivisões definidas de acordo com a sua classe de flamabilidade (ALBUQUERQUE, 2018).
- **Cordões ópticos:** São utilizados em ambientes internos, possuem uma menor quantidade de filamentos ópticos quando comparado aos cabos, o que aumenta sua flexibilidade e melhora seu manuseio (ALBUQUERQUE, 2018).

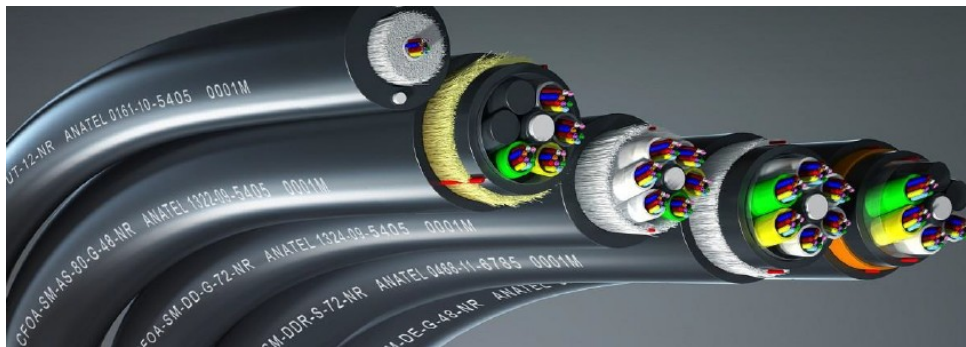
2.4 Arquitetura FTTX

Ao projetar uma rede GPON existem diversas possibilidades para determinar até qual ponto do percurso entre o provedor e o cliente a fibra vai chegar, dessa forma, surgiu a arquitetura *Fiber To The x* (FTTX). Basicamente, tal arquitetura indica qual localização, um

Figura 14 – Estrutura da fibra óptica.



(a) Camadas da fibra óptica.



(b) Cabos ópticos.

Fonte: <https://under-linux.org/entry.php?b=4668>

ponto "x", da rede o provedor levará a fibra óptica. Existem algumas variantes dessa arquitetura que especificam melhor onde é esse ponto "x", são elas:

- **Fiber to the node (FTTN)**: Nesta configuração a fibra óptica sai da central até um armário de rua, desse armário até a casa do cliente é utilizado o cobre;
- **Fiber to the curb (FTTC)**: Neste perfil a fibra vai até um armário na rua e no restante do percurso é utilizado o par de cobre ou cabo coaxial;
- **Fiber to the building (FTTB)**: Nesta configuração a fibra vai até a entrada de um prédio residencial ou comercial, mas não adentra a casa do usuário final. A partir desse ponto final, a transmissão até o usuário é feita, geralmente, através uma rede metálica de cabeamento estruturado;
- **Fiber to the home (FTTH)**: Nessa arquitetura a fibra óptica vai até a casa do usuário final.

A utilização dessas arquiteturas traz diversas vantagens, tais como a criação de diversos tipos de projetos, com diferentes custos e desempenhos, além de não sofrer perturbações eletromagnéticas.

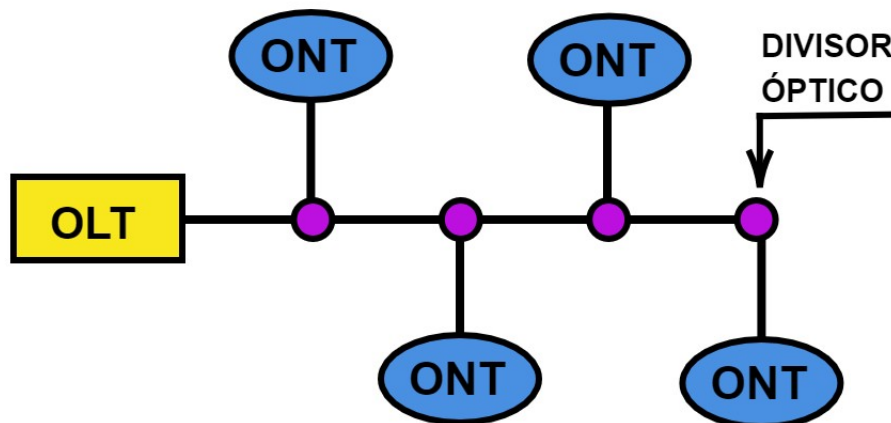
2.5 Topologias

Aqui serão mostradas algumas das topologias básicas mais utilizadas nas redes PON, em barramento, anel, árvore ou misto, detalhando-as e apresentando sua justificativa.

2.5.1 Topologia em barramento

Essa topologia é a mais simples dentre as que serão abordadas, nela, a OLT é interligada a todas as ONU através de um barramento que possui divisores ópticos com razão de 1:2, como mostra a Figura 15. Esses divisores podem ser balanceados ou desbalanceados, sendo possível mandar uma maior potência para o próximo segmento do barramento o que aumenta a distância de transmissão do sinal. Vale ressaltar que a topologia em barramento, não é muito utilizada pelos ISPs, pois a mesma é mais utilizada na arquitetura FTTC e em situações em que os clientes estão espalhados geograficamente (DIAS, 2018).

Figura 15 – Topologia do tipo barramento.



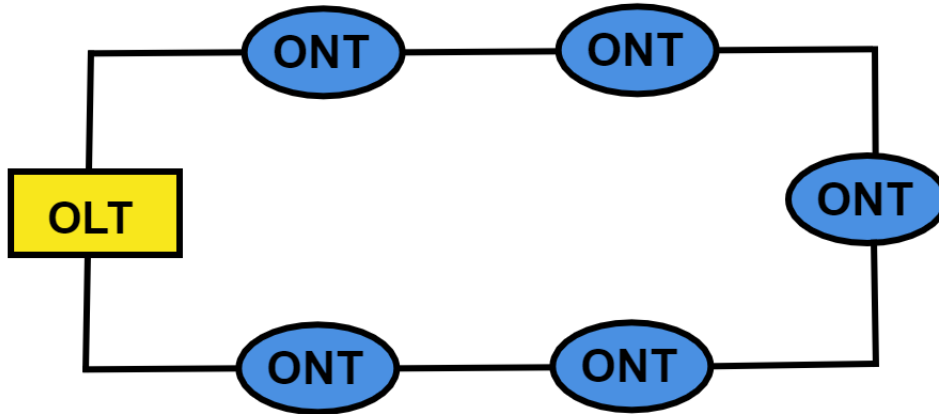
Fonte: Próprio Autor, 2021.

2.5.2 Topologia em anel

Nessa topologia, a OLT está ligada a duas ONUs através de dois caminhos distintos, um para a primeira e outro para a segunda, essas ONUs estão ligas as demais de forma serial, formando um barramento óptico em formato de anel, como mostra a Figura 16. Uma das vantagens dessa topologia é que todas os usuários acessam a rede igualmente, visto que, sua performance não é prejudicada com o aumento de usuários, por outro lado, a falha individual de

uma ONU pode afetar toda a rede, uma vez que todas estão ligadas em série (DIAS, 2018)..

Figura 16 – Topologia do tipo anel.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

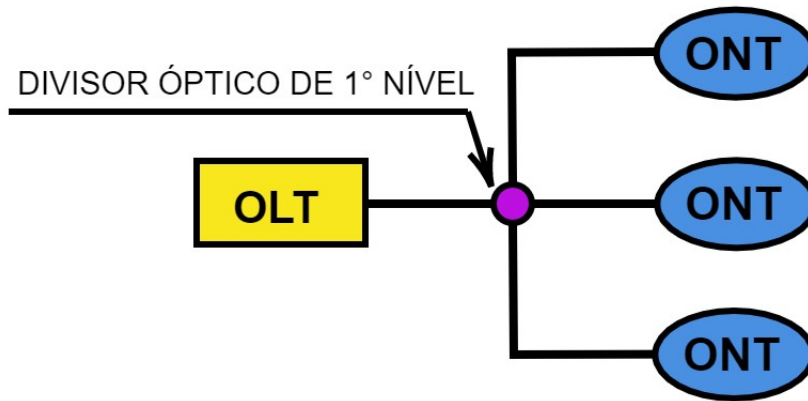
2.5.3 Topologia em árvore

Essa topologia surgiu a partir das redes de distribuição de TV a cabo e seu objetivo principal era transmitir o mesmo sinal para vários usuários a partir do mesmo ponto inicial. Sua aplicação em redes ópticas mantém a mesma lógica original, assim, o sinal é transmitido a partir de um nó gerador, que neste caso é a OLT, é distribuído através de fibras ópticas com derivações, essas derivações são feitas através de *splitters* que podem ter um ou vários níveis formando uma árvore, por fim, o sinal chega até a ONU. A Figura 16 mostra um diagrama da topologia em árvore. Dentre as vantagens dessa topologia estão, a facilidade em diagnosticar alguma falha e realizar a manutenção, caso ocorra algum dano na rede, tudo isso sem gerar nenhum tipo de transtorno aos outros usuários, além disso, a mesma pode ser implementada a outros tipos de topologia com o objetivo de aumentar a velocidade da conexão (DIAS, 2018).

2.5.4 Topologia mista

A topologia mista, como o nome sugere, é a junção de duas ou mais topologias como árvore, anel ou barramento, por conta de sua versatilidade ela é a mais utilizada em grandes redes. Devido suas características ela consegue adaptar-se melhor a diversos tipos de ambientes, visto que que, a mesma é capaz de extrair as vantagens de várias topologias ao mesmo tempo, com isso, obtém-se uma compensação dos custos, flexibilidade expansibilidade e funcionalidade

Figura 17 – Topologia do tipo árvore.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

de cada segmento de rede (MACÊDO, 2012).

O diagrama de representação de topologia mista pode variar bastante, visto que, ele é a combinação dos diagramas das topologias que estão sendo utilizadas. Vale ressaltar que, além de herdar todas as vantagens das outras topologias, a mista também irá possuir as desvantagens (MACÊDO, 2012). Devido a todos os fatores citados até aqui, essa será a topologia que será utilizada para a implementação do algoritmo.

2.6 Métrica de Desempenho da Rede GPON

Existem alguns parâmetros que medem o desempenho de uma rede GPON e que são de extrema importância para o projeto, visto que, através deles é possível responder algumas perguntas, tal como: O sinal está chegando de forma aceitável?

Diante disso, torna-se necessário o entendimento de uma métrica bem difundida chamada orçamento de potência.

2.6.1 Orçamento de potência

Tanto as OLTs quanto as ONUs possuem uma potência de transmissão e uma sensibilidade de recepção do sinal, dessa forma, para que os dados cheguem até o usuário final, as perdas durante o percurso devem ser menor do que a diferença entre a potência de transmissão e sensibilidade de recepção, essa diferença é chamada de orçamento de potência OP

(NETWORKS, 2021), como mostra a Equação:

$$OP = P_T - S_R, \quad (2.4)$$

onde P_T é a potência de transmissão e S_R é a sensibilidade de recepção. A unidade de medida da potência de transmissão e de recepção é o decibéis relativos a um miliwatt dBm , dessa forma, o resultado obtido, que no caso é o orçamento de potência, será em decibel dB , que mede o valor de ganho ou perda de potência. Com isso, pode-se calcular a Margem de proteção (MP) que indica o quanto de perda a rede ainda suporta:

$$MP = OP - P_{TOTALS}, \quad (2.5)$$

Onde P_{TOTALS} são as perdas totais durante o percurso. As perdas totais a serem consideradas na Equação 2.5 é a soma de todas as perdas durante o percurso da fibra até chegar no cliente, que são:

- Perdas nos conectores;
- Perdas nas emendas por fusão;
- Perdas nos *splitters*;
- Perdas na fibra óptica.

Para que o sinal chegue de forma aceitável até o cliente, a seguinte condição deverá ser atendida:

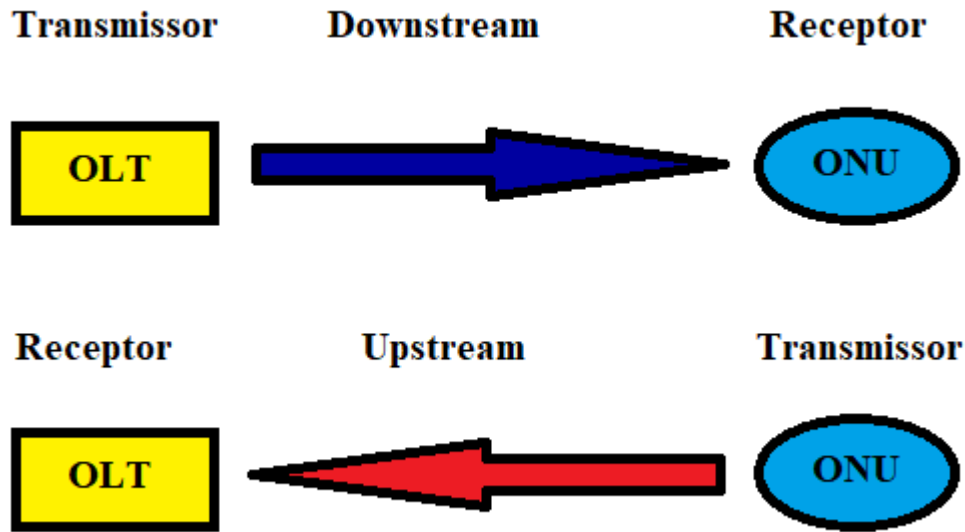
$$MP > 0. \quad (2.6)$$

Vale lembrar que, como o usuário e a ISP estão constantemente enviando e recebendo dados um do outro, então, haverá momentos em que a OLT funcionará como transmissor e momentos em que ela funcionará como receptor, no entanto, sua capacidade de transmissão é diferente de sua capacidade de recepção, o mesmo vale para a ONU, como mostra a Figura 18 (NETWORKS, 2021). Nota-se que o orçamento de potência e a margem de segurança para *downstream* serão diferentes do *upstream*, assim, ambos deverão ser calculados separadamente para saber se o usuário conseguirá enviar e receber dados de forma aceitável.

2.7 Teoria dos Grafos

A teoria dos grafos surgiu, inicialmente, com o intuito de resolver um problema de rotas. Tudo começou na cidade de Konisberg, onde seus habitantes se perguntavam se

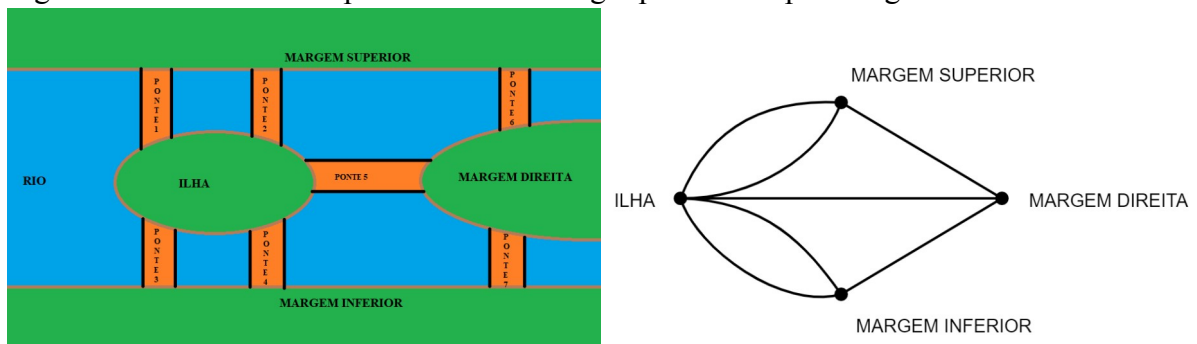
Figura 18 – Troca de dados entre OLT e ONU.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

era possível atravessar as sete pontes do rio Pregel sem passar duas vezes na mesma ponte e retornando até o ponto de partida. A Figura 19a mostra uma representação das pontes em questão. Diante disso, surgiu a necessidade da criação de um ramo da matemática que estudasse e resolvesse este tipo de problema, afim de modelar e simplificar situações como essa ou que são complexas de serem representadas, hoje esse ramo é conhecido como teoria dos grafos (PRESTES, 2020).

Figura 19 – Problema das pontes de Konisberg representado por um grafo.



(a) Pontes do rio Pregel.

(b) Grafo representado pontes do rio Pregel.

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Os grafos são formados por dois conjuntos, um conjunto de pontos chamados de vértices e um conjunto de arcos chamados de arestas, onde os vértices podem ser interligados através de arestas e utilizando esses conceitos é possível representar o problema das pontes de

Konisberg, como mostra a Figura 19b (PRESTES, 2020).

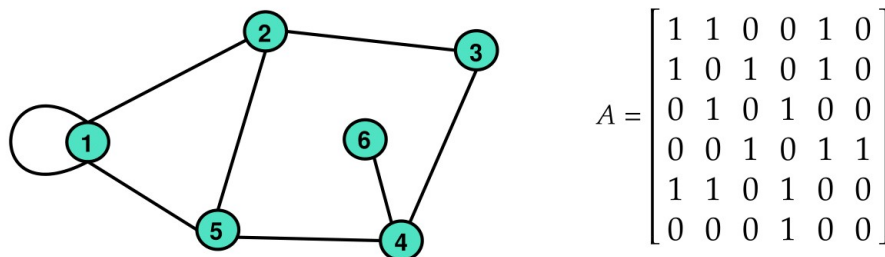
Existem diversos tipos de problemas que podem ser resolvidos utilizando a teoria dos grafos, cada um com suas particularidades, com isso, foram criados vários tipos de grafos. Quando se tem conhecimento sobre o tipo de situação que se quer resolver, em muitos casos, não haverá necessidade utilizar toda a teoria, mas apenas a parte da mesma que se enquadra naquele problema específico, tornado sua solução bem mais rápida (PRESTES, 2020).

2.7.1 Matriz Adjacência

Uma das formas de representar um grafo é através da matriz adjacência $n \times n$, onde n é o número de vértice, ela é capaz de informar se um vértice está ligado a outro ou a ele mesmo por uma aresta (PRESTES, 2020).

Dado o grafo mostrado pela Figura 20 é possível representa-lo pela matriz adjacência A , mostrada na mesma figura, cada linha e cada coluna refere-se a um vértice, assim, cada termo da matriz é relacionado a dois vértices, quando existe uma aresta que os ligam, esse termo é 1, quando não existe esse termo é 0, por exemplo, o termo 1×5 , a primeira linha refere-se ao vértice 1 e a quinta coluna ao 5, como existe uma aresta que liga esses dois vértice o termo 1×5 é 1 (PRESTES, 2020).

Figura 20 – Representação de um grafo por uma matriz adjacência.

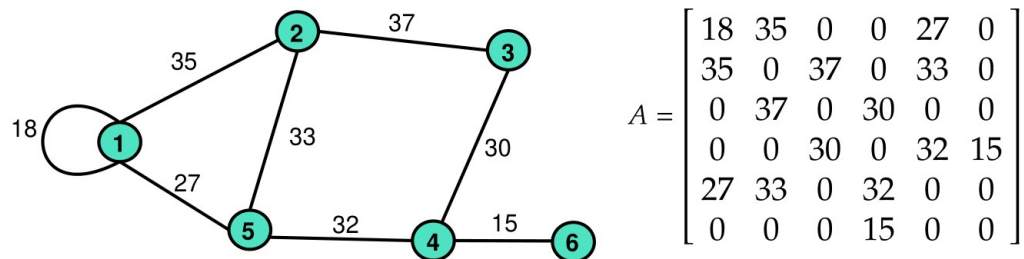


Fonte: Próprio Autor, 2021.

Existe outra forma de escrever a matriz adjacência, ao invés de apenas informar a existência da aresta com 0 ou 1, também é possível escrever cada termo relacionado ao tamanho daquela aresta e caso ela não exista esse termo será 0, como mostra a Figura 21. A lógica para montar essa matriz adjacência é a mesma explicada anteriormente, com cada termo relacionado a dois vértices, por exemplo o termo 1×5 , como os vértices 1 e 5 estão ligados por uma aresta o valor do termo 1×5 será o tamanho da aresta, no caso, 27 (PRESTES, 2020).

Vale a pena destacar que uma representação que facilita a solução em problemas de

Figura 21 – Segunda forma de montar uma matriz adjacência.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

redes é a intitulada matriz de distância D . Basicamente, a matriz de distância está relacionada com matriz de adjacência, com a diferença que A , da Figura 20, fornece as informações de que vértices estão ligados mas não diz nada sobre os custos ou distâncias entre os vértices, enquanto D informa sobre a menor distância entre dois nós (VILLALBA, 2009).

2.8 Colônia de Formigas

Na literatura de Dorigo (2004), o autor descreveu um algoritmo que se inspira no comportamento das formigas ao escolher o caminho até sua fonte de alimento usando a probabilidade e o conceito de feromônio, que é um sinal químico liberado por um animal que dispara uma resposta natural em outros membros da mesma espécie, para otimizar problemas representados por grafos.

2.8.1 Feromônio

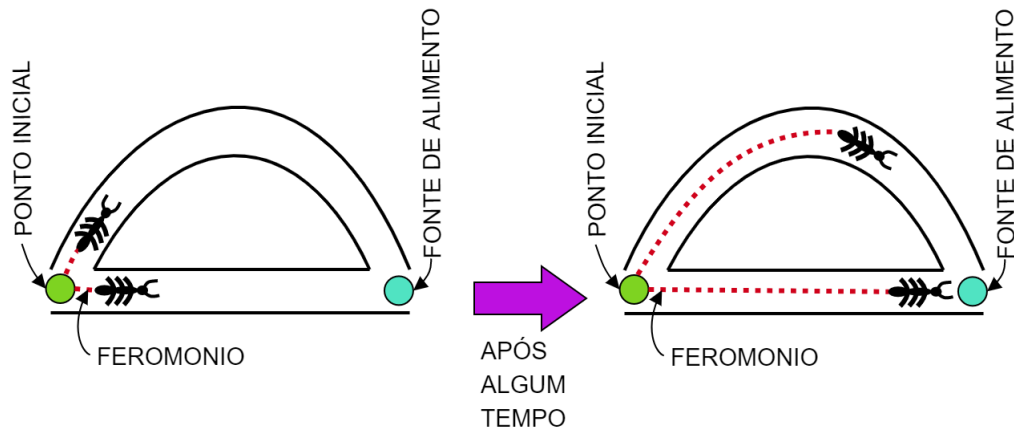
Muitas espécies de formigas são quase cegas, o que dificulta a interação entre elas e seu deslocamento, dessa forma, a comunicação entre elas é realizada por meio de substâncias chamadas de feromônio. Existem diversos tipos de feromônios, por exemplo, quando uma formiga está exposta a uma situação de perigo ela libera um tipo dessa substância para avisar as outras e isso se repete para várias situações (GOMES, 2009).

Além disso, quando uma formiga está em busca de uma fonte de alimento ela marca o caminho por onde passa com um certo tipo de feromônio, assim, caso ela encontre, aquele caminho ficará indicado para que outras formigas possam encontrar a fonte, por outro lado, essa substância evapora com o passar do tempo, dessa forma, se a rota escolhida não for a melhor, é provável que ela não seja escolhida pelas outras da mesma espécie. Com essa lógica, todas as formigas do formigueiro tendem escolher sempre a rota mais curta, que apresenta a maior

concentração de feromônio, isso irá otimizar esse percurso (GOMES, 2009).

Pela Figura 22 é possível observar que o feromônio na rota menor tende a ficar definido mais rápido, já na rota maior, pelo fato de demorar mais, ele pode evaporar antes que outras formigas o encontre.

Figura 22 – Liberação de feromônio.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

2.8.2 Algoritmo

Inicialmente, o algoritmo determina que a formiga k está no ponto inicial x e tem vários caminhos a sua escolha para seguir e chegar até o segundo ponto y , como ela só pode escolher um deles, será calculado a probabilidade de escolha para cada um baseando-se em alguns parâmetros como feromônio inicial e visibilidade, como mostra a Equação 2.7.

$$P_{xy}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{xy}(t)]^\alpha [\eta_{xy}(t)]^\beta}{\sum [\tau_{xy}(t)]^\alpha [\eta_{xy}(t)]^\beta} & \text{se } y \in y_x^k \\ 0 & \text{Caso contrario} \end{cases} \quad (2.7)$$

Onde t é o número da iteração ou geração, τ_{xy} é o valor do feromônio entre os pontos x e y , $\eta_{xy} = \frac{1}{d}$ é a visibilidade que também corresponde ao inverso da distância entre x e y , pois quanto maior a distância menor a visibilidade, α é o parâmetro relacionado ao feromônio, varia de 0 a 1, na equação ele indica o quão relevante é o feromônio para a escolha da formiga e β é o parâmetro relacionado a distância, varia de 0 a 1, na equação indica o quão relevante é a distância para a escolha da formiga. Caso o vértice y não pertença ao conjunto de pontos que possam ser escolhidos pela formiga y_x^k , essa probabilidade será 0.

Em seguida, após a formiga concluir seu percurso, o algoritmo calcula a quantidade de feromônio que foi liberada na rota, como mostra a Equação 2.8.

$$\Delta \tau_{xy}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{d_k} & \text{se } y \in \text{a rota da formiga } k \\ 0 & \text{Caso contrario} \end{cases} \quad (2.8)$$

Onde Q é a constante de peso para o deposito de feromônio e deve ser definida pelo projetista, $\Delta \tau_{xy}^k(t)$ é a quantidade de feromônio depositada pela formiga k no caminho xy na iteração, d_k é o comprimento do caminho percorrido pela formiga k na iteração.

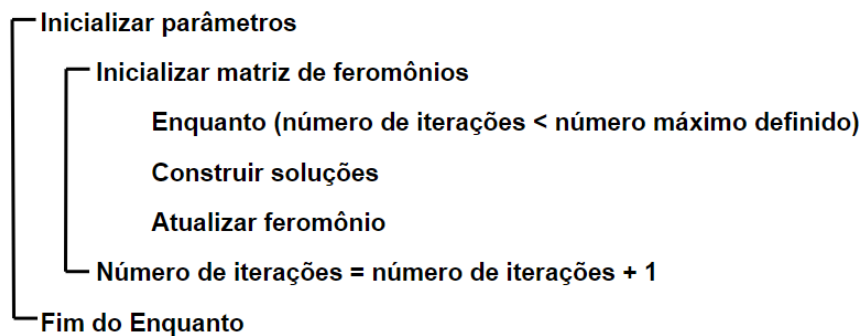
Por último, o algoritmo realiza a atualização de todas as variáveis, como mostra a Equação 2.9.

$$\tau_{xy}^k(t) = (1 - \sigma) \tau_{xy}^k(t - 1) + \sum_{\Gamma}^m \Delta \tau_{xy}^k(t) \quad (2.9)$$

Onde m é a quantidade de formigas, σ é o parâmetro que está relacionado a velocidade de evaporação do feromônio.

O algoritmo será executado seguindo as ordens dos eventos mostrados na Figura 23, utilizando os parâmetros e aplicando as equações que foram explicadas anteriormente.

Figura 23 – Lógica de execução do algoritmo.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Analisando o que foi explicado até aqui é possível observar que inicialmente as formigas agem de forma estocástica para determinar o percurso até sua fonte de alimentos, no entanto, à medida em que são explorados vários caminhos diferentes a tendência é que todas ou a maioria das formigas migrem para solução mais otimizada.

2.8.3 Adaptação S-CF

Em (DORIGO, 2004) o autor apresenta uma adaptação do algoritmo original chamada de Adaptação da Colônia de Formigas (S-CF), nessa nova solução o parâmetro referente a distância " β " é considerado como sendo zero, isso fará com que as formigas deem total peso ao parâmetro do feromônio " α " na hora de realizar os cálculos, assim, a nossa expressão da probabilidade será dada pela 2.10.

$$P_{xy}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{xy}(t)]^\alpha}{\sum [\tau_{xy}(t)]^\alpha} \text{ se } y \in y_x^k \\ 0 \text{ Caso contrario} \end{cases} \quad (2.10)$$

Vale ressaltar também que, por conta da alteração realizada nessa adaptação as operações matemáticas que serão calculadas ficarão mais simples, visto que, será um parâmetro a menos para ser computado, dessa forma, será necessário um menor esforço computacional para a execução do algoritmo, além disso, o tempo gasto deverá ser menor o que é outro ponto positivo para se levar em consideração.

Como agora as formigas estão dando peso total ao feromônio, (DORIGO, 2004) descreve $\Delta \tau_{xy}^k(t)$ como apenas $\Delta \tau$, um parâmetro constante, referente apenas a quantidade de feromônio que será depositado por cada formiga, independentemente da distância entre os pontos "x" e "y", levando em consideração apenas a constante de peso para depósito de feromônio Q .

Para as demais partes do algoritmo não será necessária nenhuma mudança, assim a Equação de atualização do feromônio 2.9 poderá ser aplicada conforme explicado na seção 2.8.2.

3 METODOLOGIA

3.1 Região Geográfica do Projeto

O desenvolvimento de um projeto FTTH deve seguir alguns estágios para garantir o melhor resultado de forma prática e célere. A primeira etapa é conhecer a região do projeto. Tal etapa torna-se importante tanto em aspectos financeiros quanto técnicos. Essa etapa pode ser feita em campo, ou seja, andando pela cidade ou através do *Google Earth* e dados censitários da cidade.

Diante disso, foi escolhida uma região no entorno da UFC que fica na cidade de Sobral-CE, mais especificamente no bairro Centro. Em termos quantitativos o mesmo possui 19.662 habitantes, em 2.389.529 m² como ilustrado na Figura 24.

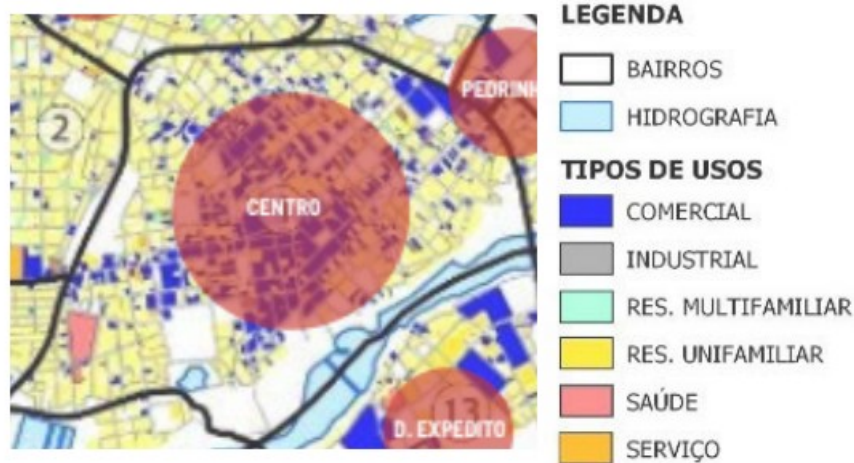
Figura 24 – Localização do bairro Centro na cidade de Sobral-CE.



Fonte: (MATOS, 2020)

Cabe destacar que o bairro Centro é formado em grande parte por residência do tipo unifamiliar¹, seguido por zonas comerciais (MATOS, 2020). A Figura 25 ilustra a localização dos principais tipos de zonas do bairro Centro.

Figura 25 – Tipos de zonas no bairro Centro.



Fonte: (MATOS, 2020)

Na localidade escolhida existe uma infraestrutura adequada para um projeto FTTH inicial. Os postes usados no projeto para lançamento dos cabos e implementação dos equipamentos são de propriedade da *Ente nazionale per l'energia elettrica* (ENEL), portanto torna-se necessário a autorização da empresa para o uso de seus recursos. O projeto será proposto para atender usuários de uma área localizada no centro da cidade de Sobral, na região norte do Ceará, como mostra a Figura 26. A escolha dessa região se deu por conta da sua irregularidade geográfica, com ruas ascendentes, descendentes e com alguns trechos de difícil acesso, o que traz um maior grau de dificuldade para projetar uma rede GPON.

Algumas informações técnicas da rede são:

- Área total: 0,15 km²;
- Perímetro: 1,7 km;
- Tipo de região: comercial e residencial;
- Quantidade de residências: 674.

Como a região escolhida possui cerca de 674 imóveis residenciais, tendo em vista que não serão todos os imóveis da região que irão utilizar o serviço, será considerada uma taxa de penetração de 40%, assim, o número de clientes inicialmente previsto para serem atendidos será de 270.

¹ Pertencente ou destinado a uma única família.

Figura 26 – Área de atendimento.



Fonte: Google Eath, 2021.

3.2 Topologia adotada para otimização GPON

Após a definição da área de atendimento e arquitetura FTTH torna-se necessário definir a topologia. Vale salientar que deve-se ser cauteloso nessa etapa por dois motivos. A topologia deve estar presente na literatura e não aumentar a complexidade do simulador proposto².

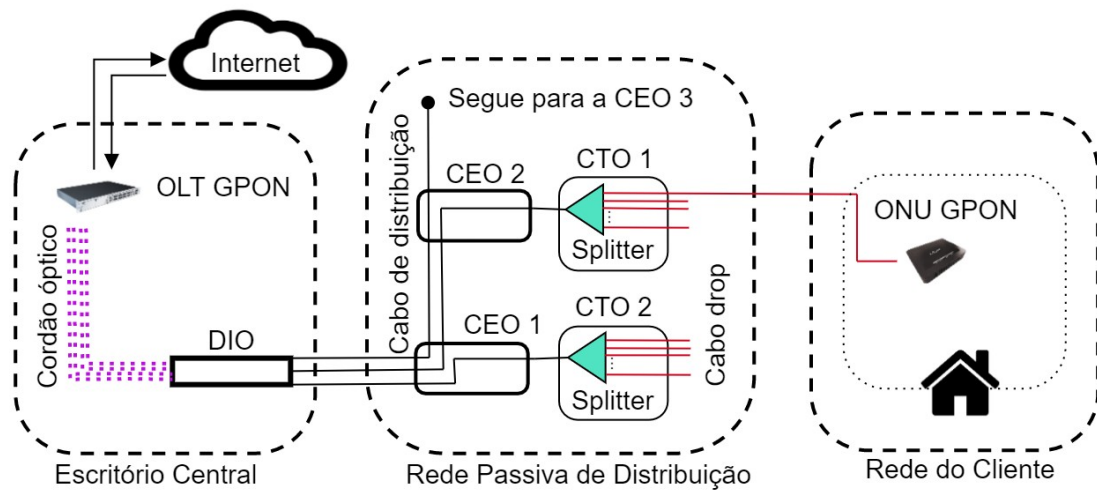
Diante dessas restrições foi escolhida a topologia mista centralizada, uma topologia que existe na literatura e possui uma média complexidade de implementação. Nesta topologia utiliza-se um único nível divisores ópticos com fator de divisão de 1x64. Este divisor óptico estará sempre disposto na rede passiva de distribuição em uma CTO³. Nesta topologia tem-se uma redução do número de dispositivos passivos na rede externa. Entretanto, há um aumento considerável na quantidade de cabos do tipo *drop* (DIAS, 2018). Para melhor entendimento, a Figura 27 apresenta o diagrama físico da rede quando se utiliza a topologia mista centralizada. Nota-se um cabo de distribuição que vai alimentando as CTOs que contém divisores ópticos de distribuição com fator de divisão de 1x64. Enquanto na CEO ocorre apenas a emenda das fibras ópticas.

É importante deixar claro que a topologia apresentada não é muito difundida em

² Quanto mais detalhes e regras possuir a topologia mais blocos de funções são necessários adicionar ao simulador.

³ Outro termo usada para esse tipo de CTO é *Fiber Distribution Hub* (FDH)

Figura 27 – Topologia mista centralizada.



Fonte: Adaptado de (DIAS, 2018)

ISPs nacionais (LAGE, 2006), contudo simplifica em termos computacionais, pelos seguintes motivos:

1. O simulador não necessita de uma camada de gerenciamento de informação para CEO e outra para CTO,
2. As quantidades de rotas que fazem a ligação entre CEO e CTO são reduzidas, diminuindo o tempo de processamento do algoritmo Dijkstra,
3. A verificação de erros torna-se mais simples pelo programador.

3.3 Processo de importação da região geográfica do projeto

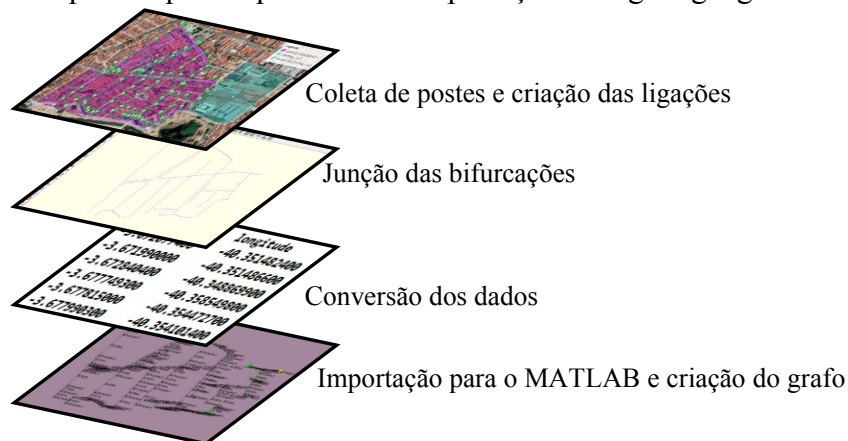
Após a fase de estudo da região geográfica do projeto, deve-se detalhar a infraestrutura existente, ou seja, a localização dos postes e as possíveis ligações entre os mesmos. Afim de processar tais informações torna-se necessário preparar um arquivo que será usado no *software* científico para computação numérica⁴. As principais etapas desse processo são apresentadas na Figura 28, que serão detalhadas no decorrer do capítulo.

3.3.1 Coleta de postes e criação das ligações

Para a criação de uma rede GPON é necessário saber a localização dos postes que receberão, as distâncias entre eles e as ligações existentes. A ferramenta usada nessa etapa foi o *Google Earth* que mapeou 102 postes na região, marcador de cor verde, ilustrado na Figura 29.

⁴ Na monografia foi usado o software Matlab[®].

Figura 28 – Principais etapas do processo de importação da região geográfica do projeto.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Figura 29 – Marcação dos postes na região de atendimento.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Após a coleta dos postes é necessário verificar a existência de caminhos/ligações entre os mesmos. A Figura 30 mostra os postes e as ligações existentes, representado por linhas sólidas contínuas. Com todas essas informações coletadas o mapa será exportado no formato kml, para que possa ser utilizado nas próximas etapas. Vale a pena destacar que tais informações serão primordiais no *software* científico para criação do grafo.

3.3.2 Junção das bifurcações

O motivo dessa etapa deve-se a limitação do *Google Earth* em não criar caminhos bifurcados, em outras palavras, não é possível criar divisões no caminho. Para superar tal

Figura 30 – Ligação entre os postes na região de atendimento.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

empecilho foi adotado o *software Java OpenStreetMap Editor (JOSM)* que unirá todos caminhos individuais⁵, originando caminhos com bifurcações, como mostra a Figura 31. Após a criação de caminhos bifurcados é criado um arquivo no formato gpx que será usado na próxima etapa.

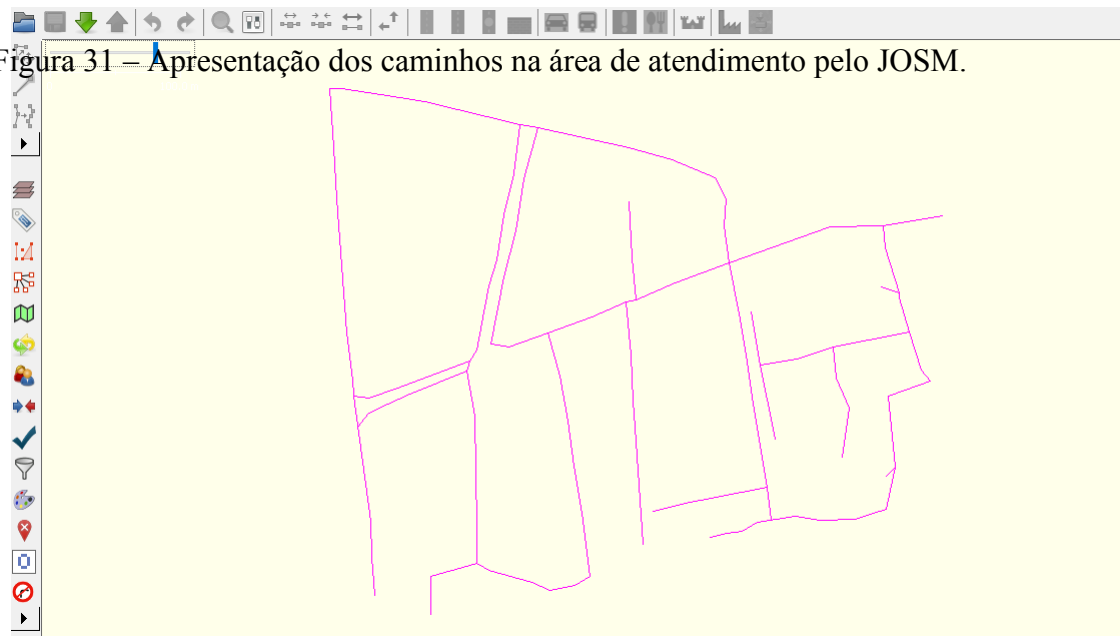


Figura 31 – Apresentação dos caminhos na área de atendimento pelo JOSM.

Fonte: Próprio Autor, 2021.

⁵ É importante mencionar que a importação do formato kml no JOSM ocorre por meio do *plugin* *opendata*.

3.3.3 Conversão dos dados

Nessa etapa é realizado a conversão e organização dos dados no formato gpx para txt. Vale a pena mencionar que existem alguns leitores de gpx para software científico Matlab ¹. Contudo, durante a implementação do simulador o uso de tal leitor modificava alguns pontos e adicionava informações. Diante disso, foi utilizado o site <https://www.gpsvisualizer.com>, na qual a organização e o controle das informações de latitude e longitude dos postes e caminhos tornaram-se maior, como apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Organização dos dados fornecido pelo GPSvisualizer.

type	time	latitude	longitude	name	desc
T	2019-12-17 03:04:50	-3.677448400	-40.349890200	Avenida José Euclides Ferreira Gomes	
T	2019-12-17 03:04:50	-3.676787800	-40.350118600		
type	time	latitude	longitude	name	desc
T	2019-12-16 05:59:47	-3.676313200	-40.353972900	Rua Geovane Carneiro	
T	2019-12-16 05:59:47	-3.676213800	-40.353932600		

Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.3.4 Importação para o MATLAB e criação do grafo

Nesta última etapa ocorre a importação dos dados no Matlab. Após a importação dos dados ocorrerá alguns processamento de dados pelo simulador desenvolvido, tais como:

- Contagem do número de postes e caminhos;
 - Usando os dados provenientes do arquivo gpx é possível quantificar os postes e caminhos. Informações que serão usadas na criação da matriz de adjacência.
- Cálculo da distância dos caminhos por Haversine;
 - Os dados provenientes do arquivo gpx apresentam apenas latitude e longitude. Portanto, se fez necessário usar o método de Haversine a fim de encontrar a distância entre dois pontos mediante latitude e longitude (BRUMMELEN, 2017).
- Criação da matriz de adjacência;
 - Através do arquivo gpx verifica-se os caminhos e atribui tal informação na matriz de adjacência. Ou seja, se o caminho existe atribui o valor 1, caso contrário 0;
- Criação da matriz de menor distância por Dijkstra;
 - Com todas informações mencionadas acima determina-se a rota de menor distância entre dois postes.

Além disso, o simulador desenvolvido possui a capacidade criar um grafo represen-

tando a área de atendimento. Na qual os vértices e arestas são os postes e ligações, respectivamente. A Figura 33 apresenta grafo fornecido pelo simulador.

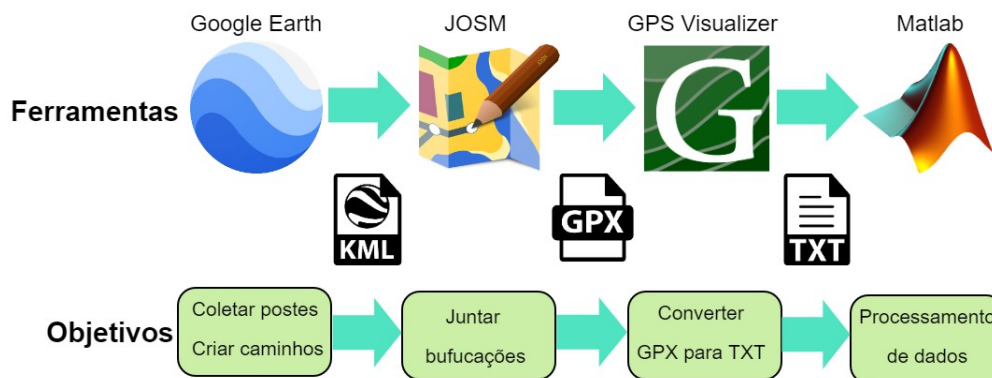
Figura 33 – Grafo fornecido pelo simulador da área de atendimento.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Em síntese, as principais ferramentas e objetivos das etapas de digitalização, importação e criação de grafos é apresentado pela Figura 34. Na qual são necessárias quatro ferramentas e o intercâmbio de três formatos de arquivos.

Figura 34 – Ferramentas e seus objetivos no processo de importação dos dados.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.4 Modelagem do Sistema

Nessa seção será descrito como foi elaborado o modelo matemático que descreve o custo para a implementação da rede GPON em questão. Aqui serão considerados os gastos com os equipamentos que serão utilizados, para isso será necessário definir alguns parâmetros e variáveis, como serão apresentados a seguir.

3.4.1 Conjuntos

Primeiramente serão definidos alguns conjuntos, visto que, existem equipamentos que serão utilizados em grandes quantidades e com modelos diferentes, com isso, o preço poderá variar.

O Ponto de Presença (POP), é uma extensão da ISP, localizada em uma determinada região, responsável por prover conexão, nesses pontos estão presentes equipamentos como OLTs e DIOS, dessa forma a descrição do conjunto *POP* é:

$$POP = \{pop_1, pop_2, \dots, pop_n \mid n = 1, 2, \dots, N\} \quad (3.1)$$

Onde N é o número de POPs utilizado no projeto⁶.

Já P é o conjunto de postes, D é o número total postes disponível na região de atendimento, dessa forma:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_d \mid d = 1, 2, \dots, D\} \quad (3.2)$$

Além disso, o conjunto formado pela OLT ativa o_m , no pop_n é descrito como:

$$OLT = \{o_1, o_2, \dots, o_m \mid m = 1, 2, \dots, N_{olt}\} \quad (3.3)$$

Na qual N_{olt} é o número de OLTs ativas em determinado POP.

A representação matemática de cada CEO e_l , equipamento que não possui divisor óptico devido a topologia adotada, e CTO_{t_a} dar-se pelos conjuntos *CEO* e *CTO*, como formulado abaixo:

$$CEO = \{e_1, e_2, \dots, e_l \mid l = 1, 2, \dots, N_{ceo}\} \quad (3.4)$$

e

$$CTO = \{t_1, t_2, \dots, t_a \mid a = 1, 2, \dots, N_{cto}\} \quad (3.5)$$

⁶ Vale ressaltar que a rede em questão possui apenas um POP, no entanto, essa forma de descrição servirá para projetos futuros que abranjam uma região de atendimento maior.

Onde N_{ceo} e N_{cto} é o número de CEOs e CTOs, respetivamente.

E, por fim, a Equação 3.6 apresenta o conjunto das ONUs ativas u_i na área de atendimento:

$$ONU = \{u_1, u_2, \dots, u_i \in ONU \mid i = 1, 2, \dots, N_{cli}\} \quad (3.6)$$

Onde N_{cli} é o número total de ONU, em outras palavras, número de clientes que usam a rede.

3.4.2 Definições

A explicação de algumas definições são indispensáveis para uma adequada compreensão do modelo matemático formulado. Inicialmente torna-se necessário escolher a ordem das CEOs ρ_{ceo} e CTOs ρ_{cto} . Vale a pena lembrar que na topologia adotada as CEOs possuem apenas a função de emenda, não existe divisão na mesma. Enquanto a ordem da CTO corresponde a 1x64. Diante de tais informação o tamanho da célula⁷ T_c usando uma taxa de penetração⁸ T_p corresponde:

$$T_c = 1/(\rho_{cto} * T_p) \quad (3.7)$$

Afim de quantificar N_{cto} e N_{ceo} , torna-se necessário indicar a quantidade de residências κ na região de atendimento. Dessa forma:

$$N_{cto} = \frac{\kappa}{T_c} \quad (3.8)$$

e

$$N_{ceo} = \rho_{ceo} \times N_{cto} \quad (3.9)$$

Vale frisar que muitas vezes a quantidade calculada não é um número inteiro, dessa forma, esse valor decimal sempre será aproximado para o maior número inteiro.

No que se refere as ligações serão definidas quatro matrizes que relacionam a distância entre os equipamentos. Tais distâncias são provenientes do algoritmo Dijkstra, na qual calcula a menor rota/caminho entre tais equipamentos. A primeira matriz relaciona a ligação

⁷ Quantos clientes cada CTO conseguirá atender.

⁸ Quantos por cento das residências da região a rede conseguirá atender.

entre OLT e CEO sendo representado pela matriz $\Gamma_{N_{olt} \times N_{ceo}}$:

$$\Gamma_{N_{olt} \times N_{ceo}} = \begin{bmatrix} \mathcal{H}_{1,1} & \mathcal{H}_{1,2} & \dots & \mathcal{H}_{1,N_{ceo}} \\ \mathcal{H}_{2,1} & \mathcal{H}_{2,2} & \dots & \mathcal{H}_{2,N_{ceo}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{H}_{N_{olt},1} & \mathcal{H}_{N_{olt},2} & \dots & \mathcal{H}_{N_{olt},N_{ceo}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Cujo $\Gamma = (\mathcal{H}_{ml})_{N_{olt} \times N_{ceo}}$, onde $1 \leq m \leq N_{olt}$ e $1 \leq l \leq N_{ceo}$, com $m, l \in \mathbf{N}^*$.

A segunda matriz relaciona a ligação entre as CEOs sendo representado pela matriz

$$\Gamma_{N_{ceo} \times N_{ceo}}^0 = \begin{bmatrix} \mathcal{H}_{1,1}^0 & \mathcal{H}_{1,2}^0 & \dots & \mathcal{H}_{1,N_{ceo}}^0 \\ \mathcal{H}_{2,1}^0 & \mathcal{H}_{2,2}^0 & \dots & \mathcal{H}_{2,N_{ceo}}^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{H}_{N_{ceo},1}^0 & \mathcal{H}_{N_{ceo},2}^0 & \dots & \mathcal{H}_{N_{ceo},N_{ceo}}^0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Cujo $\Gamma^0 = (\mathcal{H}_{ll}^0)_{N_{ceo} \times N_{ceo}}$, onde $1 \leq l \leq N_{ceo}$, com $l \in \mathbf{N}^*$.

A terceira matriz relaciona a ligação entre CTO e CEO sendo representado pela

$$\Omega_{N_{cto} \times N_{ceo}} = \begin{bmatrix} \omega_{1,1} & \omega_{1,2} & \dots & \omega_{1,N_{ceo}} \\ \omega_{2,1} & \omega_{2,2} & \dots & \omega_{2,N_{ceo}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{N_{cto},1} & \omega_{N_{cto},2} & \dots & \omega_{N_{cto},N_{ceo}} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Cujo $\Omega = (\omega_{al})_{N_{cto} \times N_{ceo}}$, onde $1 \leq a \leq N_{cto}$ e $1 \leq l \leq N_{ceo}$, com $a, l \in \mathbf{N}^*$.

A quarta matriz relaciona a ligação entre ONU e CTO sendo representado pela matriz

$$\Psi_{N_{onu} \times N_{cto}} = \begin{bmatrix} \psi_{1,1} & \psi_{1,2} & \dots & \psi_{1,N_{cto}} \\ \psi_{2,1} & \psi_{2,2} & \dots & \psi_{2,N_{cto}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{N_{onu},1} & \psi_{N_{onu},2} & \dots & \psi_{N_{onu},N_{cto}} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Cujo $\Psi = (\psi_{ia})_{N_{onu} \times N_{cto}}$, onde $1 \leq i \leq N_{onu}$ e $1 \leq a \leq N_{cto}$, com $i, a \in \mathbf{N}^*$.

Uma das parcelas de custo do projeto refere-se ao custo oriundo das fibras ópticas.

Para isso, se faz necessário definir o preço da fibra usada no *backbone* $P_{backbone}$, distribuição $P_{distribuição}$ e atendimento $P_{atendimento}$.

Dessa forma, o custo da fibra de *backbone* usando a topologia adotada possui três termos. O primeiro termo que corresponde a margem para reserva técnica ζ . O segundo termo corresponde ao elemento $\mu_{1,1}$ da matriz Γ , pois na topologia adotada existe apenas uma OLT que encontra-se conectado na primeira CEO. O terceiro termo é oriundo da matriz Γ^0 , na qual é necessário somar os elementos da diagonal superior ou inferior, uma vez que as CEOs são conectadas sequencialmente e não possuem fibras redundantes:

$$C_{\text{backbone}} = P_{\text{backbone}} \times \left(\zeta + \mu_{1,1} + \sum_{m=1, m < l}^{N_{\text{ceo}}} \gamma_{m,l}^0 \right) \quad (3.14)$$

Na topologia adotada o custo do cabo de distribuição é calculado a partir do traço⁹ da matriz Ω , já que cada CEO é conectado a apenas uma CTO de mesmo índice:

$$C_{\text{distribuição}} = P_{\text{distribuição}} \times (\zeta + \text{tr}(\Omega)) = P_{\text{distribuição}} \times \left(\zeta + \sum_{a=1}^{N_{\text{cto}}} \omega_{a,a} \right) \quad (3.15)$$

No caso do cabo de atendimento, deve-se somar todas as distância do cabo *drop*:

$$C_{\text{atendimento}} = P_{\text{atendimento}} \times \left(\zeta + \sum_{a=1}^{N_{\text{cto}}} \sum_{l=1}^{N_{\text{onu}}} \psi_{l,a} \right) \quad (3.16)$$

Desse modo, o custo total de fibra corresponde a:

$$C_{\text{fibra}} = C_{\text{backbone}} + C_{\text{distribuição}} + C_{\text{atendimento}} \quad (3.17)$$

Além das fibras deve-se calcular o custo dos equipamentos, conectores e fusões. A Equação 3.18 mostra o custo total de todas as OLTs da rede, no caso em questão, só existirá uma OLT, no entanto, essa representação matemática servirá para trabalhos futuros com redes maiores:

$$C_{\text{olt}} = N_{\text{olt}} P_{\text{olt}} \quad (3.18)$$

Onde P_{olt} é o preço de uma OLT. Assim como a OLT só existirá uma DIO na rede em questão, mas pensando em projetos futuros o custo deste item foi descrito como:

$$C_{\text{dio}} = N_{\text{dio}} P_{\text{dio}} \quad (3.19)$$

Onde P_{dio} é o preço de uma DIO.

⁹ O traço de uma matriz quadrada é a função matricial que associa a matriz à soma dos elementos da sua diagonal principal.

A Equação 3.20 mostra o custo total com CEOs:

$$C_{ceo} = N_{ceo}P_{ceo} \quad (3.20)$$

Onde P_{ceo} é o preço de uma CEO.

A Equação 3.21 mostra o custo total com CTOs:

$$C_{cto} = N_{cto}P_{cto} \quad (3.21)$$

Onde P_{cto} é o preço de uma CTO.

O custo total com ONUs irá depender do número de clientes, visto que, para cada um será necessário um equipamento desse, assim:

$$C_{onu} = N_{cli}P_{onu} \quad (3.22)$$

Onde P_{onu} é o preço de uma ONU.

O custo total com fusões dependerá do número de CTOs, visto que, para cada uma serão necessário três fusões, como mostra abaixo:

$$C_{fus} = 3 \times N_{cto} \times P_{fus} \quad (3.23)$$

Existirá dois tipos de conectores na rede, o tipo 1 ligará os cordões óticos na OLT e DIO e o do tipo 2 unirá os cabos *drop* nas CTOs e ONUs, no entanto os dois terão o mesmo preço unitário P_{con} . Diante disso, o custo total com os conectores são representados pela Equação 3.24. Cada cordão está associado a uma CEO e necessita de dois conectores, um em cada extremidade, além disso cada usuário também precisará de dois.

$$C_{con} = 2 \times N_{ceo} \times P_{con} + 2 \times N_{cli} \times P_{con} \quad (3.24)$$

O custo total da rede GPON é a soma dos custos com os equipamentos considerado anteriormente, para simplificar o calculo foram desconsiderados os custos com mão de obra, como formulado abaixo:

$$C_{total} = C_{olt} + C_{dio} + C_{ceo} + C_{cto} + C_{onu} + C_{fus} + C_{con} + C_{fibra} \quad (3.25)$$

3.4.3 Restrições

Para o funcionamento da rede é necessário impor algumas restrições, afim de não sobrecarregar a mesma e garantir que todos os usuários receba um sinal aceitável, tais como:

- Uma ONU deve está conectada a somente uma CTO;
- Uma CTO deve está conectada a somente uma CEO;
- Uma CEO deve está conectada a somente uma DIO;
- Não poderá ocorrer sobreposição de equipamentos no mesmo poste;
- Potência de recepção da ONU deverá ser maior que a sensibilidade mínima do mesmo;
- Como já citado em Seção 2.6 a margem de potência não pode ser negativa.

3.4.4 Parâmetros do projeto

Os parâmetros do projeto provenientes da região de atendimento e valores técnicos oriundos dos equipamentos são apresentados abaixo:

- Quantidade de residências κ : 674;
- Taxa de penetração T_p : 40%;
- Quantidade de clientes atendidos N_{cli} : 270;
- Ordem CEO ρ_{ceo} : 1;
- Ordem CTO ρ_{cto} : $\frac{1}{64}$
- Tamanho da célula T_c : 160;
- Quantidade de POP N : 1;
- Quantidade de postes D : 102;
- Quantidade de OLT N_{olt} : 1;
- Quantidade de DIO N_{dio} : 1;
- Quantidade de CEO N_{ceo} : 5;
- Quantidade de CTO N_{cto} : 5;
- Reserva técnica ζ : 15%;
- Sensibilidade de recepção da OLT: -28 dBm;
- Sensibilidade de recepção da ONU: -27 dBm;
- Potência de transmissão da OLT: 1,5 dBm;
- Potência de transmissão da ONU: 1,5 dBm;
- Atenuação fibra óptica (*Downstream*): 0,25 dB/km;
- Atenuação conector: 0,3 dB;
- Atenuação fusão: 0,08 dB;
- Atenuação CTO: 20,5 dB.

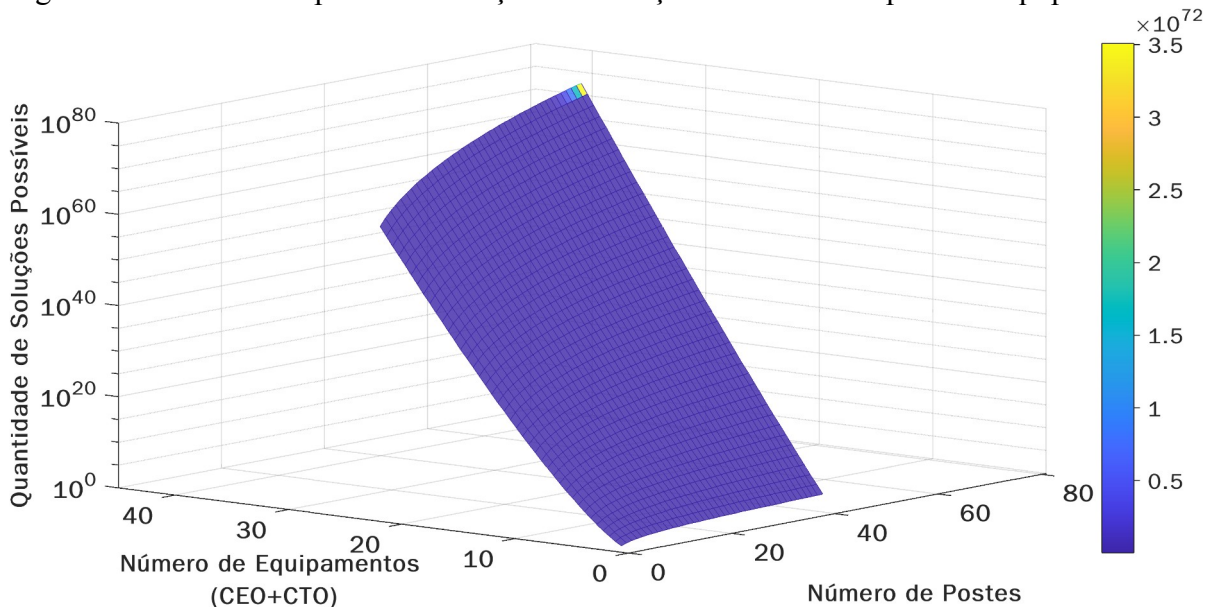
Para calcular o custo final da rede foi realizada uma pesquisa de mercado para

encontrar alguns valores de produtos e serviços, tais valores são apresentados no Anexo A.

3.5 Implementação do Algoritmo Colônia de Formigas

O problema de encontrar as melhores posições dos equipamentos da rede GPON torna-se complexo na medida em que a região de atendimento torna-se maior, pois o número de postes e equipamentos aumenta. A Figura 35 apresenta o número de possíveis soluções em relação ao número de postes e equipamentos. Por exemplo, considerando uma região com cinquenta postes e dez equipamentos, o número de soluções é aproximadamente 3×10^{16} .

Figura 35 – Número de possíveis soluções em relação ao número de postes e equipamentos.



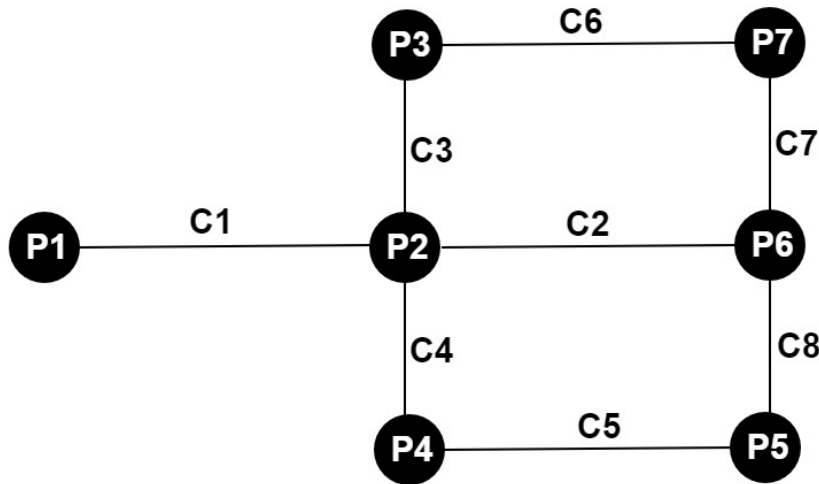
Fonte: Próprio Autor, 2022.

Tal análise confirma que o uso da força bruta, ou seja, verificar todas as soluções torna-se inviável. Dessa forma, metaheurísticas são candidatas promissoras, uma vez que são técnicas com a finalidade de encontrar solução quase ótima de um determinado problema. A metaheurística adotada nesta monografia foi CF. Vale a pena mencionar que foi necessário algumas adaptações nos grafos para que o algoritmo funciona-se adequadamente. Para conseguir implementar o algoritmo CF ao problema de otimização da rede GPON foram necessárias algumas adaptações no modo de aplicação mostrado na Seção 2.8. Primeiramente foi alterado a ideia de construção de rotas e passou-se a adotar-se a ideia de posições, ao invés de analisar os possíveis caminhos que a fibra pode percorrer agora será estudado as possíveis posições das CEOs e CTOs.

Inicialmente temos um grafo que representa a rede, onde no primeiro ponto será

fixado o POP e os demais serão os postes disponíveis, as arestas serão os caminhos por onde a fibra poderá passar, para exemplificar a Figura 36 mostra um grafo reduzido de uma rede, uma vez que o mapa do projeto é muito grande e não seria interessante explicar por ele.

Figura 36 – Grafo minimalista para exemplificação.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Para começar, será considerado que todas as formigas irão partir do POP que será fixado em P1, em seguida cada formiga irá escolher por quais pontos ela irá passar, essa escolha será baseada na probabilidade, calculada através da Equação 2.10. Em cada ponto escolhido ficará uma CEO ou uma CTO, assim, o critério de parada será quando o número total de vértices que a formiga escolheu for igual ao número total de CEOs mais CTOs.

É importante lembrar que a CEO sempre estará no ponto anterior de sua respectiva CTO, isso é importante para que o algoritmo compreenda a seletividade na hora que colocar os equipamentos, além disso, o número de CEOs será igual ao número de CTOs.

Após todos os parâmetros do algoritmo serem definidos e o grafo do mapa tenha sido importado, a CF irá determinar as posições dos equipamentos da seguinte forma:

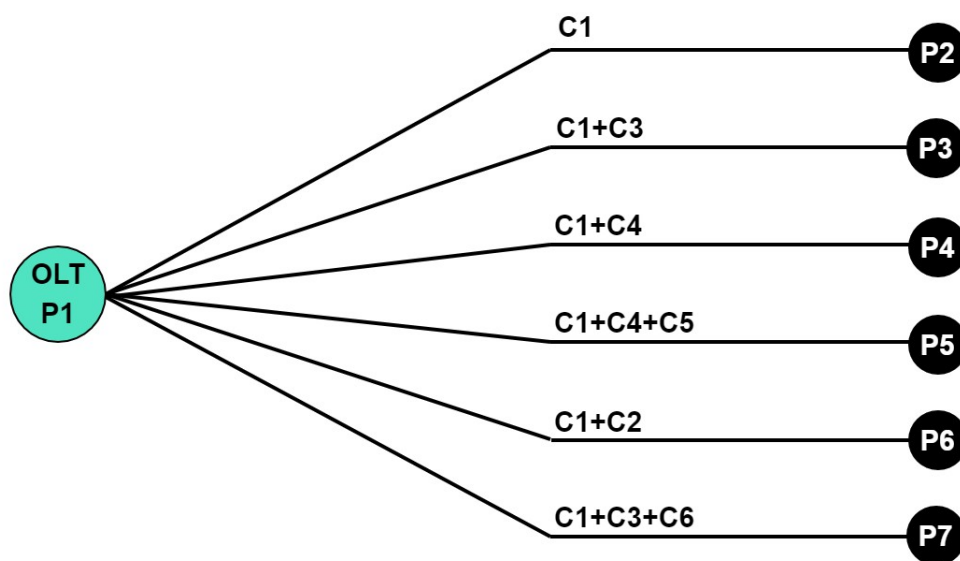
- Primeiramente a formiga irá partir do primeiro ponto P1, onde está localizada o POP e conseqüentemente a OLT. Vale ressaltar que, uma vez que a formiga sai do ponto 1, diferentemente dos outros pontos, ela não poderá mais retornar para ele;
- Para escolher o próximo ponto foi criado um novo grafo tomando como base a Figura 36, como mostra a Figura 37, nele a formiga poderá escolher qualquer outro vértice para fixar a CEO 1, mesmo que esse vértice não tenha uma ligação direta com P1 se tiver alguma

forma para que a formiga chegue até ele a distância será considerada. Para facilitar o entendimento observe a Figura 36, note que $P1$ não está diretamente ligado ao $P6$, no entanto, é possível fazer esse percurso passando antes por $P2$ e a distância considerada seria $C1 + C2$, é isso que novo grafo irá fazer. A partir disso, será escolhido o próximo ponto;

- A escolha é feita da seguinte forma: será utilizada matriz com as distâncias do novo grafo, pois nela terá as distâncias entre $P1$ e os demais pontos da rede, assim, aplicando os parâmetros na Equação 2.7 o programa irá calcular a probabilidade de formiga escolher cada ponto;
- Com todas as probabilidades já calculadas, agora será utilizado o método da roleta para definir qual será o segundo ponto que ela irá, nele será fixado a primeira CEO. Imagine que cada valor de probabilidade irá ocupar uma fatia da roleta, quanto maior esse valor, maior será a largura da fatia, assim, quando a roleta parar de girar a fatia maior terá mais chances de ser escolhida, mas não tem nenhuma garantia que isso irá ocorrer, isso evitará que a formiga fique “viciada” em um ponto deixando de explorar os outros;
- Após a primeira aplicação do método da roleta, a formiga irá escolher o terceiro ponto, onde ficará a primeira CTO. Assim como na escolha da posição da primeira CEO, um novo grafo será criado tomando como ponto inicial o atual, novamente será utilizada a matriz das distâncias para calcular as probabilidades de escolha e em seguida aplicado o método da roleta. Generalizando para qualquer rede, a Figura 38 mostra como ficará o grafo final com todas as ligações possíveis, note que existem várias camadas onde em cada uma delas é escolhido um dos pontos para fixar uma CEO ou uma CTO;
- Quando a formiga escolher todos os pontos necessários, o algoritmo irá calcular o custo total da rede levando em consideração as posições dos equipamentos;
- A seguir, será analisado se existe dois equipamentos no mesmo ponto, pois isso significaria que eles estariam no mesmo poste o que inviabilizaria a instalação, se isso for confirmado o resultado dessa formiga será descartado, caso não ocorra, o resultado seguirá para a próxima etapa;
- Adiante, será analisada a potência recebida por cada usuário, utilizando a Equação 2.5, se ela não for aceitável o resultado será descartado, caso ela seja aceitável o resultado será armazenado;
- Agora, serão calculado o custo para as demais formigas, aplicando os mesmos passos e os

- mesmos critérios;
- Em seguida, serão comparados os custos de todas as formigas que tiveram seus resultados armazenados e será escolhido o de menor valor, assim, teremos o resultado da primeira geração;
 - A matriz do feromônio será atualizada salvando o feromônio deixado pela formiga de menor custo;
 - Serão realizadas as próximas geração.

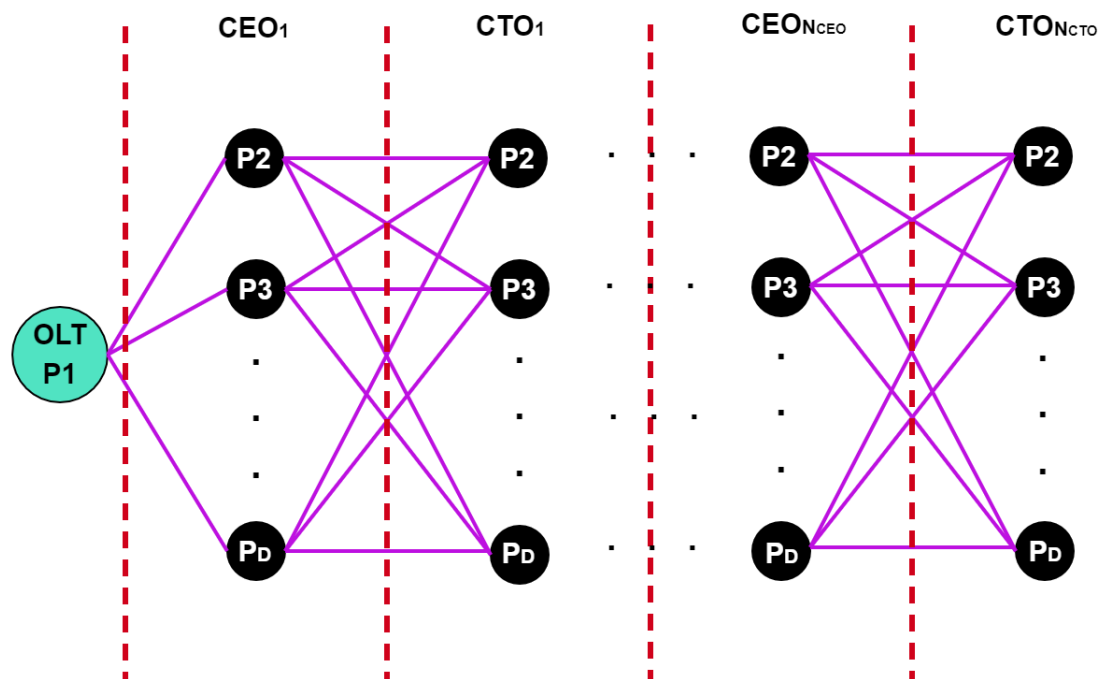
Figura 37 – Novo grafo criado com as ligações entre P1 e os demais pontos.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

A fim de resumir todo processo do algoritmo foi criado um fluxograma ilustrado na Figura 39. O mesmo detalha as etapas e a excursão do algoritmo juntamente com o simulador, nela é possível observar como ocorre todo o processo desde a inicialização dos parâmetros até o armazenamento das gerações.

Figura 38 – Generalização do grafo final para qualquer rede, com todas as ligações.



Onde:

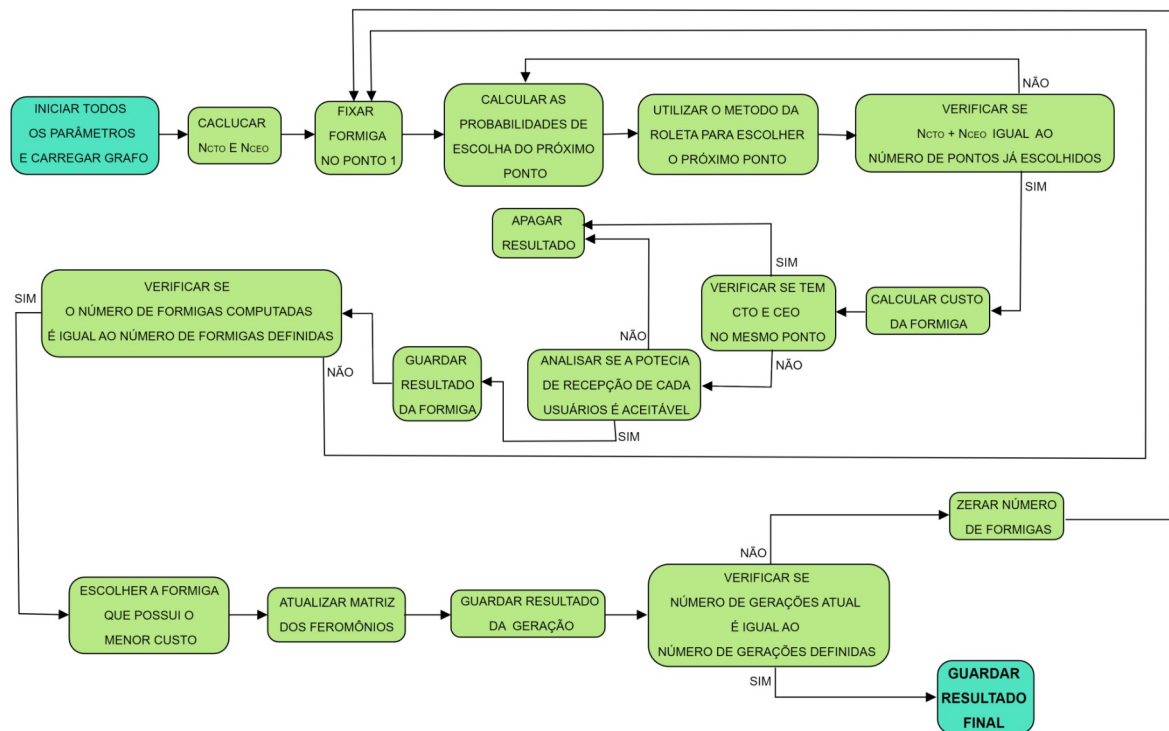
D é o número total de postes disponíveis;

N_{CEO} é o número total de CEOs da rede;

N_{CTO} é o número total de CTOs da rede.

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Figura 39 – Fluxograma da execução do algoritmo.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

4 RESULTADOS

Nesse capítulo será descrito todo o processo de obtenção dos resultados, que vai desde a obtenção dos melhores valores de parâmetros para o algoritmo até as simulações que apresentarão os resultados finais. Esta é uma das partes mais importante deste trabalho, visto que, através dela será possível comprovar ou não a eficiência do CF para a otimização da rede óptica descrita.

4.1 Técnicas para Comparação de Desempenho

Para avaliar o valor agregado das soluções propostas, duas técnicas foram escolhidas:

- **Manual:** Nesta técnica o projetista irá analisar o mapa e determinar a posição das CEOs e CTOs a partir de sua experiência;
- **Randômico:** Nessa técnica um programa irá apresentar valores aleatórios de posições para CEOs e CTOs. O mesmo não utiliza nenhuma técnica de memória ou aperfeiçoamento das soluções.

Vale a pena lembrar que ambas as técnicas devem prover soluções que respeitem as restrições impostas na Seção 3.4.3 e a viabilidade técnica.

4.2 Parametrização do CF

Nos capítulos anteriores foi descrito toda a formulação matemática do algoritmo e como o mesmo será implementado, no entanto, ainda existem algumas lacunas para serem preenchidas. Para se chegar ao melhor nível de otimização utilizando o menor poder de processamento possível é necessário antes saber quais os melhores valores de parâmetros para se chegar a esses resultados, com isso, serão necessárias várias simulações para encontrar:

- O número de gerações;
- A quantidade de formiga que serão utilizadas;
- Constante de peso do feromônio “ α ”;
- A taxa de evaporação desse feromônio “ σ ”;
- Quantidade de feromônio depositado por cada formiga “ $\Delta\tau$ ”.

Como estamos trabalhando com probabilidade, ao repetir o mesmo experimento pode ser que o resultado final mude, então, para se ter uma noção da faixa de valores prováveis que serão calculados pelo algoritmo e a precisão dessa faixa será utilizado o método de Monte

Carlo (MC). O método de MC é capaz de fazer uma previsão de um conjunto de resultados possíveis com base em um intervalo de amostras (IBM, 2020).

Para iniciar as simulações foram adotados os seguintes parâmetros iniciais:

- O número de gerações: 400;
- A quantidade de formiga que serão utilizadas: 100;
- $\alpha = 0,5$;
- $\sigma = 0,01$;
- $\Delta\tau = 0,5$.

Vale ressaltar que, inicialmente foi escolhido um alto número de gerações e de formigas com a finalidade de realizar uma análise de forma macro e em seguida de forma micro, filtrando os melhores resultados.

O *notebook* utilizado para simulações possui as seguintes especificações:

- Processador: Ryzen 5;
- Placa de vídeo: Vega 8;
- Capacidade da memória *Random Access Memory* (RAM): 12 GB;
- Capacidade do *Hard Disk* (HD): 1 TB;

A partir de algumas simulações realizadas foi comprovado que o menor número de MC capaz de fornecer um conjunto com intervalo de confiança de 95 % foi 10. Em outras palavras, se for criado um conjunto com 10 simulações do algoritmo CF, todas com os mesmos parâmetros, a probabilidade de que a 11ª simulação gere uma solução que esteja entre os valores máximo e mínimo do conjunto será de 95%, isso também serve para as demais.

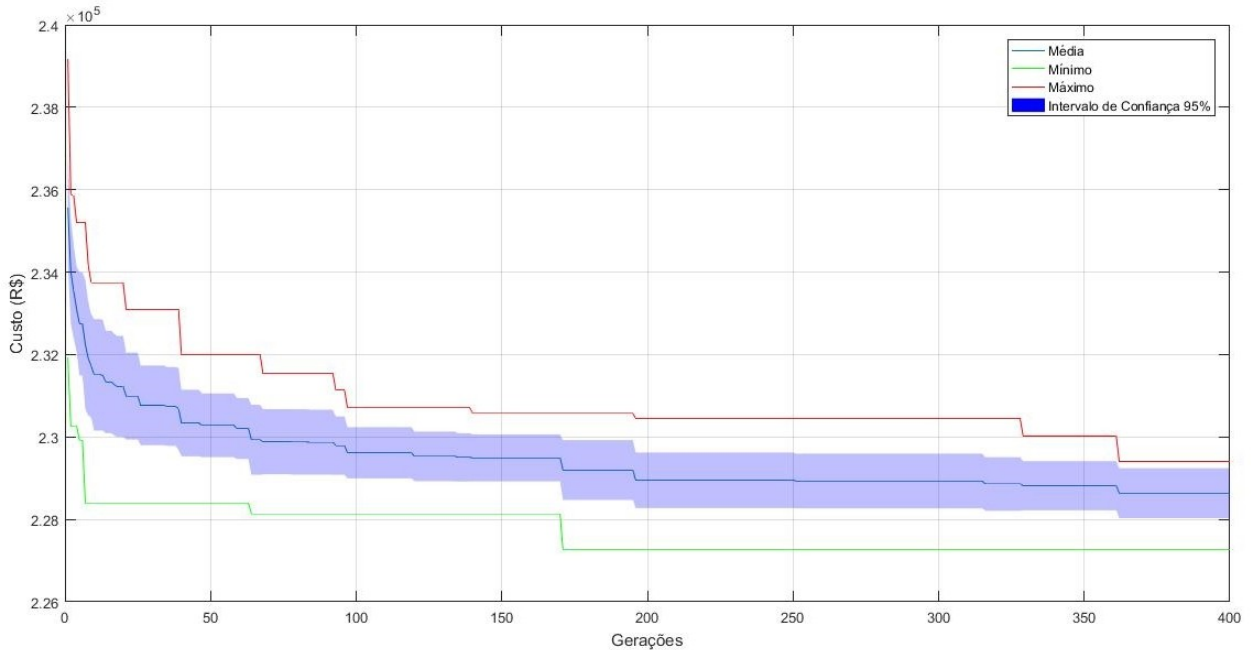
4.2.1 Número de Gerações

A Figura 40 mostra o custo dos 10 primeiros MCs, as cuvas inferior em verde e superior em vermelha são relativas aos MCs que obtiveram menor e maior custo respectivamente, a azul é o valor médio e a região em roxo é onde os próximos resultados tendem a estar.

A Tabela 3 mostra o valor dos pontos da curva referente ao valor médio a cada 100 gerações, juntamente com a geração inicial. Esta tabela é de extrema importância, visto que, com esses valores é possível detectar as regiões que obtiveram uma maior redução do custo.

Analisando os valores é possível observar que a curva do valor médio, em azul, referente ao custo da rede, foi reduzido de R \$ 235,6 Mil para R \$ 228,6 Mil, gerando uma economia de R\$ 7 Mil, após 400 gerações, com tempo médio de 1279 minutos por MC, no

Figura 40 – Curva do custo para 400 gerações.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Tabela 3 – Pontos da curva do custo médio com 400 gerações.

GERAÇÃO	CUSTO NO PONTO	REDUÇÃO EM RELAÇÃO AO VALOR INICIAL	TEMPO DE PROCESSAMENTO
1	R\$ 235,6 Mil	R\$ 0	3,2 Minutos
100	R\$ 229,6 Mil	R\$ 6 Mil	320 Minutos
200	R\$ 228,9 Mil	R\$ 6,7 Mil	640 Minutos
300	R\$ 228,9 Mil	R\$ 6,7 Mil	960 Minutos
400	R\$ 228,6 Mil	R\$ 7 Mil	1279 Minutos

Fonte: Próprio Autor, 2022.

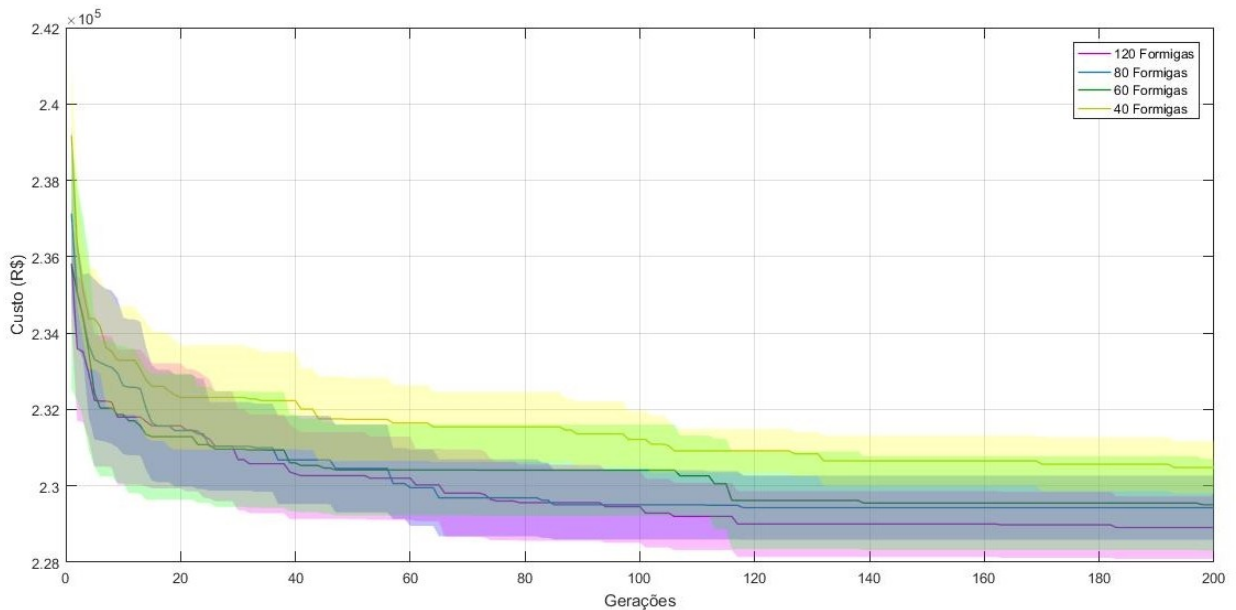
entanto, também foi visto que da geração 200 para a 400 houve uma redução de R\$ 300, o que vale a 4,29% da redução total, levando em torno de 639 minutos para ser calculada, 50 % do tempo total, de forma que esse valor não compensa o custo computacional. Perante o exposto, foi determinado que para as próximas simulações o número de gerações será de 200.

4.2.2 Quantidade de Formigas

Com o número de gerações igual a 200 e os demais parâmetros mantidos, foram realizadas quatro simulações variando a quantidade de formigas para 120, 80, 60 e 40, com a finalidade de encontrar o melhor custo-benefício em relação ao processamento, em outras palavras, achar a menor quantidade de formigas capaz de gerar resultados satisfatórios. Na Figura

41 o eixo da vertical representa o custo em reais do projeto e o eixo da horizontal representa o número de geração do CF. Pode-se observar, quatro linhas contínuas de diferentes cores que representam o custo médio e uma região de mesma cor que representa o intervalo de confiança de 95%. Além disso, os valores dos principais pontos são reunidos na Tabela 4.

Figura 41 – Curvas do custo médio para 120, 80, 60 e 40 formigas.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Tabela 4 – Principais valores das simulações com 120, 80, 60 e 40 formigas.

QUANTIDADE DE FORMIGAS	CUSTO INICIAL	CUSTO FINAL	CUSTO MÉDIO	TEMPO MÉDIO POR MC
120	R\$ 235,8 Mil	R\$ 228,9 Mil	R\$ 229,8 Mil	761 Minutos
80	R\$ 237,1 Mil	R\$ 229,4 Mil	R\$ 230,1 Mil	477 Minutos
60	R\$ 235,8 Mil	R\$ 229,5 Mil	R\$ 230,3 Mil	403 Minutos
40	R\$ 239,2 Mil	R\$ 230,5 Mil	R\$ 231,4 Mil	249 Minutos

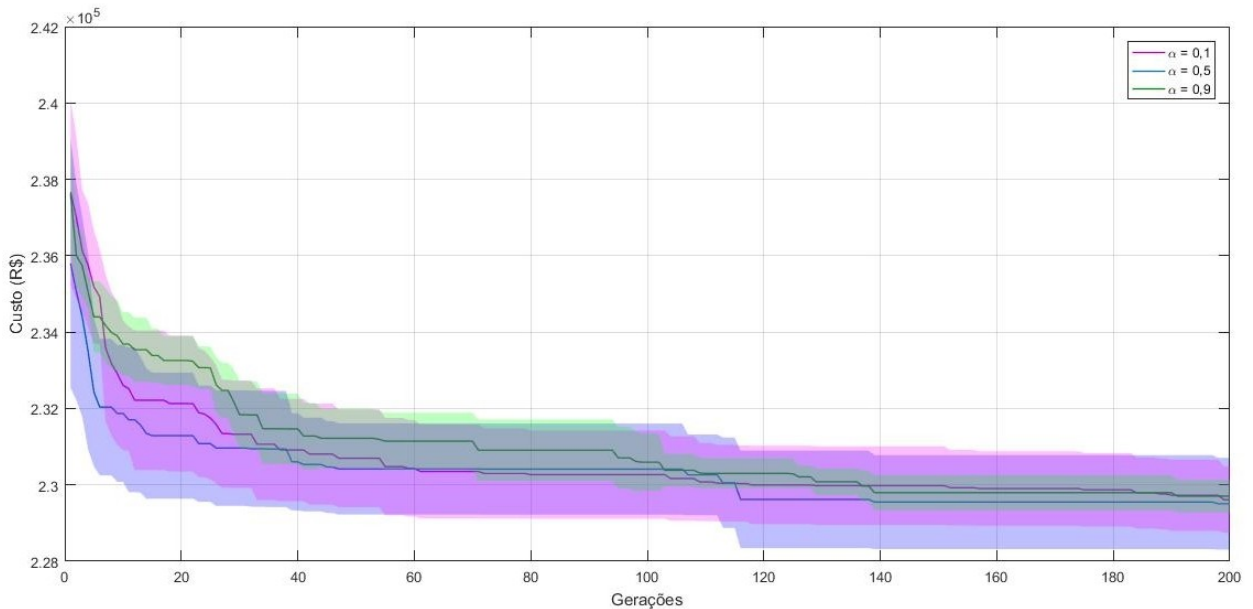
Fonte: Próprio Autor, 2022.

Analisando os resultados, é possível observar que a simulação com 40 formigas apresenta uma média bem mais destoante das outras, com uma diferença de R\$ 1,1 mil para a de 60. As simulações com 120, 100, e 80 possuem médias bem próximas, com uma diferença entre as simulações de 120 para 80 e 80 para 60 de R\$ 300 e R\$ 200 respectivamente. Dessa forma, o parâmetro que possui tempo de processamento e custo de projetos adequados situa-se na margem de 60 formigas, tal valor será adotado nas próximas simulações.

4.2.3 Constante de Peso do Feromônio α

Para determinar a constante de peso do feromônio foram realizadas, além da simulação com $\alpha = 0,5$, mais duas simulações, explorando os valores extremos, $\alpha = 0,1$ e $\alpha = 0,9$, assim, foi montado um gráfico do custo com os três valores, como mostra a Figura 42, além disso, os principais valores são expostos na Tabela 5. Vale ressaltar que, para esse e os próximos parâmetros não serão analisados mais o tempo de processamento, visto que, todos terão tempos de processamentos semelhantes, além disso, as alterações de tais valores terão maior influência em fatores como a acentuação da curva do custo e seu valor médio, ou seja, na convergência da metaheurística.

Figura 42 – Curvas do custo médio para $\alpha = 0,1$, $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 0,9$.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Tabela 5 – Características das curvas do custo médio para $\alpha = 0,1$, $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 0,9$.

α	CUSTO INICIAL	CUSTO FINAL	CUSTO MÉDIO
0,1	R\$ 237,7 Mil	R\$ 229,6 Mil	R\$ 230,6 Mil
0,5	R\$ 235,8 Mil	R\$ 229,5 Mil	R\$ 230,3 Mil
0,9	R\$ 237,6 Mil	R\$ 229,7 Mil	R\$ 230,9 Mil

Fonte: Próprio Autor, 2022.

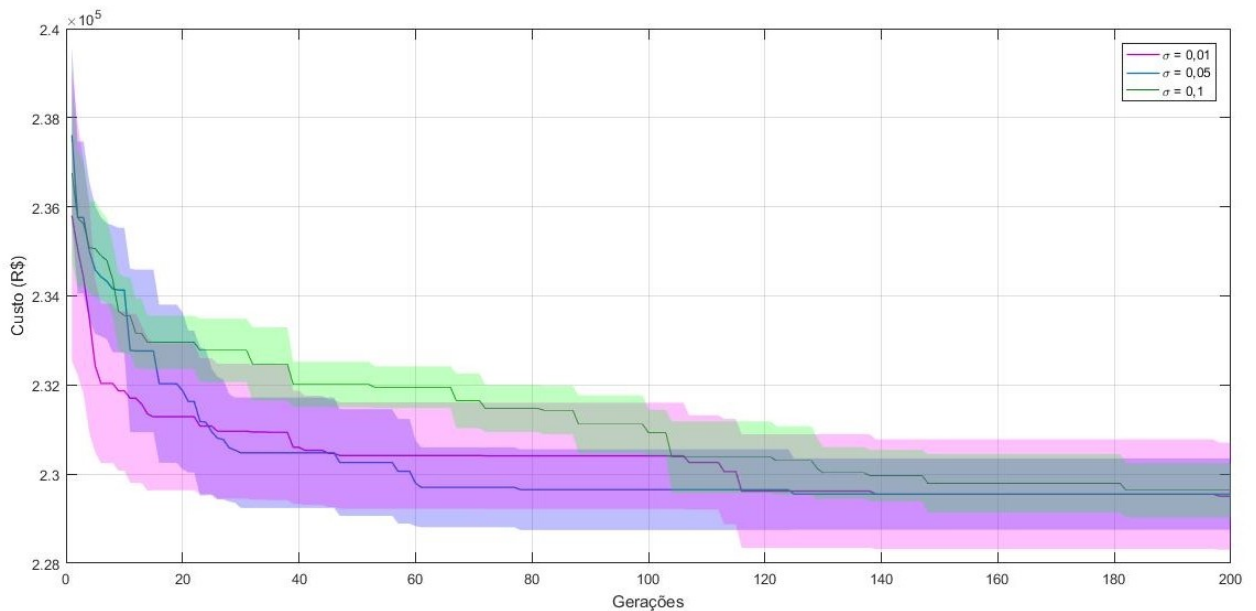
Analisando os três resultados é possível observar que a curva que obteve melhor desempenho foi $\alpha = 0,5$, visto que a mesma é mais acentuada que as outras duas, além disso,

teve menor média e valor final. Vale destacar que inicialmente a quantidade de feromônio é idêntica para cada caminho/solução, fazendo com que as formigas se movimentem em caminhos aleatórios, alguns bons e outros ruins. Ao se adotar valor baixo de α , verifica-se que nas iterações iniciais os caminhos ainda mantêm probabilidades semelhantes, fazendo com que as formigas procurem novas soluções e conseqüentemente atrasando a convergência. Por outro lado, valores elevados de α fazem com que as formigas optem pelas melhores rotas obtidas nas iterações iniciais, isso faz com que a metaheurística fique situado em mínimos locais, saindo desta situação em iterações mais elevadas. Diante o exposto, para as próximas simulações continuará sendo usado $\alpha = 0,5$, uma vez que mantém o equilíbrio entre procurar novos caminhos, sem esquecer os melhores já obtidos.

4.2.4 Taxa de Evaporação do Feromônio σ

A taxa de evaporação atual corresponde a 1%. A fim de verificar o comportamento, variou-se σ para 5% e 10%. Os resultados são ilustrados na Figura 43 e os valores foram expressos na Tabela 6.

Figura 43 – Curvas do custo médio para $\sigma = 0,01$, $\sigma = 0,05$ e $\sigma = 0,1$.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

A discrepância de custo para os três valores de σ ocorre nas primeiras iterações, enquanto que nas últimas iterações verifica-se alterações sutis. Esse comportamento deve-se

Tabela 6 – Características das curvas do custo médio para $\sigma = 0,01$, $\sigma = 0,05$ e $\sigma = 0,1$.

σ	CUSTO INICIAL	CUSTO FINAL	CUSTO MÉDIO
0,01	R\$ 235,8 Mil	R\$ 229,5 Mil	R\$ 230,3 Mil
0,05	R\$ 237,6 Mil	R\$ 229,6 Mil	R\$ 230,2 Mil
0,1	R\$ 236,8 Mil	R\$ 229,6 Mil	R\$ 231,1 Mil

Fonte: Próprio Autor, 2022.

ao fato que nas primeiras iterações com valores elevados σ , a maioria das formigas tendem a permanecer nas trilhas iniciais que possuem melhor resultado, não optando de forma imediata por novos caminhos- sugeridos por uma formiga exploratória que foi contra a colônia. Isso faz com que a convergência torne-se lenta.

Como já mencionado, nas últimas gerações os custos são semelhantes, tendo sobreposição do intervalo de confiança. Diante disso, optou-se por adotar um valor intermediário, ou seja, $\sigma = 0,05$.

4.2.5 *Quantidade de Feromônio Depositado Por Cada Formiga $\Delta\tau$*

Com todas as simulações realizadas até aqui entende-se que a variação da quantidade de feromônio na formiga $\Delta\tau$ não causará uma mudança significativa no resultado final. A escolha da formiga se baseia na quantidade de feromônio depositado em cada parte do percurso, quando ocorre uma variação em $\Delta\tau$ haverá uma mudança na quantidade desse feromônio depositado, no entanto, uma mudança equivalente já foi explorada as Seção 4.2.3, ao variar α .

Observando a Equação 2.10 é possível ver que o termo $[\tau_{xy}(t)]^\alpha$ irá aumentar quando houver uma elevação no valor de α , a formiga dará uma maior importância para os trechos que tiverem mais feromônio, pois a probabilidade de escolha desse trecho aumenta. Quando houver uma elevação no valor de $\Delta\tau$, $\tau_{xy}(t)$ irá aumentar, assim como o termo $[\tau_{xy}(t)]^\alpha$ e a probabilidade.

Diante do exposto, é possível chegar a conclusão que, no caso da solução S-CF, α e $\Delta\tau$ influenciarão de forma similar a probabilidade de escolha da formiga, por conta disso, não foram realizadas simulações variando o valor de $\Delta\tau$.

Após todos as etapas de parametrização até aqui, fica determinado que os melhores parâmetros analisados capazes de fornecer resultado satisfatórios com o custo computacional aceitável (i.e. para o *hardware* mencionado na seção 4.2) foram:

- Número de Gerações: 200;

- Número de Formigas: 60;
- $\alpha = 0,5$;
- $\sigma = 0,05$;
- $\Delta\tau = 0,5$.

4.3 Resultados Comparativos

Nesta seção é apresentado o processo de obtenção dos resultados das técnicas mencionadas na Seção 4.1. Em seguida, na seção 4.3.3 será apresentado os melhores resultados juntamente com a disposição dos equipamentos e a potência de recepção para cada cliente.

4.3.1 *Manual*

Para o resultado manual foram coletadas quatro soluções desenvolvidas por quatro projetistas diferentes, cada um analisou a região em questão e determinou as posições para as CEOs e CTOs. As escolhas foram realizadas de acordo com visão e análise de cada projetista, a intenção foi posicionar os equipamentos de forma que ficassem o mais distribuídos possível, escolhendo locais que, em sua percepção, fossem estratégicos para reduzir o custo e melhorar o desempenho.

Vale ressaltar que, como a escolha foi feita de forma manual, não foram exploradas várias soluções, como no algoritmo, além disso, todas as restrições impostas na Seção 3.4.3 foram aplicadas.

Os projetistas que desenvolveram as soluções manuais foram:

- Adail Moreira Albuquerque: Coorientador deste trabalho e engenheiro de computação, formado pela UFC;
- Antônio Lucas Sousa Aguiar: Aluno do curso de engenharia elétrica da UFC;
- Francisco Brizamar Caxias Sousa: Aluno do curso de engenharia da computação da UFC.
- Francisco Geilson Isaias Silva: Aluno do curso de engenharia elétrica da UFC.
- Francisco Jonas Silva Pinto: Autor deste trabalho.

As informações sobre cada um dos projetos são mostradas pela Tabela 7. As posições das CEOs e CTOs são referentes a localização dos nós mostrados na Figura 33.

Com os dados da Tabela 7 obteve-se uma média dos projetos manuais de R \$ 243,84 Mil, o desvio padrão foi de R\$ 5,354 Mil e o menor custo foi de R\$ 236,19 Mil. Vale ressaltar

Tabela 7 – Dados de cada solução manual.

PROJETISTA	POSIÇÃO DAS CEOs	POSIÇÃO DAS CTOs	CUSTO FINAL
Adail	35 – 59 – 41 – 29 – 37	44 – 72 – 93 – 21 – 36	R\$ 246,67 Mil
Lucas	69 – 29 – 35 – 33 – 40	74 – 79 – 85 – 70 – 93	R\$ 250,59 Mil
Brizamar	21 – 75 – 91 – 98 – 33	26 – 72 – 40 – 54 – 93	R\$ 243,50 Mil
Geilson	8 – 3 – 60 – 100 – 37	42 – 20 – 63 – 88 – 31	R\$ 242,27 Mil
Jonas	6 – 2 – 62 – 97 – 33	41 – 21 – 63 – 98 – 32	R\$ 236,19 Mil

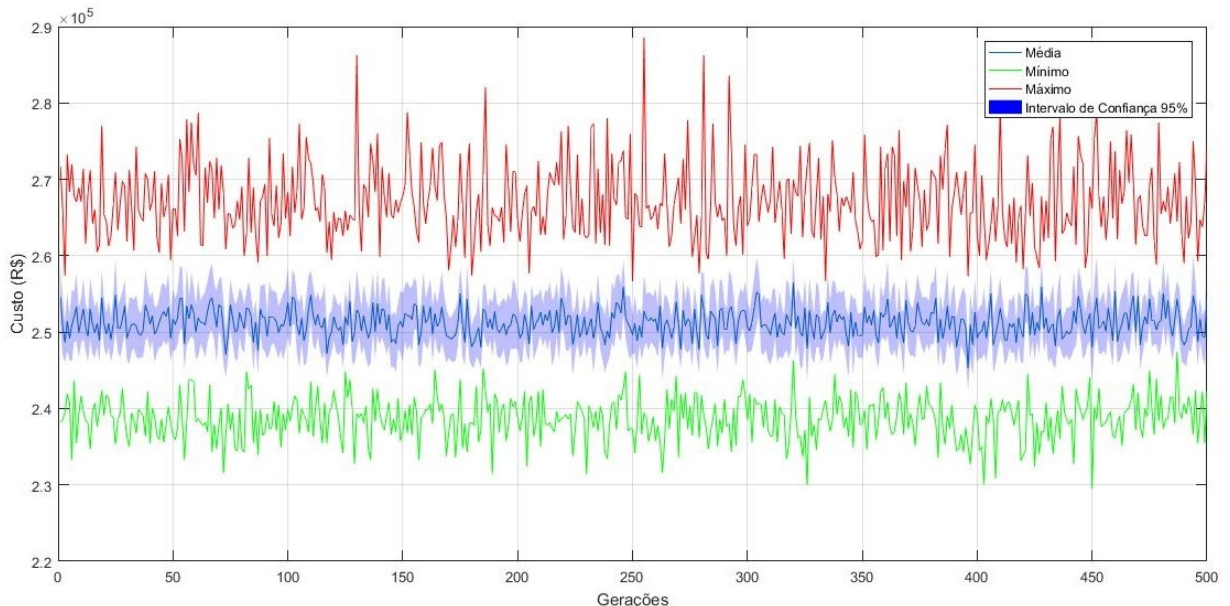
Fonte: Próprio Autor, 2022.

que a solução manual é comumente utilizada pelos ISPs.

4.3.2 *Randômico*

Nessa simulação serão utilizadas posições aleatórias para determinar as localizações das CEOs e CTOs, como foi mencionado, as restrições impostas na Seção 3.4.3 continuarão sendo aplicadas, no entanto, o custo da rede não terá nenhuma relevância para o programa o que pode gerar valores bem mais destoantes em relação as soluções por CF e Manual. As curvas do custo mínimo, médio e máximo para 500 gerações são mostradas pela Figura 44, os mesmos valores também são expressos pela Tabela 8.

Figura 44 – Custo mínimo, médio e máximo da solução randômica com 500 gerações.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Note que as três curvas possuem um comportamento totalmente aleatório, sem nenhuma lógica definida, além disso, elas não têm uma tendência de redução do custo o que as

Tabela 8 – Curvas de custo da solução randômica.

CURVA	MENOR CUSTO	MAIOR CUSTO	CUSTO MÉDIO
Mínima	R\$ 229,6 Mil	R\$ 247,5 Mil	R\$ 238,7 Mil
Média	R\$ 245,2 Mil	R\$ 256,5 Mil	R\$ 251,2 Mil
Máxima	R\$ 256,7 Mil	R\$ 288,6 Mil	R\$ 267,2 Mil

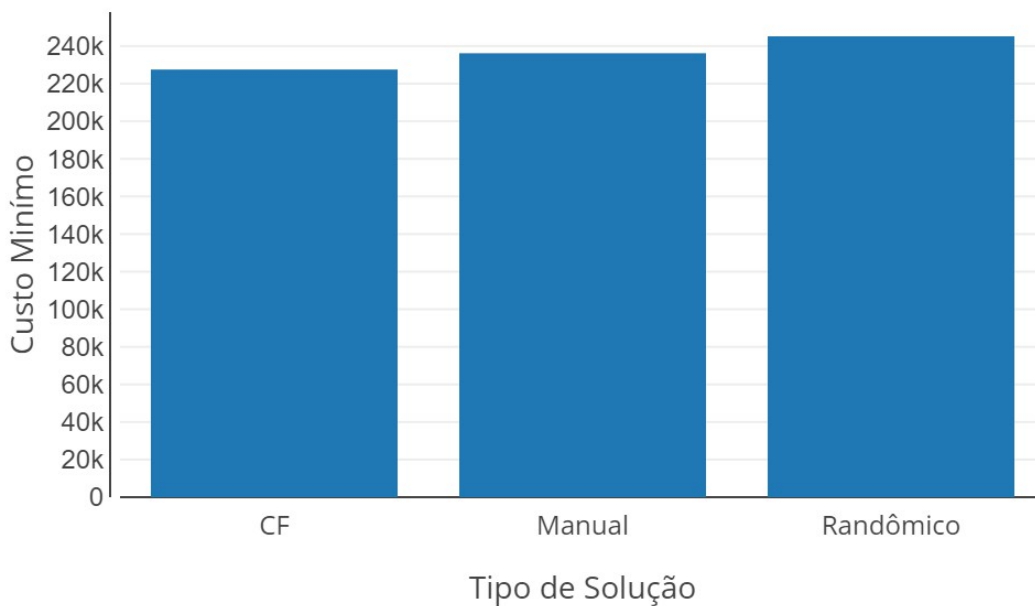
Fonte: Próprio Autor, 2022.

torna ineficientes para a resolução deste problema.

4.3.3 *Melhores Resultados*

Para saber se o algoritmo CF gerou uma redução significativa no custo da rede GPON e verificar se vale ou não apenas sua implementação, a Figura 45 mostra o custo mínimo encontrado por cada uma das técnicas apresentadas.

Figura 45 – Comparação entre os menores custos.



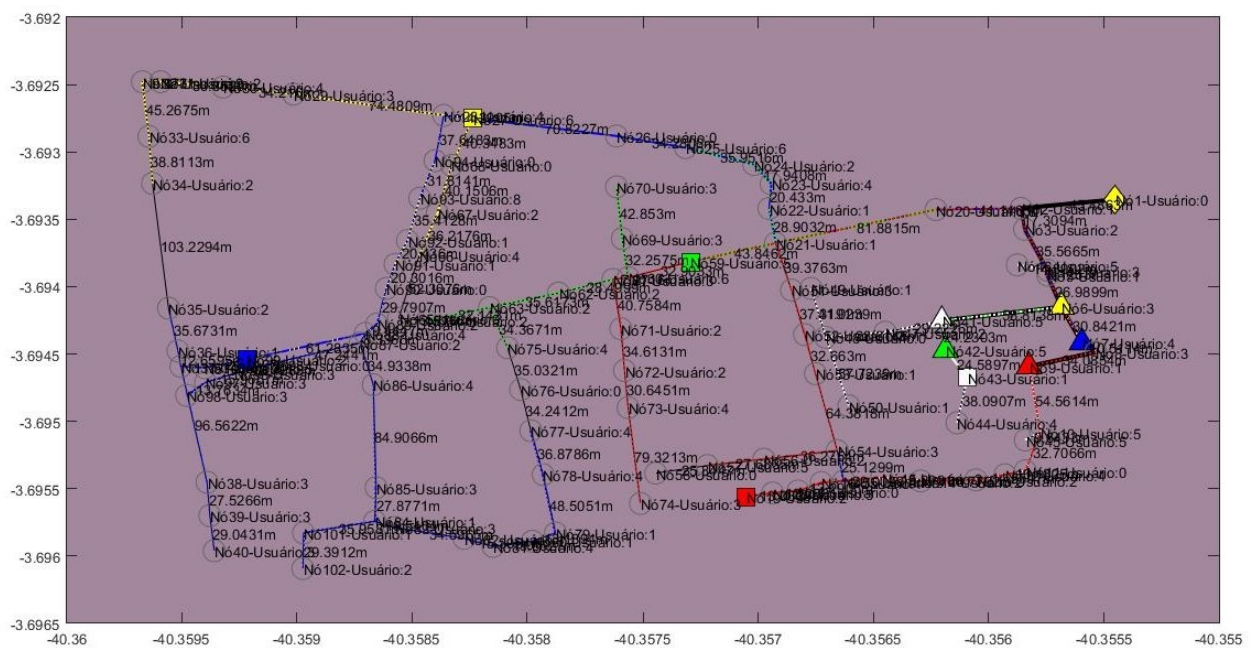
Fonte: Próprio Autor, 2022.

Comparando os valores mostrados é possível observar que a solução randômica apresentou o maior custo entre as três, com um valor de R\$ 245,2 Mil, o que já era esperado por se tratar de tomadas de decisões aleatórias. O menor preço dos projetos realizados de forma manual foi de R\$ 236,19 Mil, cerca de R\$ 8,67 Mil mais caro do que o fornecido pelo CF, que custou R\$ 227,52 Mil, dito isso, fica claro que o algoritmo CF se mostrou como a técnica mais eficiente, automatizando várias etapas do processo de criação de um projeto GPON, tornando-o

mais barato e tecnicamente viável.

As Figuras 46 até a 51 ilustram a região de atendimento do projeto, no qual a ordenada e abscissa representam, latitude e longitude, respectivamente. O losango de cor amarela representa a posição da OLT, enquanto o triângulo e quadrado indicam a posição da CEO e CTO, respectivamente. Vale a pena mencionar, que durante o projeto foi adotada a seguinte sequência de cores¹: verde, amarelo, branco, azul e vermelho. Em relação a fibra óptica foi usado o seguinte padrão: uma linha contínua de cor preta representa o *backbone*, linha tracejada representa a distribuição e linha pontilhada o *drop*. Além disso, aspectos técnicos como potência de recepção de cada ONU são apresentados para provar viabilidade técnica impostas na Seção 3.4.3.

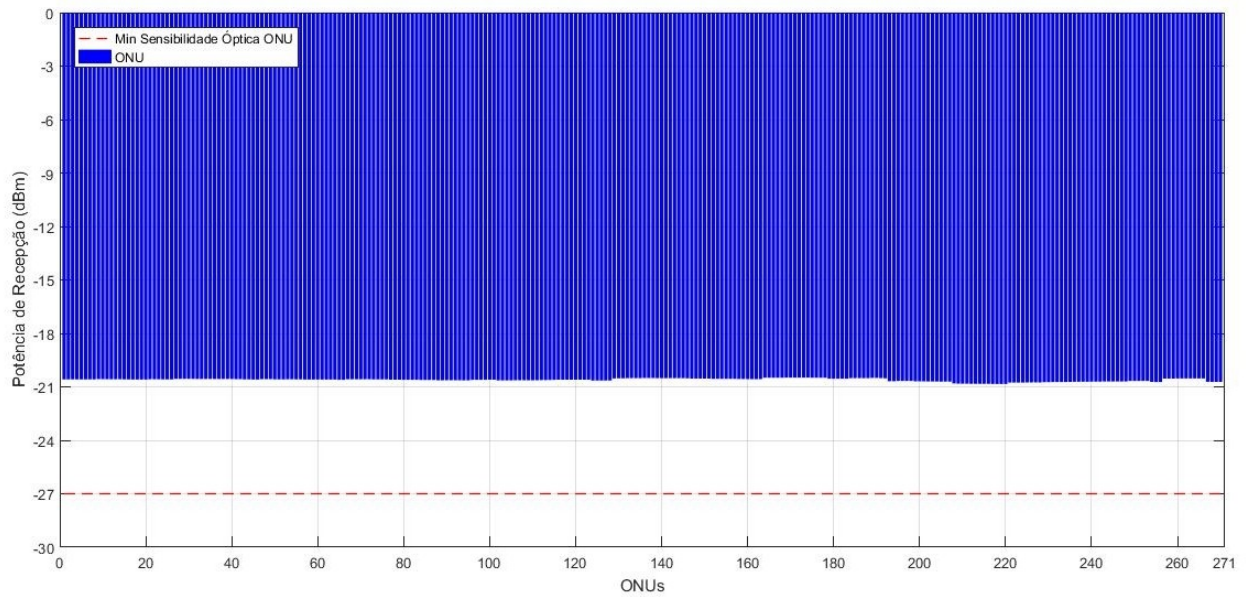
Figura 46 – Posição dos equipamentos no mapa fornecido pelo algoritmo CF de menor custo.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

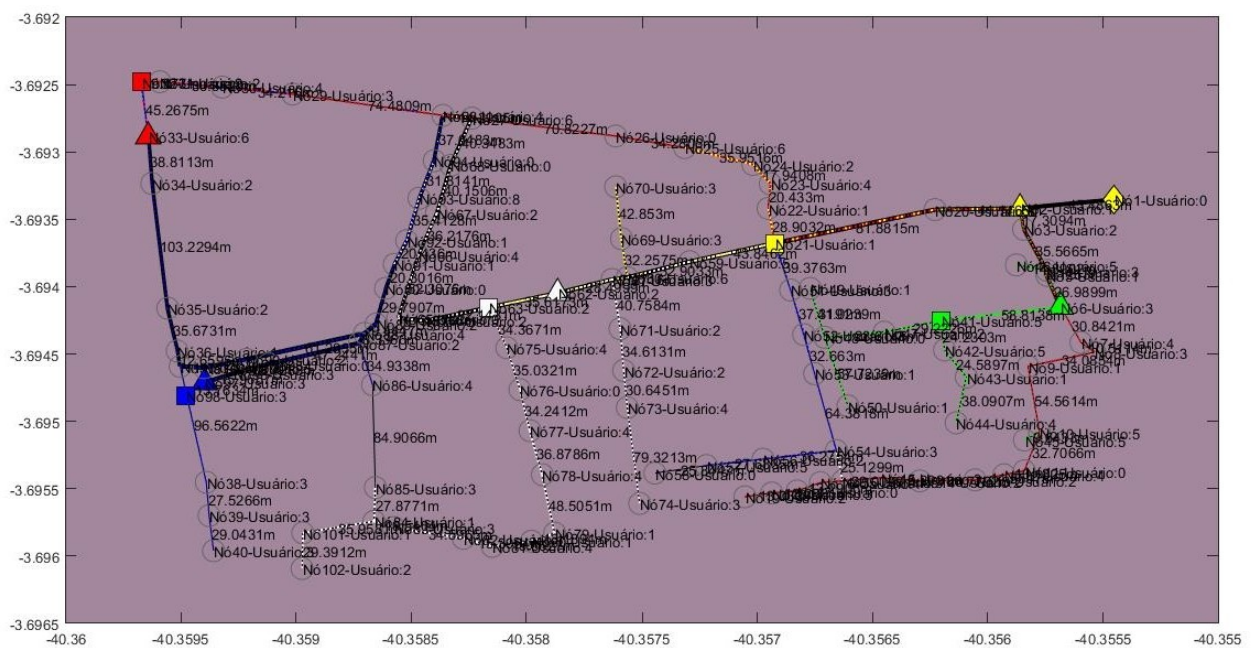
¹ Proveniente do padrão ABNT usado nas fibras ópticas.

Figura 47 – Potência de recepção para cada ONU fornecido pelo algoritmo CF.



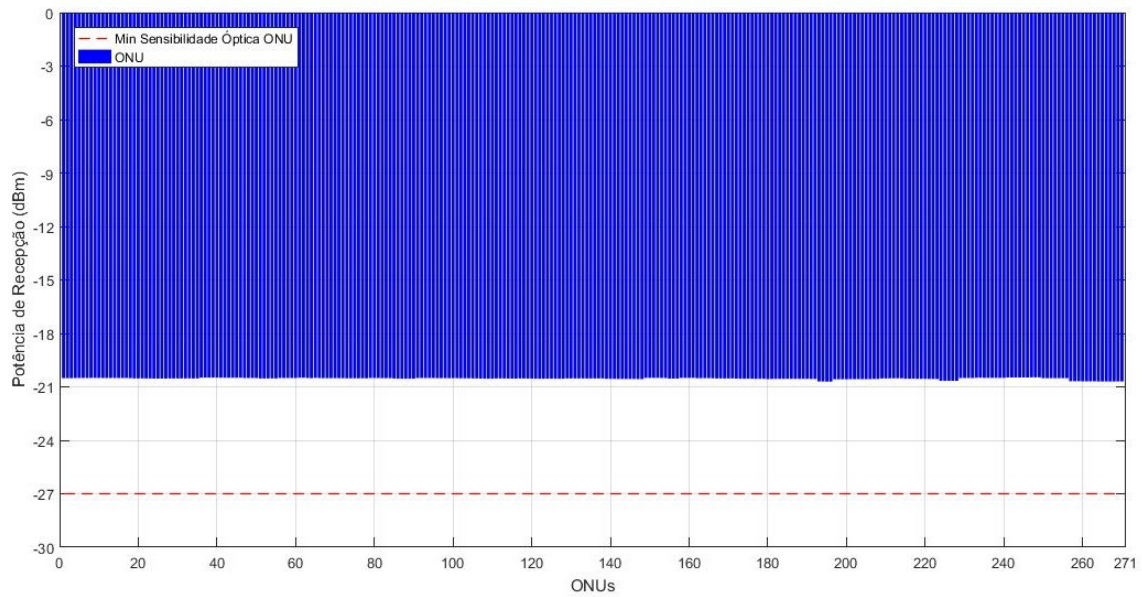
Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 48 – Posição dos equipamentos no mapa fornecido pela solução manual.



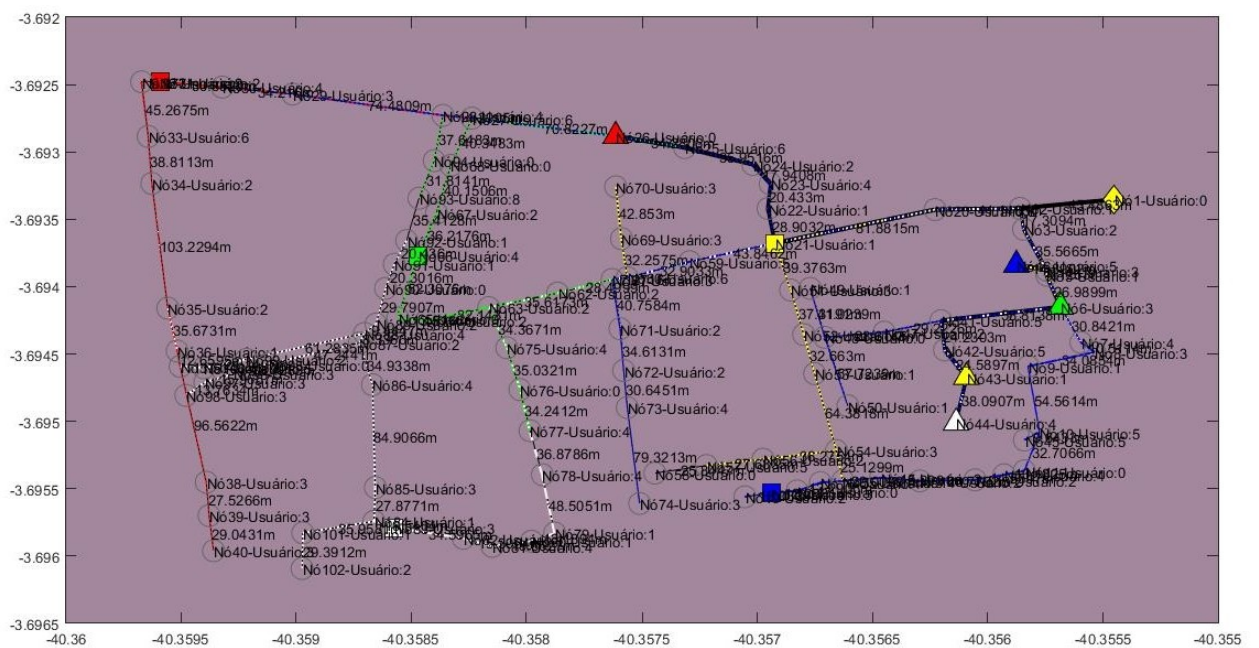
Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 49 – Potência de recepção para cada ONU da solução manual.



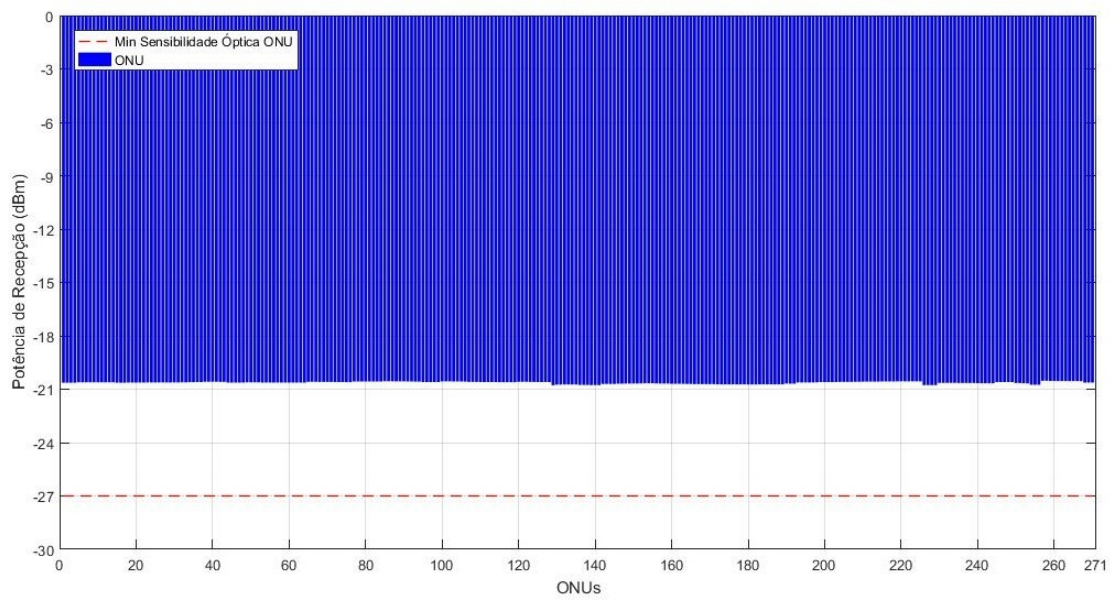
Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 50 – Posição dos equipamentos no mapa fornecido pela solução randômica.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 51 – Potência de recepção para cada ONU da solução randômica.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta monografia foram descritas todas as etapas para a implementação do algoritmo CF em uma rede GPON com topologia mista, como resultado final, o sistema proposto automatiza várias etapas do processo da criação de um projeto e indica as melhores posições para os equipamentos afim de tornar o custo final o menor possível. Diante de tudo que foi exposto até aqui, é possível responder os questionamentos feitos no começo deste trabalho.

- **QP 1** : Dada à concorrência crescente dos ISPs, como torna o projeto de rede óptica economicamente mais barato e tecnicamente aceitável?
- **QP 2** : A CF pode ser aplicado para aperfeiçoar economicamente e tecnicamente o projeto de rede óptica?
- **QP 3** : Quais os fatores que possuem influência nos resultados do projeto de rede óptica usando CF?
- **QP 4** : Qual a diferença econômica e técnica entre um projeto com CF quando comparado a um projeto manual?

Diante dos resultados foi possível responder as QPs:

- **Resposta da QP 1** : Para melhorar o projeto, tanto tecnicamente quanto economicamente, foi realizado uma busca das melhores posições para os equipamentos com o intuito de reduzir a perda de potência e o comprimento da fibra óptica;
- **Resposta da QP 2** : Aplicar o CF trouxe, mesmo que pequena, uma redução no custo de implementação da rede e pode ajudar a atingir os dois objetivos citados, no entanto para a aplicação real em uma rede GPON ainda é necessário uma evolução no estudo;
- **Resposta da QP 3** : Foi comprovado que a localização dos equipamentos possui total influência no custo e viabilidade técnica;
- **Resposta da QP 4** : A quantidade de soluções geradas entre os dois métodos é bem discrepante, o CF tem a vantagem de analisar várias soluções e filtra-las, o que traz bons resultados. Para verificar a eficiência do algoritmo perante a solução manual foram feitas algumas comparações. A média de custo da solução manual foi de R\$ 243,84 Mil, sendo superior a média da CF, que foi de R \$ 230,2 Mil. Os resultados obtidos mostram uma diferença de R\$ 13,64 mil na média de custo entre um projeto elaborado manualmente e outro aplicando o algoritmo CF, comprovando que houve uma redução no preço final da rede.

Em síntese, mesmo com todos os resultados positivos obtidos até aqui, ainda existe

muito espaço para a evolução deste estudo, tais como:

- Inserir uma interface gráfica para usuário final;
- Inserir restrição de tamanho para fibra óptica;
- Ser flexível em relação a topologia adotada;
- Adotar outras métricas de desempenho técnico (e.g. latência, taxa de transmissão, etc.);
- Adotar métricas de desempenho financeiro (e.g. *payback*, margem operacional, margem líquida, etc.);
- Usar distribuição do usuário de forma mais realista, ou seja, com regiões densas e outras não;
- Aprimorar informações financeiras sobre equipamentos e serviços (e.g. custo de ferragens, mão de obra, etc.).

Como visto, a tecnologia GPON é amplamente utilizada pelos brasileiros, atendendo aos mais diversos tipos de área, melhorar a qualidade do serviço e o preço final do mesmo é benéfico não somente para os ISPs, mas principalmente para os usuários.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. M. **PROJETO E ANÁLISE DE UMA REDE GPON**. [S. l.], 2018.
- ANATEL. **RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO DO SETOR DE TELECOMUNICAÇÕES**. 2020. Disponível em: https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?NMLZh5iV6nbOCmPPhjssYO7ecW3Ia5ZtxFzuL_reIqZ8L3mCXpDwpWj43Y64iTm1DEA9jNIPIyHBKZq354jBP71fMe1sO_1Q1aZ75HOS2-wvsCYhAE5N16qmLMhu_OI2.
- ARAÚJO, F. H. V. **PROJETO DE UMA REDE GPON FTTH IMPLANTADA NA CIDADE DE SANTANADO ACARAÚ**. [S. l.], 2019.
- BARROS, T. A. S. Algoritmos para otimização do desempenho de geradores de relutância variável aplicados em geração elétrica. **Universidade Estadual de Campinas**, 2016.
- BRAGA, L. **Entenda a diferença entre 3G, LTE, 4G, 4G+, 4,5G e 5G** 2018. Disponível em: <https://tecnoblog.net/236506/diferenca-internet-celular-lte-4g-4gmais-5g/>.
- BRUMMELEN, G. **Heavenly mathematics : the forgotten art of spherical trigonometry** . Princeton Oxford: Princeton University Press, 2017. ISBN 0691175993.
- BULHÕES, G. 2021. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2021/05/13/coronavirus/durante-a-pandemia-consumo-de-internet-dobra-no-brasil/>.
- CECCON, D. **Algoritmos de otimização** . 2020. Disponível em: <https://iaexpert.academy/2020/07/13/algoritmos-de-otimizacao/#:~:text=Algoritmosdeotimizaç~ao,porsua,pelomenossatisfatória,sejaencontrada>.
- CORREIA, B. V. de A. Planejamento e otimização de redes Ópticas. **REVISTA DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO**, v. 5, 2015.
- DIAS, D. **Modelo de Rede Hierárquica – parte 1 de 2** . 2012. Disponível em: <https://www.comutadores.com.br/modelo-de-rede-hierarquica-parte-1-de-2/>.
- DIAS, L. P. Redes Ópticas passivas: Uma nova alternativa para as redes locais lan. **REVISTA DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO**, v. 7, 2017.
- DIAS, L. P. **Otimização de Redes de Acesso PON Utilizando Algoritmos Genéticos e Análise Técnico-Econômica da Proposta PON-LAN** . Dissertação (Mestrado) – UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, 2018.
- DORIGO, M. **Ant colony optimization** . Cambridge, Mass: MIT Press, 2004. ISBN 9780262042192.
- FERRAUDO, G. **O que é a tecnologia GPON**. 2021. Disponível em: <https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/tecnologia-gpon/>.
- FILHO, E. A. de M. **DIMENSIONAMENTO DE UMA REDE DE FIBRA ÓPTICA PON FTTH CARAÚBAS**. [S. l.], 2018.
- FONTES, P. **Fibra Óptica: tudo que você precisa saber!** 2021. Disponível em: <https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/fibra-optica/>.

- G., A. **O Que é Latência?** 2019. Disponível em: <https://www.hostinger.com.br/tutoriais/o-que-e-latencia>.
- GOMES, D. **Aprendendo refração, reflexão e fibra óptica!** 2018. Disponível em: <https://youtu.be/phHGmTveuSc>.
- GOMES, F. A. M. **ALGORITMOS DE COLÔNIAS DE FORMIGAS**. 2009. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/~chico/mt852/formigas.pdf>.
- IBGE. **USO DE INTERNET, TELEVISÃO E CELULAR NO BRASIL** . 2019. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/materias-especiais/20787-uso-de-internet-televisao-e-celular-no-brasil.html>.
- IBM. **Simulação de Monte Carlo**. 2020. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/cloud/learn/monte-carlo-simulation>.
- KEISER, G. **Optical fiber communications**. Singapore: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 9789814575690.
- LAGE, L. B. candthesis, **Estudo de Uma Rede de Acesso Via Fibra Óptica**. 2006. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/849/1/2006_LuizaLage_MariaClaraOliveira.pdf.
- MACÊDO, D. **Topologias de Rede de Computadores** . 2012. Disponível em: <https://www.diegomacedo.com.br/topologias-de-rede-de-computadores/>.
- MATOS, C. techreport, **Diagnóstico de Leitura Comunitária** . 2020. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1Ag0GtDKuztbREWkmJ6VF2P51xLUAkqID/view>.
- MAURÍCIO, J. **Transmissores e Receptores Ópticos** . 2021. Disponível em: <https://www.ispblog.com.br/2021/02/11/transmissores-e-receptores-opticos/>.
- MONTEIRO, H. da S. **SIMULATED ANNEALING: PARADIGMA CLÁSSICO DA MECÂNICA ESTATÍSTICA PARA PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA** [S. l.], 2019.
- NETWORKS, U. **CÁLCULO DE POTÊNCIA ÓPTICA EM REDES FTTH**. [S. l.], 2021.
- NOVADC. **Pandemia aumenta o uso de internet no planeta** . 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/pr/parana/especial-publicitario/novadc/check-in-tech-nova-dc/noticia/2020/11/30/pandemia-aumenta-o-uso-de-internet-no-planeta.ghtml>.
- PACIFICO, R. P. C. **PROCEDIMENTO PRÁTICO PARA ELABORAÇÃO DE UMA REDE GPON FTTH BALANCEADA**. [S. l.], 2018.
- PEREIRA, F. C. de L. **PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE REDES GPON** . Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2013.
- PEREIRA, O. I. **ALGORITMO GENÉTICO ESPECIALIZADO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE REDES ÓPTICAS PASSIVAS** Dissertação (Mestrado) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU, 2020.

PERON, M. **O que é fibra ótica?** 2009. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/web/1976-o-que-e-fibra-otica-.htm>.

PIRES, D. B. **OTIMIZAÇÃO DA COLETA DE ENERGIA A PARTIR DE MATERIAIS PIEZELÉTRICOS.** 2019. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12213/1/PG_DAENP_2019_1_9.pdf.

PRESTES, E. **Introdução a Teoria dos Grafos** 2020. Disponível em: <http://www.inf.ufrgs.br/~prestes/Courses/GraphTheory/Livro/LivroGrafos.pdf>.

SANTANA, J. H. M. **APLICAÇÃO DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS PARA OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL** 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21872/1/AplicacaoAlgoritmosEvolutivos.pdf>.

SILVA, E. B. da. **APLICAÇÃO DO ALGORITMO COLÔNIA DE FORMIGAS NA RESTAURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, 2016.

TEIXEIRA, M. M. **Reflexão total da luz.** 2020. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/reflexao-total-luz.htm>.

VILLALBA, T. **Distribuição De Divisores De Potência Em Redes Ópticas Passivas Utilizando Algoritmos Genéticos.** 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18155/tde-19032010-144608/publico/Tany.pdf>.

ANEXO A – TABELA DE PREÇOS

Para calcular o custo final da rede foi realizada uma pesquisa de mercado para encontrar alguns valores de produtos e serviços, tais valores são mostrados pelas Tabelas 9 e 10 respectivamente. Vale ressaltar que, a pesquisa foi realizada em diversos sites, visto que, não foi possível encontrar toda a lista em apenas um fornecedor, além disso, muitos só forneciam o preço dos materiais para empresas.

Tabela 9 – Média de preço dos produtos.

PRODUTOS	PREÇO (R\$)
Fibra 2FO/km	1,08
Fibra 12FO/km	2,95
Fibra 48FO/km	8,55
Fibra 144FO/km	15,44
CTO 1X8	137,19
CTO 1X16	215,12
CTO 1X32	885,50
CTO 1X64	1.185,50
CEO 12F	162,63
CEO 24F	232,05
OLT	9.367,65
DIO 12FO	432,42
ONU	260,75
Conector	5,42

Fonte: Mercado Livre, 2021.

Tabela 10 – Média de preço dos serviços.

SERVIÇO	PREÇO (R\$)
Emenda por fusão	43,00
Emenda mecânica	22,00

Fonte: (DIAS, 2018).