



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

**FRANCISCO LAIO ARAÚJO E SILVA PRADO**

**ALGORITMOS GENÉTICOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE REDES GPON EM  
ARQUITETURA FTTH: ESTUDO DE CASO EM PIRIPIRI-PI**

**SOBRAL**

**2023**

FRANCISCO LAIO ARAÚJO E SILVA PRADO

ALGORITMOS GENÉTICOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE REDES GPON EM  
ARQUITETURA FTTH: ESTUDO DE CASO EM PIRIPIRI-PI

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.

SOBRAL

2023

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

---

- P917a Prado, Francisco Laio Araújo e Silva.  
Algoritmos Genéticos na Implementação de Redes GPON em Arquitetura FTTH: Estudo de Caso em Piripiri-PI / Francisco Laio Araújo e Silva Prado. – 2023.  
71 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo.
1. Otimização por Algoritmo Genético. 2. Meta-heurística. 3. FTTH. 4. AG. 5. Redes Ópticas Passivas. I. Título.

CDD 621.3

---

FRANCISCO LAIO ARAÚJO E SILVA PRADO

ALGORITMOS GENÉTICOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE REDES GPON EM  
ARQUITETURA FTTH: ESTUDO DE CASO EM PIRIPIRI-PI

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: 08/12/2023

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Antônio Josefran de Oliveira Bastos  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Eli Sales Muniz Lima  
Instituto Centro de Ensino Tecnológico (CENTEC)

À Deus, minha família e minha esposa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por mesmo tendo me afastado sinto sua presença em tudo que faço. Agradeço a minha família, meu pai Queginaldo, minha mãe Ana Luiza e meu irmão Loan por me aguentar reclamando muitas vezes e mesmo assim me incentivarem. Agradeço a minha esposa Lia por sempre me apoiar em tudo e me ajudar no possível e impossível para que eu tenha sucesso. Agradeço ao meu melhor amigo Eli, por não me deixar desistir e me incentivar sempre. Agradeço ao meu grupo de amigos, cada um deles fez diferença na minha vida. Sem vocês não teria conseguido persistir.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo por aceitar estar junto comigo nesse processo e me auxiliar da melhor forma para que esse trabalho se concretizasse. Sem dúvidas foi um Professor que se mostrou interessado em ajudar e ensinar para que tudo ocorresse como planejado.

"Tudo nessa vida tem um preço, nada é de graça." (John Lennon)

## RESUMO

Este trabalho tem como proposta de estudo o problema de otimização de redes GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) utilizando Algoritmo Genético (AG). Procurou-se elaborar um sistema computacional feito na plataforma Matlab utilizando como base a meta-heurística algoritmo genético, permitindo de forma rápida e eficiente, soluções para projetos de redes GPON. Buscou-se desenvolver um projeto utilizando regiões reais, que apresentassem alguma dificuldade na elaboração manual da rede, diminuindo os custos e tempo de implantação. A eficiência do sistema computacional desenvolvido pôde ser confirmada quando comparada a projetos de redes PON elaboradas de forma manual, obtendo um melhor desempenho, e com menor custo. Diante do resultado, ficou claro o potencial da utilização dessa ferramenta no que diz respeito a projetos mais econômico e viáveis.

**Palavras-chave:** Redes Ópticas Passivas; Otimização por Algoritmo Genético; Meta-heurística; AG; FTTH; GPON.



## ABSTRACT

This work aims to study the problem of optimizing GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) networks using Genetic Algorithm (GA). We sought to develop a computational system made on the Matlab platform using the genetic algorithm meta-heuristic as a base, allowing quick and efficient solutions for GPON network projects. We sought to develop a project using real regions, which presented some difficulty in manually creating the network, reducing costs and implementation time. The efficiency of the developed computational system could be confirmed when compared to PON network projects created manually, obtaining better performance at a lower cost. Given the result, the potential of using this tool with regard to more economical and viable projects became clear.

**Keywords:** Passive Optical Networks; Optimization by Genetic Algorithm; Meta-heuristics; AG; FTTH; GPON.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução dos Meios de Comunicação. . . . .	16
Figura 2 – Áreas do conhecimento envolvidas e seus respectivos trabalhos comentados. . . . .	20
Figura 3 – Arquitetura de Rede em três camadas. . . . .	22
Figura 4 – Estrutura de uma rede óptica passiva. . . . .	23
Figura 5 – Uma onda eletromagnética é uma oscilação que se propaga no campo elétrico e magnético. . . . .	24
Figura 6 – Refração e reflexão de um feixe de luz em uma interface material. . . . .	25
Figura 7 – Passagem da luz de um meio mais refringente para um meio menos refringente. . . . .	25
Figura 8 – Estrutura da fibra óptica. . . . .	26
Figura 9 – Índices gradual, degrau e dispersão Modal. . . . .	27
Figura 10 – <i>Passive Optical Networks</i> . . . . .	28
Figura 11 – Topologia das Redes PON. . . . .	29
Figura 12 – Rede PON detalhada. . . . .	30
Figura 13 – OLT da fabricante FiberHome. . . . .	30
Figura 14 – DIO da fabricante Furukawa. . . . .	31
Figura 15 – Modelo de Splitter 1x8 balanceado. . . . .	31
Figura 16 – ONU da fabricante FiberHome. . . . .	32
Figura 17 – CEO da fabricante Furukawa. . . . .	32
Figura 18 – CTO da fabricante Furukawa. . . . .	33
Figura 19 – Máquina de fusão da fabricante Fujikura. . . . .	34
Figura 20 – Representação esquemática de uma Rede FTTx. . . . .	35
Figura 21 – Representação de Ciclos. . . . .	38
Figura 22 – Fluxograma básico de funcionamento de um Algoritmo Genético. . . . .	40
Figura 23 – Localização da região do projeto na cidade de Piripiri-PI. . . . .	42
Figura 24 – Região de atendimento e localização da OLT. . . . .	43
Figura 25 – Diagrama físico da rede que representa a topologia mista centralizada. . . . .	43
Figura 26 – Postes mapeados através de suas coordenadas no <i>Google Earth</i> . . . . .	44
Figura 27 – Junção das bifurcações utilizando JOSM. . . . .	45
Figura 28 – Grafo da região do projeto fornecido pelo simulador. . . . .	46
Figura 29 – Ferramentas e seus objetivos no processo de importação dos dados. . . . .	46
Figura 30 – Possíveis soluções com base na quantidade de postes e equipamentos. . . . .	53

Figura 31 – Exemplo de codificação com dois cromossomos. . . . .	53
Figura 32 – Exemplo de cromossomos inaptos. . . . .	54
Figura 33 – Exemplo de reprodução dos cromossomos com taxa de reprodução 0,5. . . . .	55
Figura 34 – Relação entre custo do projeto e número de gerações. . . . .	57
Figura 35 – Custo médio em diferentes tamanhos de população. . . . .	58
Figura 36 – Custo médio em diferentes taxas de reprodução. . . . .	59
Figura 37 – Custo médio em diferentes probabilidades de mutação. . . . .	60
Figura 38 – Custos em relação aos parâmetros abordados. . . . .	60
Figura 39 – Mínimo Custo obtido pelo AG e Manual. . . . .	61
Figura 40 – Grafo com posições dos equipamentos e rotas da FO utilizando AG. . . . .	62
Figura 41 – Potência de recepção das ONU - AG. . . . .	63
Figura 42 – Grafo com posições dos equipamentos e rotas da FO utilizando método Manual. . . . .	63
Figura 43 – Potência de recepção das ONU - Manual. . . . .	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de conceitos de Darwin e Holland . . . . .	38
Tabela 2 – Preço dos equipamentos. . . . .	70
Tabela 3 – Custo da rede utilizando AG. . . . .	70
Tabela 4 – Custo da rede utilizando técnica manual. . . . .	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	<i>Algoritmo Genético</i>
CEO	Caixa de Emenda Óptica
CO	<i>Central Office</i>
CTO	Caixa de Terminação Óptica
DIO	Distribuidor Interno Óptico
FO	<i>Fibra Óptica</i>
FTTA	<i>Fiber to the Apartment</i>
FTTB	<i>Fiber to the Building</i>
FTTC	<i>Fiber to the Curb</i>
FTTD	<i>Fiber to the Desk</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
FTTx	<i>Fiber to the x</i>
GPON	<i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i>
GPSO	<i>Gaussian Particle Swarm Optimization</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IOT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
JOSM	<i>Java OpenStreetMap Editor</i>
LAN	<i>Local Área Network</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
PCV	<i>Problema do Caixeiro-Viajante</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
POP	Ponto de Presença
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QP	<i>Questões de Pesquisa</i>
RANG	Rede de Acesso de Nova Geração

SDH     *Synchronous Digital Hierarchy*  
TDMA    *Wavelength Division Multiplexing*  
TE       Tempo de Execução  
WDM     *Wireless Local Area Network*  
WLAN    *Wireless Local Area Network*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação e Escopo da Monografia</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b>	<b>20</b>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Estrutura Básica das Redes de Telecomunicações</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Princípios das Comunicações Ópticas</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1</b>	<i>Efeitos de refração e reflexão</i>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<i>Lei de Snell-Descartes</i>	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Estrutura Básica das Redes Ópticas</b>	<b>26</b>
<b>2.4</b>	<b>Redes Ópticas Passivas</b>	<b>28</b>
<b>2.5</b>	<b>Principais Componentes da Rede PON</b>	<b>29</b>
<b>2.5.1</b>	<i>Optical Line Terminal (OLT)</i>	<b>30</b>
<b>2.5.2</b>	<i>Distribuidor Interno Óptico (DIO)</i>	<b>30</b>
<b>2.5.3</b>	<i>Divisores Ópticos (Splitters)</i>	<b>31</b>
<b>2.5.4</b>	<i>Optical Network Unit (ONU) ou Optical Network Terminal (ONT)</i>	<b>31</b>
<b>2.5.5</b>	<i>Caixa de Emenda Óptica (CEO)</i>	<b>32</b>
<b>2.5.6</b>	<i>Caixa de Terminação Óptica (CTO)</i>	<b>32</b>
<b>2.5.7</b>	<i>Conectores e Emendas</i>	<b>33</b>
<b>2.6</b>	<b>Arquitetura FTTX</b>	<b>34</b>
<b>2.7</b>	<b>Topologias</b>	<b>35</b>
<b>2.8</b>	<b>Métrica de Desempenho das Redes Ópticas</b>	<b>36</b>
<b>2.9</b>	<b>Grafos</b>	<b>36</b>
<b>2.10</b>	<b>Algoritmo de Otimização por Algoritmo Genético</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Região geográfica do projeto</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Topologia adotada para otimização de rede GPON</b>	<b>41</b>
<b>3.3</b>	<b>Processo de importação da região geográfica do projeto</b>	<b>43</b>

3.3.1	<i>Coleta de postes e criação das ligações</i>	44
3.3.2	<i>Junção das bifurcações</i>	44
3.3.3	<i>Conversão dos dados</i>	45
3.3.4	<i>Importação para o Matlab e criação do grafo</i>	45
3.4	<b>Modelagem do sistema</b>	47
3.4.1	<i>Conjuntos</i>	47
3.4.2	<i>Definições</i>	48
3.4.3	<i>Restrições</i>	51
3.4.4	<i>Parâmetros do projeto</i>	51
3.5	<b>Implementação do Algoritmo Genético</b>	52
4	<b>RESULTADOS</b>	56
4.1	<b>Técnicas para Comparação de Desempenho</b>	56
4.2	<b>Parametrização do Algoritmo Genético</b>	56
4.3	<b>Resultados Comparativos</b>	61
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	65
	<b>REFERÊNCIAS</b>	67
	<b>ANEXO A – TABELAS DE CUSTOS</b>	70



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A comunicação é uma parte fundamental da civilização desde seu surgimento. Não se pode citar humanidade, sociedade e desenvolvimento sem associá-los à comunicação, pois sempre foi considerada a chave dos relacionamentos (ZANETTI, 2021).

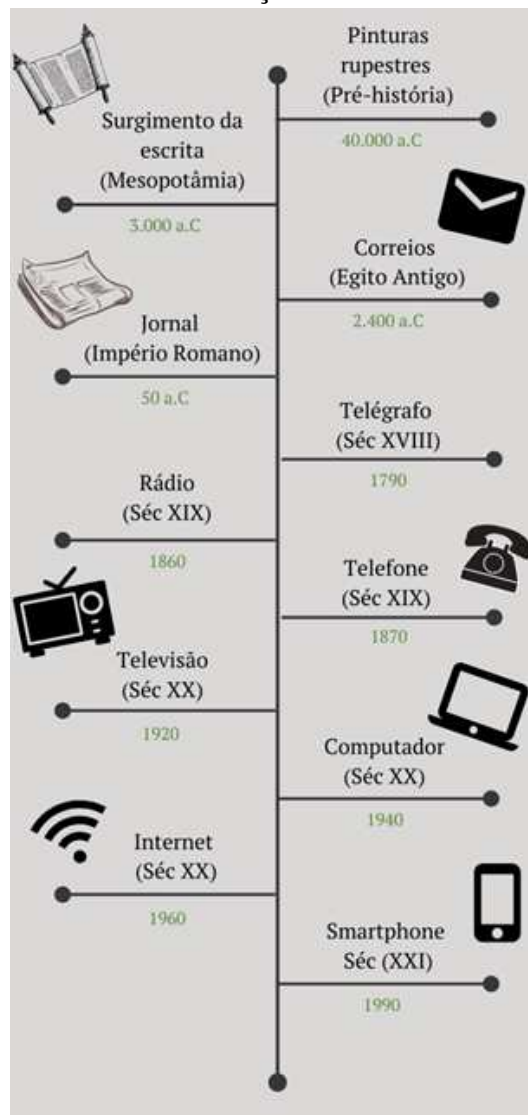
Nos primórdios, o ser humano não possuía força física suficiente para fazer frente aos outros animais, sendo necessário desenvolver a inteligência para aumentar as chances de sobrevivência. Com isso, a complexidade da sua comunicação foi um dos pontos mais importantes desse avanço intelectual (WERNER, 2012).

Uma das muitas contribuições dos sumérios está vinculada ao progresso da escrita cuneiforme, onde se observava a impressão dos caracteres sobre argila exposta ao sol e, na sequência, era endurecida com sua exposição a chama. Essa civilização mesopotâmica produziu uma imensa gama de atividades literárias que contava com poemas, códigos de leis, mitos e outras narrativas, tornando-se a língua escrita mais antiga (MACHADO, 2020).

A escrita foi o elemento principal que revolucionou a comunicação. Consolidou-se num período curto, começou a criar significados padronizados e cada povo criou sua própria forma de escrita, no entanto, foram os sumérios que transformaram os sons produzidos em símbolos, ou seja, os caracteres passaram a, juntos, representar sílabas, sendo o início da escrita fonética (BRAGANCA, 2009).

Em 1844, a comunicação evoluiu novamente, com o surgimento do telégrafo. O equipamento projetado por Samuel Finley Breese Morse trouxe rapidez ao envio de mensagens, sendo muito utilizado pelos militares. Logo depois, em 1876, Alexander Graham Bell, juntamente com Thomas Watson, criaram o telefone fixo, que turbinou mais ainda o desenvolvimento da comunicação. O aparecimento do rádio entre os anos 1880-1890 e da televisão em 1920 fomentou o interesse em mais pessoas de se envolver no progresso da comunicação. Apesar do alcance e notoriedade, esses meios não puderam ser classificados como eficientes pela forma passiva do receptor. Para a relação entre emissor e receptor foi necessária a criação da internet, que no final dos anos 60 surge como novo meio de comunicação revolucionando o mercado, inicialmente utilizada somente pelos militares, ficando disponível aos civis, para utilização de todos, no fim dos anos 80 (ZANETTI, 2021).

Figura 1 – Evolução dos Meios de Comunicação.



Fonte: Theodoro (2023).

O desenvolvimento da comunicação até o surgimento da internet e suas atribuições possibilitaram diversas mudanças na ciência e educação, além de indústrias e empresas. Essa evolução vem ao encontro, atualmente, da comunicação de dados e redes, promovendo evoluções cada vez maiores no meio (FOROUZAN, 2010).

Para conduzir tal evolução, os *Internet Service Provider* (ISP) estão procurando utilizar das redes *Passive Optical Network* (PON) devido aos baixos custos de implementação e seu bom desempenho (ALBUQUERQUE, 2018). Toda essa expansão das redes ópticas tem se tornado tendência global devido aos avanços tecnológicos de diversos equipamentos como televisões 4K, vídeos 3D e *Internet of Things* (IOT) (DIAS, 2018).

## 1.2 Motivação e Escopo da Monografia

Devido à alta capacidade de transmissão que a arquitetura *Fiber to the Home* (FTTH) gera às redes ópticas, tornou-se indispensável sua utilização atualmente. Houve uma crescente na demanda, principalmente dentre as ISP regionais onde as grandes empresas não focam seus serviços, criando assim um mercado fora dos centros urbanos. Com isso, mostrou-se a importância da otimização de infraestrutura de redes ópticas, buscando menores custos sem diminuir a qualidade da entrega aos consumidores.

O planejamento da distribuição se torna complexo a medida que aumenta sua carga geográfica, sendo assim, quanto maior a região mais difícil se torna a avaliação do projetista para detectar o melhor custo-benefício. Então, criou-se as *Questões de Pesquisa* (QP) para nortear o trabalho e se tornar um guia para auxiliar em projetos de redes ópticas (AGUIAR, 2022).

– QP1: Devido a crescente concorrência dos ISP, como tornar o projeto da rede *Gigabit-capable Passive Optical Network* (GPON) mais econômico e tecnicamente acessível?

– QP2: A meta-heurística *Algoritmo Genético* (AG) pode ser aplicada para aprimorar o projeto da rede GPON de forma econômica e técnica?

– QP 3: Quais os fatores que influenciam os resultados do projeto de Rede Óptica usando AG?

– QP4: Qual a diferença econômica e técnica entre um projeto com AG quando comparado a um projeto manual?

– Hipótese QP 1: Com a crescente na competitividade dentre o mercado de ISP é preciso elaborar projetos de redes ópticas que possam contornar os possíveis problemas característicos devido a peculiaridades da região, como custo de implantação, manutenção e localização dos equipamentos. Com isso, é importante o uso de estratégias, como a meta-heurística AG para auxiliar na evolução do projeto, com a justificativa de torná-lo aceitável.

– Hipótese QP 2: O Algoritmo Genético é uma estratégia que há muito vem sendo utilizada no meio científico na resolução de diversos problemas de engenharia. Com a utilização de um modelo apropriado, torna-se possível o aperfeiçoamento nos custos do projeto de redes ópticas.

– Hipótese QP 3: Topologia, equipamentos, parâmetros de mutação, população e reprodução são alguns fatores de influência no resultado utilizando AG.

– Hipótese QP 4: Acredita-se que o projeto utilizando AG terá melhores resultados financeiros e estratégicos quanto ao enlace, principalmente tendo em vista os diversos artigos já

publicados demonstrando sua eficiência.

### 1.3 Estado da Arte

Alguns trabalhos e estudos da comunidade acadêmica/científica foram de importância e inspiração no decorrer do trabalho, tornando-se pilares. São apresentados alguns desses para exemplificar o estado da arte trabalhado. Referenciando trabalhos que tem envolvimento nas áreas de redes ópticas, otimização e sua interseção.

A priori, Oliveira (2006) se propôs a realizar um estudo das aplicações práticas da *Fibra Óptica* (FO), de modo a demonstrar e exemplificar a rede de acesso, conceituado sistema de comunicação óptico, elementos de rede óptica, técnicas de multiplexação e redes de acesso e comparado os tipos de redes de acesso via fibra existentes, de modo a mostrar as vantagens e sua devida importância na evolução das redes de telecomunicação.

Ao utilizar da arquitetura FTTH para o dimensionamento de uma rede GPON, e, assim como neste trabalho, empregar como área de estudo a cidade de Piri-piri-Pi, Pacifico (2018) apresentou os dados sobre área de cobertura, número de clientes, taxa de penetração, localização dos equipamentos e orçamento de potência, demonstrando as etapas utilizadas para a elaboração do projeto, tão como suas características e análise de viabilidade econômica da região, ressaltando, assim, a importância do trabalho dos profissionais, projetistas e acadêmicos da área de telecomunicação para a compreensão sobre projetos de rede GPON e visão de mercado, além de informações sobre o Payback de investimento.

No trabalho de Benzinho (2011) foi apresentada uma dissertação que avalia com caráter econômico as redes FTTH em diferentes cenários geográficos. Tomando como referência uma Rede de Acesso de Nova Geração (RANG) com tecnologia FTTH – PON, o trabalho visa contribuir para a compreensão de problemas associados à engenharia e à avaliação econômica de redes ópticas. É feito o enquadramento das redes de acesso de modo a identificar as soluções tecnológicas baseadas nas FO mais utilizadas e, por fim, é feita a compilação e adaptação de um conjunto de modelos geométricos que tem como finalidade construir abordagens para projetos de rede PON.

Em seu trabalho, Aguiar (2022) apresentou uma proposta de implementação da meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO) no processo de criação de uma GPON utilizando da arquitetura FTTH. A otimização via PSO foi aplicada de modo a diminuir os custos do projeto, utilizando algoritmo feito no Matlab para reduzir o tempo de elaboração e

implementação. Foi feita a comparação da técnica trabalhada com redes PON utilizando a forma manual e randômica, e assim comprovado a indicação do modelo PSO para criar resultados de menor custo e tempo de execução menor, se comparado aos outros métodos.

Em sua dissertação, Dias (2018) demonstrou a realização de otimização de uma rede PON utilizando da aplicação de meta-heurística AG. Foi feita a criação do algoritmo utilizando a teoria dos grafos, a mesma utilizada neste trabalho, pois gera ganhos consideráveis em comparação ao planejamento usual, visto que é capaz de eliminar possíveis erros que possam surgir no projeto, reduzir o tempo de aplicação e garantir as condições mínimas definidas para o funcionamento da rede. Os resultados encontrados pelo autor confirmam a eficiência do uso de AG, apresentando custos menores e melhores que a solução manual. As sugestões do autor para trabalhos futuros caminham para o uso de nova formas de otimização utilizando os algoritmos heurísticos, comparando eficiências e definindo quais algoritmos propostos seriam os mais indicados para cada tarefa.

No caso de Barth (2016), sua dissertação apresentou um método computacional para projetos de redes híbridas (FO e sem fio), de modo a otimizar a instalação de equipamentos em determinada área de atendimento e reduzir os custos para ser viável a implementação em cidades inteligentes. O autor desenvolveu um sistema baseado na meta-heurística de colônia de formigas e comparou com outras heurísticas trabalhadas na literatura e obteve resultados mais eficientes que as demais.

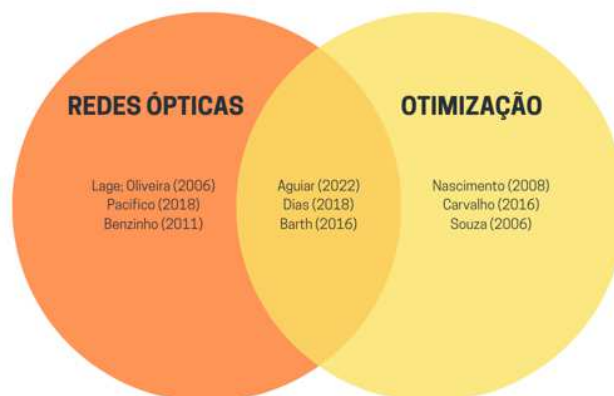
Também trabalhou no problema quanto a otimização de confiabilidade-redundância Coelho (2008), e, segundo o mesmo, métodos matemáticos não funcionam para resolução de problemas de otimização de confiabilidade-redundância. Com isso, o autor mostra necessário como alternativa de otimização a utilização de meta-heurísticas. Foi utilizado no trabalho a meta-heurística PSO juntamente com *Gaussian Particle Swarm Optimization* (GPSO). Após os resultados foi feita a comparação entre os dois métodos de PSO, demonstrando uma sutil superioridade do segundo método em relação ao primeiro.

O estudo de Carvalho (2016) sugeriu uma técnica composta utilizando árvore de decisão e a meta-heurística AG para resolução de problemas. O método utilizado tem como base a precisão preditiva, compreensibilidade e grau de interesse. Com os resultados desse método trabalhado, foi possível otimizar bancos de dados de forma eficiente aperfeiçoando o problema do algoritmo.

Em sua dissertação de mestrado, Souza (2006) demonstrou uma abordagem utilizando a meta-heurística PSO para a resolução de problemas de otimização combinatória, aplicando melhorias no algoritmo, utilizando em conjunto métodos de outras heurísticas, adotando conceitos de AG para representar os resultados como um vetor numérico, assim como trabalhado nesta monografia. O autor utilizou de Busca Local para auxiliar na melhora das soluções encontradas, ou seja, refinar as soluções. Como resultado, se obteve soluções positivas quando utilizado o PSO em comparação a outras heurísticas de resolução para o *Problema do Caixeiro-Viajante (PCV)*.

Observamos que o intuito deste trabalho é realizar um estudo que envolva projetos de redes ópticas e de otimização, assim como os trabalhos que serviram de referência. Com essa apresentação resumida dos estudos na literatura que foram definidos como os pilares deste trabalho, podemos observar na Figura 2 sua relação no estado da arte. Áreas do conhecimento envolvidas e seus respectivos trabalhos comentados.

Figura 2 – Áreas do conhecimento envolvidas e seus respectivos trabalhos comentados.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

## 1.4 Objetivos

O trabalho tem como objetivo propor uma técnica otimizada para o planejamento de redes PON utilizando AG, automatizando a implementação da rede óptica, de modo a:

- Diminuir custo de implementação da rede FTTH;
- Garantir condições mínimas de funcionamento adequado da rede FTTH;
- Comparar o projeto proposto AG com o método manual.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, incluindo a introdução. Logo abaixo um breve resumo dos quatro capítulos restantes:

– Capítulo 2: Demonstra os principais conceitos empregados, tais como: comunicação óptica, grafos e a meta-heurística AG. São apresentados os princípios básicos das redes de telecomunicações, os princípios sobre comunicações ópticas como reflexão, refração e a lei de Snell. Em sequência, o assunto passa a ser a estrutura das redes ópticas, conceito de redes ópticas passivas e suas principais arquiteturas, tais como métricas de desempenho. Ao final do capítulo é demonstrado os conceitos de grafos empregados e a utilização da meta-heurística AG;

– Capítulo 3: Aborda sobre a metodologia aplicada para a proposta de disposições dos equipamentos na rede óptica, desde a escolha da área de atendimento até a implementação do projeto utilizando AG;

– Capítulo 4: É descrito todo o processo de parametrização do AG, determinando os valores dos parâmetros que resultam em um projeto viável e de baixo custo. Após isso, os resultados obtidos pelo AG serão comparados com o método manual;

– Capítulo 5: Tem-se as devidas conclusões do trabalho e parâmetros que podem ser melhorados para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

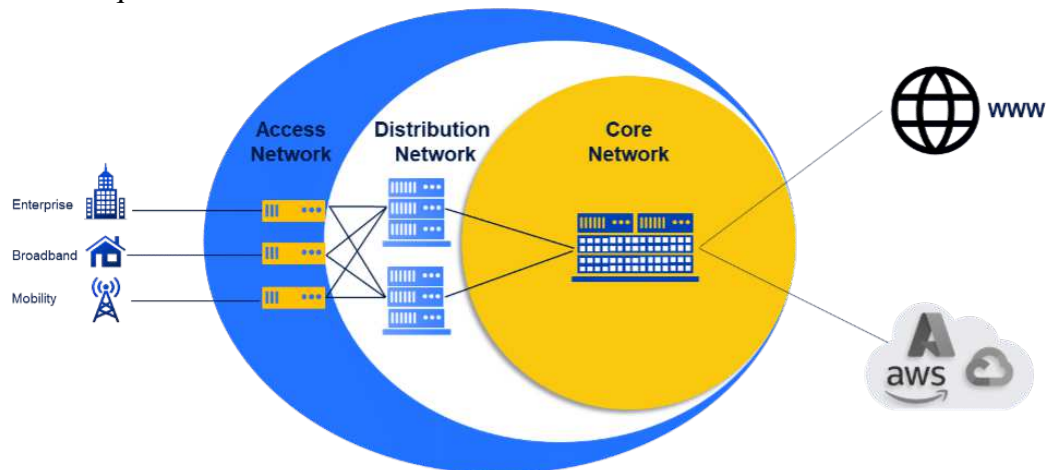
Neste capítulo serão expostos os principais conceitos aplicados no trabalho, tais como: estrutura básica de redes, comunicação óptica, grafos e a meta-heurística AG. Introduzimos com a apresentação da estrutura básica das redes de telecomunicações, em seguida os princípios sobre comunicações ópticas citando reflexão, refração e a lei de Snell. Dando seguimento, são apresentados nas seções 2.3 a 2.8 a estrutura das redes ópticas, conceito de redes ópticas passivas e suas principais arquiteturas, além de métricas de desempenho. Para finalizar, será mostrado os conceitos de grafos empregados neste trabalho e, por fim, será apresentada a meta-heurística AG.

### 2.1 Estrutura Básica das Redes de Telecomunicações

A estrutura básica das redes de telecomunicações possui suas funcionalidades, se diferenciando tanto em transporte e serviços quanto em público e privado. É possível identificar os diversos segmentos de rede que utilizam múltiplas tecnologias de transmissão, comutação e encaminhamento (LOPES, 2011). E, além disso, determinar de quais formas podem se interligar os diversos tipos de redes de telecomunicações, sejam elas fixas (redes cabeadas) ou móveis (redes sem fio) (MELO, 2013).

As redes de telecomunicações atuais podem ser classificadas em três grupos: redes principais (*core-network*), também denominadas redes de interligação ou rede nuclear; redes de acesso e redes de cliente (redes locais) (DIAS, 2018).

Figura 3 – Arquitetura de Rede em três camadas.



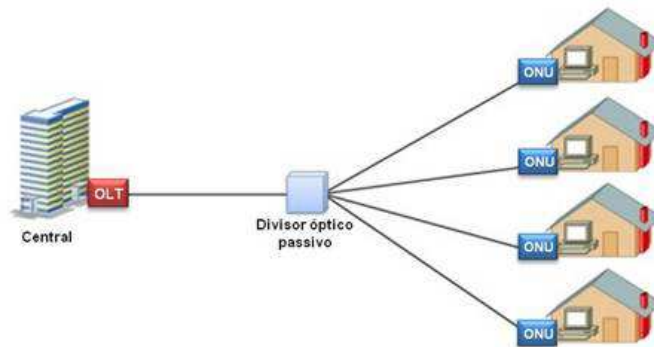
Fonte: Drivenets (2022).



À rede *core-network* é atribuída a interligação entre as diversas redes de acesso. A rede *core-network* deve ser escalável, transmitir grandes taxas de dados, atingir elevadas distâncias, mantendo o padrão de qualidade da informação ao máximo. Como redes *core-network* operam em grande escala, indo da esfera nacional até intercontinental, são capazes de conduzir tráfego de terabites por segundo.

A rede de acesso é encarregada pela interligação dos comutadores, que se encontram situados nas centrais locais ou central office, aos equipamentos dos clientes. Na Figura 4 vemos um exemplo de rede de acesso, com a utilização de tecnologia de fibra ótica e divisores de rede passivos, que tem como atribuição o transporte de serviços, tanto para clientes empresariais quanto residenciais (BENZINHO, 2011).

Figura 4 – Estrutura de uma rede óptica passiva.



Fonte: Silva (2015).

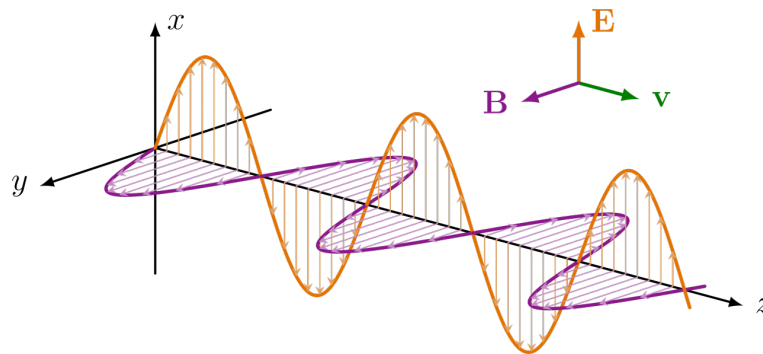
São diferentes os tipos de tecnologias que as redes de acesso têm para possibilitar a interligação até os clientes finais, como, por exemplo: par entrelaçado de cobre, cabo coaxial, FO e *wireless*, e vale salientar que essas tecnologias podem ser operadas simultaneamente, de forma a potencializar e maximizar a transmissão dos dados, bem como reduzir os custos de implantação e infraestrutura (AGUIAR, 2022).

Por fim, a rede do cliente, as redes locais, são redes de pequena dimensão, localizadas e postas em residências ou edifícios, e que provem a ligação do usuário final por meio da rede de acesso vista anteriormente, acesso este que efetua comunicação por meio de tecnologia *Local Area Network* (LAN) ou *Wireless Local Area Network* (WLAN), segundo o *Internet Protocol* (IP) (LOPES, 2011).

## 2.2 Princípios das Comunicações Ópticas

A definição acerca da luz passou por várias alterações no decorrer da história, onde no século XVII, por exemplo, teorizava-se que a luz seria um fluxo de algumas minúsculas partículas que viajavam em linha reta e eram emitidas por fontes luminosas, e essas partículas eram capazes de penetrar matérias transparentes, mas eram refletidas em matéria opaca, o que corroborava alguns efeitos ópticos como reflexão e refração, mas falhava em justificar fenômenos como difração e interferência. Somente em 1864 que James Clerk Maxwell propôs que a luz seria uma onda constituída por um campo elétrico e magnético, assim como mostra a Figura 5. Além disso, constatou-se que as ondas de luz são de formatos transversais tendo como base a observação de seus efeitos de polarização (KEISER, 2014).

Figura 5 – Uma onda eletromagnética é uma oscilação que se propaga no campo elétrico e magnético.



Fonte: Hosti (2021).

### 2.2.1 Efeitos de refração e reflexão

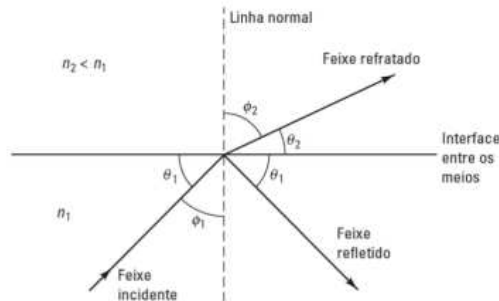
Uma propriedade óptica essencial para um material é seu índice de refração, que é, portanto, utilizado para a fabricação de cabos de FO.

A fórmula  $c = v \cdot \lambda$  relaciona a velocidade da luz à frequência e ao comprimento de onda, onde  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $v$  a frequência da onda luminosa e  $\lambda$  o comprimento da onda. A luz, ao entrar em um meio não condutor ou material dielétrico, passa a se mover em uma nova velocidade  $s$ , que é uma velocidade específica do material e menor que a velocidade  $c$ . Assim, o índice de refração do material ( $n$ ) será dado pela nova razão  $n = \frac{c}{s}$ .

As noções de reflexão e refração podem ser melhores explicadas ao considerar o comportamento dos raios de luz associados às ondas planas que se movem por um material não condutor. Quando um raio luminoso se move até um ponto onde percorre em dois meios

distintos, parte do raio é refletido e o restante refratado, assim como mostra a figura 6, onde  $n_2 < n_1$  (KEISER, 2014).

Figura 6 – Refração e reflexão de um feixe de luz em uma interface material.



Fonte: Keiser (2014, p.37).

### 2.2.2 Lei de Snell-Descartes

A refração ou flexão de um raio luminoso é um resultado da variação na velocidade de dois ou mais materiais, com índices de refração distintos. A relação entre esses materiais que possuem índices diferentes é conhecida como Lei de Snell (ou segunda lei da refração) e dada por  $n_1 \sin \Phi_1 = n_2 \sin \Phi_2$ , cujos ângulos são mostrados na figura 6. O ângulo ( $\Phi_1$ ) que está entre o feixe incidente e na linha normal a superfície é conhecido como ângulo de incidência (KEISER, 2014).

Quando um raio luminoso passa de um meio de menor densidade para um de maior densidade, a velocidade da luz diminui e o raio se aproxima da linha normal, então, o ângulo que o raio forma com a linha normal diminui, como é mostrado na figura abaixo.

Figura 7 – Passagem da luz de um meio mais refringente para um meio menos refringente.



Fonte: Marques (2023).

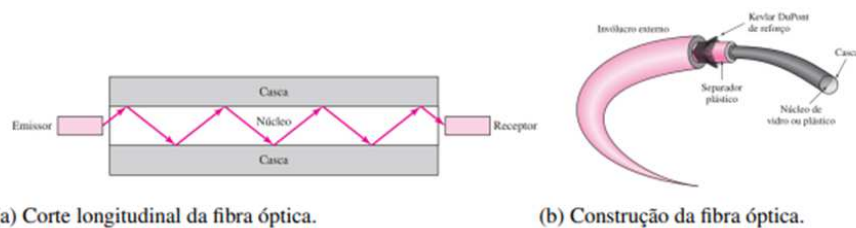
### 2.3 Estrutura Básica das Redes Ópticas

As fibras ópticas, apesar de terem diversas aplicações, são mais utilizadas para a transmissão de dados. Geralmente possuem espessura por volta de  $10^{-6}m$  e podem atingir vários quilômetros de comprimento. São compostas de filamentos flexíveis de material transparente para conseguir propagar a luz de forma adequada.

O núcleo das FO tem alto índice de refração, além de ter um revestimento transparente de menor índice de refração. A reflexão interna total da luz é o fenômeno físico que permite a utilização da FO, e para que o mesmo ocorra, a luz deve ser emitida para o interior do núcleo em um ângulo mínimo de incidência, conhecido como ângulo limite (ou ângulo crítico). Com isso, a luz consegue ser propagada por grandes distâncias sem perder intensidade.

As FO conseguem fazer a propagação de várias cores ou comprimentos de onda pelo processo de multiplexação, onde permite a transmissão simultânea de informações que são utilizadas geralmente em telefone, televisão e dados de internet. Como as cores se misturam quando são emitidos diferentes comprimentos de onda, formando um único feixe branco por meio da síntese aditiva, é utilizado nos terminais dos cabos uma espécie de prisma para a dispersão da luz, separando novamente as cores e, assim, exibindo seu espectro discreto de cada comprimento de onda antes unificados (HELERBROCK, 2023).

Figura 8 – Estrutura da fibra óptica.

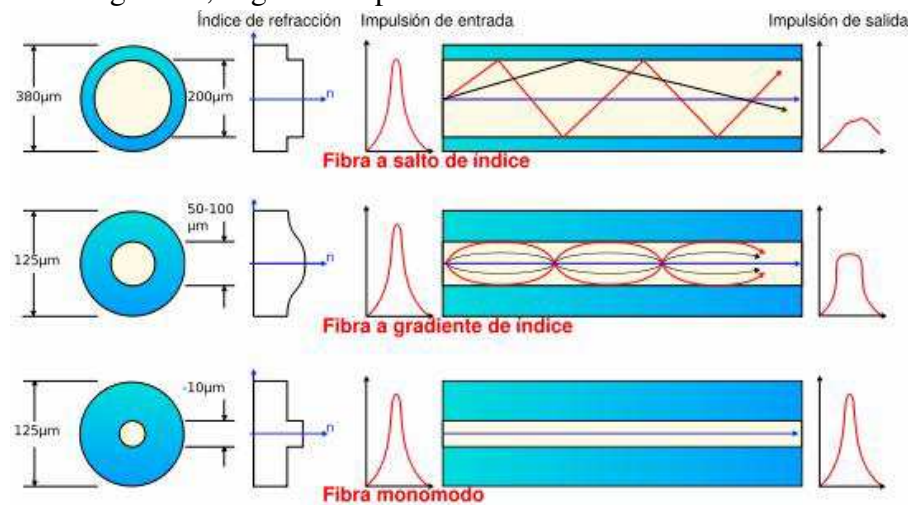


Fonte: Forouzan (2010).

Com o uso de materiais distintos ou dopagens convenientes de semicondutores na sílica, é possível obter diferentes índices de refração entre o núcleo e a casca e, de acordo com esses índices, as fibras são classificadas em perfil de índice degrau ou perfil de índice gradual.

Características tais como geometria, perfil de índices, materiais e processos utilizados na fabricação da fibra vão definir sua capacidade de transmissão, níveis de atenuação, frequências ópticas, bem como características mecânicas. As FO tem como característica um ângulo de aceitação (ou admissão) que limita a incidência da luz em relação ao eixo normal de modo que esta consiga penetrar no cabo.

Figura 9 – Índices gradual, degrau e dispersão Modal.



Fonte: Pereira (2023).

Feixes com ângulo superior ao de aceitação não preenchem os requisitos para a reflexão total, sendo assim, não conduzidos.

Em relação aos modos, a FO é classificada em monomodo ou multimodo, e esta última divide-se em duas subespécies: índice degrau ou abrupto e índice gradual.

O índice degrau se diferencia pelo fato de que o índice de refração do núcleo é uniforme e totalmente distinto do índice da casca, e a refração acontece, portanto, somente entre o núcleo e a casca. Tem como vantagens o fato de que a fibra capta energia luminosa, o que permite o uso de emissores de menor custo, bem como possui um perfil de índices de disposição simples, e as suas grandes dimensões contribuem para a conectividade e fabricação, tornando este sistema econômico e de fácil produção. Por outro lado, traz como desvantagem a grande dispersão modal, causada pelos altos valores de abertura numérica e o elevado número de modos dentro da fibra, o que torna sua utilização indicada apenas para curtas distâncias.

Na fibra de índice gradual, o núcleo aumenta gradativamente o índice de refração do eixo central para a periferia, ocorrendo uma refração gradual quando os raios vão se aproximando das bordas. Esta fibra é indicada para uso em sistemas de telecomunicações, pois, diferentemente das fibras de índice degrau, possuem aberturas numéricas menores e menos modos dentro da fibra, uma maior banda passante e, portanto, atingem maiores distâncias. Apesar disso, ainda não é indicada para longas distâncias.

As fibras monomodo, por sua vez, possuem núcleo finíssimo, de poucos micrômetros, e uma casca de tamanho convencional, pois necessita da densidade e espessura para aguentar ou tolerar os campos eletromagnéticos. Esse tipo de fibra possui apenas um caminho para a luz, ou seja, um único modo, e nelas a luz deve ser estudada como onda eletromagnética e não como

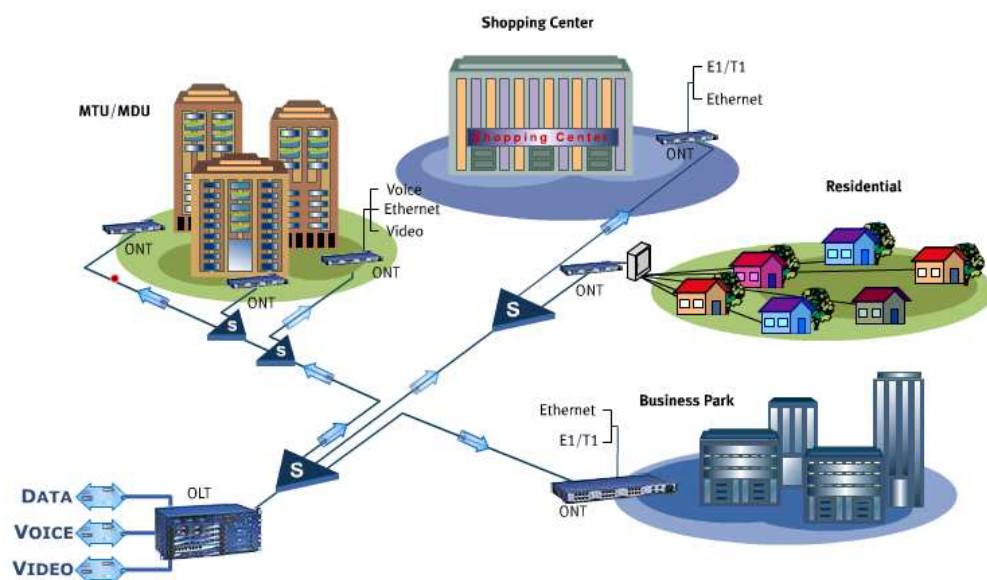
partícula. Sua fabricação é de maior complexidade, visto a necessidade de fios e acopladores para fibras tão finos. Neste tipo, a dispersão modal é nula, e a desvantagem está no fato de que as pequenas dimensões requerem uma qualidade alta, o que eleva o custo. São fibras indicadas para médias e longas distâncias, utilizadas, por exemplo, intercontinentalmente (PEREIRA, 2023).

## 2.4 Redes Ópticas Passivas

A topologia utilizada nas redes PON é a ponto-multiponto, onde o meio é compartilhado por múltiplos clientes que utilizam da mesma largura de banda. Essas redes possuem elementos passivos (splitters) que dividem a largura da banda na fibra em até 64 clientes, e no máximo 20km de distância. Elementos passivos não necessitam de energia elétrica para seu funcionamento, sendo assim, esse tipo de rede, que é equipada com esses elementos, é definida como rede passiva. Salvo as exceções do *Central Office* e do equipamento terminal do cliente, que esses utilizam energia elétrica.

Comparando com a arquitetura ponto-a-ponto, a configuração PON reduz a quantidade de fibras e equipamentos necessários na central local além de reduzir os custos de operação e manutenção.

Figura 10 – *Passive Optical Networks*.

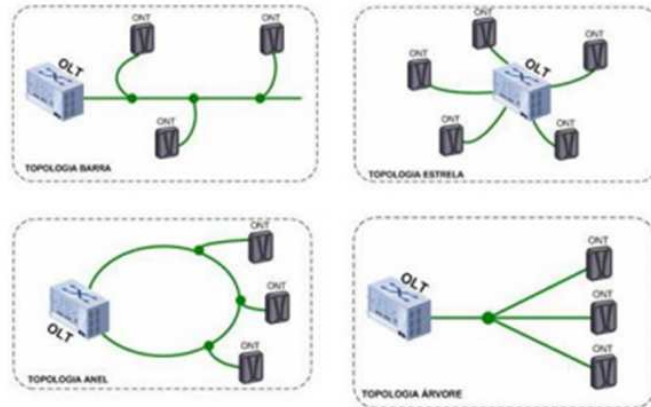


Fonte: REACHOPTICS (2019).

Essa tecnologia emprega configurações em forma de barramento, estrela, anel ou árvore (conforme ilustrado na Figura 10) para possibilitar a comunicação entre diversos usuários

finais. Em uma Rede PON, os fluxos de dados que vão do provedor para o cliente e os fluxos de dados que vão do cliente para o provedor são tratados de maneira distinta. Os sinais de dados que seguem do provedor para o cliente são distribuídos para todas as instalações, utilizando a mesma FO. O sinal transmitido pela *Optical Line Terminal* (OLT) é captado por todas as *Optical Network Unit* (ONU) e cada uma seleciona as informações pertinentes. Esses sinais são criptografados para que somente uma instalação específica tenha acesso às informações transmitidas. Na transmissão de dados no sentido ascendente, as ONU compartilham o meio físico. Elas acessam o meio físico em momentos distintos usando um protocolo conhecido como *Wavelength Division Multiplexing* (TDMA) ou empregam tecnologias mais recentes de multiplexagem, como o *Wireless Local Area Network* (WDM). As informações provenientes dos usuários são então integradas e encaminhadas para a FO em direção à OLT. Dois comprimentos de onda são utilizados: 1310 nm para a transmissão ascendente e 1510 nm para a transmissão descendente. O comprimento de onda de 1550 nm é comumente reservado para a transmissão de sinais de vídeo analógicos (LOPES, 2011).

Figura 11 – Topologia das Redes PON.



Fonte: REACHOPTICS (2019).

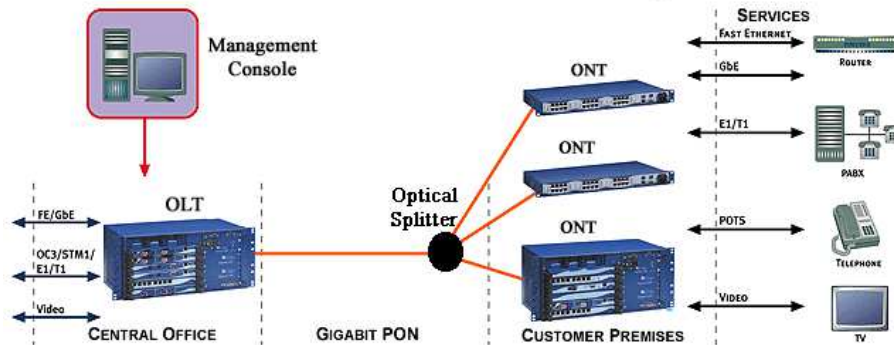
## 2.5 Principais Componentes da Rede PON

Conforme descrito, a rede PON opera sem a necessidade de alimentação elétrica nos dispositivos que transmitem os dados. Nesse tipo de rede, um sinal óptico é injetado e distribuído para todos os usuários conectados a ela. O sinal é dividido no splitter de maneira equilibrada ou desequilibrada, distribuindo-o ao longo da rede, desde a OLT até as Unidades de Rede Óptica ONU. São alimentados eletricamente somente os dispositivos nos pontos de



transmissão e recepção. Na Figura 12, você pode ver o esquema básico de uma rede PON. Os principais componentes da mesma serão detalhados nas seções subsequentes (AGUIAR, 2022).

Figura 12 – Rede PON detalhada.



Fonte: REACHOPTICS (2019).

### 2.5.1 *Optical Line Terminal (OLT)*

O OLT, que fica localizado no *Central Office (CO)*, faz interface com a rede metropolitana e deve ser de alta potência para enviar sinais ópticos, que são divididos em vários fluxos. Sua principal função é adaptar o tráfego de entrada dos anéis metropolitanos para a camada de transporte PON (REACHOPTICS, 2019).

Figura 13 – OLT da fabricante FiberHome.



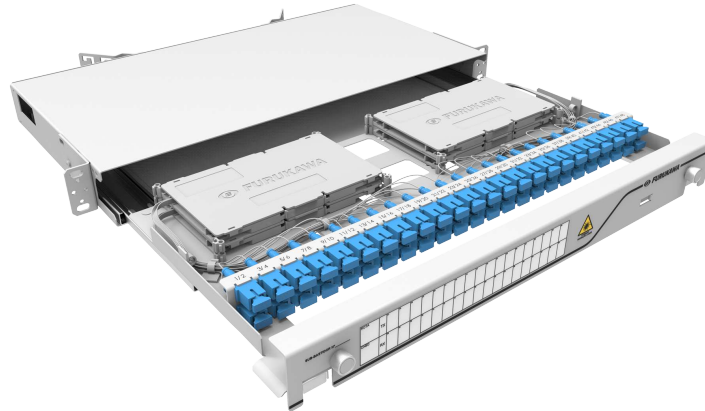
Fonte: Catálogo da FiberHome, 2023.

### 2.5.2 *Distribuidor Interno Óptico (DIO)*

O Distribuidor Interno Óptico (DIO) é um equipamento onde são acomodadas as fibras dando maior flexibilidade e manobras para os cabos ópticos dentro dos armários ópticos (SOUSA, 2018).



Figura 14 – DIO da fabricante Furukawa.

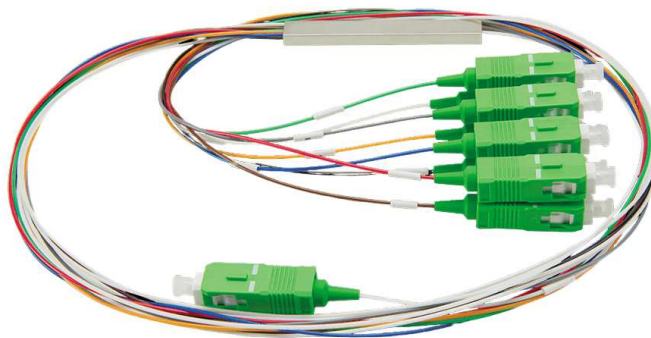


Fonte: Catálogo da Furukawa, 2023.

### 2.5.3 Divisores Ópticos (Splitters)

Com um único equipamento, os splitters conseguem atender até 64 clientes, o que torna desnecessário a inclusão de muitos multiplexadores ou instalação de muitos gabinetes. Os divisores ópticos podem ser organizados em configurações de estrela, anel ou árvore para aumentar sua confiabilidade (REACHOPTICS, 2019).

Figura 15 – Modelo de Splitter 1x8 balanceado.



Fonte: Catálogo Fiberx, 2023.

### 2.5.4 Optical Network Unit (ONU) ou Optical Network Terminal (ONT)

O *Optical Network Terminal* (ONT), que fica localizado nas instalações da casa do cliente, e ONU, que está localizado fora da casa do cliente, são praticamente o mesmo dispositivo, e promovem a interface entre o equipamento do cliente e a rede PON, se comunicando com o OLT através da mesma (REACHOPTICS, 2019).

Figura 16 – ONU da fabricante FiberHome.



Fonte: Catálogo da FiberHome, 2023.

### **2.5.5 Caixa de Emenda Óptica (CEO)**

Caixa de Emenda Óptica (CEO) serve para amplificar e dar continuidade de ligação. As emendas são inseridas juntamente com outros componentes passivos dentro da CEO, mostrada na Figura 17 (SOUSA, 2018).

Figura 17 – CEO da fabricante Furukawa.



Fonte: Catálogo da Furukawa, 2023.

### **2.5.6 Caixa de Terminação Óptica (CTO)**

Caixa de Terminação Óptica (CTO) é aplicada como terminação do cabo backbone para efetuar a conexão com o cabo drop de acesso aos clientes (SOUSA, 2018).

Figura 18 – CTO da fabricante Furukawa.



Fonte: Catálogo da Furukawa, 2023.

### 2.5.7 Conectores e Emendas

Para construir uma rede óptica, é necessário um cauteloso planejamento, afim de atingir confiabilidade e flexibilidade. Para isso, é necessário tomar algumas decisões: utilizar emendas ópticas ou uso de conectores para junção dos cabos da rede, lembrando que o hardware passivo que irá operar junto aos cabos ópticos deve ser conectado de modo a obter uma maior eficiência, ou seja, melhor desempenho com a menor perda possível para o sistema.

Partindo do princípio que emenda é uma junção permanente de dois segmentos de FO, são utilizadas, por exemplo, quando há necessidade de reparo no sistema devido a rompimentos do cabo óptico ou para aumentar um lance de FO quando o comprimento do cabo disponível não é o suficiente. Há duas formas de realizar a emenda: por fusão e mecânica.

A emenda por fusão corresponde ao aumento de temperatura nas faces da fibra, que dissolve e funde a FO, e é o procedimento com melhor desempenho à perda por inserção e retorno. É realizada com auxílio da máquina de emenda por fusão, que diminui o risco de perda no desempenho, e as fibras são alinhadas pelo núcleo. A perda de desempenho corresponde a 0,05 dB, em média, como visto na Figura 19

A emenda mecânica alinha as fibras com uso de estruturas mecânicas, não necessitando de maquinário para isso. Correspondem a travas que não permitem a movimentação da fibra no seu interior, contendo um tubo com líquido que fica entre as fibras, o líquido casador de índice de refração, e sua função é diminuir as perdas por reflexão. Por ter seu tempo de execução menor, é utilizada provisoriamente para reparos de emergência, necessitando apenas de decapador e clivador de fibra para sua execução (PINHEIRO, 2017).

Figura 19 – Máquina de fusão da fabricante Fujikura.



Fonte: Catálogo da Fujikura, 2023.

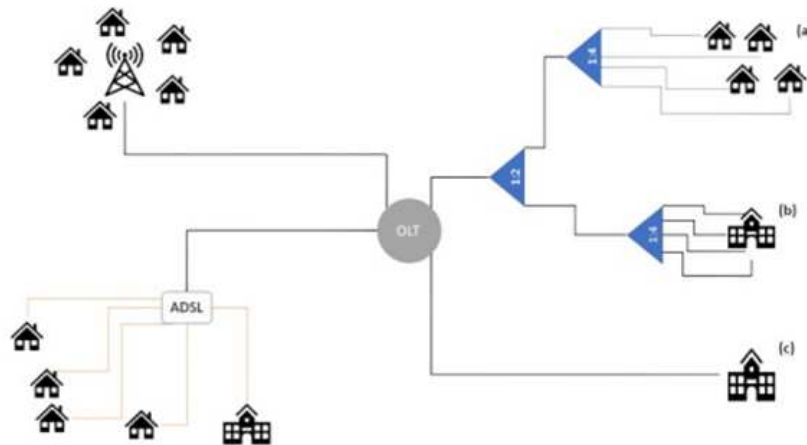
## 2.6 Arquitetura FTTX

Para preservar o alto desempenho na transmissão dos dados, no início, os projetos de FO eram realizados no esquema de rede ponto-a-ponto e, após a conexão estabelecida, as empresas provedoras faziam a mudança para o cabeamento de cobre para distribuição do sinal aos clientes. Como o custo de produção ficou menor, os cabos de FO são a tecnologia dominante entre as empresas provedoras. O termo *Fiber to the x* (FTTx), é um termo que abrange a estrutura necessária para realizar a conexão entre o provedor e os clientes, em que "x" é o tipo de cliente, podendo ser residência, instalação, armário de distribuição ou outro provedor. Assim, para ser possível essa arquitetura, são necessários equipamentos que emitem o sinal, como o OLT, acopladores mecânicos e divisores de sinal (splitters), responsáveis por distribuírem o sinal ao longo da rede, e receptores ONU ou ONT, que ficam localizados nas estruturas dos clientes. A Figura 20 ilustra um esquema que permite identificar os diferentes tipos de redes FTTx (TORMANN, 2023).

Os clientes, por sua vez, podem ser:

- *Fiber to the Home* (FTTH) : onde a fibra chega até a casa do cliente;
- *Fiber to the Apartment* (FTTA): onde a fibra vai ao apartamento do cliente, em edifícios residenciais;
- *Fiber to the Desk* (FTTD): redes de empresas e corporativas, onde as fibras são arquitetadas para o espaço de trabalho;

Figura 20 – Representação esquemática de uma Rede FTTx.



Fonte: Tormann (2023).

- *Fiber to the Curb* (FTTC): onde a fibra vai até uma esquina ou calçada, e é então transferida para outra tecnologia, como exemplo, o par metálico;
- *Fiber to the Building* (FTTB): onde chega até uma empresa e em seguida é convertida em outra tecnologia.

As fibras podem, até mesmo, serem utilizadas até as torres de telecomunicações (TORMANN, 2023).

## 2.7 Topologias

A topologia da rede óptica é dada pela forma física que a rede é construída para atender os usuários, deste modo existem diferentes configurações possíveis, cada uma com suas características específicas para atender os mais diversos cenários (AGUIAR, 2022). Algumas topologias básicas das redes PON serão descritas na sequência.

A forma física em que a rede é construída, sua topologia, pode ser descrita em algumas configurações, com base nas características específicas para atender os vários cenários, tais como:

- Topologia Anel: duas ONU são conectadas a uma OLT, criando dois segmentos, PON-A e PON-B. A partir da primeira ONU do segmento, que pode ser o A ou B, outras ONUs são conectadas, o que forma um barramento óptico, e cada ONU do barramento funciona como um splitter 1:1 ou um elemento passante como no *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH). Ao final, as últimas ONU da topologia se conectam entre si e fecham o anel óptico a partir de dois segmentos PON. Essa topologia tem a vantagem de redundância da rede,

configuração do custo métrico do tráfego, com possibilidade de indicação da direção mais veloz para o tráfego, oeste ou leste (SANCHEZ, 2004).

- Topologia Árvore: Nesse caso, as ONU são conectadas a uma OLT por um só segmento PON, e a partir dessa OLT, conecta-se a Deep Fiber, que é um segmento de FO, e que então recebe um derivador passivo (ou splitter), que crie, no mínimo, dois sub-segmentos de fibra, ou seja, fator de derivação 1:2, podendo ainda criar mais sub-segmentos. Esta topologia é vantajosa para ONU distantes da OLT ou quando estão em áreas sem ONU intermediárias, assim, pode-se por exemplo utilizar 15km de Deep Fiber e só então iniciar a derivação deste segmento (SANCHEZ, 2004).
- Topologia Barramento: As ONU são conectadas a OLT através da Deep Fiber, que então recebe vários derivadores splitter com fator de derivação 1:2, onde um sub-segmento serve de conexão para a ONU e outro de caminho para o próximo splitter. É vantajosa para o uso nas ruas, como FTTC, criando-se gabinetes de distribuição em calçadas e postes (SANCHEZ, 2004).
- Topologia Mista: uma topologia que abrange todas as configurações, mesclando-as da melhor maneira para atender a cada projeto específico (AGUIAR, 2022).

## 2.8 Métrica de Desempenho das Redes Ópticas

O orçamento de potência pode ser verificado em *downstream*, no sentido OLT para a ONU, e *upstream*, no sentido ONU para OLT. Para elaborar o orçamento de potência ou cálculo de atenuação óptica, os parâmetros a seguir devem ser levados em consideração, como: coeficiente de atenuação do cabo (dB/km) no comprimento de onda adotado, atenuação máxima das emendas por fusão, atenuação máxima dos conectores, atenuação máxima dos splitters, potência de saída de transmissão, sensibilidade do receptor. Além disso, tem de atender às especificações do transmissor e receptor e manter a taxa de transmissão dentro do erro admissível, como citam Pacifico (2018) e Aguiar (2022).

## 2.9 Grafos

Os grafos são meios matemáticos utilizados para a resolução de problemas em diversas áreas do conhecimento. Um grafo, portanto, é um conjunto de vértices e arestas, onde os vértices são pontos que representam, por exemplo, cidades, lugares, postes, entre outros.

Matematicamente, o grafo é representado por  $G = (V, A)$ , onde  $V$  é o vértice ou nós e  $A$  a aresta ou linha.

Também é possível representar um grafo por uma matriz de adjacência  $MAdj$ , indicando a relação de ligação entre todos os vértices do grafo. Assim, um grafo  $G(V, A)$  com  $n$  vértices seria representado por matriz  $n \times n$ . Os elementos da  $MAdj$  são preenchidos como:  $-0$  indica que não há ligação entre os vértices;  $-1$  indica que existe uma ligação entre vértices.

A utilização de grafos representados por matrizes simplifica a resolução de problemas de otimização nas redes ópticas, pois elabora matriz de distâncias entre pontos relacionados  $MDist$ . Assim, a matriz de distância está relacionada com matriz de adjacência, só que a  $MAdj$  oferece as informações de que os vértices estão ligados, mas não os custos ou distâncias entre eles. Já a matriz  $MDist$ , auxilia a determinar a menor distância entre dois nós, utilizando o algoritmo Dijkstra, que foi adotado por ser uma solução na busca do caminho mais curto em 50 grafos, assim como Barth (2016) e Dias (2018).

## 2.10 Algoritmo de Otimização por Algoritmo Genético

Em 1975, John Holland propôs o AG, baseado na Teoria da Evolução de Charles Darwin, a seleção natural, que defende a sobrevivência dos indivíduos mais hábeis e que melhor se adaptam ao longo das gerações. O AG, por sua vez, é um instrumento usado para otimizar problemas e impasses de diversos campos, como robótica, reconhecimento de padrões, identificação de parâmetros e sistemas, reconhecimento de voz, entre outros.

Para utilizar o AG, é necessário uma representação cromossômica, população inicial, métodos de cruzamento, seleção e mutação, quantidade de interações e função objetivo. Os genes dos indivíduos são mapeados conforme as variáveis que representam as soluções do problema. Como os genes são os parâmetros de entrada, a função objetivo elabora uma saída que representa a aptidão da provável solução. O valor da aptidão retrata quão eficiente é o indivíduo, bem como suas chances de avançar no processo de evolução (FILHO, 2018).

O procedimento de cruzamento utiliza o material genético dos pais, em uma nova combinação, para gerar os filhos. Esse procedimento não obrigatoriamente acontece em todos os pares de indivíduos selecionados, sendo associada uma probabilidade de ocorrência ao processo de cruzamento ( $Pc$ ). O cruzamento objetiva propagar os genes dos indivíduos melhor adaptados ao meio, e, portanto, quanto maior a variável  $Pc$ , maior será a quantidade do processo de cruzamento, o que pode acarretar na geração de seres com uma melhor adaptação pela

recombinação genética.

Na natureza, a mutação é uma modificação genética aleatória, o que gera uma nova estrutura cromossômica. Desse modo, por ser simples, pode ser adaptada a inúmeros problemas de otimização, recebendo uma probabilidade ( $P_m$ ) de ocorrer em cada indivíduo. O operador de mutação tem a função de criar diversidade na população, por mudanças aleatórias nos cromossomos de cada indivíduo. Isso porque o cruzamento, mesmo que efetivo e satisfatório, se torna conservador ao longo das gerações, o que ocasiona a perda de potencial nos indivíduos, assim, o operador de mutação funciona como prevenção a essa possibilidade, evitando a convergência para máximos locais.

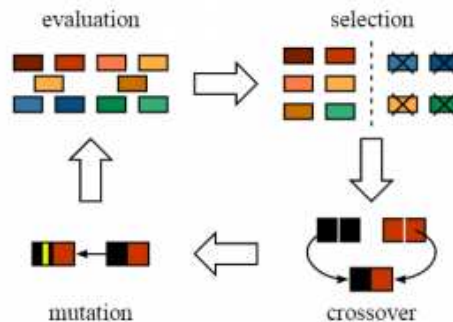
O mecanismo de seleção dos indivíduos que serão utilizados nos processos de mutação e cruzamento é importante, pois tende a distinguir os indivíduos que possuem melhores valores de aptidão, o que aumenta as chances da perpetuação de seus genes a cada geração. O mecanismo de seleção geralmente é construído com base nos indivíduos com melhores valores de aptidão, mas também é necessário que os indivíduos menos aptos façam parte das próximas gerações, pois isso propicia uma maior exploração do espaço de soluções (HOLLAND, 2009).

Tabela 1 – Relação de conceitos de Darwin e Holland

Teoria de Darwin	Algoritmo Genético
Ambiente	Problema
Indivíduo	Solução
População	Conjunto de Soluções
Gerações	Ciclos
Reprodução	Operador Crossover
Mutação	Operador Mutação

Fonte: Próprio Autor, 2023

Figura 21 – Representação de Ciclos.



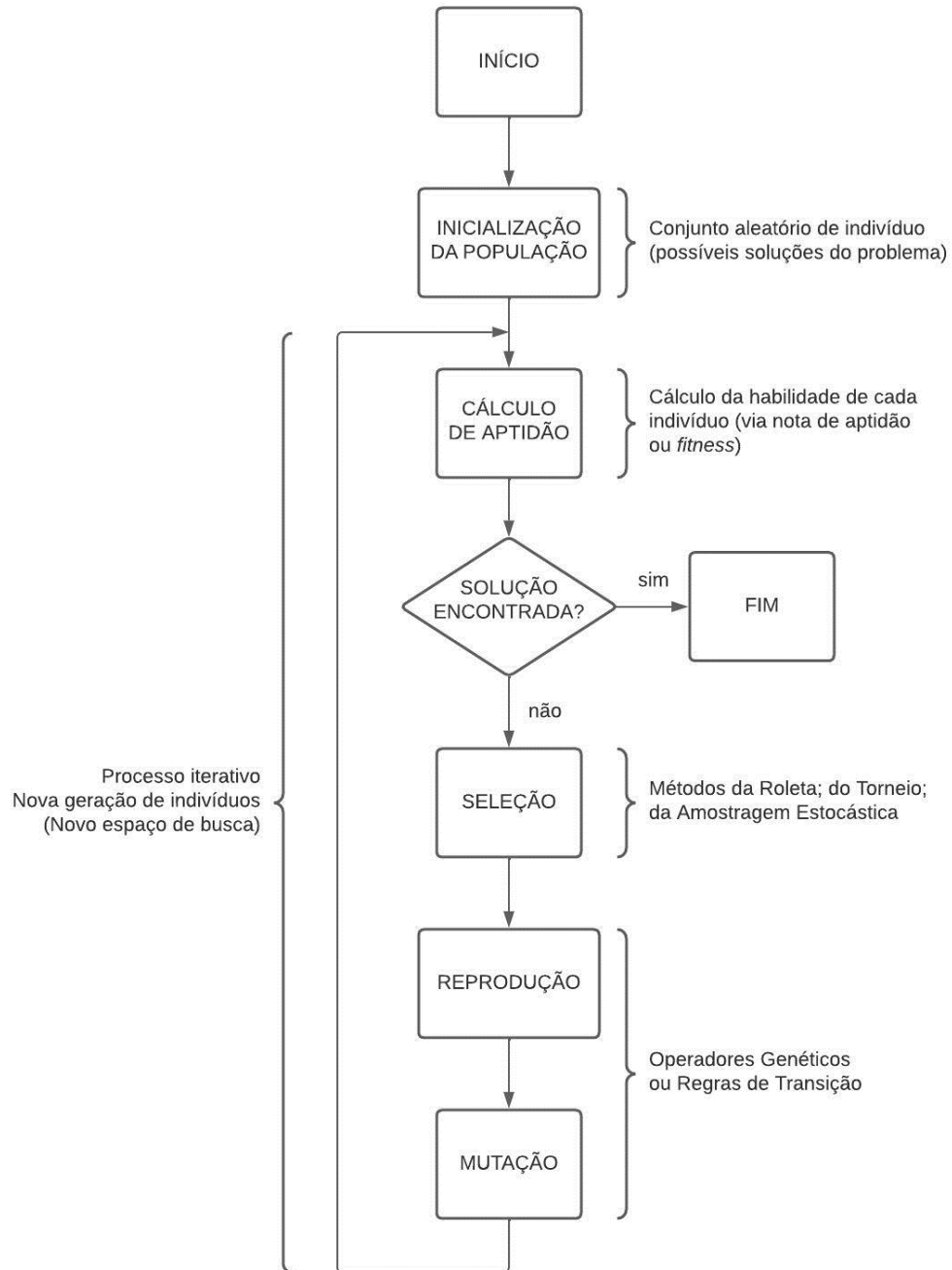
Fonte: Scholz (2023).



É preciso cumprir algumas etapas para a implementação do AG, tais como: codificação, onde as soluções possíveis são codificadas, usando strings, binário ou decimal, essas soluções codificadas são chamadas de cromossomos; função de adaptação ou *fitness function*, ou apenas *fitness*, vai indicar o quão bem um cromossomo se adapta à natureza do problema, e o *fitness* pode ser usado para avaliar se uma solução é melhor que a outra; assim, cromossomos com *fitness* alto tem maior chance de sobreviver e repassar suas características para as próximas gerações (SILVA, 2022).

O AG segue um fluxograma padrão, como mostrado na Figura 22. Dessa maneira, o mesmo combina o conceito da seleção natural, através do *fitness*, com a troca aleatória de informação, que seriam a reprodução e mutação, na intenção de presumir melhores pontos de busca, mimetizando, portanto, a evolução natural das espécies, ao passo de que cada geração (iteração do algoritmo) os cromossomos de maior *fitness* (mais adaptados) substituirão os cromossomos de menor *fitness*, e ao final de um número específico de gerações, a solução será dada pelo cromossomo com *fitness* maior (SILVA, 2022).

Figura 22 – Fluxograma básico de funcionamento de um Algoritmo Genético.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

### 3 METODOLOGIA

Nesse capítulo, é descrito a proposta de projetos de infraestrutura de redes ópticas, desde sua região geográfica do projeto até a implementação do Algoritmo Genético.

#### 3.1 Região geográfica do projeto

Deve-se seguir certas etapas para garantir o melhor resultado possível, de forma rápida e prática, para a elaboração de um projeto FTTH. Primeiramente a escolha e reconhecimento da região do projeto, podendo ser realizada em campo ou via softwares como Google Earth juntamente com os dados censitários da área.

Para o trabalho em questão, foi escolhida uma região da cidade de Piripiri-PI, envolvendo os bairros São João, Caixa D'água e Petercas. A cidade possui uma população de 65.538 habitantes e uma área territorial de 1.407,192 km<sup>2</sup>, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), tal como ilustrado na Figura 23.

Para a infraestrutura do projeto FTTH, serão utilizados postes da concessionária Equatorial Energia, sendo necessária uma solicitação de autorização para o uso de seus equipamentos. Autorizações desse tipo terão que ser encaminhadas à Equatorial, incluindo o projeto de compartilhamento de postes, sendo cobrado uma mensalidade por poste utilizado.

A região selecionada conta com uma área de 3,09 km<sup>2</sup> incluindo os três bairros já citados, como mostrado na Figura 23, sendo composto, em sua maioria, por imóveis residenciais, constituindo aproximadamente 700 construções. Tendo em vista que nem todos os imóveis irão utilizar o mesmo serviço, foi considerado uma taxa de penetração de 40%, diminuindo assim o número previsto de clientes.

Como complemento, a Figura 24, mostra a área de atendimento (em vermelho) e localização da OLT demonstrada logo abaixo.

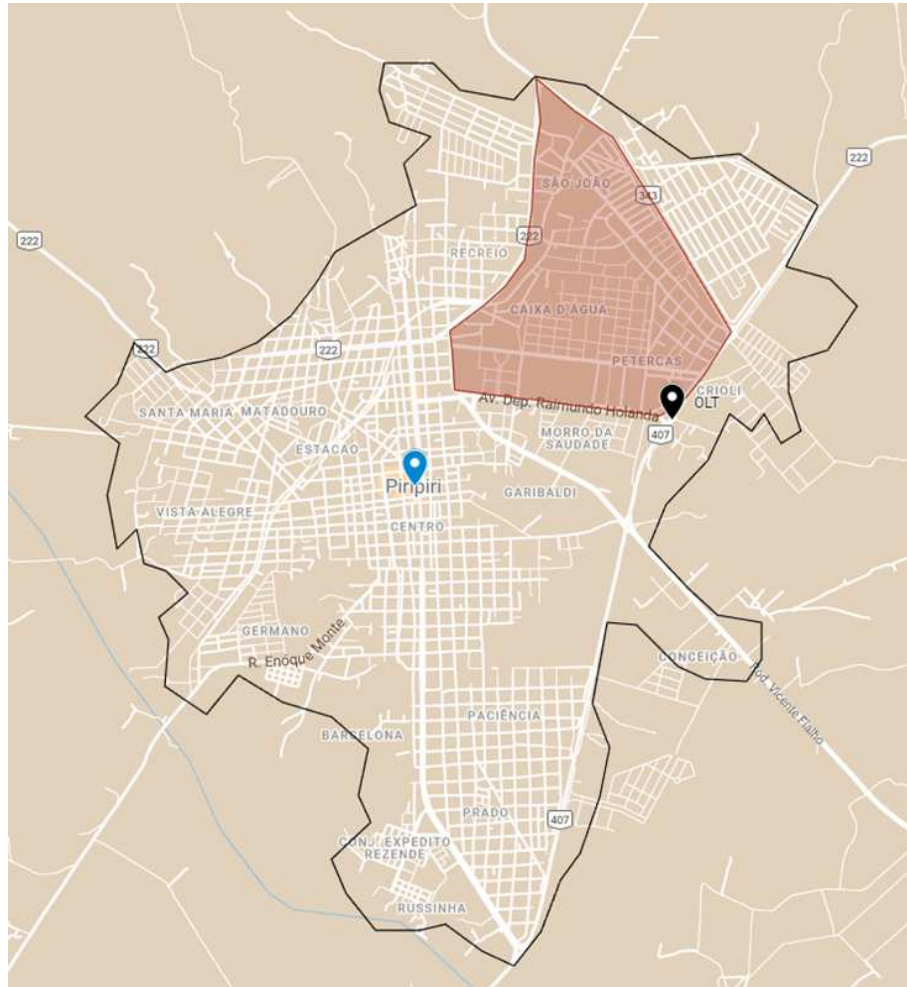
#### 3.2 Topologia adotada para otimização de rede GPON

Após a utilização da arquitetura FTTH e escolha da região adotada, passamos para a etapa de topologia da rede, que deve estar presente na literatura, além de não aumentar a complexidade do Simulador<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> É o programa utilizado para calcular os custos da infraestrutura da rede óptica. Quanto mais detalhes e regras a topologia agregar, mais blocos de funções serão necessárias ao simulador.

Figura 23 – Localização da região do projeto na cidade de Piripiri-PI.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Respeitando as limitações impostas para o projeto, foi definida a topologia mista centralizada, na qual se utiliza um único estágio de divisores ópticos de 1x64 armazenados em FDH (armários intermediários). O atendimento dos usuários é feito a partir de cada unidade de terminações do divisor óptico citado, onde se tem uma diminuição da quantidade de dispositivos passivos e aumento no número de cabos drop na rede externa (DIAS, 2018). Na Figura 25 podemos ver a representação simplificada de uma rede mista centralizada, onde observamos as CTOs que guardam os divisores ópticos citados anteriormente.

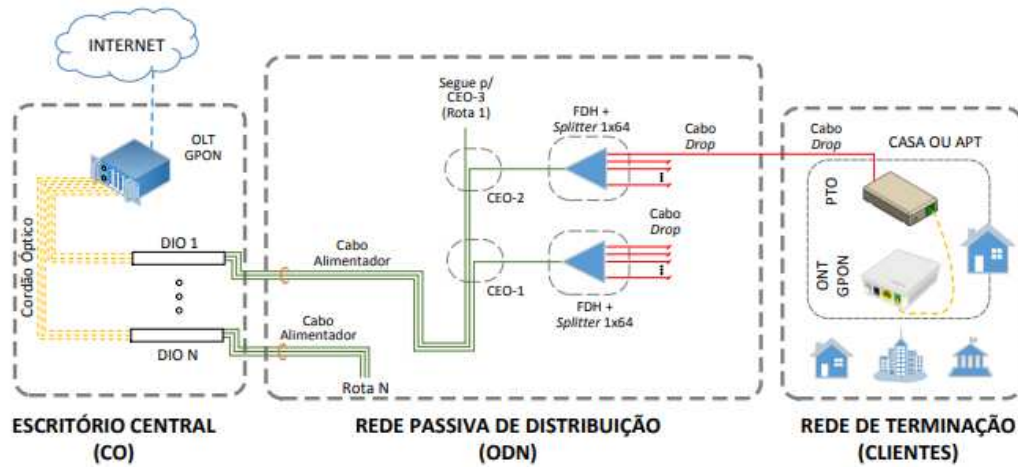
Tal topologia adotada não é muito veiculada dentre as ISP presentes na nossa região (OLIVEIRA, 2006), contudo simplifica em termos computacionais, uma vez que o simulador não necessita de uma camada de gerenciamento de informação para a CEO e outra para a CTO, os números de rotas que fazem a ligação entre a CEO e a CTO são reduzidas, baixando o tempo de processamento do algoritmo *Dijkstra* e a verificação de erros torna-se mais simplificada pelo programador.

Figura 24 – Região de atendimento e localização da OLT.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Figura 25 – Diagrama físico da rede que representa a topologia mista centralizada.



Fonte: Dias (2018).

### 3.3 Processo de importação da região geográfica do projeto

Após a definição da região geográfica do projeto, será iniciado o processo de importação dos dados que contém as informações detalhadas de toda a infraestrutura da área (localização dos postes e devidas ligações). Para o processo de envio da região do projeto para o *software Matlab*, foi utilizado um arquivo para a junção de toda a rede óptica, seguindo os processos de coleta dos postes e criação das ligações, junção das bifurcações, conversão dos dados e, por fim, importação dos dados no *Matlab*.



### 3.3.1 Coleta de postes e criação das ligações

Para este projeto de rede óptica FTTH, foram utilizados 421 postes devidamente especificados por suas coordenadas (latitude e longitude) com a utilização do software *Google Earth*, como mostra a Figura 26. Com os postes coletados, foram criadas as ligações entre os mesmos.

Figura 26 – Postes mapeados através de suas coordenadas no *Google Earth*.



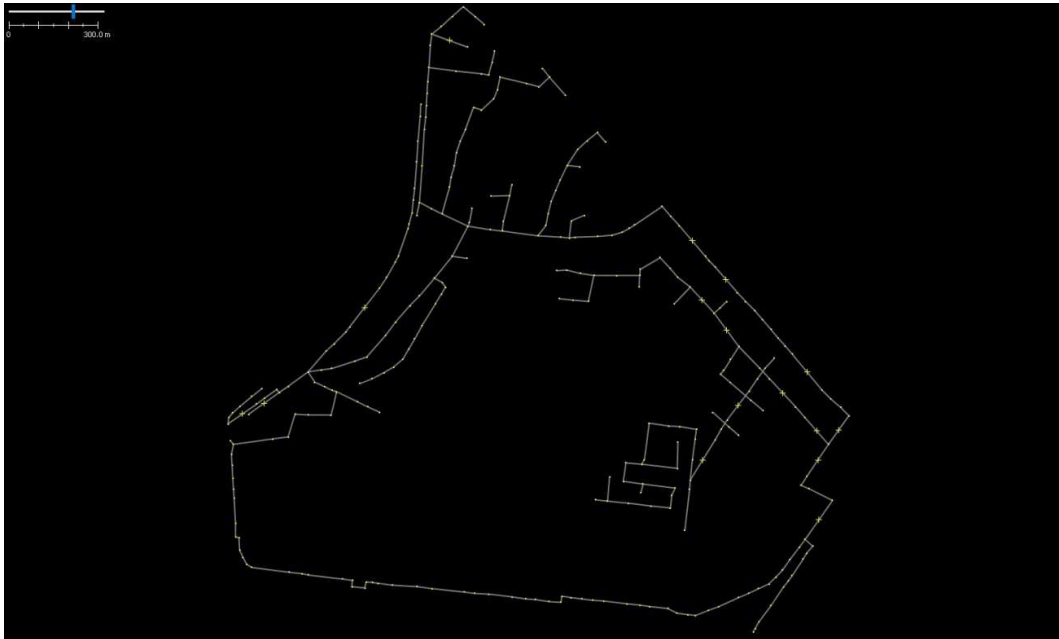
Fonte: Próprio Autor, 2023.

### 3.3.2 Junção das bifurcações

Logo após a coleta e ligação entre os postes escolhidos para o projeto, notou-se uma limitação do software *Google Earth* no que se refere a junção entre os pontos de ligação e bifurcações, sendo necessário então a utilização do software *Java OpenStreetMap Editor* (JOSM) como complemento.

Com o arquivo do *Google Earth* em formato kml, é feita a exportação dos dados para o JOSM (contando com a extensão Opendata previamente instalada), para que possa ser feito as edições na rede do projeto conectando os pontos, e assim, salvando o arquivo no formato gpx.

Figura 27 – Junção das bifurcações utilizando JOSM.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

### 3.3.3 Conversão dos dados

Finalizadas as ligações entre os postes no JOSM, obtivemos o arquivo em formato gpx, que, para o software *Matlab* reconhecer, terá que passar por uma conversão utilizando o GPS Visualizer<sup>2</sup>. Utilizando esse site, conseguimos o arquivo em formato txt, e assim, possibilitando organizar os dados de coordenadas e caminhos para ser possível a manipulação mais simplificada no *Matlab*.

### 3.3.4 Importação para o Matlab e criação do grafo

Com posse do arquivo de dados das coordenadas marcando os postes e ligações, é feita a importação para o software *Matlab*. Com isso pode-se iniciar o processamento das informações pelo simulador, como:

- Contagem do número de postes e caminhos: utilizando os dados presentes no arquivo, é possível quantificar os postes e ligações necessários para a criação da matriz de adjacência.

- Cálculo da distância dos caminhos por *Haversine*: como as informações resultantes do arquivo apresentam somente coordenadas, é utilizado o método de Haversine para encontrar a distância entre dois pontos mediante latitude e longitude (BRUMMELEN, 2017).

<sup>2</sup> Site que cria mapas e perfis a partir de dados geográficos. [www.gpsvisualizer.com](http://www.gpsvisualizer.com)

- Criação da matriz de adjacência: são verificados os caminhos e atribuído cada valor na matriz de adjacência, assim, se o caminho existe, atribui-se valor 1 e, caso contrário, atribui-se valor 0.

- Criação da matriz de menor distância por *Dijkstra*: com os dados resultantes, determina-se a rota de menor distância entre dois postes.

A simulação tem capacidade de criar um grafo que represente a região atendida, onde os vértices e arestas são definidos como postes e ligações respectivamente, como mostra na Figura 28.

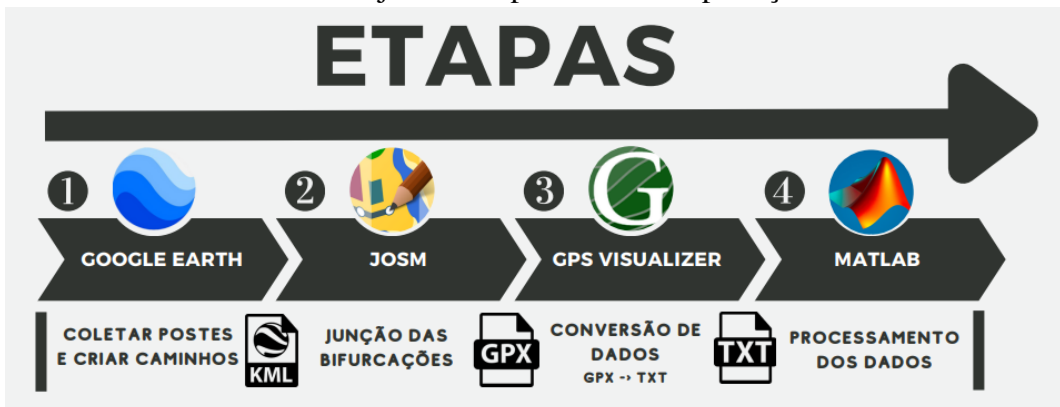
Figura 28 – Grafo da região do projeto fornecido pelo simulador.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

A figura a seguir apresenta as ferramentas utilizadas, tão como os objetivos em cada etapa:

Figura 29 – Ferramentas e seus objetivos no processo de importação dos dados.



Fonte: Próprio Autor, 2023.



### 3.4 Modelagem do sistema

Nesta etapa do projeto, será elaborado o modelo matemático para a definição dos custos de implementação da rede GPON, considerando tanto os custos com equipamentos como também outras variáveis, conjuntos, restrições e parâmetros, comentadas na sequência.

#### 3.4.1 Conjuntos

Serão definidos alguns conjuntos, pois devido a alguns equipamentos serem utilizados em quantidades e modelos distintos, o custo sofre variação. O Ponto de Presença (POP) é uma extensão da ISP, localizada em uma determinada região, responsável por prover conexão. Nos pontos de presença, estão localizados equipamentos como as OLT e DIO, assim, pode-se descrever o conjunto POP como:

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

No qual  $N$  é o número de pontos de presença utilizados no Projeto<sup>3</sup>. O conjunto  $P$  é formado pelos postes disponíveis na região de atendimento ( $p_d$ ), onde  $D$  representa a quantidade de postes disponíveis, assim:

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

O agrupamento formado pelas OLTs que estão ativas ( $o_m$ ), na ( $pop_n$ ), onde ( $N_{olt}$ ) é o número de OLTs em funcionamento num determinado POP, é descrito como:

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

O conjunto das CEO ( $e_l$ ), no qual ( $N_{ceo}$ ) é o número de CEO é representada por:

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

A representação do conjunto de CTO ( $t_a$ ) é dado pelo agrupamento definido em (3.5), onde ( $N_{cto}$ ) é a quantidade de CTO, assim:

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

Para finalizar, o agrupamento das ONU em funcionamento ( $u_i$ ) na área de atendimento, onde ( $N_{cli}$ ) é a quantidade total de clientes atendidos pela ISP, é descrita como:

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

<sup>3</sup> A rede trabalhada neste projeto possui apenas um POP, porém, é descrita de forma que sirva para projetos futuros no qual abrangem uma maior extensão.

### 3.4.2 Definições

Certas definições se tornam necessárias para a total compreensão do modelo matemático adotado no trabalho em questão. É feita a escolha da ordem das CEO ( $\rho_{ceo}$ ) e CTO ( $\rho_{cto}$ ), lembrando que a topologia que foi adotada para as CEO é somente para a função de emenda de fibra e não de divisões.

Tendo  $\rho_{ceo}$  correspondente a 1x64, o tamanho da célula<sup>4</sup>  $T_c$  utilizando uma taxa de penetração<sup>5</sup>  $T_p$  será de:

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

De modo a ter uma quantidade para  $N_{cto}$  e  $N_{ceo}$ , é necessário a indicação do quantitativo de clientes  $\kappa$  na área atendida, além de realizar a multiplicação entre a ordem da CEO utilizada pelo quantitativo de CTO, assim temos:

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

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

Sempre que o resultado demonstrar ser um número não inteiro, será feito uma aproximação para o maior inteiro em sequência. Quanto a ligação entre os equipamentos utilizados, tornou-se necessário a definição de quatro matrizes que associam a distância, resultante do algoritmo *Dijkstra*. A matriz inicial relaciona a ligação entre a OLT e a CEO tendo como representação  $\Gamma_{N_{olt} \times N_{ceo}}$ , no qual  $\gamma_{1,1}$  representa a distância entre a  $OLT_1$  e a  $CEO_1$ .

Sendo  $\Gamma = (\gamma_{ml})_{N_{olt} \times N_{ceo}}$ , onde  $1 \leq m \leq N_{olt}$  e  $1 \leq l \leq N_{ceo}$ , com  $m, l \in N^*$ , temos:

$$\Gamma_{N_{olt} \times N_{ceo}} = \begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \gamma_{1,2} & \cdots & \gamma_{1,N_{ceo}} \\ \gamma_{2,1} & \gamma_{2,2} & \cdots & \gamma_{2,N_{ceo}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{N_{olt},1} & \gamma_{N_{olt},2} & \cdots & \gamma_{N_{olt},N_{ceo}} \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

A matriz secundária relaciona a ligação entre CEO tendo como representação  $\Gamma'_{N_{ceo} \times N_{ceo}}$ , no qual  $\gamma'_{1,2}$  representa a distância entre a  $CEO_1$  e a  $CEO_2$ .

<sup>4</sup> Tamanho da célula se dá pela ordem de divisão do splitter e taxa de penetração.

<sup>5</sup> Taxa de penetração é descrita como a porcentagem de clientes que podem aderir a rede.

Sendo  $\Gamma'(\gamma'_{ll})_{N_{ceo} \times N_{ceo}}$ , onde  $1 \leq l \leq N_{ceo}$ , com  $l \in N^*$ , temos:

$$\Gamma'_{N_{ceo} \times N_{ceo}} = \begin{bmatrix} \gamma'_{1,1} & \gamma'_{1,2} & \cdots & \gamma'_{1,N_{ceo}} \\ \gamma'_{2,1} & \gamma'_{2,2} & \cdots & \gamma'_{2,N_{ceo}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma'_{N_{ceo},1} & \gamma'_{N_{ceo},2} & \cdots & \gamma'_{N_{ceo},N_{ceo}} \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

A terceira matriz relaciona a ligação entre a CTO e a CEO tendo como representação  $\Omega_{N_{cto} \times N_{ceo}}$ , no qual  $\omega_{1,1}$  representa a distância entre a  $CTO_1$  e a  $CEO_1$ .

Sendo  $\Omega(\omega_{al})_{N_{cto} \times N_{ceo}}$ , onde  $1 \leq a \leq N_{cto}$  e  $1 \leq l \leq N_{ceo}$ , com  $a, l \in N^*$ , temos:

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

E por fim, a quarta matriz relaciona a ligação entre a ONU e a CTO tendo como representação  $\Psi_{N_{onu} \times N_{cto}}$ , no qual  $\psi_{1,1}$  representa a distância entre a  $ONU_1$  e a  $CTO_1$ .

Sendo  $\Psi(\psi_{ia})_{N_{cto} \times N_{ceo}}$ , onde  $1 \leq i \leq N_{cli}$  e  $1 \leq a \leq N_{cto}$ , com  $i, a \in N^*$ , temos:

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

Devido a parte do custo do projeto se dar pelo valor das fibras, faz-se necessário definir os valores das fibras utilizadas no backbone  $P_{backbone}$ , na distribuição  $P_{distribuio}$  e no atendimento  $P_{atendimento}$ . Com isso, o curso da FO utilizada no backbone possui um total de três termos, sendo eles:

- Margem para reserva técnica  $\zeta$ ;
- Elemento  $\gamma_{1,1}$  da matriz  $\Gamma$ ;
- Originário da matriz  $\Gamma'$ ;

Vale ressaltar sobre o segundo termo que, na topologia adotada, existe somente uma OLT que se conecta a CEO inicial. Sobre o terceiro termo, faz-se necessário somar a super diagonal pois as CEO utilizadas sofrem ligações sequenciais e não possuem fibras ópticas redundantes.

Assim, temos que:

$$C_{backbone} = P_{backbone} \times (\zeta + \gamma_{1,1} + \sum_{l=1}^{N_{ceo}-1} \gamma'_{l,l+1}) \quad (3.14)$$

O custo do condutor de distribuição, de acordo com a topologia adotada no trabalho, é calculado a partir do traço da matriz<sup>6</sup>  $\Omega$  onde cada CEO é ligada somente a uma CTO de mesmo índice, então:

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

Já para o condutor de atendimento, é somado todas as distâncias do cabo drop, assim:

$$C_{atendimento} = P_{atendimento} \times (\gamma + \sum_{a=1}^{N_{cto}} \sum_{i=1}^{N_{cli}} \psi_{i,a}) \quad (3.16)$$

Com isso, o custo total da FO é definido como:

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

Com os cálculos para o custo de fibra finalizados, deve-se calcular os custos também dos equipamentos, conectores e fusões realizadas. O custo total de todas as OLTs<sup>7</sup> utilizadas na rede, onde  $P_{olt}$  equivale ao valor de uma OLT é representada por:

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

O custo para as DIO utilizadas na rede, onde  $P_{dio}$  é o valor de uma DIO, estarão representadas por:

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

Em complemento, os custos das CTO e ONU, onde  $P_{cto}$  e  $P_{onu}$  são os valores unitários de cada equipamento, são dados pelas equações:

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

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

<sup>6</sup> Traço da matriz quadrada é uma função matricial que une a matriz a soma dos elementos de sua diagonal principal.

<sup>7</sup> Foi utilizado somente uma OLT neste trabalho, mas para representação matemática utilizamos a equação descrita.

Finalizando, o custo com fusões é dependente da quantidade de CTO pois em cada uma são necessárias três fusões, resultando na equação:

$$C_{fuso} = 3 \times N_{cto} \times P_{fusao} \quad (3.22)$$

Além disso temos os conectores, que serão utilizados dois tipos distintos. O conector tipo 1 será responsável por ligar os cordões ópticos na OLT e DIO, e o conector tipo 2 será utilizado para conectar os cabos drop nas CTO e ONU. Ambos os tipos de conector terão o mesmo valor no cálculo total, sendo  $P_{condutor}$ . O custo total é dado por:

$$C_{condutor} = 2 \times N_{ceo} \times P_{condutor} + N_{cli} \times P_{condutor} \quad (3.23)$$

Na equação anterior cada cordão é associado a uma CEO que utiliza um conector em cada extremidade, totalizando dois conectores. Para cada cliente também será necessário o uso de um conector em cada extremidade. Com isso, o custo total calculado para a rede GPON em questão será a soma de todos os custos descritos nessa seção. De modo a simplificar os cálculos foi excluído os custos quanto a mão de obra, e então especificados na equação abaixo:

$$C_{total} = C_{olt} + C_{dio} + C_{ceo} + C_{cto} + C_{onu} + C_{fusao} + C_{condutor} + C_{fibra} \quad (3.24)$$

### 3.4.3 Restrições

Serão adotadas algumas restrições para a melhor funcionalidade do software e não sobrecarga da rede, de modo que todos os possíveis clientes possam obter um sinal aceitável. Uma ONU deve ser conectada somente a uma CTO, que por sua vez, deve ser conectada a somente uma CEO; a CEO deve ser conectada somente a uma DIO, como também, não poderá ocorrer sobreposição de equipamentos no mesmo poste; a potência de recepção da ONU deverá ser maior que a sensibilidade mínima do mesmo e, por fim, a margem de potência não poderá ser negativa.

### 3.4.4 Parâmetros do projeto

Os parâmetros que foram definidos para o projeto em questão de acordo com a região de atendimento e valores técnicos dos equipamentos que serão utilizados estão apresentados logo abaixo. Vale ressaltar que os parâmetros que se referem a quantidade de clientes, taxa de

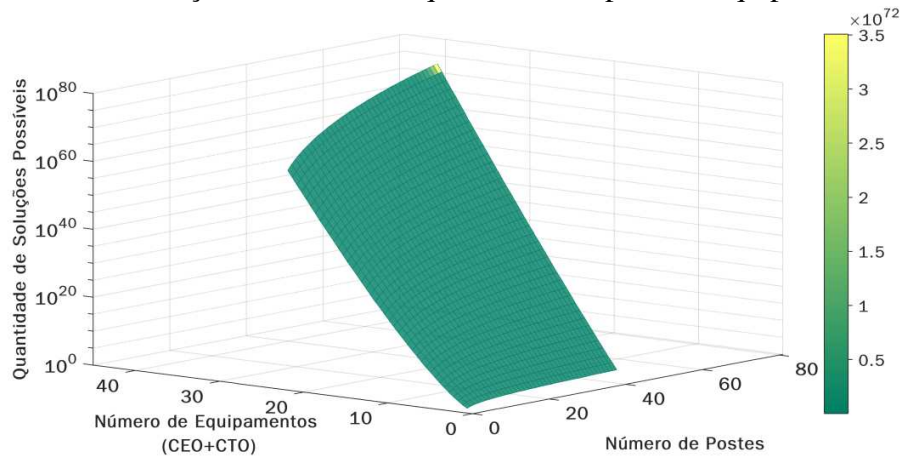
penetração e tamanho de célula dependem na área atendida, assim, influenciando no quantitativo total dos demais parâmetros utilizados.

- Quantidade de clientes  $\kappa$  : 700;
- Taxa de penetração  $T_p$  : 40%;
- Quantidade de clientes atendidos  $N_{cli}$  : 280;
- Ordem CEO  $\rho_{ceo}$  : 1;
- Ordem CTO  $\rho_{cto}$  :  $\frac{1}{64}$ ;
- Tamanho da célula  $T_c$  : 160;
- Quantidade de POP  $N$  : 1;
- Quantidade de postes  $D$  : 421;
- 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  $\gamma$  : 15%;
- Sensibilidade de recepção da OLT:  $-28dBm$ ;
- Sensibilidade de recepção da ONU:  $-27dBm$ ;
- Potência de transmissão da OLT:  $1,5dBm$ ;
- Potência de transmissão da ONU:  $1,5dBm$ ;
- Atenuação FO (Downstream):  $0,25dB/km$ ;
- Atenuação do conector:  $0,3dB$ ;
- Atenuação da fusão:  $0,08dB$ ;
- Atenuação da CTO:  $20,5dB$ ;

### 3.5 Implementação do Algoritmo Genético

Juntamente com o crescimento de uma rede GPON, aumentam as possibilidades de implementação, pois, quanto maior a área atendida, maior será o número de postes e equipamentos. Como mostra a Figura 30, é possível ter diversas possibilidades de implementação possíveis de acordo com essas variáveis descritas. Com isso em mente, tem-se uma implementação praticamente inviável se feita de forma manual, pois não seria capaz de chegar a uma análise precisa de custos para cada solução, sendo assim, necessário o uso de meta-heurísticas capazes de facilitar esse processo.

Figura 30 – Possíveis soluções com base na quantidade de postes e equipamentos.



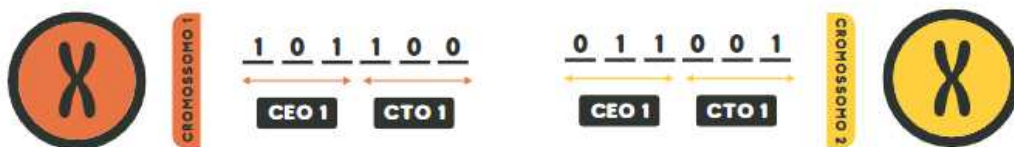
Fonte: Silva (2022).

Com isso, as meta-heurísticas se tornam indispensáveis nos problemas de otimização, por serem técnicas capazes de buscar soluções muito boas, além de diminuir o custo computacional por não ter a necessidade de calcular todas as possibilidades possíveis de um determinado problema.

Foi adotada no trabalho em questão a meta-heurística Algoritmo Genético, que utiliza como seu princípio a evolução natural, proposta por Charles Darwin. De modo a implementar o AG como forma de otimização da rede GPON proposta, o primeiro passo foi a inserção dos parâmetros do AG como número de gerações, tamanho da população, taxa de reprodução e probabilidade de mutação.

Em sequência, foi submetido a codificação e organização dos dados obtidos. Alguns genes dos cromossomos são responsáveis por informar a localização das CEO e CTO, sendo necessário encontrar a quantidade de bits suficientes para representar todas as possíveis localizações dos postes. É mostrado uma possível organização para dois cromossomos distintos na Figura 31, ambos de tamanhos iguais (seis bits tendo como exemplo uma rede composta por dois equipamentos, sendo uma CEO e uma CTO), de modo aos primeiros bits representarem a localização da CEO e os últimos a localização da CTO.

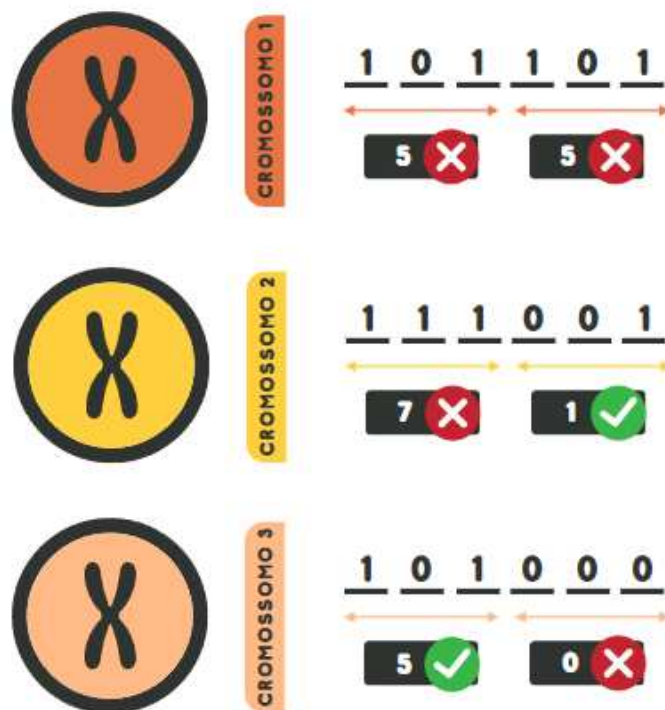
Figura 31 – Exemplo de codificação com dois cromossomos.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Após a codificação ocorrer nos cromossomos, ocorre a filtragem das soluções resultantes. Serão consideradas inaptas as soluções que tiverem valores nulos ou de uma unidade, além de posições acima do valor de nós disponíveis ou repetidos como mostrado na Figura 32. Em contrapartida, as soluções que se demonstrarem aptas serão consideradas como candidatas e sendo necessário a verificação quanto a viabilidade técnica do projeto, que se ocorre verificando o orçamento de potência (calculado pelas rotas derivadas do algoritmo *Dijkstra*) de cada cromossomo.

Figura 32 – Exemplo de cromossomos inaptos.



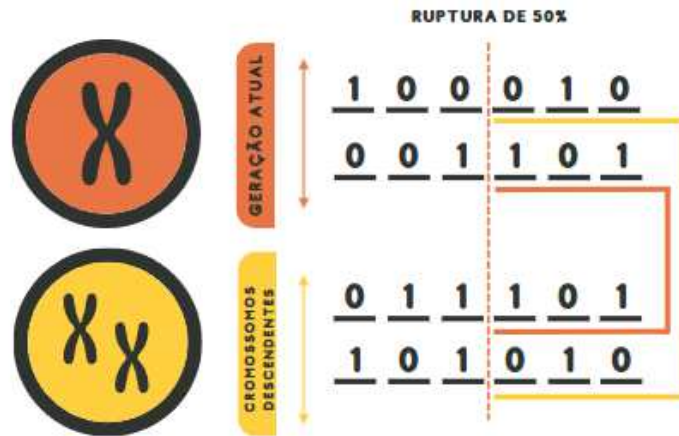
Fonte: Próprio Autor, 2023.

Nesse ponto, é feito o cálculo de aptidão do cromossomo, tendo como base o inverso do custo, e em decorrência, utilizado o método da roleta para a seleção dos pares de cromossomos que serão escolhidos para a reprodução. Neste método específico, cada cromossomo é representado de forma proporcional ao seu índice de aptidão, sendo assim, quanto maior seu valor de aptidão, maior sua região na roleta e, conseqüentemente, maior a chance de ser selecionado. Possuindo os pares de cromossomos selecionados, ocorre o processo de reprodução utilizando a taxa definida anteriormente. Para uma demonstração mais didática a Figura 33 representa uma reprodução utilizando taxa de 50%, decorrendo no ponto de ruptura centralizado. Cada gene dos cromossomos descendentes decorrente das reproduções possuem probabilidade de sofrer mutação de acordo com os parâmetros definidos anteriormente, e com



isso, a geração atual é substituída pela geração dos descendentes, se sucedendo até o momento em que o número de gerações seja alcançado e a evolução dos cromossomos interrompida.

Figura 33 – Exemplo de reprodução dos cromossomos com taxa de reprodução 0,5.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

## 4 RESULTADOS

No capítulo em questão será exemplificado duas técnicas de otimização que serão utilizadas de modo a comparar com os resultados obtidos com Algoritmo Genético. Será descrito o processo de parametrização do algoritmo de otimização juntamente com uma análise detalhada sobre como os parâmetros podem influenciar no custo do projeto.

### 4.1 Técnicas para Comparação de Desempenho

Será utilizada de modo a avaliar as soluções obtidas pelo algoritmo AG a técnica Manual, na qual a localização de CEO e CTO definidas pelo projetista com base em sua experiência.

Em resalta, as técnicas descritas também devem apresentar soluções de modo a respeitar os parâmetros impostos no trabalho.

### 4.2 Parametrização do Algoritmo Genético

Utilizando a técnica de varredura de parâmetros, sempre mantendo os parâmetros inalterados enquanto um é alterado, foi possível fixar aos poucos os melhores valores obtidos em cada parâmetro. Com isso, foi possível parametrizar o AG de modo a analisar a variação do custo em diferentes valores de parâmetros trabalhados.

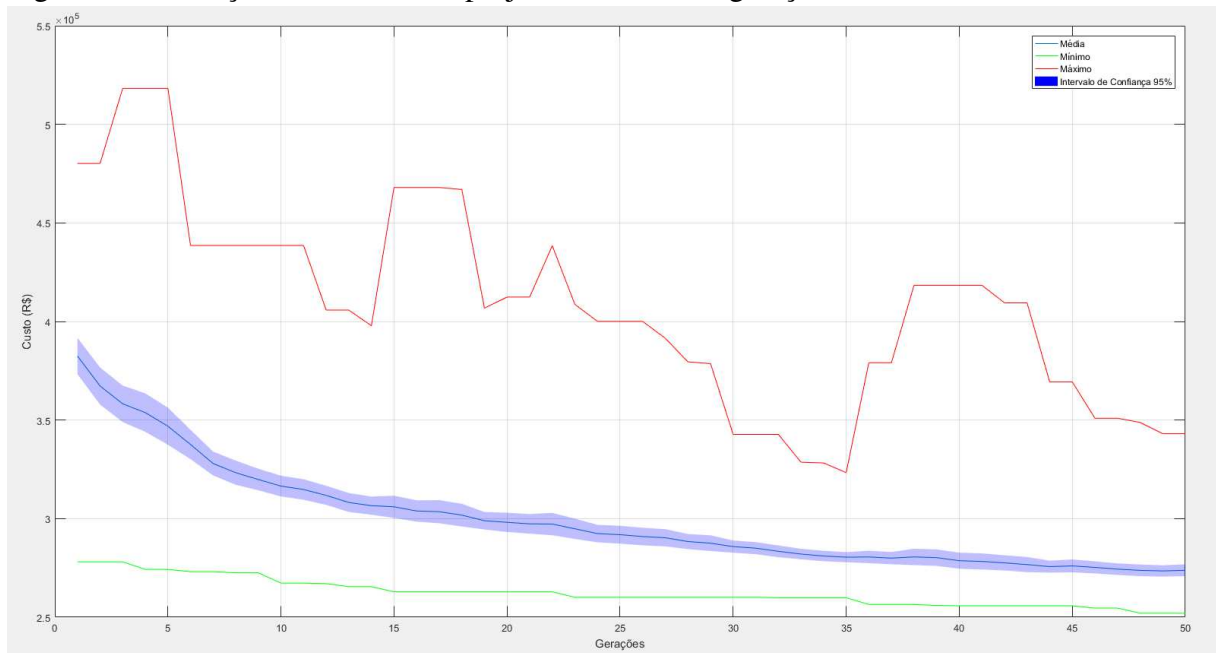
Foi iniciada a parametrização de modo a obter um valor adequado para o número de gerações, utilizando tamanho da população de 50, taxa de reprodução (ponto de ruptura) de 0,5 e probabilidade de mutação igual a 0,01.

Observa-se na Figura 34 o eixo vertical representando o custo em reais e o eixo horizontal o número de gerações trabalhadas. As linhas vermelha, azul e verde no gráfico representam respectivamente o valor de maior custo fornecido pela simulação, o valor médio fornecido e o valor de menor custo; na área em volta da linha azul, temos o intervalo de confiança de 95% de acordo com as 100 amostras de Monte Carlo<sup>1</sup>.

Ao analisar os resultados obtidos no gráfico, obtemos um custo médio na primeira geração de R\$373.200,00 e na última geração de R\$270.800,00, assim, resultando em uma diferença de R\$102.400,00. Na linha verde de menor custo foi obtido valores de primeira geração de R\$278.100,00 e de última geração de R\$251.974,00, resultando em uma economia

<sup>1</sup> É um método que se baseia em amostragem aleatória massiva para obter resultados numéricos.

Figura 34 – Relação entre custo do projeto e número de gerações.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

de R\$26.126,00 no projeto. Vale ressaltar que não foram utilizados os resultados máximos, que seriam na linha vermelha, pois buscando um custo computacional menor foi utilizado baixo número de gerações.

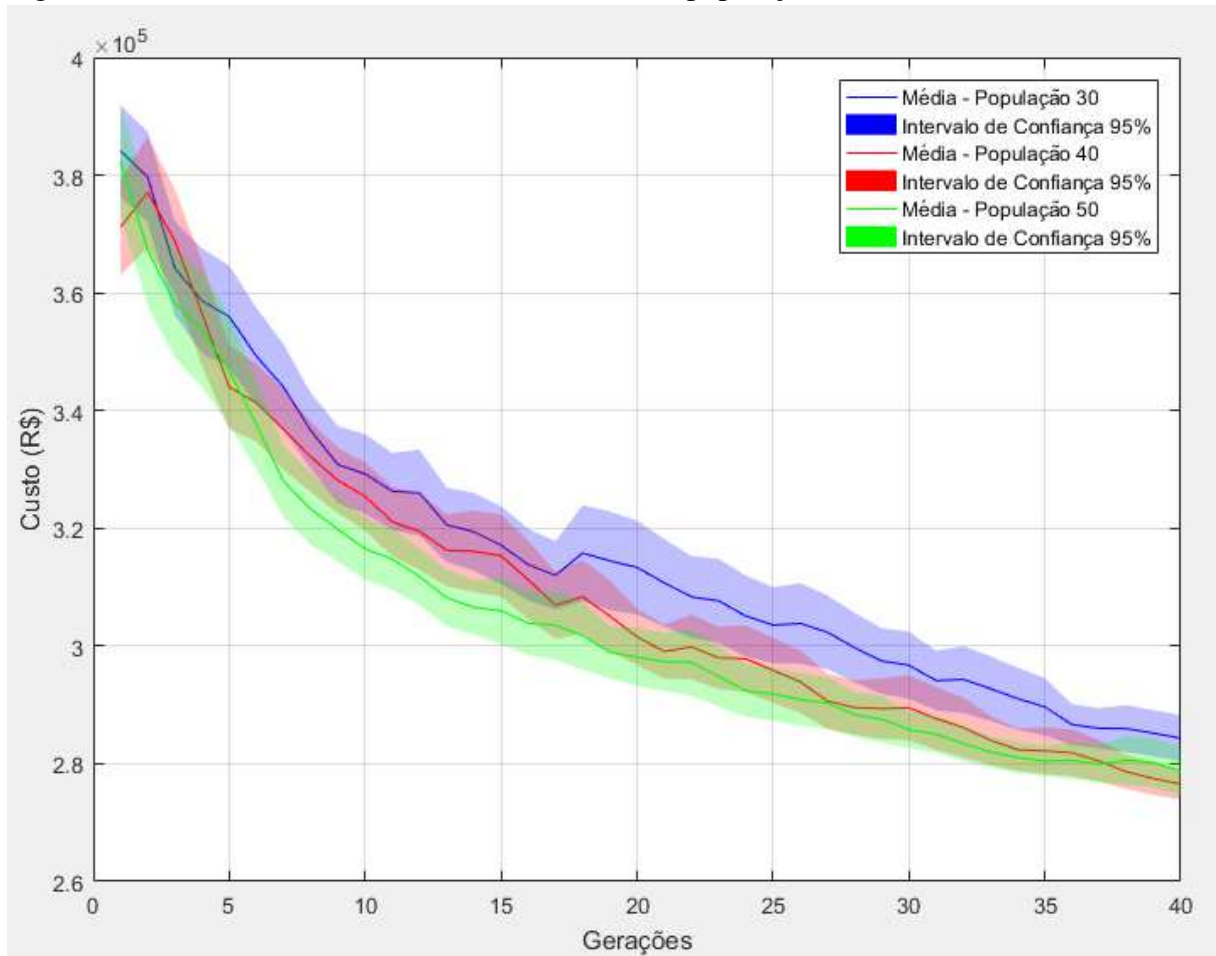
Juntamente com o custo, analisou-se o Tempo de Execução (TE) do simulador como uma variável importante, observando que cada Monte Carlo durava aproximadamente 5 minutos e entre as gerações 40 e 50 não havia uma mudança significativa no custo, pois seria um aumento no TE de 500 minutos por R\$390,00 de economia. Sendo assim, determinou-se em 40 a quantidade adequada de gerações.

Com a quantidade de gerações definida, podemos buscar um tamanho de população mais adequado para a simulação. Utilizando número de gerações em 40, taxa de reprodução (ponto de ruptura) de 0,5 e probabilidade de mutação igual a 0,01. Observando a Figura 35 podemos ver novamente o eixo vertical representando o custo em reais e o eixo horizontal representando o número de gerações (já travado no valor de gerações encontrado).

Destrinchando o gráfico, temos três linhas distintas representando o custo médio e três regiões que circulam essas linhas representando o intervalo de confiança de 95%. Foi testado em sobreposição os tamanhos de população de 30, 40 e 50 respectivamente. No caso de tamanho igual a 30 tivemos na primeira geração um custo de R\$376.400,00 e para a geração 40 um custo de R\$280.400,00, tendo assim uma diferença de R\$96.000,00. Utilizando o tamanho de 50 se obteve um custo de R\$373.200,00 na primeira geração e R\$274.600,00 na última geração,

causando uma diferença de R\$98.600,00. Quando se observou o tamanho de 40, obteve-se um custo de R\$363.000,00 na primeira geração e de R\$273.900,00 na geração derradeira, tendo assim uma economia de R\$89.100,00, que apesar de ter uma economia menor que o tamanho de população de 50, foi comparado em relação a primeira geração, então, observando o gráfico constatamos que o tamanho de 40 seria o mais adequado.

Figura 35 – Custo médio em diferentes tamanhos de população.

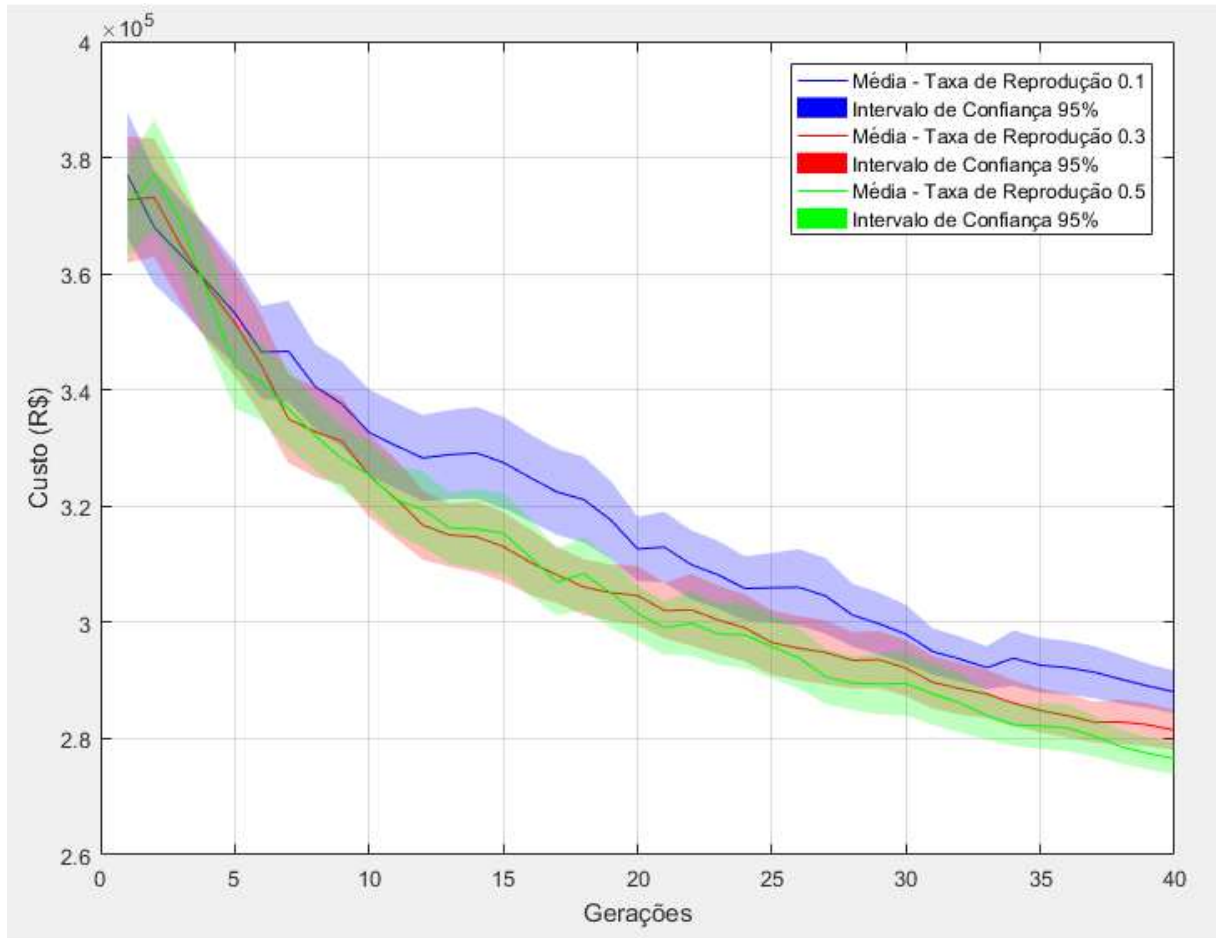


Fonte: Próprio Autor, 2023.

Em sequência, foi analisado a taxa de reprodução (ponto de ruptura). Foi utilizado número de geração igual a 40, tamanho de população também em 40 e probabilidade de mutar em 0,01. Pode-se observar na Figura 36 três linhas representando taxas de reprodução distintas e seus respectivos intervalos de confiança em 95%.

Nota-se uma variação muito baixa, principalmente nas primeiras gerações. Apesar de sutil, a maior diferença em questão de custo ocorreu na linha que mostra a taxa reprodução de 0,5, sendo assim, a escolha ideal ao trabalho.

Figura 36 – Custo médio em diferentes taxas de reprodução.



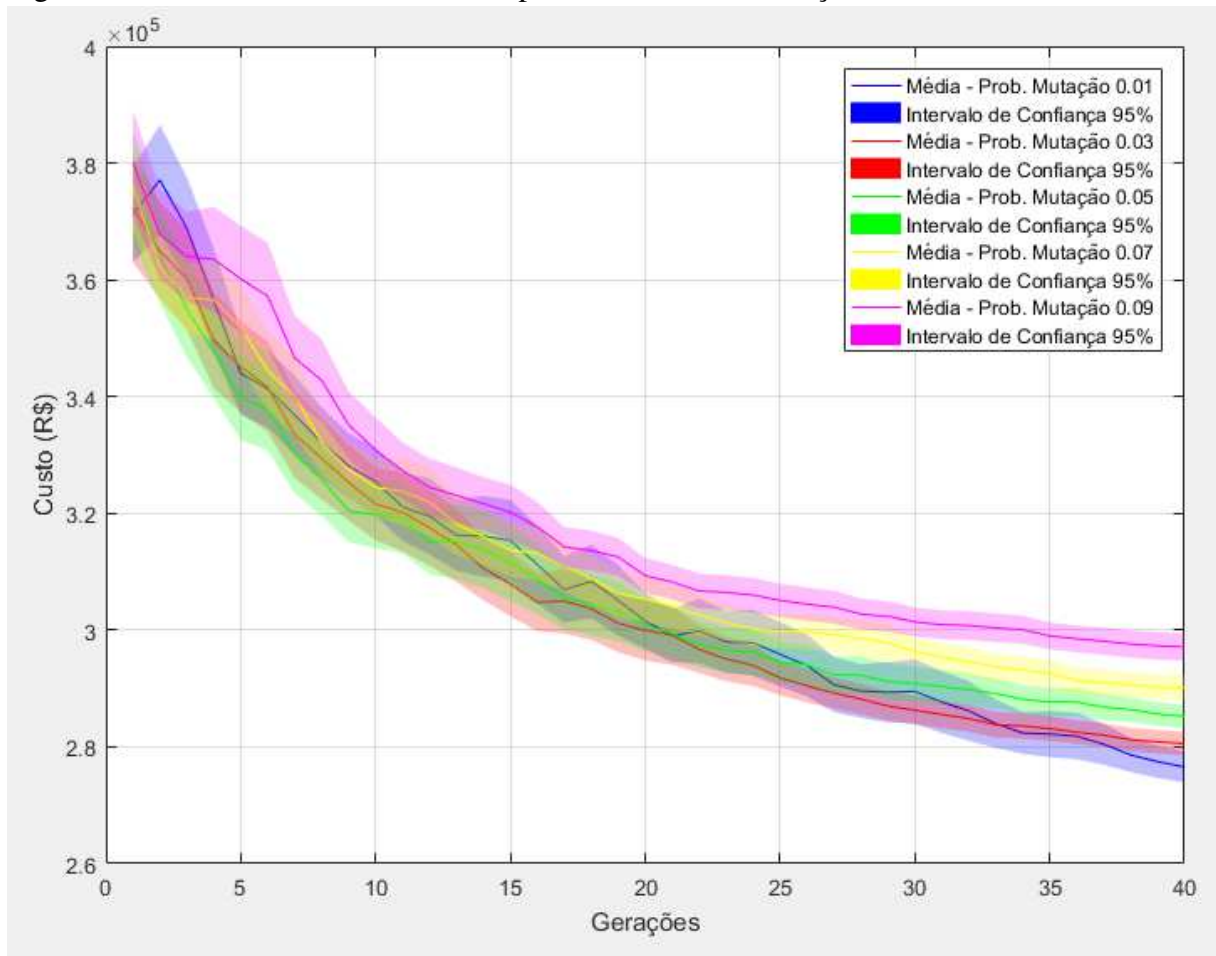
Fonte: Próprio Autor, 2023.

Como último parâmetro trabalhado, foi deixado a probabilidade de mutação. Foi utilizado como número de gerações 40, tamanho de população 40 e taxa de reprodução 0,5. Na Figura 43 é ilustrado cinco linhas com diferentes probabilidades de mutação e assim como os demais parâmetros, cada um com seu intervalo de confiança de 95%.

Observou-se que, a medida que aumentamos a probabilidade de mutação ao decorrer das gerações, o custo aumenta gradativamente. Isso ocorre pois grandes probabilidades de mutação causam uma dificuldade na evolução dos cromossomos, causando custo adicional ao projeto. Com isso, escolheu-se o valor de 0,01 para a probabilidade de mutação.

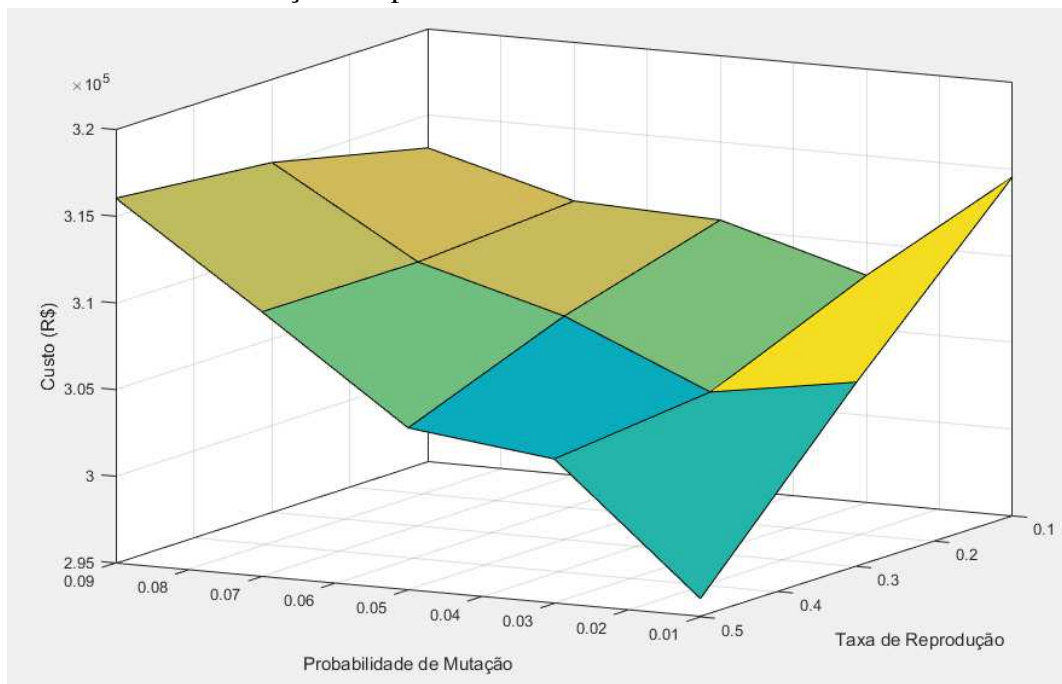
Para resumir a análise feita quanto a parametrização, tem-se um gráfico geral em 3D que exemplifica o movimento de todas as linhas estudadas nos gráficos anteriores. Observa-se na Figura 38 a área onde se encontra o menor custo R\$296.100,00, assim como o maior custo R\$316.000,00.

Figura 37 – Custo médio em diferentes probabilidades de mutação.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Figura 38 – Custos em relação aos parâmetros abordados.

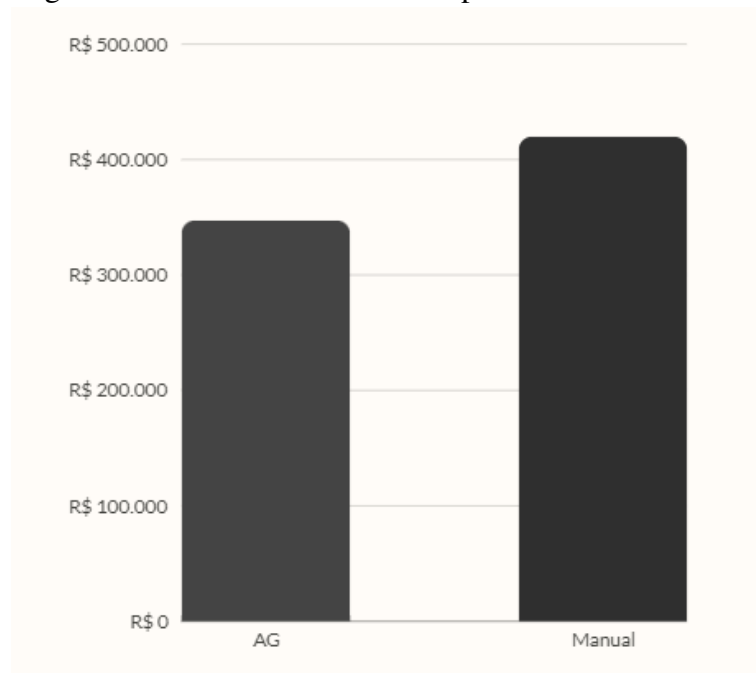


Fonte: Próprio Autor, 2023.

### 4.3 Resultados Comparativos

Como mencionado anteriormente, é feito o comparativo entre a técnica de otimização AG e a técnica manual. Apresentando a princípio os resultados obtidos pela técnica manual, observa-se que o menor valor obtido durante os testes foi de R\$ 419.906,90. Na figura 39 é demonstrado graficamente a comparação entre o menor custo obtido entre as duas técnicas.

Figura 39 – Mínimo Custo obtido pelo AG e Manual.

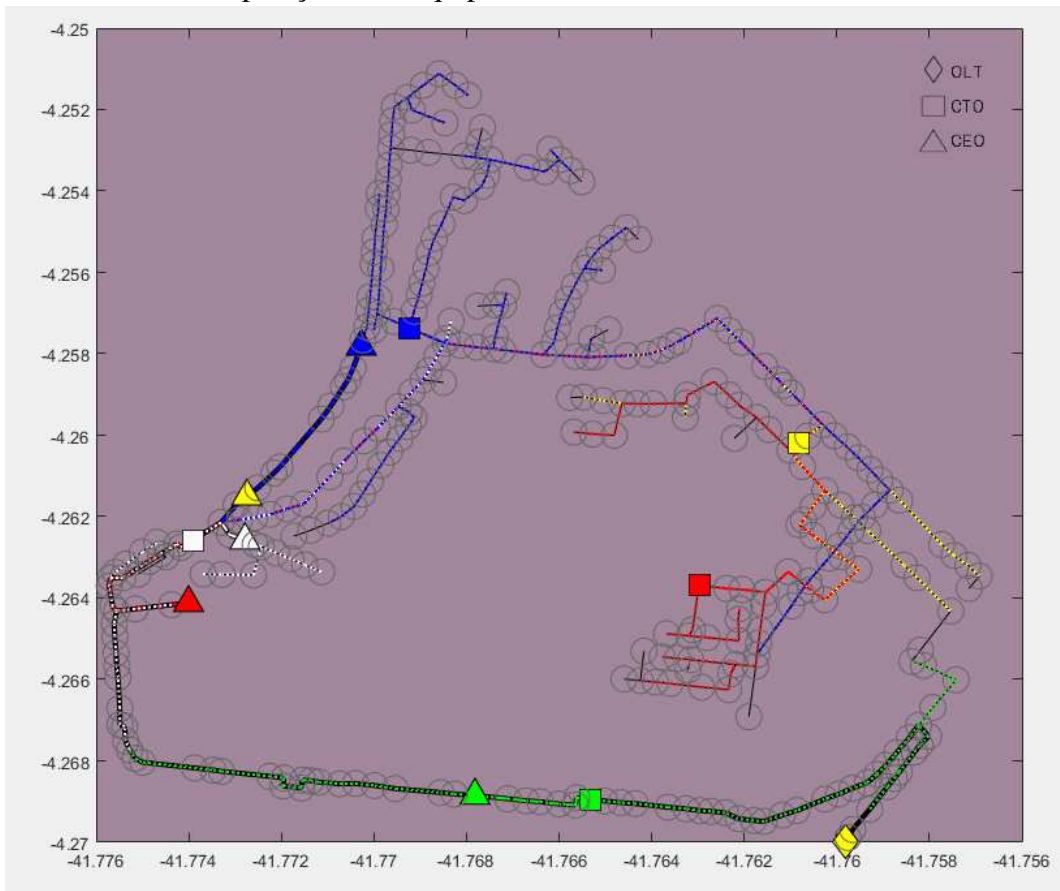


Fonte: Próprio Autor, 2023.

Em sequência, a Figura 40 representa a região atendida onde a ordenada representa a latitude e a abscissa representa a longitude. A localização da OLT é representada por um losango, as localizações das CEO por triângulos e das CTO por quadrados. Foi adotado a sequência de cores de acordo com o padrão Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) utilizado nas fibras ópticas, iniciando pela cor verde e seguindo a sequência amarelo, branco, azul e vermelho. O backbone foi representado por uma linha contínua de cor preta, a rede de distribuição por uma linha tracejada e o cabo drop por uma linha pontilhada.

Observando a disposição adotada pelo AG vemos que as CEO tem a tendência de ficarem mais juntas e as CTO um pouco mais separadas e espaçadas. Na Figura 41 temos as potências de recepção de acordo com cada ONU, sendo representadas por barras azuis. A indicação de sensibilidade mínima da ONU é representada por uma linha tracejada de cor vermelha, de modo que seja de fácil observação.

Figura 40 – Grafo com posições dos equipamentos e rotas da FO utilizando AG.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

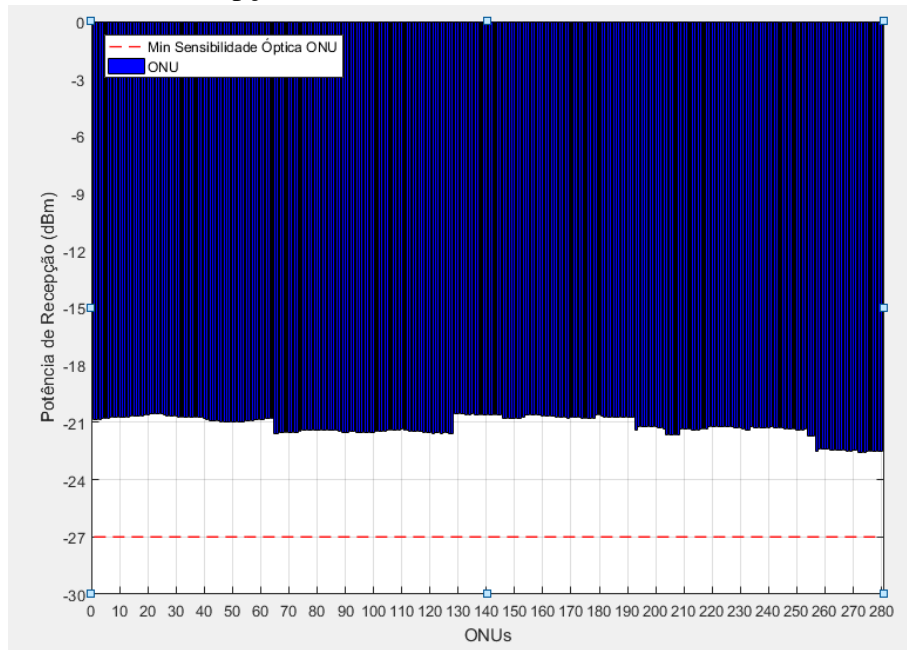
Todos os usuários atendidos estão dentro do intervalo de potência aceitável, na ordem de  $-21dBm$ , com margem de  $6dB$ .

Apresentando os resultados obtidos com a utilização da técnica manual, é possível observar na Figura 42 que o projetista optou por distribuir espaçadamente as duplas de CEO e CTO de modo a atender todos os clientes da região. Já na Figura 43, é especificado as potências de recepção de modo que todas as ONU tenham nível satisfatório.

A implementação do AG torna-se uma ótima forma de otimização para projetos GPON feitos de modo manual, visto que apresenta capacidade de buscar soluções com eficiência e menor custo. Com isso, pode-se ter benefícios utilizando dos resultados obtidos com AG de modo a melhorar seu projeto.

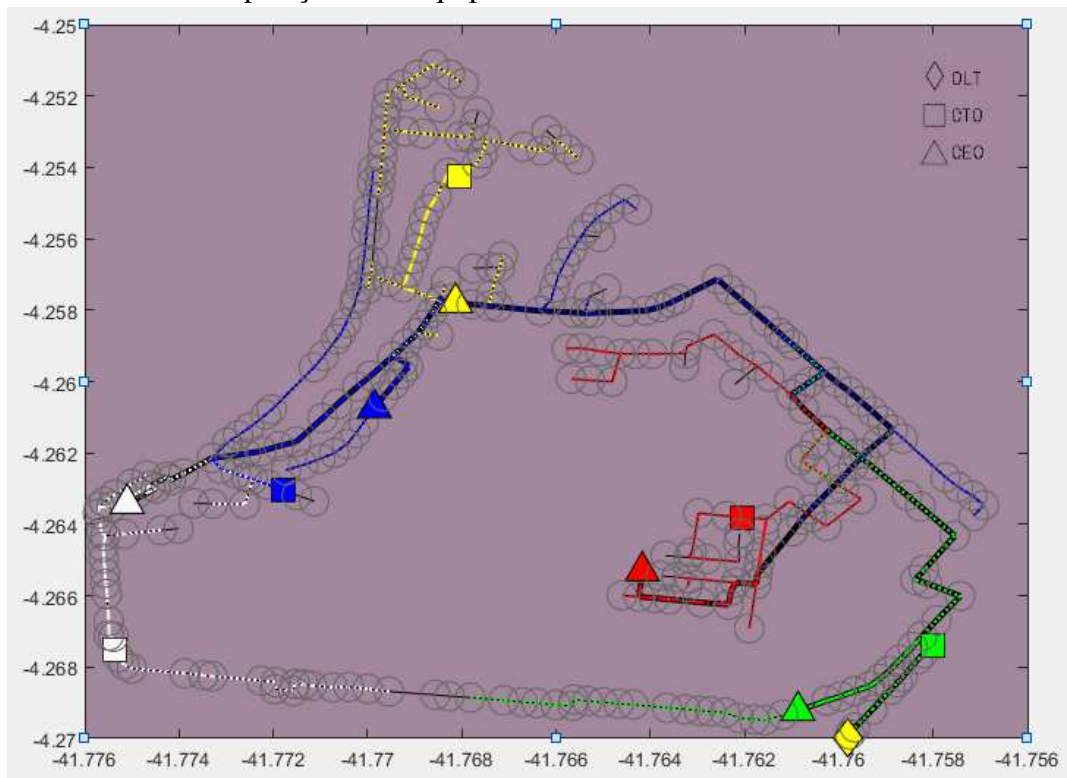


Figura 41 – Potência de recepção das ONU - AG.



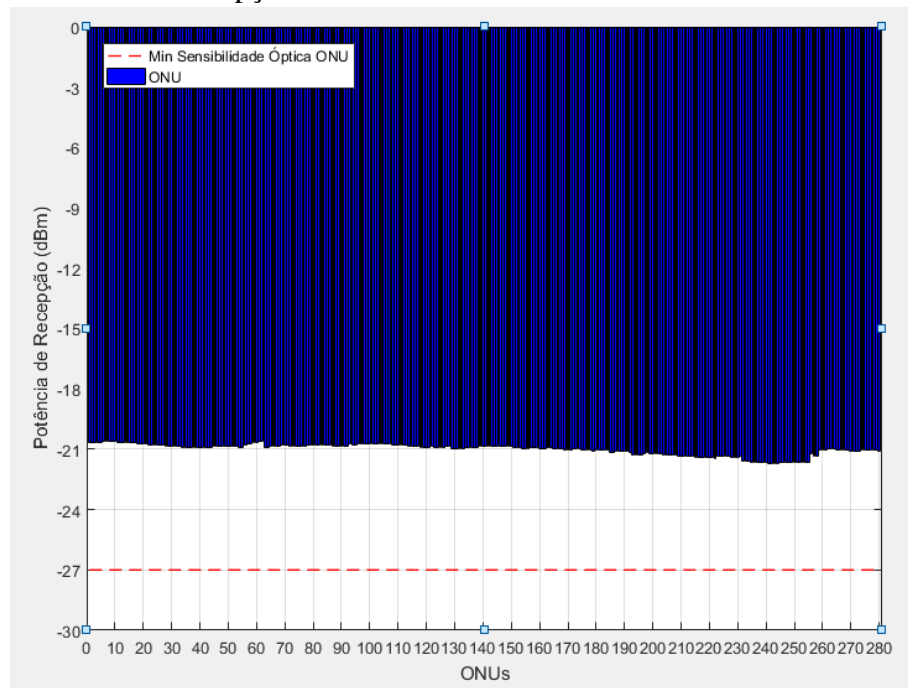
Fonte: Próprio Autor, 2023.

Figura 42 – Grafo com posições dos equipamentos e rotas da FO utilizando método Manual.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Figura 43 – Potência de recepção das ONU - Manual.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Foi proposto para a otimização de redes GPON a utilização da meta-heurística AG como base. Com posse dos resultados obtidos durante o trabalho em questão, tornou-se possível responder o Questionário de Pesquisa citado na Seção 1.2.

– **QP1:** Devido a crescente concorrência dos ISP, como tornar o projeto da rede GPON mais econômico e tecnicamente acessível?

– **Resposta QP1:** Atualmente, com o crescimento do mercado tecnológico, tendo como foco projetos de rede GPON, vem sendo necessária a busca por novas tecnologias que possam otimizar de alguma forma esse meio. Obteve-se uma economia de 29,3% na simulação do projeto em questão, comparando a meta-heurística AG com a forma de otimização Manual.

Assim, a medida que forem surgindo novas meta-heurísticas ou novas aplicações em modelos de otimização já existentes, pode-se esperar uma melhora significativa.

– **QP2:** A meta-heurística AG pode ser aplicada para aprimorar o projeto da rede GPON de forma econômica e técnica?

– **Resposta QP2:** Sim. De forma convincente, a meta-heurística AG mostrou-se eficaz na otimização de rede GPON, principalmente quando comparada ao modelo Manual onde apresentou um ganho em cima do mesmo, como já citado na QP1.

– **QP 3:** Quais os fatores que influenciam os resultados do projeto de Rede Óptica usando AG?

– **Resposta QP 3:** Pode-se citar como fatores de influência o número de gerações trabalhadas, tamanho da população e probabilidade de mutação. Além do tempo de execução, que se mostrou mais longo a medida que a região aumentava sua densidade populacional.

Os fatores que não influenciaram nos resultados foram taxa de reprodução e número de gerações a partir de uma certa quantidade.

– **QP4:** Qual a diferença econômica e técnica entre um projeto com AG quando comparado a um projeto manual?

– **Resposta QP4:** Observou-se uma grande diferença no custo do projeto com a utilização do AG. Em comparação, com o modelo de otimização Manual não foi possível definir bons pontos de localização dos equipamentos de modo a diminuir de forma significativa os custos.

O trabalho em questão tem a possibilidade de melhorias e correções, e assim, podendo ser aplicado de forma prática no mercado de projetos GPON.

Pode-se adotar uma interface mais interativa para o usuário, adicionar restrições mais elaboradas para diversas formas de equipamentos, aumentar as métricas e parâmetros e adicionar custos não computados como mão de obra, locomoção, entre outros.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. L. S. Proposta de rede gpon usando pso. **Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, Sobral/CE.**, 2022.
- ALBUQUERQUE, A. M. Projeto e análise de uma rede gpon. 2018.
- BARTH, M. J. Otimização multi-nível para projeto de redes híbridas (ópticas e sem fio) para implementação de cidades inteligentes. **Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós Graduação em Computação Aplicada**, 2016.
- BENZINHO, J. M. Avaliação económica de redes fttb em diferentes cenários geográficos. **Universidade de Aveiro**, 2011.
- BRAGANCA, I. Evolução das comunicações. **Disponível em:** <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfBkAAD/evolucao-das-comunicacoes/>. **Acesso em: 20 set. 2023.**, 2009.
- BRUMMELEN, G. V. Heavenly mathematics. **Disponível em:** [https://www.ebook.de/de/product/26870535/glen\\_van\\_brummelen\\_heavenly\\_mathematics.html](https://www.ebook.de/de/product/26870535/glen_van_brummelen_heavenly_mathematics.html), 2017.
- CARVALHO, T. L. A. de. Aplicação do algoritmo colônia de formigas na restauração de redes elétricas de distribuição. **Disponível em:** <https://eventos.ufpr.br/smne/SMNE1/paper/viewFile/421/160/>, 2016.
- COELHO, F. N. F. G. L. Abordagem de análise de partículas aplicada à engenharia de confiabilidade. **VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**, 2008.
- DIAS, L. P. Otimização de redes de acesso ppon utilizando algoritmos genéticos e análise técnico-econômica da proposta pon-lan. **Dissertação (mathesis) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador**, 2018.
- DRIVENETS. What is a core network? **Disponível em:** <https://drivenets.com/resources/education-center/what-is-a-core-network/>, 2022.
- FILHO, P. F. D. S. Proposta de heurística e meta-heurística para alocação eficiente de recursos em redes com multiplexação por divisão espacial. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, RECIFE**, 2018.
- FOROUZAN, A. B. Comunicação de dados e redes de computadores. **AMGH**, 2010.
- HELERBROCK, M. R. Fibra Óptica. **Disponível em:** <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/fibra-optica/>, 2023.
- HOLLAND, J. H. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. **Disponível em:** <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/0202009>, 2009.
- HOSTI, B. P. As equações de maxwell e a revolução do eletromagnetismo. **Disponível em:** <https://www.espacotempo.com.br/equacoes-de-maxwell-eletromagnetismo/>, 2021.
- KEISER, G. **Comunicações por Fibras Ópticas**. [S. l.]: AMGH, 2014.

LOPES, S. C. N. Fibra Óptica na rede de acesso: Cenários de evolução. **Universidade de Aveiro**, 2011.

MACHADO, G. M. História da comunicação humana. **InfoEscola**. Disponível em: <http://www.infoescola.com/historia/historia-da-comunicacao-humana/>, 2020.

MARQUES, D. Lei de snell-descartes. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/lei-snell-descartes.htm>, 2023.

MELO, A. D. dos S. Análise tecno-econômica de redes de telecomunicações: Ferramentas web. **Universidade de Aveiro**, 2013.

OLIVEIRA, L. B. L. M. C. A. de. Estudo de uma rede de acesso via fibra Óptica. **Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.**, 2006.

PACIFICO, R. P. C. Procedimento prático para elaboração de uma rede gpon ftth balanceada. 2018.

PEREIRA, R. J. G. Fibras ópticas e wdm. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/081/wdm1/index/>, 2023.

PINHEIRO, J. M. S. **Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações**. [S. l.]: Eusevier, 2017.

REACHOPTICS. Pon passive optical network. Disponível em: <https://www.reachoptics.com/pon-passive-optical-network-n106/>, 2019.

SANCHEZ, W. P. Pon: Redes Ópticas de acesso de baixo custo. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialpon/default/>, 2004.

SCHOLZ. Genetic algorithms. Disponível em: <https://paperswithcode.com/method/ga>, 2023.

SILVA, F. G. I. Otimização de rede gpon utilizando algoritmo genético. **Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, Sobral/CE.**, 2022.

SILVA, W. L. Rede gpon: Uma breve abordagem da tecnologia. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialpontec/default.asp>, 2015.

SOUSA, I. P. dos Santos; Rayane Araújo Lima; Bruno Quirino de Oliveira; Antônio Marcos de Melo Medeiros; Marcos Antônio de. Projeto de implantação de rede gpon com ftth. **Universidade Federal de Uberlândia**, 2018.

SOUZA, G. R. Uma abordagem por nuvem de partículas para problemas de otimização combinatória. **Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN**, 2006.

THEODORO, J. Meios de comunicação: o que são e evolução (dos antigos aos atuais). **Enciclopédia Significados**, 2023.

TORMANN, S. M. Métodos de otimização combinatória aplicados a problema de projeto de redes ftx. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, RS**, 2023.

WERNER, A. **Oratória Descomplicada. Dicas Práticas Para Quem Quer Se Comunicar Melhor**. [S. l.]: IBPEX, 2012.

ZANETTI, C. O. Z. E. ComunicaÇÃo: HistÓria, componentes, formas e ruídos. **Revista Organização Sistêmica**, 2021.

## ANEXO A – TABELAS DE CUSTOS

Tabela 2 – Preço dos equipamentos.

<b>Material</b>	<b>Valor unitário</b>
Cabo Óptico 2FO	R\$ 1,08
Cabo Óptico 12FO	R\$ 2,95
Conector	R\$ 4,69
CTO 1x64	R\$ 1.185,50
CEO 12F	R\$ 162,63
OLT	R\$ 9.367,65
ONU	R\$ 260,75
DIO	R\$ 432,42

Fonte: Próprio Autor, 2023

Na Tabela 2 temos os custos dos materiais utilizados na rede GPON, e com base nos melhores resultados obtidos foram preenchidas as tabelas 3 e 4 com os custos do projeto utilizando AG e método Manual respectivamente.

Tabela 3 – Custo da rede utilizando AG.

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor unitário</b>	<b>Valor final</b>
Cabo Óptico 2FO	122480	R\$ 1,08	R\$ 132.278,40
Cabo Óptico 12FO	5394,4	R\$ 2,95	R\$ 15.913,00
Conector	4	R\$ 4,69	R\$ 18,76
CTO 1x64	5	R\$ 1.185,50	R\$ 5.927,50
CEO 24F	5	R\$ 232,04	R\$ 813,15
OLT	1	R\$ 9.367,65	R\$ 9.367,65
ONU	700	R\$ 260,75	R\$ 182.525,00
DIO	1	R\$ 432,42	R\$ 432,42
<b>Custo Total</b>			<b>R\$ 347.275,88</b>

Fonte: Próprio Autor, 2023



Tabela 4 – Custo da rede utilizando técnica manual.

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor unitário</b>	<b>Valor final</b>
Cabo Óptico 2FO	182090	R\$ 1,08	R\$ 196.657,20
Cabo Óptico 12FO	8191,6	R\$ 2,95	R\$ 24.165,22
Conector	4	R\$ 4,69	R\$ 18,76
CTO 1x64	5	R\$ 1.185,50	R\$ 5.927,50
CEO 24F	5	R\$ 232,04	R\$ 813,15
OLT	1	R\$ 9.367,65	R\$ 9.367,65
ONU	700	R\$ 260,75	R\$ 182.525,00
DIO	1	R\$ 432,42	R\$ 432,42
<b>Custo Total</b>			<b>R\$ 419.906,90</b>

Fonte: Próprio Autor, 2023