



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

ANTÔNIO LUCAS SOUSA AGUIAR

PROPOSTA DE REDE GPON USANDO PSO

SOBRAL

2022

ANTÔNIO LUCAS SOUSA AGUIAR

PROPOSTA DE REDE GPON USANDO PSO

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

Orientador: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo

Coorientador: Eng. Adail Moreira Albuquerque

SOBRAL

2022

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

A227p Aguiar, Antônio Lucas Sousa.
Proposta de rede GPON usando PSO / Antônio Lucas Sousa Aguiar. – 2022.
97 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo.

Coorientação: Prof. Adail Moreira Albuquerque.

1. Redes Ópticas Passiva. 2. Otimização por Enxame de Partículas. 3. PSO. 4. FTTH. 5. GPON. I. Título.
CDD 621.3

ANTÔNIO LUCAS SOUSA AGUIAR

PROPOSTA DE REDE GPON USANDO PSO

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

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

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

Eng. Adail Moreira Albuquerque (Coorientador)
Instituto Centro de Ensino Tecnológico (Centec)

Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Me Alanio Ferreira de Lima
Online Telecom

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e capacidade a mim conferidas para desenvolver este trabalho e por permitir que concluísse mais essa etapa. Agradeço a minha família em especial meu pai Maurício e minha mãe Elenita, que compreenderam minha ausência em vários momentos e me apoiaram para realização deste trabalho, sempre me apoiando e me amparado nas horas mais difíceis. Sem vocês, nunca teria conseguido.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo pela motivação, orientações e ensinamentos para tornar este trabalho possível, muitíssimo obrigado. Agradeço a todos os professores que tive ao longo dessa jornada, neste processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito uma pessoa melhor.

Agradeço todos que de uma forma ou outra contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, entre eles, colegas do curso de Engenharia Elétrica, amigos da empresa NCC, e, em especial, a minha namorada Daniele Aguiar que há dois anos me acompanha em todas as jornadas. Seu carinho e compreensão foram os combustíveis indispensáveis para mais esta realização.

"Se você se concentrar em algo, poderá fazer qualquer coisa."

(Madara Uchiha, Naruto Shippuden)

RESUMO

Este trabalho apresenta a proposta de implementação da meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO), no processo de criação de uma rede *Gigabit Passive Optical Network* (GPON) com arquitetura *Fiber To The Home* (FTTH). A rede FTTH baseada no padrão GPON é considerada uma opção de tecnologia capaz de disseminar Internet de alta velocidade, no entanto, o alto custo do projeto pode inviabilizar sua implantação. Diante desse desafio, o PSO é aplicado para a redução do custo da rede, haja vista que o planejamento de uma rede óptica envolve a determinação geográfica do posicionamento de diferentes equipamentos, cabos de fibra óptica e de diversos outros parâmetros relevantes para o funcionamento adequado da rede, sendo uma tarefa árdua e complexa. Em síntese, busca-se desenvolver um algoritmo feito em Matlab ® utilizando o PSO, que permita elaborar de forma rápida e eficiente soluções para projetos GPON utilizando mapas reais com dados experimentais, além de minimizar os custos de implantação e reduzir o tempo destinado para a elaboração de projetos. A eficiência do sistema computacional proposto foi confirmada a partir de comparações com redes PONs elaboradas pelas duas técnicas: criação de forma manual e randômicas. Mediante aos resultados obtidos, comprovou-se que a rede indicada pelo PSO apresentam melhor custo médio, trazendo resultados viáveis e atrativos, além de um tempo de execução aceitável, atestando a potencialidade do sistema na proposta de redes GPON.

Palavras-chave: Redes Ópticas Passivas. Otimização por Enxame de Partículas. PSO. Meta-heurística. GPON. FTTH

ABSTRACT

This study presents the proposes the use of Particle Swarm Optimization (PSO) meta-heuristic, in the process of building a Gigabit Passive Optical Network (GPON) with Fiber To The Home (FTTH) architecture. The FTTH network based on the GPON standard is considered a technology option capable of disseminating high-speed Internet, however, the high cost of the project may make its implementation unfeasible. Faced with this challenge, the PSO is applied to reduce the cost of the network, given that the planning of an optical network involves the geographical determination of the positioning of different equipments, fiber optic cables, and several other parameters relevant to the proper functioning of the network, being an arduous and complex task. In summary, we develop a PSO algorithm in Matlab® using the PSO, which allows us to quickly and efficiently develop solutions for GPON projects using real maps with experimental data, as well as minimizing implementation costs and reducing the time allocated for the elaboration of projects. The efficiency of the proposed computational system was confirmed from comparisons with PONs networks elaborated by manual and random creation techniques. Based on the obtained results, it was proved that the PSO based network design has a better average cost, bringing viable and attractive results, in addition to an acceptable execution time, attesting to the potential of the system in the proposal of GPON networks.

Keywords: Passive Optical Network. Particle Swarm Optimization. PSO. Meta-heuristic. GPON. FTTH

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de tipos de acesso mais usadas em 2021 no Brasil.	18
Figura 2 – Tráfego de dados no Brasil.	18
Figura 3 – Evolução dos acessos de banda larga fixa.	19
Figura 4 – Evolução dos acessos por tecnologia.	20
Figura 5 – Quantidade de acessos telefonia móvel.	20
Figura 6 – Áreas do conhecimento envolvidas no estado da arte.	22
Figura 7 – Áreas do conhecimento envolvidas e seus respectivos trabalhos.	28
Figura 8 – Ilustração de uma rede básica de telecomunicação.	30
Figura 9 – Meios de transmissão nas redes de acesso.	31
Figura 10 – Rede local do usuário final.	32
Figura 11 – Primórdios das comunicações ópticas.	32
Figura 12 – Refração e reflexão de um feixe de luz em uma interface material.	33
Figura 13 – Representação do ângulo crítico e reflexão interna total.	34
Figura 14 – Estrutura da fibra óptica.	35
Figura 15 – Modos de propagação na fibra óptica.	35
Figura 16 – Modos de propagação.	36
Figura 17 – Esquema básico da rede PON com único elemento passivo.	39
Figura 18 – OLT AN6000-2 da fabricante FiberHome.	40
Figura 19 – DIO BT48 da fabricante Furukawa.	40
Figura 20 – ONU modelo HG6245D, da fabricante FiberHome.	41
Figura 21 – Modelo de <i>Splitter</i> balanceado 1x8.	41
Figura 22 – <i>Splitter</i> balanceado e desbalanceado.	42
Figura 23 – CEO da fabricante Furukawa.	42
Figura 24 – CTO da fabricante Furukawa.	43
Figura 25 – Máquina de fusão, da fabricante Fujikura.	43
Figura 26 – OTDR – AQ7280, da fabricante Yokogawa.	44
Figura 27 – Arquiteturas <i>Fiber to the X</i> (FTTx).	45
Figura 28 – Topologia em anel.	46
Figura 29 – Topologia em árvore.	47
Figura 30 – Topologia em barramento.	47
Figura 31 – Topologia mista.	47

Figura 32 – Orçamento de potência.	48
Figura 33 – Representação de um grafo.	49
Figura 34 – Fluxograma do algoritmo PSO.	52
Figura 35 – Localização do bairro centro na cidade de Sobral-CE.	53
Figura 36 – Área de atendimento e localização da OLT.	54
Figura 37 – Topologia mista centralizada.	56
Figura 38 – Postes mapeados através da latitude e longitude.	57
Figura 39 – Junção das bifurcações.	57
Figura 40 – Grafo fornecido pelo simulador da área de atendimento.	59
Figura 41 – Ferramentas e seus objetivos no processo de importação dos dados.	59
Figura 42 – Número de possíveis soluções em relação ao número de postes e equipamentos.	66
Figura 43 – Representação matricial da posição e velocidade das partículas.	66
Figura 44 – Postes selecionados pela partícula.	67
Figura 45 – Fluxograma de implementação do PSO.	68
Figura 46 – Processo de escolha para 4 CTOs e 4 CEOs.	69
Figura 47 – Processo de escolha para 4 CTOs e 4 CEOs quando há postes repetidos.	70
Figura 48 – Evolução do custo médio do projeto em relação ao número de partículas.	74
Figura 49 – Resultado individual da simulação com 500 partículas.	74
Figura 50 – Evolução do custo médio do projeto em relação a inércia máxima.	75
Figura 51 – Evolução do custo médio do projeto em relação a inércia mínima.	76
Figura 52 – Evolução do custo médio do projeto em relação a constante social.	77
Figura 53 – Resultado simulação com c_2 igual a 2.	78
Figura 54 – Rede proposta pelo algoritmo PSO.	79
Figura 55 – Potência de recepção de cada ONU ao adotar projeto proposto pelo PSO.	80
Figura 56 – Evolução do custo médio do projeto utilizando a técnica Randômica.	81
Figura 57 – Rede proposta pela técnica Randômica.	82
Figura 58 – Potência de recepção de cada ONU ao adotar projeto Randômico.	82
Figura 59 – Rede proposta pela técnica Manual.	83
Figura 60 – Potência de recepção de cada ONU ao adotar projeto Manual.	84
Figura 61 – Custo médio obtido por cada técnica.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de fibras com suas principais características técnicas.	36
Tabela 2 – Principais características das tecnologias PON (padronizadas pelo ITU-T e IEEE).	39
Tabela 3 – Posição dos equipamentos pelo Algoritmo PSO.	79
Tabela 4 – Posição dos equipamentos pela técnica Randômica.	81
Tabela 5 – Redes projetadas manualmente.	83
Tabela 6 – Tempo de execução das técnicas.	85
Tabela 7 – Preço dos materiais.	96
Tabela 8 – Custo da rede pelo PSO.	96
Tabela 9 – Custo da rede pela técnica Randômica.	96
Tabela 10 – Custo da rede pela Técnica Manual.	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FTTx	<i>Fiber to the X</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
IOT	<i>Internet of Things</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
NBR	Norma Brasileira
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
GBIC	<i>Gigabit Interface Converter</i>
SFP	Small Form Factor Pluggable
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
AG	Algoritmos Genéticos
AM	Algoritmos Meméticos
VMP	Vizinho mais Próximo
GPSO	<i>Gaussian Particle Swarm Optimization</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union</i>
GEPON	<i>Gigabit Ethernet Passive Optical Network</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
AON	<i>Active Optical Network</i>
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
DIO	Distribuidor Interno Óptico
CEO	Caixa de Emenda Óptica
CTO	Caixa de Terminação Óptica

OTDR	Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo
MP	Margem de Potência
UFC	Universidade Federal do Ceará
ENEL	<i>Ente nazionale per l'energia elettrica</i>
FDH	<i>Fiber Distribution Hub</i>
JOSM	<i>Java OpenStreetMap Editor</i>
POP	Ponto de Presença
MC	Monte Carlo
RAM	<i>Random Access Memory</i>
TE	Tempo de Execução
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
QP	Questões de pesquisa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização	17
1.2	Motivação e Escopo da Monografia	20
1.3	Estado da Arte	21
1.4	Objetivos	27
1.5	Produto Tangível do Trabalho	28
1.6	Estrutura do Trabalho	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
2.1	Estrutura Básica das Redes de Telecomunicações	30
2.2	Princípios das Comunicações Ópticas	31
2.2.1	<i>Efeitos de refração e reflexão</i>	33
2.3	Estrutura Básica da Comunicação Óptica	34
2.4	Redes Ópticas Passivas	37
2.4.1	<i>Comparativo dos padrões de redes PON</i>	37
2.4.1.1	<i>Padrão EPON</i>	37
2.4.1.2	<i>Padrão GPON</i>	38
2.4.1.3	<i>Padrão 10GEPON</i>	38
2.4.1.4	<i>Padrão 10GPON</i>	38
2.5	Principais Componentes da Rede PON	38
2.5.1	<i>OLT</i>	39
2.5.2	<i>DIO</i>	40
2.5.3	<i>ONU</i>	40
2.5.4	<i>Divisores ópticos (Splitters)</i>	40
2.5.5	<i>CEO</i>	41
2.5.6	<i>CTO</i>	42
2.5.7	<i>Emenda por fusão</i>	42
2.5.8	<i>Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo</i>	44
2.6	Arquitetura FTTx	44
2.7	Topologias	46
2.8	Métrica de Desempenho das Redes Ópticas	47

2.9	Grafos	48
2.10	Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas	50
3	METODOLOGIA	53
3.1	Região Geográfica do Projeto	53
3.2	Topologia Adotada para Projeto de Rede GPON	54
3.3	Processo de Importação da Região Geográfica do Projeto	55
3.3.1	<i>Coleta de postes e criação das ligações</i>	56
3.3.2	<i>Junção das bifurcações</i>	56
3.3.3	<i>Conversão dos dados</i>	57
3.3.4	<i>Importação para o MATLAB e criação do grafo</i>	58
3.4	Modelagem do Sistema	59
3.4.1	<i>Conjuntos</i>	60
3.4.2	<i>Definições</i>	61
3.4.3	<i>Restrições</i>	64
3.4.4	<i>Parâmetros do projeto</i>	64
3.5	Implementação do PSO	65
4	RESULTADOS	72
4.1	Técnicas para Comparação de Desempenho	72
4.2	Parametrização do PSO	72
4.2.1	<i>Quantidade de partículas e número de gerações</i>	73
4.2.2	<i>Peso inercial máximo</i>	75
4.2.3	<i>Peso inercial mínimo</i>	76
4.2.4	<i>Constante social</i>	77
4.3	Resultados Comparativos	80
4.3.1	<i>Resultados usando a técnica Randômica</i>	80
4.3.2	<i>Resultados usando a técnica Manual</i>	81
4.3.3	<i>Comparativo entre as técnicas Randômica, Manual e PSO</i>	84
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICES	90
	APÊNDICE A–CÓDIGO PARA OTIMIZAÇÃO GPON USANDO PSO.	90
	ANEXOS	95

ANEXO A-TABELAS DE CUSTO.	96
----------------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Historicamente os primeiros meios de comunicação usavam a luz através do fogo. Os Gregos no século VIII A.C usavam sinais de fumaça para anunciar eventos, solicitar ajuda e indicar ameaças. Mas o sistema era falho, pois, dependia das condições atmosféricas. Ainda havia um raio de visibilidade da mensagem, além disso, os sinais dependiam da interpretação do indivíduo e uma má interpretação poderia levar a eventos catastróficos (KEISER, 2011).

Durante a evolução humana sempre houve a necessidade de comunicação, sendo um processo que permanece em constante aprimoramento até os dias atuais. Inicialmente a transmissão de informações estavam limitadas aos membros locais de um ambiente, mas com a evolução humana surgiram interesses de sistemas de comunicação mais complexos, onde as informações pudessem se propagar com maior velocidade, para maiores distâncias e para uma maior quantidade de indivíduos (KEISER, 2011).

Os avanços tecnológicos no último século estão possibilitando que enlaces de comunicação transmitam um número crescente de informações e de forma mais rápida. Como consequência, os serviços estão progredindo e possibilitando o uso dessa capacidade expandida. Com a rápida expansão digital das últimas décadas o entendimento do mundo sobre o conceito de comunicação tomou novas proporções, a Internet facilitou a distribuição de informações de forma global, melhorou a produtividade em tarefas cotidianas e fez diversas alterações nas relações humanas. Surgiram os conceitos de comércio eletrônico, redes sociais e infoprodutos (FOROUZAN, 2010).

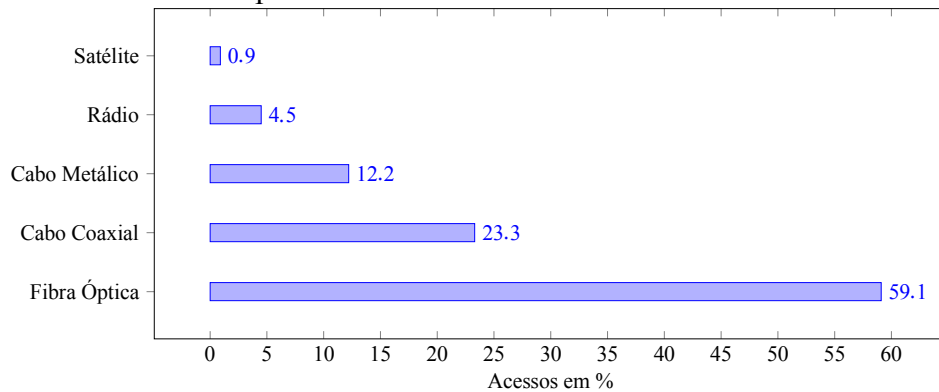
De forma análoga, o desenvolvimento de computadores pessoais no século passado possibilitou grandes mudanças nas empresas, nas indústrias, nas ciências e na educação. Uma revolução semelhante está ocorrendo nas comunicações de dados e nas redes (FOROUZAN, 2010). Para acompanhar as necessidades do mercado, Provedores de Acesso à Internet (do inglês, *Internet Service Provider* (ISP)) buscam a utilização das Redes Ópticas Passivas (do inglês, *Passive Optical Network* (PON)) devido seu ótimo desempenho, queda nos custos de implementação (ALBUQUERQUE, 2018), grande largura de banda para suportar a nova demanda, tempo de vida útil estimado de vinte anos, imunidade a interferência eletromagnética e dispensam o uso da eletricidade para a transmissão de dados (KEISER, 2011).

Com o aprimoramento dos sistemas e meios de comunicação, a transmissão de dados

tem se tornado um serviço essencial, equiparando-se ao fornecimento de energia elétrica e água (DIAS, 2018). A expansão das redes ópticas é uma tendência global, segundo a empresa Cianet (atuante no mercado de provedores há 27 anos) os fatores que contribuem para esse aumento são os avanços tecnológicos com equipamentos acessíveis, como, por exemplo: aplicações com televisão de alta definição, vídeo 3D, computação em nuvem, jogos *online*, videoconferência e *Internet of Things* (IOT) (DIAS, 2018).

Conforme os dados da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) até setembro de 2021, houve cerca de 39,6 milhões de acessos com banda larga fixa, sendo estes acessos distribuídos e transmitidos entre as tecnologias de fibra óptica, cabo coaxial, rádio e satélite, conforme ilustra a Figura 1.

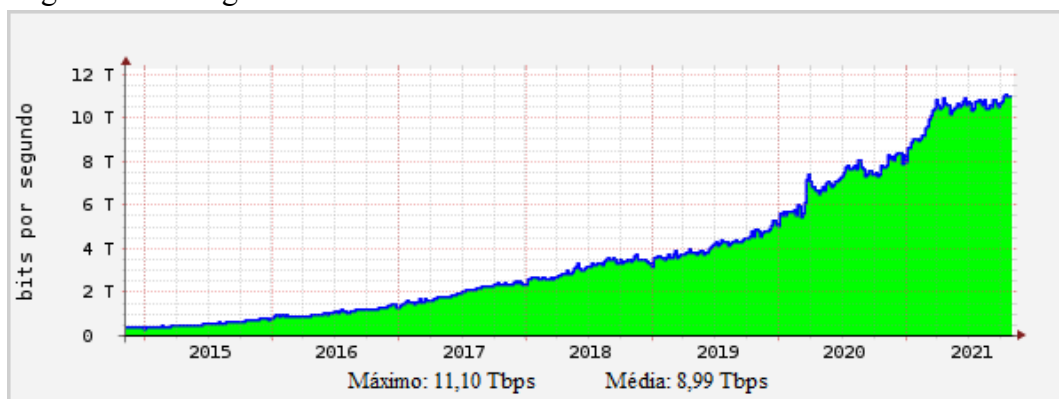
Figura 1 – Gráfico de tipos de acesso mais usadas em 2021 no Brasil.



Fonte: ANATEL, 2022 (adaptado).

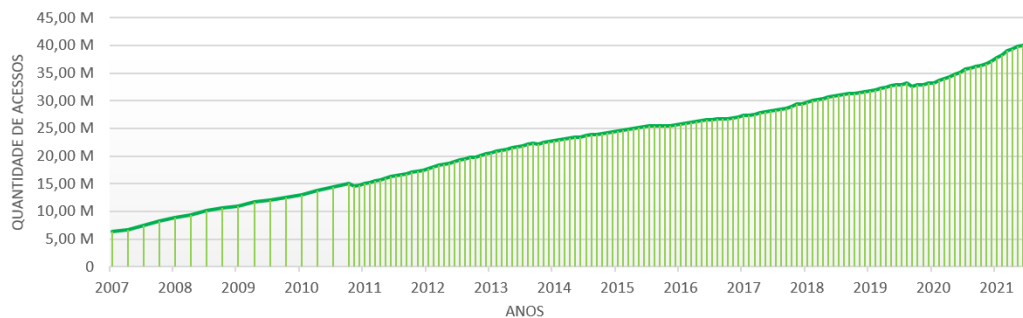
No Brasil houve uma rápida expansão no consumo de dados, se agravando durante o surto do COVID-19, sendo perceptível nas Figuras 2 e 3 a aceleração nos últimos três anos, onde o tráfego de dados de 2021 foi quase o triplo de 2019.

Figura 2 – Tráfego de dados no Brasil.



Fonte: IX.br, 2022 (adaptado).

Figura 3 – Evolução dos acessos de banda larga fixa.



Fonte: ANATEL, 2022 (adaptado).

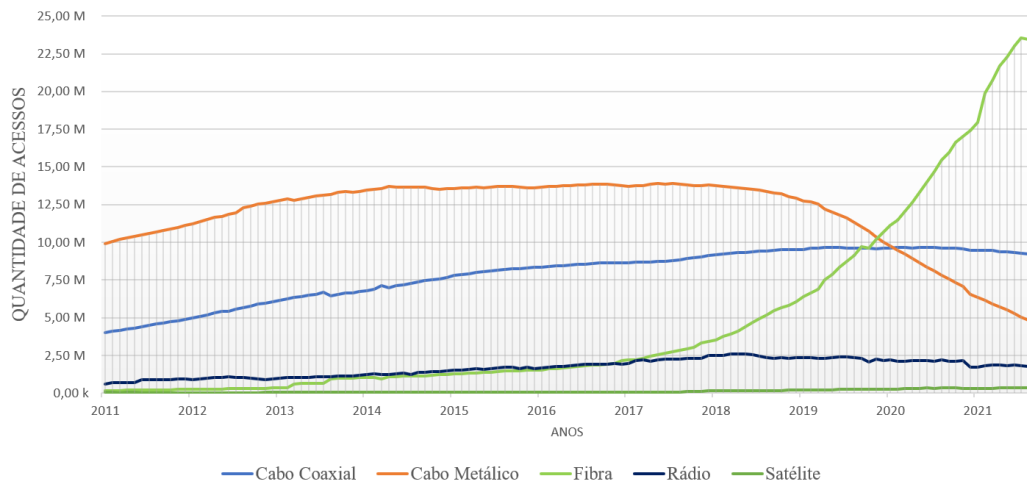
Consoante ao que foi exposto, em abril de 2020 segundo Martin McKeay (Diretor editorial da Akamai, empresa atuante no mercado de fornecimento de dados via CDN), houve um aumento de 30% no tráfego da internet mundial quando se iniciou a pandemia do COVID-19. As ações de *lockdown*¹ e as mudanças para o trabalho remoto tiveram um impacto gigantesco na Internet, o tráfego de dados atingiu um pico recorde para um único dia, registrando 180 Tbps no dia 11 de novembro de 2020.

Pelos dados da ANATEL na Figura 4 fica claro que a tendência é de um maior aumento do uso de redes ópticas nos próximos anos na banda larga fixa, levando também a considerar que as demais tecnologias abordadas serão substituídas ou implementadas em conjunto as redes PON, com isso vários ISPs terão que atender a nova demanda. Na prática, as novas instalações ocorrem sem planejamento, sendo efetuadas quando surge a necessidade, entretanto, a falta da elaboração de um projeto pode gerar prejuízos ou afetar a qualidade da rede (DIAS, 2018). Para a elaboração de um projeto de telecomunicações com elementos ópticos é necessário que o ISP realize a análise de inúmeros fatores, estes que contribuem para o aumento da complexidade da rede, pois é fundamental um estudo minucioso da geografia do local onde será realizada a implementação da rede além de verificar a quantidade e potenciais clientes por residência. Também é necessário realizar um estudo para o posicionamento de forma adequada dos divisores ópticos ao longo da rede, de modo que a rede tenha escalabilidade para ampliações futuras mantendo a qualidade do sinal, esperando-se sempre o menor custo de implementação possível (DIAS, 2018).

Por outro lado, os acessos por telefonia móvel, conforme ilustra a Figura 5 tiveram um declínio a partir de 2015, mas estão sendo utilizadas em paralelo com as tecnologias com

¹ Medida adotada durante a pandemia do COVID-19 para restringir a circulação de pessoas em locais públicos, permitindo apenas o acesso de forma limitada, para questões essenciais como (supermercados, hospitais, clínicas e drogarias).

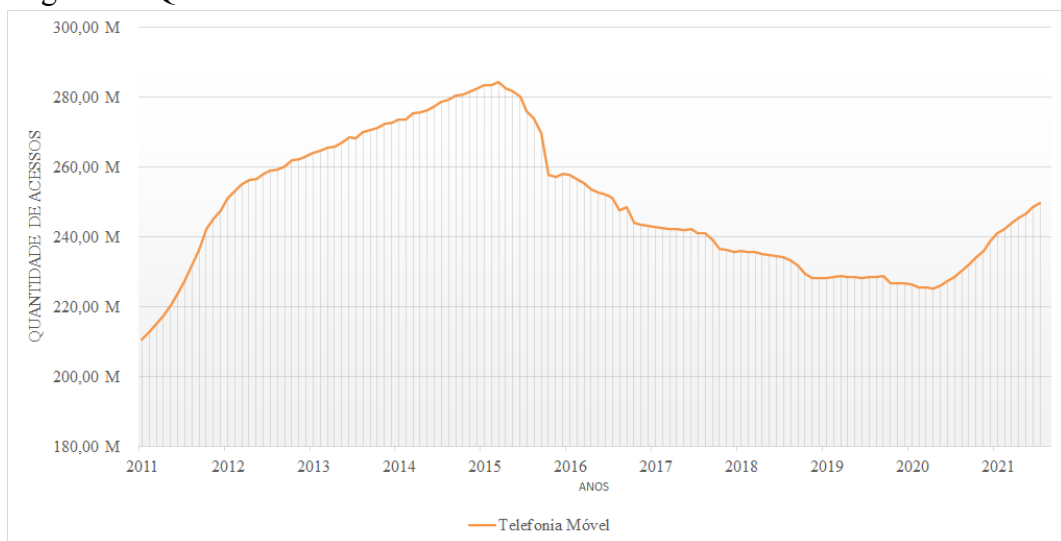
Figura 4 – Evolução dos acessos por tecnologia.



Fonte: ANATEL, 2021 (adaptado).

banda larga fixa. É evidente que a quantidade de acessos móvel é superior aos demais tipos de acessos, ultrapassando 200 milhões, também sendo um mercado muito promissor para estudos futuros com a utilização do 5G².

Figura 5 – Quantidade de acessos telefonia móvel.



Fonte: ANATEL, 2022 (adaptado).

1.2 Motivação e Escopo da Monografia

A popularização das redes ópticas usando arquitetura *Fiber to the Home* (FTTH)³ é uma tendência crescente devido a elevada capacidade de transmissão que tal tecnologia

² Padrão de tecnologia de quinta geração para redes móveis.

³ Nesta arquitetura o cabeamento óptico vai até o usuário final. Diferentemente das demais arquiteturas apresentadas, não há a utilização de cabos metálicos na transmissão dos dados

consegue fornecer. Os principais impulsionadores desse crescente aumento deve-se as ISPs de características regionais que miraram fora dos grandes centros urbanos, onde grandes ISPs estão ausentes. Levando isso em consideração, verifica-se a importância de estudos sobre infraestrutura de redes ópticas de modo a prover serviços com baixo custo de operação para o provedor e elevada qualidade para o consumidor. Contudo, o planejamento da distribuição e conexão de equipamentos é algo complexo, pois é necessário avaliar a quantidade e a melhor distribuição geográfica dos equipamentos. Normalmente, um projetista realiza essa tarefa de forma manual e superficial, devido à inviabilidade de analisar todos os cenários que podem ser obtidos com as informações de quantidade e distribuição dos equipamentos na região. Diante dessa problemática, este trabalho criou Questões de Pesquisas (QPs) que serviram de guia para a pesquisa:

- **QP1** . Atualmente, dada a crescente concorrência dos ISPs, como tornar o projeto FTTH mais econômico e tecnicamente aceitável?
- **QP2** . A meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO) pode ser aplicada para aperfeiçoar economicamente e tecnicamente o projeto FTTH?
- **QP3** . Qual a diferença econômica e técnica entre um projeto com PSO quando comparado ao projeto manual (i.e., projetistas humanos)?

Para responder estes questionamentos, foram levantadas as seguintes hipóteses:

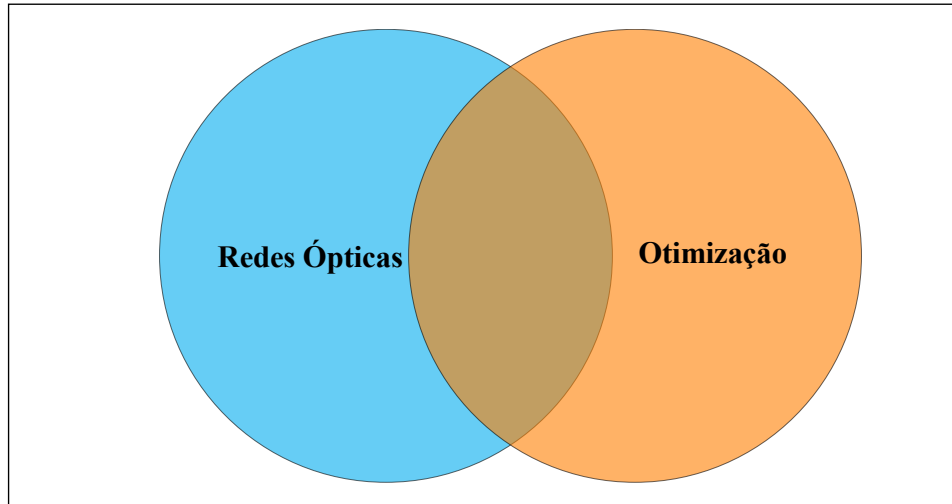
- **Hipótese QP1** . O uso de uma abordagem inteligente proverá ganhos para ISP, uma vez que, apresentará projeto FTTH de baixo custo e viável tecnicamente. Tal resultado contribuirá para a redução de custo da ISP, possibilitando aplicar tal economia na expansão da rede existente.
- **Hipótese QP2** . PSO é uma estratégia bem difundida na comunidade científica em diversos problemas de engenharia. Através de um modelo adequado acredita-se em bons resultados no âmbito econômico e técnico de projeto FTTH.
- **Hipótese QP3** . Baseada em outros trabalhos espera-se obter redução em torno de R\$ 10.000,00 mantendo uma adequada qualidade do enlace de comunicação.

1.3 Estado da Arte

Nesta seção são apresentados alguns estudos da comunidade científica que serviram de inspiração na proposta deste trabalho. Os estudos são apresentados de modo a situar o estado da arte das áreas do conhecimento aqui envolvidas. A seguir são apresentados trabalhos relacionados ao estado da arte na área de otimização, projeto de rede óptica e a intersecção de ambas,

conforme mostra o diagrama apresentado na Figura 6, tais áreas motivaram e consolidaram como pilares da monografia.

Figura 6 – Áreas do conhecimento envolvidas no estado da arte.



Fonte: Autor, 2022.

Albuquerque (2018) em seu trabalho, teve como objetivo promover a tecnologia *Gigabit Passive Optical Network* (GPON) para ISPs na cidade de Moraújo, a fim de modernizar o cenário telecomunicações do município. Para isso o autor demonstrou a confiabilidade e escalabilidade da rede óptica descrevendo os principais componentes da rede e seus indicadores de desempenho. O autor retratou os conceitos e peculiaridades físicas utilizados nas fibras ópticas, desde sua fabricação, capacidade de transmissão e suas perdas decorrentes das características do material. Também incluiu uma breve explicação sobre os componentes e conectores, e como devem ser utilizados seguindo a Norma Brasileira (NBR) vigente na época. Com base em seus resultados o projeto da rede GPON conseguirá substituir as tecnologias obsoletas usadas na cidade de Moraújo, estando preparada para o crescimento da demanda pelas próximas duas décadas. A rede também poderá lidar com operações de TV tanto em definição HD como em resolução 4K com eficiência. Segundo o Albuquerque (2018) os maiores beneficiados no projeto são os usuários finais que poderão usufruir de serviços de qualidade e com maior taxa de transmissão de dados. Entretanto, em seu trabalho o autor não demonstrou o orçamento de potência da rede, métrica de desempenho importante para a execução do projeto.

Pacifico (2018) promoveu em seu trabalho os procedimentos práticos para elaboração de uma rede GPON FTTH, utilizando divisores ópticos balanceados em uma cidade situada no interior do Piauí. Para isso o autor demonstrou as etapas para elaboração do projeto, as características da rede passiva e a análise de viabilidade econômica. O autor também sustentou

suas ideias na evolução das tecnologias dos sistemas de telecomunicação, comparando o quão rápido os sistemas com cabeamento metálico tornaram-se antiquados frente a demanda por largura de banda, diferentemente da rede GPON que vem conseguindo acompanhar as inovações tecnológicas, tornando-se um componente essencial para garantir a sobrevivência dos ISPs no mercado. O trabalho apresentou todo o desenvolvimento para o projeto da rede, desde a definição da área de cobertura, levantamento da quantidade de imóveis, estabelecimento da taxa de penetração (taxa representativa de potenciais clientes), posicionamento dos equipamentos ópticos, diagramas de emenda da fibra, diagramas de ramais de atendimento, orçamento de potência, lista de materiais e a estimativa de retorno do investimento (do inglês, *Payback*). Como o próprio autor citou em sua conclusão, sua obra dá aporte aos profissionais, projetistas e estudantes da área de telecomunicação pelo nível de detalhes e a visão de mercado do autor sobre o *Payback* de investimentos para ISPs. Entretanto, nas estimativas de retorno de investimento não foi adicionado o custo do uso dos postes da concessionária de energia, visto que é um custo mensal que o ISP deve arcar.

Seguindo a base dos trabalhos anteriores, Araújo (2019) promoveu em seu estudo os procedimentos para elaboração de uma rede GPON FTTH, com nível de detalhamento semelhante ao do Pacífico (2018), seu diferencial foi a implementação de um sistema fotovoltaico no escritório central, para a geração de energia. Entretanto, não houve a demonstração com maiores detalhes acerca do dimensionamento do sistema e o motivo financeiro da escolha do investimento. De acordo com a opinião do autor desta monografia, o autor de Araújo (2019) poderia ter realizado uma análise de viabilidade econômica.

Cortes (2020) teve como objetivo em seu trabalho, realizar uma análise da tecnologia GPON para demonstrar através de um projeto, a solução para serviços de telecomunicações. O autor finalizou seu estudo informando que a fibra óptica é um excelente meio de transmissão de dados em alta velocidade, superior às tecnologias convencionais, pois possui baixa perda na transmissão além de não sofrer interferência eletromagnética. Porém sua implantação para atendimento a usuários residenciais e pequenas empresas têm um alto custo quando comparado ao acesso via cabeamento metálico que já possui toda infraestrutura instalada. Vale evidenciar que em seu artigo o autor não se aprofundou nas categorias de laser utilizados nos Terminais de Linha Óptica (do inglês, *Optical Line Terminals (OLTs)*), visto que os Conversores de Interface Gigabit (do inglês, *Gigabit Interface Converters (GBICs)*) e Small Form Factor Pluggables (SFPs), podem aumentar a possibilidade de alcançar maiores distâncias ou a possibilidade de

cascatear, ou adicionar mais um *splitter* na rede.

Paiva (2012) em sua dissertação de mestrado mostra que um dos desafios inerentes às redes PON é o fato do orçamento de potência ser bastante limitado, pois depende das taxas de divisão de potência óptica e das distâncias percorridas pelo sinal propagante. O seu trabalho teve como objetivo desenvolver sistemas eficientes de amplificação óptica. Para isso é apresentado esquemas de amplificação óptica visando à obtenção de um orçamento de potência adequado, mantendo, sempre que possível, a característica passiva da rede. O autor expõe sobre os princípios básicos de amplificação óptica e suas características. Para longos enlaces foi sugerido a inserção de repetidores optoeletrônicos ou amplificadores ópticos ao longo do enlace, ocorrendo a regeneração do sinal óptico, mas tornando a rede ativa. Neste trabalho o autor destaca que ao receber o sinal, o sinal pode ser reformatado e reemitido ou ainda reformatado, re-sincronizado e reemitido, entretanto, o autor não destacou que com o uso de amplificadores é necessário que os equipamentos que irão receber o sinal também tenham uma potência de envio no sentido *upstream* adequada.

No que se refere a otimização, Silva (2017) apresentou em sua monografia a evolução ao longo dos anos das principais características e parâmetros do PSO de modo a verificar sua aplicabilidade de otimização do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), realizando comparações com os resultados de outras meta-heurísticas, como o Algoritmos Genéticos (AG), Algoritmos Meméticos (AM) e o Algoritmo do Vizinho mais Próximo (VMP). Com base nos resultados do autor percebeu-se que o algoritmo PSO não obteve respostas satisfatórias, pois não conseguiu superar as soluções do AG, AM e VMP. O autor também relatou que houve um alto tempo de execução do algoritmo para obtenção dos resultados do trabalho. Entretanto, o autor não informou o tempo de execução dos demais algoritmos, apenas sugeriu que em trabalhos futuros houvesse a implementação de estratégias e parâmetros para minimizar o tempo de execução do PSO, destacando o uso de métodos como o Busca Local e o *Path-Relinking*. Silva (2017) também apresentou um pseudo código para intensificar o entendimento do algoritmo PSO no problema do PCV, contudo a aplicação final realizada pelo *Software Matlab*® não foi demonstrada para facilitar o uso em trabalhos futuros.

Souza (2006) em sua dissertação de mestrado apresentou uma abordagem usando um modelo híbrido do PSO para Problemas de Otimização Combinatória, demonstrou com maiores detalhes que o Silva (2017) os conceitos e parâmetros do PSO. O autor deste trabalho fez sugestões de melhorias na aplicação do algoritmo, adicionando métodos de outras heurísticas,

empregando conceitos de AG usando a representação dos resultados como um vetor numérico e o cruzamento para deslocar as partículas pelo espaço de busca. O autor também usou conceitos de Busca Local para melhorar as soluções, ou como o próprio autor citou, refinar as soluções encontradas durante a busca. Em seus resultados o autor obteve soluções médias positivas usando o PSO híbrido comparado a outras heurísticas no problema do PCV. Também relatou o uso do PSO em outras aplicações práticas como:

- Missões de inspeção/vigilância com base no PCV;
- Otimização de funções de controle nebulosas;
- Identificação de partículas por dispersão de luz;
- Programação de sistemas de manufatura;
- Controle reativo de tensão elétrica e potência.

Carvalho *et al.* (2014) em seu artigo propôs um algoritmo baseado no PSO que permite determinar a localização de um robô baseando-se na sobreposição das leituras do sensor com o mapa que o robô atualiza conforme avança em um espaço desconhecido. Neste artigo foi proposta uma nova abordagem para resolução do problema de localização e mapeamento simultâneos utilizando o PSO, criando uma função objetivo tal que traduzisse a melhor sobreposição entre o mapa global e a leitura do sensor laser. Testado em um robô real, a implementação mostrou-se promissora realizando mapas a uma resolução de 100 mm² por pixel.

Nascimento *et al.* (2008) teve como objetivo a otimização de confiabilidade-redundância na seleção de componentes com escolhas múltiplas e de múltiplos níveis de redundância. Segundo o autor muitos métodos matemáticos clássicos falham em problemas de otimização de confiabilidade-redundância. Como uma alternativa às abordagens clássicas de otimização, as meta-heurísticas têm ganhado muita atenção de diversos pesquisadores devido à habilidade destas técnicas em determinar boas soluções globais. Para a obtenção dos resultados, Nascimento *et al.* (2008) utilizou a meta-heurística PSO clássica e *Gaussian Particle Swarm Optimization* (GPSO) devido sua simplicidade de aplicação e rápida convergência. Com os resultados foi possível comparar a eficiência entre os dois métodos e com resultados da literatura sobre o assunto. A comparação entre os dois métodos da PSO, clássico e gaussiano, apresentou como resultado uma pequena superação do segundo método sobre o primeiro de 3,9%.

Carvalho (2019) em seu artigo sobre PSO, realiza uma abordagem sobre os conceitos e topologias da meta-heurística de modo a demonstrar o potencial do mecanismo e comparar o comportamento da otimização com base na topologia adotada, função objetiva e peso de

inércia definidos. Seus resultados conseguiram demonstrar a capacidade das três principais topologias do PSO, sendo elas o melhor global, melhor local (Anel) e melhor focal. Com seus resultados concluiu que a topologia melhor global tem uma convergência mais rápida devido ao compartilhamento da melhor posição com todas as partículas, além de destacar a importância da parametrização da meta-heurística para se atingir bons resultados.

No que se refere a projetos de redes ópticas otimizados, Dias (2018) em sua dissertação demonstrou o potencial das redes PON e a demanda emergente por tal tecnologia no Brasil com a substituição dos tradicionais cabos metálicos por fibras ópticas de alta capacidade. Também expôs os desafios na implementação das redes ópticas devido à geografia do país, e das diversas possibilidades de posicionamento dos equipamentos ópticos ao longo da rede. Dias (2018) propôs uma nova técnica de elaboração de redes PON atrelada a análise técnico-econômica, empregando um sistema computacional baseado em AG. A formulação do algoritmo foi tratada utilizando a teoria dos grafos, pois resulta em ganhos consideráveis em relação ao planejamento de redes produzido de forma tradicional, visto que a nova técnica visa eliminar eventuais erros de projetos, reduzir o tempo envolvido no processo e garantir as condições mínimas de funcionamento da rede. Com base nas análises do Dias (2018), identificou-se uma relação de custo entre a topologia adotada na rede óptica ao se comparar 4 modelos de topologia, sendo 2 modelos do tipo centralizada e 2 do tipo distribuída, distinguindo-se pela relação de divisão óptica. Os resultados demonstrados pelo autor confirmaram que o sistema baseado em AG é bastante eficiente e apresenta custos sempre menores ou próximos da solução manual. Tendo como vantagem a drástica redução de tempo necessário na elaboração da rede óptica, tendo também um elevado nível de detalhe apresentado para cada solução encontrada. A proposta do autor foi testada em cenários de várias escalas, mostrando-se uma ferramenta eficiente em redes PON de diferentes tamanhos. Dias (2018) em suas sugestões para trabalhos futuros sugeriu o uso de novas técnicas de otimização utilizando algoritmos heurísticos, visando comparar a eficiência entre os algoritmos propostos, tarefa sendo realizada neste trabalho.

Pereira (2013) em sua dissertação de mestrado realizou o desenvolvimento de um método para otimizar o processo de planejamento e dimensionamento de redes GPON utilizando algoritmos, seguindo as recomendações da União Internacional de Telecomunicações (do inglês, *International Telecommunication Union* (ITU-T)) G.984.x O algoritmo proposto usa como base o nível máximo de divisões ópticas e o comprimento dos enlaces da fibra como métrica de custo, pois se verificou que o custo das fibras é o mais dispendioso do projeto. A formulação

do problema se deu de forma semelhante a do Dias (2018), foi utilizado a teoria dos grafos para otimizar o posicionamento dos divisores de potência, também foi utilizado técnicas de cauterização para maximizar a eficiência do algoritmo.

Abrão (2017) no artigo analisaram um mecanismo de eficiência energética em redes ópticas passivas baseadas em *10Gigabit Ethernet Passive Optical Network* (GEPON). O mecanismo híbrido proposto emprega o esquema de hibernação das *Optical Network Terminals* (ONTs) previsto para o padrão 10GEPON em conjunto com o controle/alocação de potência dos lasers, baseado na otimização por PSO. A proposta do trabalho foi de empregar um algoritmo de controle e alocação de recursos baseado no PSO. O PSO foi escolhido em função da relação custo-benefício quando comparado com outras técnicas de otimização que utilizam inversão de matrizes, métodos numéricos e outros algoritmos heurísticos. Os resultados mostram que a energia consumida por bit em cada ONU pode diminuir 10^{-7} para 10^{-12} quando se emprega o mecanismo proposto. Ainda, verificou-se que o algoritmo proposto é robusto, apresentando elevada taxa de convergência ($>0,95$) em função da variação de potência na rede.

Barth (2016) em sua dissertação de mestrado teve como objetivo apresentar um método computacional para o projeto de redes de acesso híbrido (fibras ópticas e sem fio), para otimizar a instalação de equipamentos em uma região geográfica, com o intuito de reduzir custos para o atendimento de cidades inteligentes. Para obter os resultados foi desenvolvido um sistema computacional baseado na meta-heurística de colônia de formigas e comparou com os resultados publicados na literatura que utilizaram outras heurísticas. Realizando esse comparativo, o autor obteve resultados com 20% de melhoria, demonstrando que sua abordagem é eficiente para o planejamento de infraestrutura de redes híbridas multiníveis capacitadas.

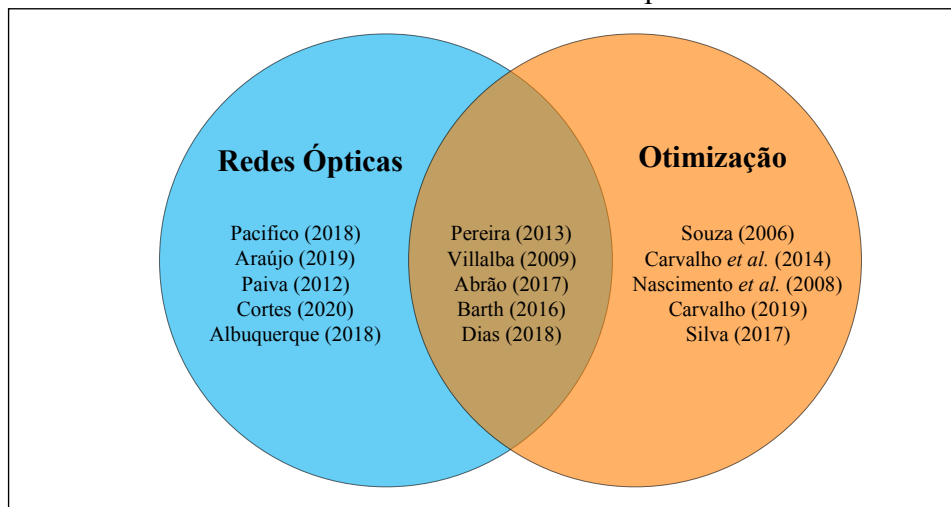
Diante do que foi exposto, os estudos apresentados na literatura que foram os pilares na proposta deste trabalho estão relacionados no diagrama abaixo de modo a situar o estado da arte das áreas aqui envolvidas.

1.4 Objetivos

Atualmente ISPs de pequeno e grande porte normalmente usam métodos pouco automatizados para a criação de redes PON, requerendo vários dias de trabalho e alocando recursos que poderiam ser usados em outras necessidades da empresa (DIAS, 2018).

Para a elaboração de um projeto de telecomunicações com elementos ópticos é necessário que o ISP realize a análise de inúmeros fatores, estes que contribuem para o aumento

Figura 7 – Áreas do conhecimento envolvidas e seus respectivos trabalhos.



Fonte: Autor, 2022.

da complexidade da rede, pois é fundamental um estudo minucioso da geografia do local onde será realizada a implementação da rede, além de verificar a quantidade e relação de potenciais clientes por residência. Também é necessário realizar um estudo para o posicionamento de forma adequada dos divisores ópticos ao longo da rede, de modo que a rede tenha escalabilidade para ampliações futuras mantendo a qualidade do sinal, esperando-se sempre o menor custo de implementação possível (DIAS, 2018).

O objetivo desse trabalho é propor uma nova técnica de planejamento de redes PON com o uso do PSO, automatizando a criação da rede, de modo a:

- Minimizar custo de implementação da rede FTTH causados pela falta de planejamento;
- Garantir condições mínimas de funcionamento adequado da rede FTTH;
- Comparar o projeto proposto com outros métodos.

1.5 Produto Tangível do Trabalho

A seguinte publicação foi **submetida** a partir desta monografia:

1. Antônio L. S. Aguiar, Francisco B. C. Sousa e Yuri V. L. de Melo, **Optical Distribution Network Design using PSO**, submetida em IEEE Communications Letters.

1.6 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é dividida em cinco capítulos, incluindo o capítulo de introdução. Um breve resumo dos quatro capítulos restantes é apresentado a seguir:

- **Capítulo 2** : apresenta os principais conceitos aplicados neste trabalho, tais como: comunicação óptica, grafos e a meta-heurística PSO. Mais especificamente, neste capítulo, serão abordados os princípios básicos das redes de telecomunicações, os princípios sobre comunicações ópticas como os efeitos de reflexão, refração e a lei de Snell. Em seguida, é apresentado a estrutura das redes de telecomunicações ópticas, conceito de redes ópticas passivas e suas principais arquiteturas e métricas de desempenho. Ao final deste capítulo será mostrado os conceitos de grafos empregadas neste trabalho e por fim, é discutido sobre a utilização da meta-heurística PSO;
- **Capítulo 3** : apresenta a metodologia deste trabalho para a proposta de disposições dos equipamentos na rede óptica, desde a escolha da região geográfica do projeto até a implementação do PSO;
- **Capítulo 4** : neste capítulo será descrito o processo de parametrização do algoritmo PSO, através deste processo será possível determinar os valores dos parâmetros que resultam em um projeto viável e de baixo custo no cenário analisado. Além disso, os resultados obtidos pelo PSO serão comparados com o método convencional e o aleatório;
- **Capítulo 5** : é apresentado as devidas conclusões da monografia e aspectos que podem ser aperfeiçoados em trabalhos futuros.

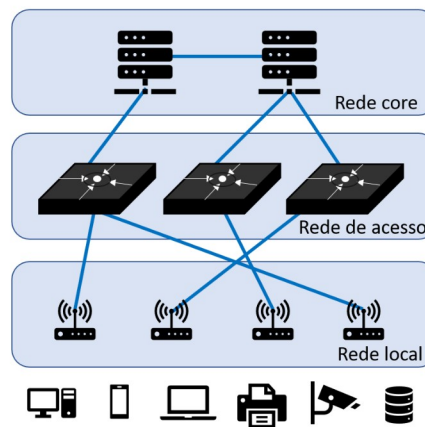
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são expostos os principais conceitos aplicados neste trabalho, tais como: comunicação óptica, grafos e a meta-heurística PSO. Tendo como destaque os princípios básicos das redes de telecomunicações, os princípios sobre comunicações ópticas como os efeitos de reflexão, refração e a lei de Snell. Em seguida, é apresentada a estrutura das redes ópticas, conceito de redes ópticas passivas e suas principais arquiteturas e métricas de desempenho. Ao final deste capítulo será mostrado os conceitos de grafos empregados neste trabalho e por fim, será discutido sobre a utilização da meta-heurística PSO.

2.1 Estrutura Básica das Redes de Telecomunicações

Em comunicação de dados a infraestrutura das redes de telecomunicação possuem diferentes níveis hierárquicos, sendo tipicamente classificados como redes principais (*core*), redes de acesso e redes locais.

Figura 8 – Ilustração de uma rede básica de telecomunicação.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

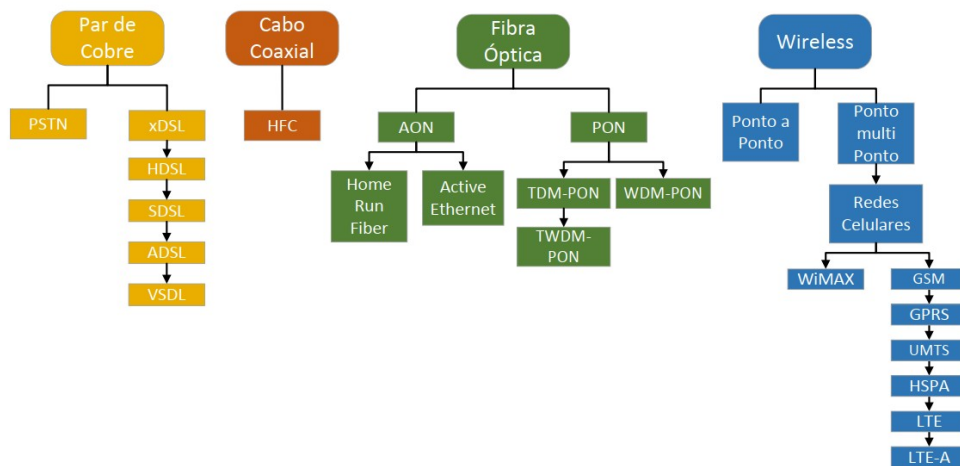
A rede *core* é normalmente projetada com ligações de redundância para garantir qualidade e segurança na rede, pois ela é responsável pelas interligações das redes de acesso, pelo roteamento e chaveamento das informações. Com suas atribuições, a rede *core* desempenha funções em larga escala, a níveis nacionais, continentais ou até mesmo intercontinentais, controlando grande volume de dados. Com isso, as redes *core* comumente usam a tecnologia óptica para suprir a sua demanda (DIAS, 2018).

As redes de acesso têm como função básica promover a interligação dos ISPs aos usuários finais, compostas por diferentes tipos de tecnologias como, por exemplo: cabo de cobre,

cabo coaxial, fibra óptica e *wireless*. Cabe ressaltar que as tecnologias podem ser utilizadas em conjunto para maximizar a transmissão de dados e diminuir custos de implementação de infraestrutura (DIAS, 2018).

Além disso, os segmentos de tecnologias nas redes de acesso sofrem constantes atualizações de melhoria de desempenho. Na Figura 10 é apresentado os meios de transmissão nas redes de acesso e suas variações, sendo estas relacionadas a transmissão através de par de cobre, cabo coaxial, fibra óptica e *wireless*. Atualmente no Brasil, devido à geografia do país se destacam as redes ópticas e as redes *wireless* pelas suas características distintas e pela capacidade de transmissão que cada uma propõe.

Figura 9 – Meios de transmissão nas redes de acesso.



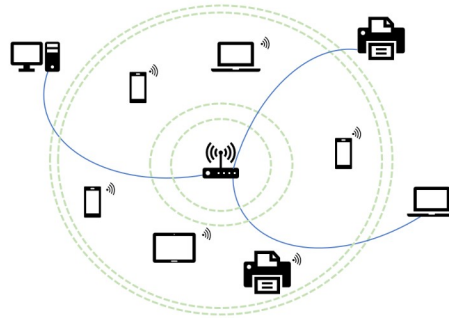
Fonte: (DIAS, 2018).

Já as redes locais, ilustrada pela Figura 10, são pequenas redes usadas pelos usuários finais, comumente utilizadas com *switches* ou roteadores que usam a tecnologia *Local Area Network* (LAN) ou *Wireless Local Area Network* (WLAN) do protocolo *Internet Protocol* (IP) (DIAS, 2018).

2.2 Princípios das Comunicações Ópticas

A utilização da luz para a comunicação vem sendo utilizada desde o início da humanidade. Sua usabilidade foi se desenvolvendo e seu uso vem ficando cada vez mais tecnológico, passando de simples sistemas visuais como telégrafo óptico, o *Sémaphore*, idealizado pelo engenheiro francês Claude Chappe, passando para sistemas como o *Photophone* de Bell, usado na telefonia em 1880, desenvolvido por Alexander Graham Bell, chegando aos dias atuais onde

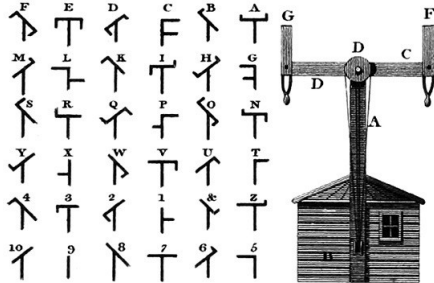
Figura 10 – Rede local do usuário final.



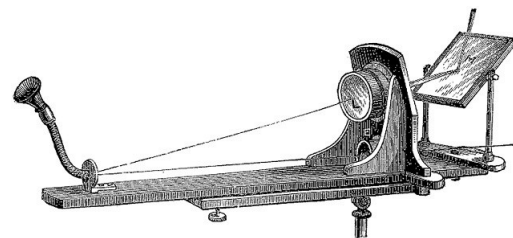
Fonte: Próprio Autor, 2022.

a luz é utilizada em fibras ópticas para a transmissão de dados em larga escala e a níveis globais (PINHEIRO, 2017). A Figura 11a, apresenta o dispositivo *Sémaphore*, que era usualmente instalado em locais altos e permitia a transmissão de sinais utilizando braços mecanizados operados manualmente. O *Sémaphore* era capaz de representar sinais com base na posição dos braços mecânicos. Já a Figura 11b apresenta a estrutura do *Photophone* de Bell, que utilizava a luz através de um espelho vibratório para a transmissão de voz (PINHEIRO, 2017).

Figura 11 – Primórdios das comunicações ópticas.



(a) Códigos Sémaphore de Chappe.



(b) Estrutura do Photophone de Bell.

Fonte: (PINHEIRO, 2017).

Os atuais sistemas de comunicações ópticas usam fibras ópticas proveniente dos avanços tecnológicos e científicos ao longo dos anos. Conforme os sistemas evoluem, suas complexidades também aumentam, de modo que é essencial um conhecimento prévio dos conceitos físicos da luz, tais como: forma de propagação, índice de refração e reflexão interna total.

A definição à cerca da luz sofreu diversas alterações ao longo da história da física. A princípio a luz era caracterizada como uma partícula emitida por fontes luminosas, posteriormente o físico James Clerk Maxwell propôs que a luz tem natureza de uma onda eletromagnética. Atualmente a luz é caracterizada pela sua dualidade onda-partícula, podendo se comportar como

uma partícula ou como uma onda (KEISER, 2011). Ademais, as características da fibra óptica nos sistemas de transmissão de ondas luminosas tem grande relevância, pois, delimitam o funcionamento e qualidade dos serviços, trazendo parâmetros à cerca dos materiais e estrutura a serem utilizados, além dos mecanismos de perda ou atenuação do sinal (KEISER, 2011).

2.2.1 Efeitos de refração e reflexão

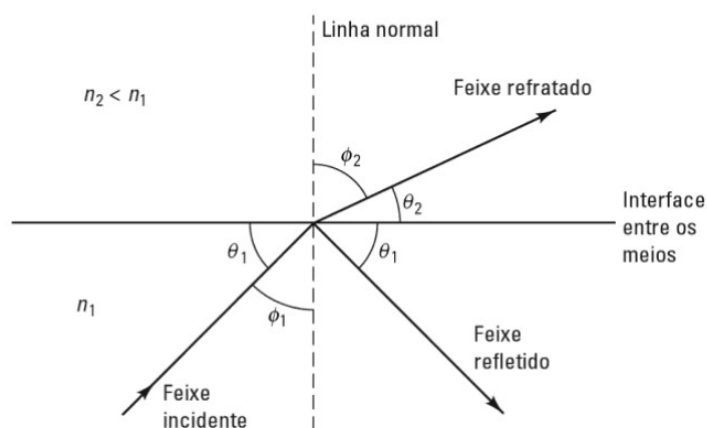
Para a fabricação dos cabos de fibra óptica utilizam-se materiais caracterizados pelo seu índice de refração. O índice refrativo n é dado pela razão entre a velocidade da luz no vácuo c e a velocidade da onda no material dielétrico s , ou seja, $n = \frac{c}{s}$, já a velocidade de uma onda é associada pela sua frequência f e o seu comprimento de onda λ , onde $v = f \cdot \lambda$. No vácuo, uma onda luminosa tem uma velocidade de aproximadamente $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ (KEISER, 2011).

Com o índice refrativo do material, o funcionamento básico das fibras ópticas, pode ser descrito pela lei de Snell, também conhecida como segunda lei da refração. Nela, a relação entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é igual à relação entre as velocidades de propagação da onda nos dois meios respectivos, conforme a Equação (2.1), onde os ângulos φ_1 e φ_2 são ilustrados na Figura 12.

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

Na Figura 12, é mostrado que o ângulo θ_1 no feixe incidente é idêntico ao ângulo do feixe refletido na interface entre os meios, demonstrando o efeito da reflexão. Ou seja, o funcionamento da fibra óptica está baseado em dois fenômenos: a reflexão e a refração da luz.

Figura 12 – Refração e reflexão de um feixe de luz em uma interface material.

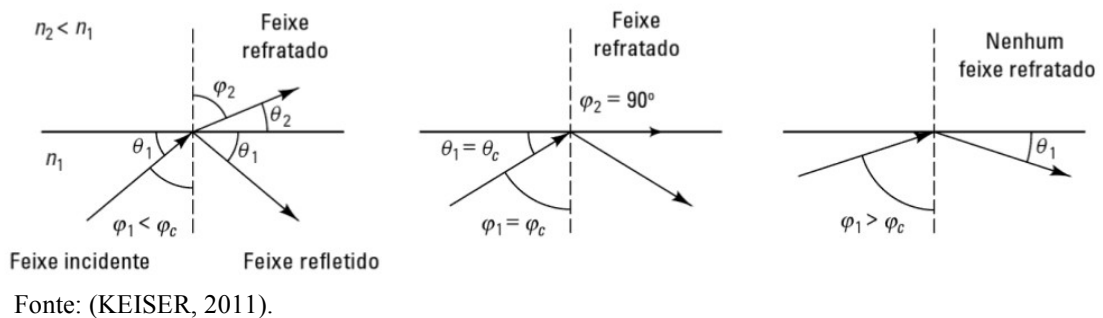


Fonte: (KEISER, 2011).

As fibras ópticas usam o efeito de reflexão e refração para guiar a luz por um canal. A reflexão pode ocorrer de modo interno ou externo com base na densidade dos materiais utilizados, além de que, quando um raio de luz trafega por um meio e passa para outro meio de densidade diferente, ele tende a mudar sua direção. No momento em que a luz é refletida por um material mais denso opticamente, ou seja, com índice de refração mais elevado, o processo é chamado de reflexão externa. Já quando a luz passa por um material menos denso opticamente é chamado de reflexão interna (KEISER, 2011).

Com base na Figura 13, ao passo que o ângulo de incidência em um material mais denso opticamente aumenta, o ângulo de refração aproxima-se de 90° , além desse valor, nenhuma refração é realizada e os raios de luz são refletidos internamente (KEISER, 2011). Dessa forma, a condição necessária para a reflexão interna total é fazer com que θ_1 supere o ângulo crítico θ_c , de modo que $\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$. Com isso, as fibras ópticas utilizam o fenômeno da reflexão interna total para a transmissão dos raios de luz. Sem este efeito não seria possível guiar a luz por um canal.

Figura 13 – Representação do ângulo crítico e reflexão interna total.

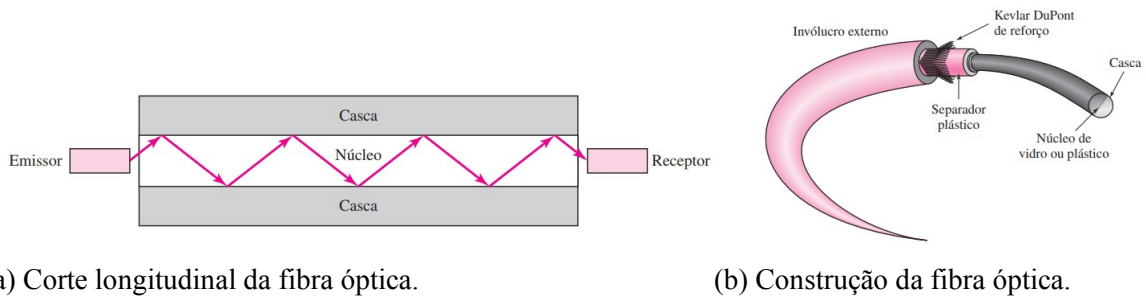


2.3 Estrutura Básica da Comunicação Óptica

A fibra óptica possui um núcleo de vidro extremamente fino, com dimensões na casa dos micrômetros μm , revestido por uma casca de plástico ou vidro menos denso. A diferença de densidade dos dois materiais deve permitir que o fluxo de luz através do núcleo seja refletido pela casca em vez de ser refratado, permitindo assim o deslocamento do feixe ao longo do núcleo, conforme ilustra a Figura 14a. Além disso, há revestimentos na fibra óptica para promover a proteção dos materiais internos, conforme ilustra a Figura 14b (FOROUZAN, 2010).

Devido aos aspectos físicos distintos das fibras ópticas, com opções de uso de materiais distintos e variados índices de refração, surgiram no setor de telecomunicações algumas

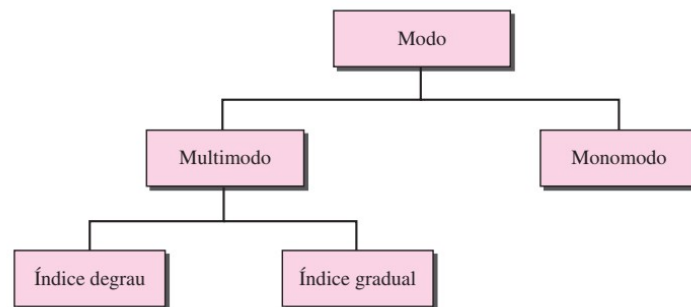
Figura 14 – Estrutura da fibra óptica.



Fonte: (FOROUZAN, 2010).

características para distinção dos modelos de fibra. Existem duas classificações elementares quanto a categoria das fibras ópticas de acordo com o modo de propagação da luz ao longo no núcleo: fibras monomodo e fibras multimodo, conforme ilustra a Figura 15. As fibras multimodo, no que lhe concerne, estão subdivididas em dois tipos: índice degrau e índice gradual (PINHEIRO, 2017).

Figura 15 – Modos de propagação na fibra óptica.

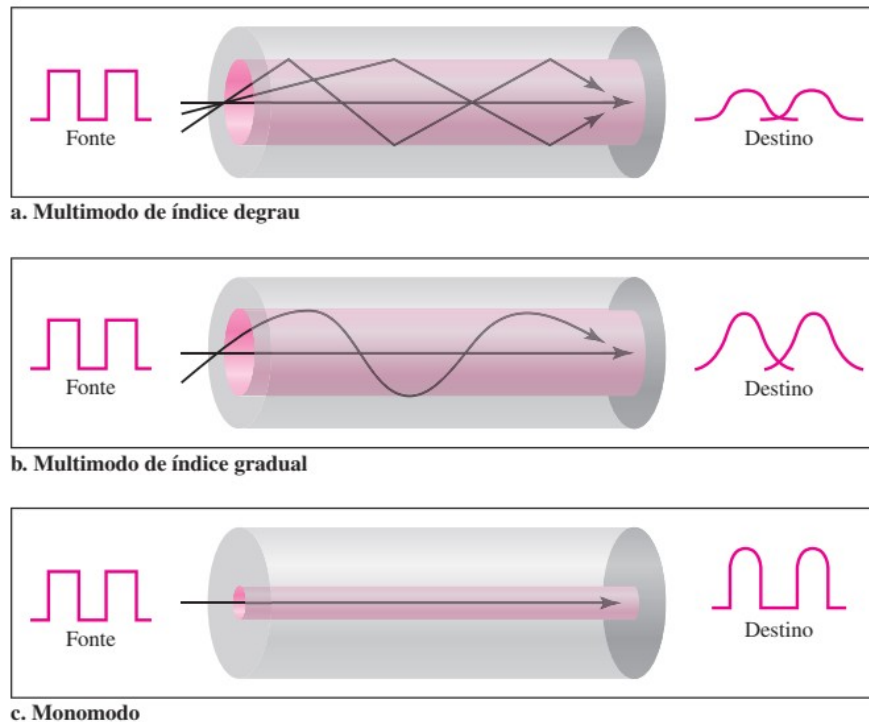


Fonte: (FOROUZAN, 2010).

- Fibra monomodo: Utiliza uma luz focalizada que limita os fluxos a um pequeno intervalo de ângulos, se aproximando da horizontal, em vista disto, é fabricada com um núcleo muito menor que a da fibra multimodo, conforme ilustra a Figura 16c (FOROUZAN, 2010). Os sistemas que usam fibras monomodo apresentam desempenho superior se comparados aos sistemas que utilizam fibras multimodo, também são mais utilizadas nas redes das operadoras de telecomunicações, provedores ISP e de TV a cabo (PINHEIRO, 2017).
- Fibra multimodo: Nesta tipo de fibra, a luz pode se deslocar ao longo do núcleo por diferentes caminhos, isso ocorre com base no modo de fabricação do núcleo, sendo este modo subdividido em **Índice Degrau** e **Índice Gradual**. Na fibra multimodo com índice degrau, o núcleo apresenta densidade constante, dessa forma o feixe de luz consegue

trafegar em linha reta até a casca, onde ocorre uma mudança abrupta de direção devido à diferença de densidade, conforme ilustra a Figura 16a. Já na fibra multimodo com índice gradual a fibra apresenta densidade variável, a densidade é maior no centro do núcleo e diminui gradualmente até sua borda, conforme ilustra a Figura 16b (FOROUZAN, 2010).

Figura 16 – Modos de propagação.



Fonte: (FOROUZAN, 2010)

Na Tabela 1 é demonstrado a classificação comercial da fibra óptica com base no seu tipo, núcleo, diâmetro da casca e modo. O tipo é categorizado pela razão entre o diâmetro do núcleo e o diâmetro da casca, ambos expressos em micrômetros.

Tabela 1 – Tipos de fibras com suas principais características técnicas.

Tipo	Núcleo (μm)	Diâmetro da Casca (μm)	Modo
50/125	50	125	Multimodo, índice gradual
62,5/125	62	125	Multimodo, índice gradual
100/125	100	125	Multimodo, índice gradual
7/125	7	125	Monomodo

Fonte: (FOROUZAN, 2010).

2.4 Redes Ópticas Passivas

As redes de telecomunicações baseadas em sistemas ópticos são divididas em dois grupos, as redes ópticas passivas PON e as redes ópticas ativas (do inglês, *Active Optical Network* (AON)), diferenciadas essencialmente pela presença de equipamentos eletricamente alimentados na rede óptica. Na rede PON não há elementos entre o escritório do provedor e a rede local do usuário que necessitam de energia elétrica, diferentemente da rede AON, que por sua vez, utiliza elementos elétricos para aumentar a capacidade da rede (DIAS, 2018).

Para este trabalho, considerou-se a utilização da rede PON para a otimização em virtude de sua maior utilização em ISPs e sua vantagens que serão citadas ao longo deste trabalho, logo conceitos e peculiaridades das redes AON não serão citadas.

Devido não ter elementos ativos eletricamente na rede PON, sua principal vantagem está no baixo custo de implantação e de manutenção, além de um maior tempo de via útil da rede. Cabe ressaltar que devido à popularização desta tecnologia seus custos de implementação tendem a ficar cada vez mais atrativos ao longo dos anos. A rede PON também pode ter sua largura de banda ampliada sem o aumento de componentes na rede, sendo feita através de roteamento óptico flexível (PINHEIRO, 2017).

2.4.1 Comparativo dos padrões de redes PON

Com o desenvolvimento das redes de telecomunicações diferentes padrões para redes ópticas passivas foram projetadas, e estão em fase de desenvolvimento, com a finalidade de acompanhar a crescente demanda por novos serviços.

2.4.1.1 Padrão EPON

A arquitetura *Ethernet Passive Optical Network* (EPON) foi projetada pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (do inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE)) com base na especificação 802.3ah, no padrão Ethernet. Esta arquitetura permite o tratamento das informações entre a rede de acesso e as redes Ethernet, sem a necessidade de camadas adicionais, de modo nativo. A tecnologia encapsula e transporta dados em quadros de Ethernet e também transporta IP em enlace Ethernet (PINHEIRO, 2017).

2.4.1.2 Padrão GPON

O padrão GPON também conhecida como *Gigabit PON*, é a segunda geração da ITU-T, publicada em 2003, com as recomendações G.984.1, G.984.2 e G.984.3 que tratam dos meios físicos, dos requisitos dos serviços, das camadas para processamento dos quadros, métodos de alcance, funcionalidade e segurança. Em suma, é uma arquitetura mais robusta que a EPON tendo maiores taxas de transmissão e maior capacidade de número de clientes (PINHEIRO, 2017).

2.4.1.3 Padrão 10GE PON

A 10GE PON surgiu em 2009 como melhoria da rede EPON, seguindo a especificação IEEE 802.3av., garantindo a compatibilidade com a EPON já existente, além de promover maiores taxas de transmissão e maior número de clientes por porta PON (PINHEIRO, 2017).

2.4.1.4 Padrão 10GPON

A 10GPON faz parte das tecnologias XG-PON1 e segue a especificação ITU G.987, com taxas de transferência mais elevadas se comparado ao padrão GPON da ITU G.984. Mediante ao exposto, as novas arquiteturas PON em desenvolvimento apresentam uma tendência para a transmissão de 40 Gbps, ou superior, entretanto é de fundamental importância o aprimoramento de técnicas de multiplexação para que seja suportado elevadas taxas de transmissão. Com isso, os novos modelos poderão apresentar serviços de gerenciamento de banda, facilidade no uso múltiplo de banda larga, melhorias no transporte de informação ao longo da rede com controle da qualidade de serviço e funções de gerenciamento independentes do tráfego de dados. Na Tabela 2 é demonstrado as principais características das tecnologias PON.

2.5 Principais Componentes da Rede PON

Como já citado nas seções anteriores, a rede PON não utiliza equipamentos alimentados eletricamente para a transmissão de dados ao longo da rede¹. Nesta rede o sinal óptico é injetado e distribuído com todos os usuários ligados a ela. O *splitter* divide os sinais de acordo com o especificado para cada caso, de forma balanceada ou desbalanceada, deste modo o sinal é compartilhado ao longo da rede, a partir da OLT até chegar as *Optical Network Units* (ONUs)

¹ Apenas os equipamentos nos pontos de transmissão e recepção são alimentados eletricamente.

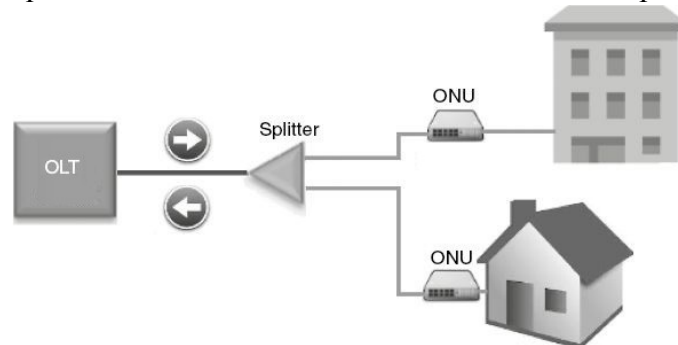
Tabela 2 – Principais características das tecnologias PON (padronizadas pelo ITU-T e IEEE).

	EPON	GPON	10GEPON	10GPON (NG-PON1)
Taxa de <i>downstream</i>	1,25 Gbit/s	2.5 Gbit/s	10 Gbit/s	10 Gbit/s
Taxa de <i>upstream</i>	1,25 Gbit/s	1.25 ou 2.5 Gbit/s	1 ou 10 Gbit/s	2.5 ou 10 Gbit/s
Comprimento de onda <i>downstream</i>	1490 nm	1490 nm	1575 a 1580 nm	1575 a 1580 nm
Comprimento de onda <i>upstream</i>	1310 nm	1310 nm	1260 a 1280 nm	1260 a 1280 nm
Comprimento de onda de vídeo <i>broadcast</i>	1550 nm	1510 nm	1550 nm	1550 nm
Alcance máximo	20 km	20 km	20 km	20 km
Número máximo de usuários (porta PON)	16 ou 32	64 ou 128	64 ou 128	128 ou 256
Custo	Baixo	Médio	Alto	Alto

Fonte: Adaptado de (DIAS, 2018).

(PACIFICO, 2018). Na Figura 17 é apresentado o esquema básico da rede PON. Os principais elementos que constituem uma rede PON serão descritos nas seções a seguir.

Figura 17 – Esquema básico da rede PON com único elemento passivo.



Fonte: Adaptado de (PINHEIRO, 2017).

2.5.1 OLT

O equipamento OLT é o gerenciador da rede óptica, em suma, é um concentrador instalado fisicamente na central de equipamentos do provedor (PINHEIRO, 2017). Tendo como função de administrar o tráfego da rede, multiplexação, disponibilizar serviços para usuários finais, controlar a qualidade de serviços, fornecendo serviços de voz, dados e vídeo, entre outras tarefas (PACIFICO, 2018), na Figura 18 apresentamos uma ilustração de uma OLT.

Figura 18 – OLT AN6000-2 da fabricante FiberHome.

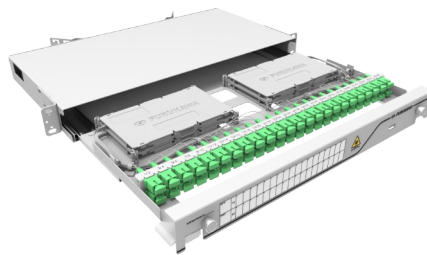


Fonte: Catálogo da Fiberhome, 2022.

2.5.2 DIO

O equipamento Distribuidor Interno Óptico (DIO), ilustrado pela Figura 19, tem como finalidade, promover a proteção, acomodação e distribuição das fibras e das emendas dos cabos ópticos provenientes da rede externa, a fim de propiciar a administração e gerenciamento dos cabos (PINHEIRO, 2017). Nos ISPs são utilizados armários de telecomunicações para acomodar as DIOs e os equipamentos de administração da rede como OLTs e roteadores.

Figura 19 – DIO BT48 da fabricante Furukawa.



Fonte: Catálogo da Furukawa, 2022.

2.5.3 ONU

A ONU é um equipamento ativo, instalado em locais internos, no ambiente do usuário final ou próximo a ele, ilustrado pela Figura 20. Este equipamento realiza a conversão do sinal óptico em sinal elétrico para ser utilizado por dispositivos da rede local (DIAS, 2018). Cabe ressaltar que atualmente no mercado alguns modelos de ONUs também realizam papel de *Access Point Wireless* com rede LAN, com função de *switch* e roteamento, as fabricantes FiberHome, Huawei e Nokia contam com soluções para ISPs, com ONUs *bridge* e ONUs *wireless*.

2.5.4 Divisores ópticos (*Splitters*)

Os divisores ópticos (*Splitters*) são responsáveis por dividir ou combinar o sinal óptico transmitido a partir de uma fonte comum. É um equipamento que não necessita de fonte de alimentação elétrica, ou seja, é um equipamento passivo e situa-se entre a OLT e as ONUs (PACIFICO, 2018). O *Splitter* é utilizado como divisor óptico em caixas de emenda externas

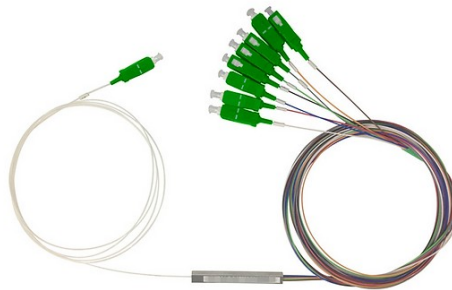
Figura 20 – ONU modelo HG6245D, da fabricante FiberHome.



Fonte: Catálogo da Fiberhome, 2022.

realizando a divisão do sinal proveniente de uma fibra para N fibras, em razões usuais de 1:2, 1:4, 1:8, 1:32 e 1:64 (PINHEIRO, 2017), tal como apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Modelo de *Splitter* balanceado 1x8.



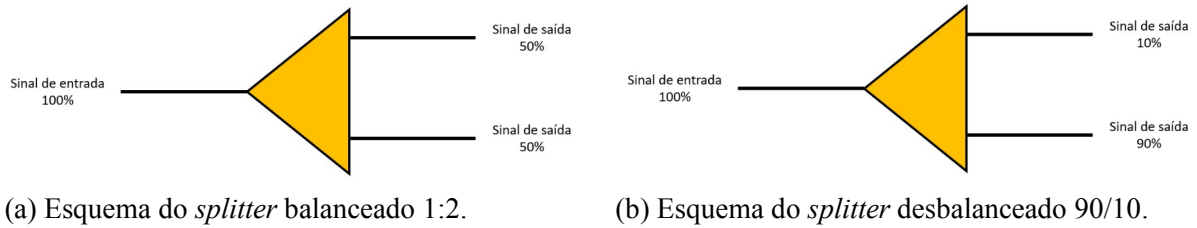
Fonte: Catálogo Fiberx, 2022.

Há duas categorias básicas de *Splitters*, o balanceado e o desbalanceado. Com base na categoria do divisor óptico a rede PON recebe uma nomenclatura diferente, podendo ser uma rede PON balanceada ou uma rede PON desbalanceada. O *Splitter* balanceado realiza a divisão da potência do sinal óptico de entrada em cada porta de saída em partes iguais (balanceadas), tal como ilustrado na Figura 22a. Enquanto no *Splitter* desbalanceado a divisão da potência do sinal óptico de entrada em cada porta de saída em partes desiguais (desbalanceadas), normalmente utilizado em projetos especiais que necessitam de frações de potência alocadas ao longo da rede (PINHEIRO, 2017), como ilustrado na Figura 22b.

2.5.5 CEO

A Caixa de Emenda Óptica (CEO) é utilizada para comportar as fibras unidas no processo de emenda por fusão, protegendo-as do meio externo, sendo resistente a água, poeira

Figura 22 – *Splitter* balanceado e desbalanceado.



(a) Esquema do *splitter* balanceado 1:2.

(b) Esquema do *splitter* desbalanceado 90/10.

Fonte: (PINHEIRO, 2017).

e outras impurezas presentes no meio. A CEO pode ser encontrada em diversos tamanhos, chegando a acomodar dezenas de fusões. É um componente instalado nos postes ou nos vãos entre os postes (ARAÚJO, 2019).

Figura 23 – CEO da fabricante Furukawa.



Fonte: Catálogo da Furukawa, 2022.

2.5.6 CTO

A Caixa de Terminação Óptica (CTO) tem com função realizar a distribuição das fibras (*drops*) para os usuários finais, é um componente que recebe o cabo principal (*backbone*) e realiza a divisão óptica de acordo com a especificação da CTO. Assim como a CEO, a CTO também tem função de proteção, protegendo as fibras ópticas contra chuva, poeira e contra raios UV (ARAÚJO, 2019).

2.5.7 Emenda por fusão

Durante a fase de projeto da rede óptica, é necessário utilizar com maestria os conectores e emendas na rede. Estes equipamentos passivos têm como função realizar a junção entre duas fibras, no entanto, esta ligação pode acarretar perdas significativas no sinal óptico. Deste modo, constata-se que o projeto de uma rede óptica demanda de um planejamento

Figura 24 – CTO da fabricante Furukawa.



Fonte: Catálogo da Furukawa, 2022.

minucioso, visando obter um sistema confiável e com uma infraestrutura flexível e escalável.

Em vista disto, ISPs devem levar em consideração que os componentes passivos que irão trabalhar associado aos cabos ópticos devem ser utilizados de maneira que seja garantido o melhor desempenho com a menor perda possível para a rede (PINHEIRO, 2017). Emendas são utilizadas para ampliar ou dar continuidade a um lance de fibra óptica quando o comprimento do sistema é maior que o comprimento contínuo do cabo disponível, este artifício também é usado para permitir a inserção de novos componentes ópticos no sistema ou em ações corretivas devido a rompimentos no cabo óptico. Há dois métodos para a emenda de fibras ópticas: por fusão e mecânica. Na emenda por fusão, em suma, as fibras são alinhadas pelo núcleo utilizando uma máquina de fusão, Figura 25, e são submetidas a um arco voltaico que eleva a temperatura das fibras, provocando seu derretimento e sua soldagem (PINHEIRO, 2017). Este processo de emenda acarreta uma pequena perda no sinal óptico, que com base na ITU-T G.671 a perda máxima na emenda de fusão é de 0,08dB (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2019),

Figura 25 – Máquina de fusão, da fabricante Fujikura.



Fonte: Catálogo da Fujikura, 2022.

2.5.8 Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo

O Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo (OTDR) é um equipamento utilizado por ISPs para avaliar as características de um enlace óptico. Através do seu uso, é possível identificar e localizar falhas e anomalias na rede. Também é possível determinar os valores de atenuação da fibra, comprimento, perdas nos conectores e emendas e níveis de reflectância de luz no enlace (PINHEIRO, 2017). Na Figura 26 é ilustrado o OTDR, da fabricante Yokogawa.

Figura 26 – OTDR – AQ7280, da fabricante Yokogawa.



Fonte: Catálogo da Yokogawa, 2022.

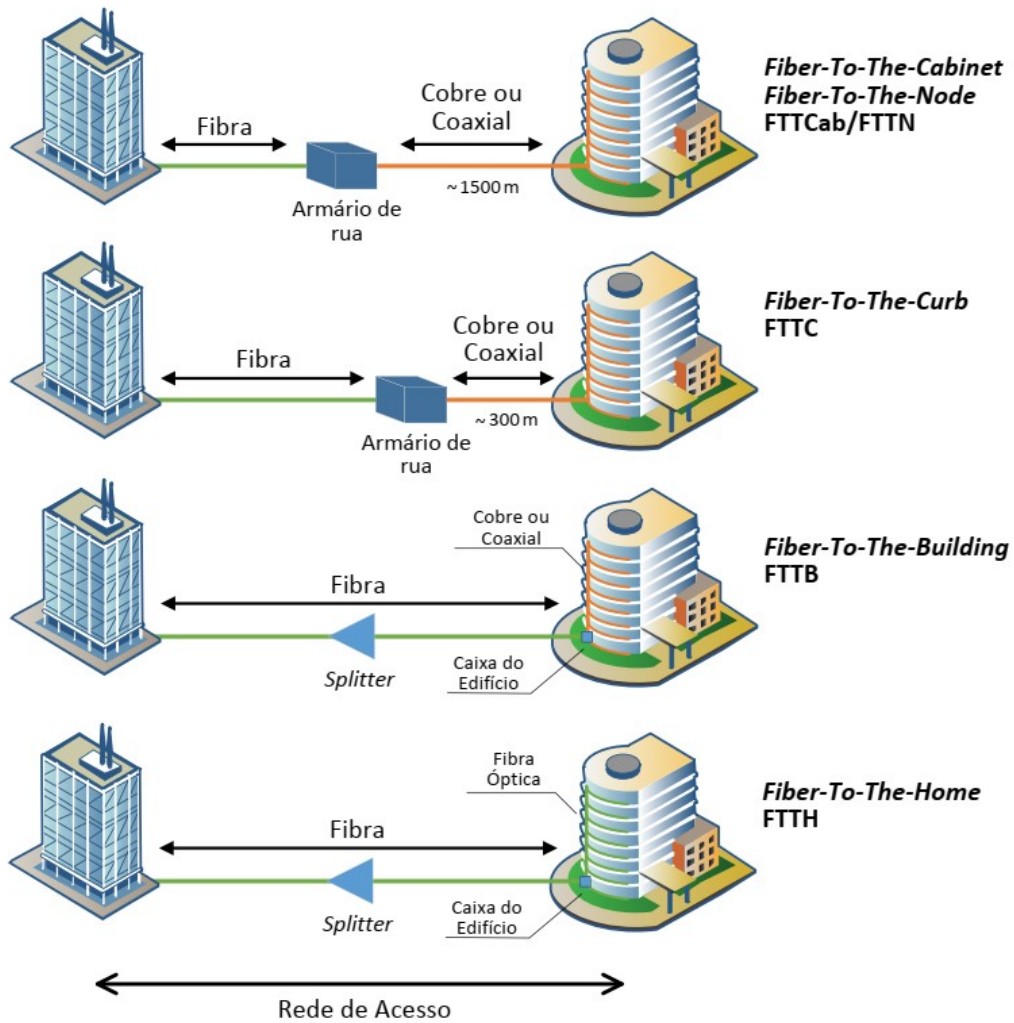
2.6 Arquitetura FTTx

A arquitetura da rede PON é caracterizada pelo caminho que o cabo óptico irá percorrer, indicando também o quão perto a fibra está do usuário final, com isso, a tecnologia FTTx descreve a grande gama de arquiteturas, onde a letra 'x' representa o ponto de terminação do cabo óptico. Na Figura 27 é apresentado as principais arquiteturas utilizadas no mercado.

Devido a grande possibilidade de variação, a arquitetura da rede receberá diferentes nomenclaturas conforme a designação da letra 'x' (DIAS, 2018), tais como:

- **FTTN (Fiber To The Node) ou FTTCab (Fiber To The Cabinet)** : nesta arquitetura o cabo de fibra óptica vai até um armário de telecomunicações localizado em áreas externas. Do armário até o usuário final é utilizado a infraestrutura de outras tecnologias, como par de cobre ou cabo coaxial, com extensão máxima de 1500m.
- **FTTC (Fiber To The Curb)** : semelhante à arquitetura anterior, esta também reutiliza a infraestrutura de outras tecnologias, mas difere-se, pois o armário de telecomunicações já se encontra próximo dos clientes, com distância máxima de 300m.

Figura 27 – Arquiteturas FTTx.



Fonte: (DIAS, 2018).

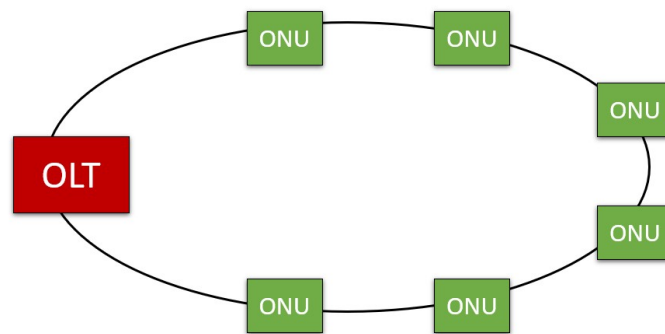
- **FTTB (Fiber To The Building):** nesta arquitetura o cabeamento óptico finaliza no prédio do cliente (não chegando diretamente à casa usuário final) e a interligação entre o usuário final e a fibra óptica é feita usando cabos de par de cobre ou cabo coaxial.
- **FTTH (Fiber To The Home):** : nesta arquitetura o cabeamento óptico vai até o usuário final, diferentemente das demais arquiteturas apresentadas, não há a utilização de cabos metálicos na transmissão dos dados, com isso, tem-se uma maior qualidade e capacidade de transmissão que as demais arquiteturas. No entanto, para implementar essa tecnologia é necessário maior investimento.

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. Algumas topologias básicas das redes PON são descritas abaixo:

- **Anel:** nesta topologia cada dispositivo da rede é interligado formando um barramento óptico serial fechado. Cada ONU realiza a derivação óptica para o próximo dispositivo. Com a ligação feita em anel a rede cria uma redundância, sendo sua principal vantagem, evitando que equipamentos fiquem isolados por conta de manutenções ou rompimentos no cabeamento (DIAS, 2018).

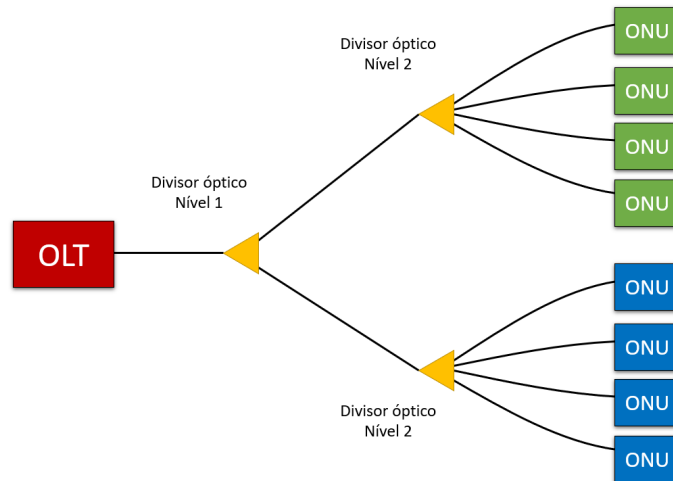
Figura 28 – Topologia em anel.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

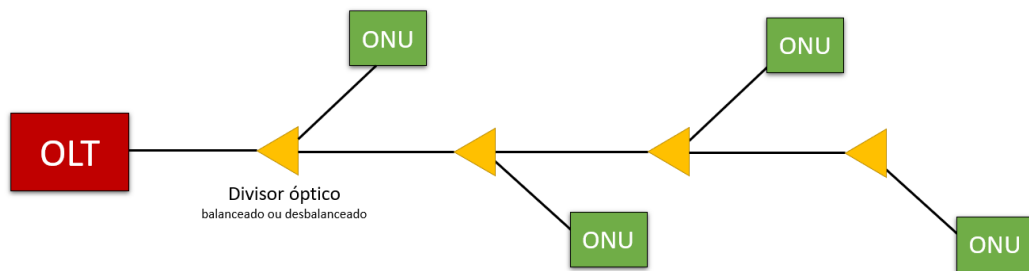
- **Árvore:** nesta topologia, os usuários finais são conectados a OLT através de um derivador óptico (*splitter*), criando ramificações ou níveis na rede (DIAS, 2018). Sendo utilizada com maior frequência em casos onde as ONUs estão distantes do OLT ou estão reunidas em uma mesma área (PINHEIRO, 2017).
- **Barramento:** nesta configuração os usuários são conectados a OLT por um segmento de fibra óptica que recebe vários derivadores ópticos. Esta topologia é mais utilizada quando os usuários estão geograficamente distantes uns dos outros, e geralmente utiliza-se *splitters* desbalanceados para proporcionar o sinal adequado para cada cliente (DIAS, 2018).
- **Mista:** esta topologia abrange todas as configurações citadas anteriormente, mesclando a melhor funcionalidade de cada topologia para cada projeto.

Figura 29 – Topologia em árvore.



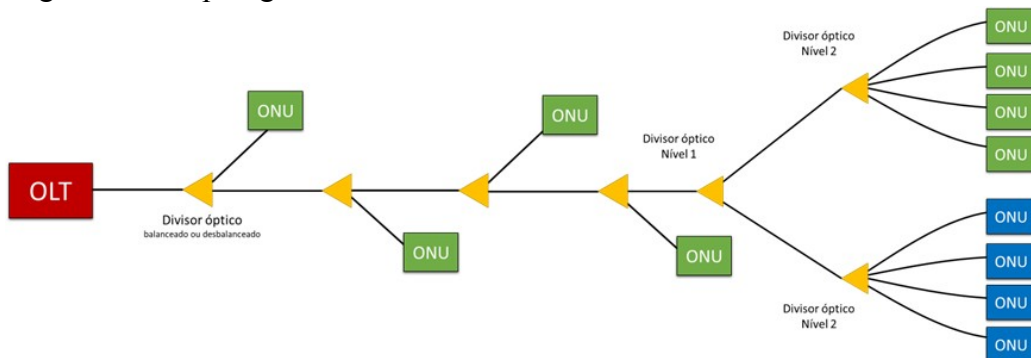
Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 30 – Topologia em barramento.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 31 – Topologia mista.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

2.8 Métrica de Desempenho das Redes Ópticas

Para o bom funcionamento da rede óptica é estabelecido durante a fase de planejamento um Orçamento de Potência (do inglês, *Link Budget*). Esta métrica de desempenho estabelece o sinal mínimo que o cliente deve receber (PACIFICO, 2018). Dessa maneira, o sinal transmitido deve estar dentro da faixa tolerada na elaboração do projeto. Os parâmetros

verificados para o cálculo de atenuação óptica são as seguintes:

- Atenuação do cabo em (dB/km) com base no comprimento de onda;
- Atenuação máxima dos conectores;
- Atenuação máxima dos *splitters*;
- Atenuação máxima das emendas por fusão.

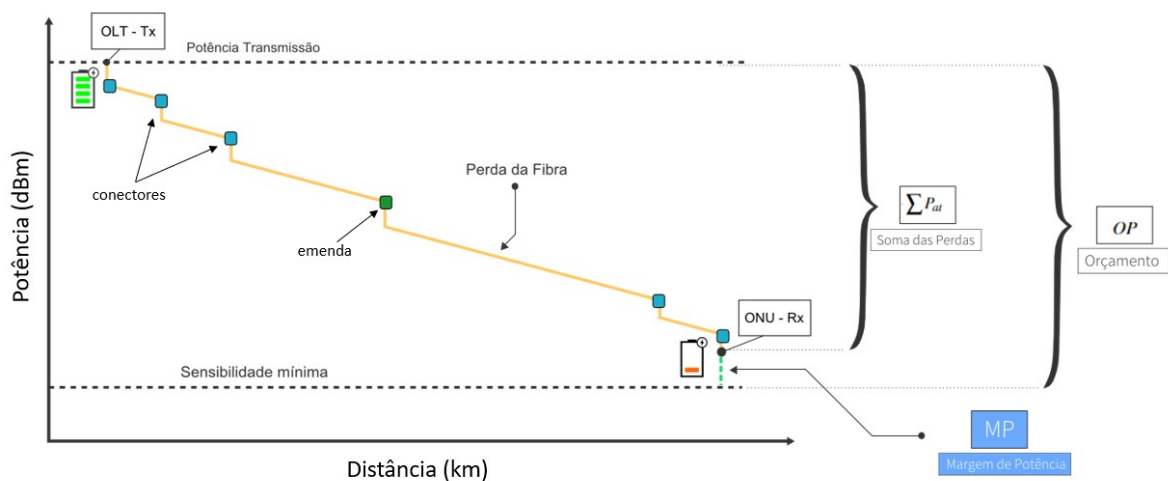
O Orçamento de Potência pode ser verificado em ambos os sentidos *downstream* (i.e. sentido OLT para ONU) e *upstream* (i.e., sentido ONU para OLT) em função das atenuações diferentes para os comprimentos de onda que transferem os sinais, podendo ser calculado com base na Equação (2.2):

$$OP = P_{tx} - S_{rx}, \quad (2.2)$$

em que S_{rx} e P_{tx} indica a potência recebida e transmitida, respectivamente. Com isso, utilizando esta equação podemos verificar o quanto de perda a rede ainda suporta através da Margem de Potência (MP), como mostra a Equação (2.3), onde $\sum P_{at}$ representa o somatório das perdas no enlace:

$$MP = P_{tx} - S_{rx} - \sum P_{at}. \quad (2.3)$$

Figura 32 – Orçamento de potência.



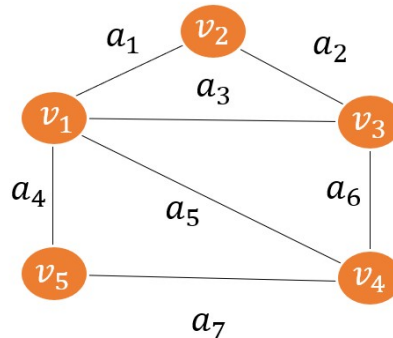
Fonte: Adaptado de DATACOM.

2.9 Grafos

Grafos são ferramentas matemáticas usadas para representar problemas em diversas áreas do conhecimento. Em suma, um grafo é um conjunto de vértices e arestas (DIAS, 2018).

Os vértices são pontos que podem representar cidades, postes, postos de atendimento, por exemplo. Um grafo pode ser representado matematicamente por $G = (V, A)$, onde V simboliza os vértices (ou nós) e A simboliza as arestas (ou linhas). A Figura 33 ilustra um grafo com vértices $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ e arestas $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\}$.

Figura 33 – Representação de um grafo.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Também é possível representar um grafo através da matriz de adjacência M_{Adj} . Com ela é possível indicar a relação de ligação entre todos os vértices do grafo. Nesse sentido, um grafo $G(V, A)$ com n vértices pode ser representado por uma matriz de ordem $n \times n$. Os elementos da M_{Adj} são preenchidos da seguinte maneira:

- **0**: não existe ligação entre os vértices;
- **1**: existe ligação entre os vértices.

Diante disso, a matriz M_{Adj} da Figura 33 é representado como:

$$M_{Adj} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

A representação de grafos utilizando matrizes facilita a solução em problemas de otimização de redes ópticas, pois com ela é possível criar uma matriz de distâncias entre pontos relacionados M_{Dist} . Basicamente, a matriz de distância está relacionada com matriz de adjacência, com a diferença que M_{Adj} fornece as informações de que vértices estão ligados, mas não se refere aos custos ou distâncias entre os vértices.

Com a matriz M_{Dist} , pode ser determinado a menor distância entre dois nós usando algoritmo Dijkstra (o algoritmo foi adotado por ser uma solução na busca do caminho mais curto

em grafos) (BARTH, 2016).

2.10 Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas

Desenvolvido em 1995 por Russell Eberhart e James Kennedy, o PSO é uma rotina de otimização bioinspirada projetada para modelar o comportamento de cardumes e revoada de pássaros. O PSO verifica o comportamento coletivo de indivíduos interagindo com seu ambiente e entre si (SOUZA, 2006; SILVA, 2017). A partir dos estudos dos pesquisadores sobre o comportamento social dos animais, foi possível extrair três características principais dos indivíduos de uma população:

- **Avaliativa:** é a habilidade do indivíduo de analisar a situação e tomar suas decisões;
- **Comparativa:** é a habilidade de examinar um conjunto de ações com certas semelhanças e aperfeiçoar seu conhecimento;
- **Imitação:** é a capacidade de realizar exatamente o que outro indivíduo do grupo está fazendo.

Com base nas características citadas acima, o PSO foi descrito com duas equações básicas. A primeira refere-se a velocidade:

$$\mathbf{v}_i(t+1) = w \cdot \mathbf{v}_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [\mathbf{P}_b - \mathbf{x}_i(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [\mathbf{G}_b - \mathbf{x}_i(t)], \quad (2.5)$$

onde:

- $\mathbf{v}_i(t+1)$ é a nova velocidade da partícula;
- $\mathbf{v}_i(t)$ é a velocidade atual da partícula;
- w é o fator associado a inércia da partícula;
- c_1 e c_2 são as constantes cognitiva e social, respectivamente;
- r_1 e r_2 números aleatórios entre 0 e 1;
- \mathbf{P}_b é a melhor posição individual da partícula;
- \mathbf{G}_b é a melhor partícula global;
- $\mathbf{x}_i(t)$ é a posição atual da partícula.

Acerca dos parâmetros c_1 e c_2 , usualmente são iguais a 2. Contudo, podem variar no intervalo [0,4] e indicam respectivamente o quanto a partícula confia em si mesma e o quanto ela confia nos seus vizinhos (SOUZA, 2006). Já a segunda equação corresponde a atualização da posição da partícula (indivíduo), a atualização é realizada com base na sua posição no instante t , somado

a nova velocidade, dada por:

$$\mathbf{x}_i(t + 1) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t + 1), \quad (2.6)$$

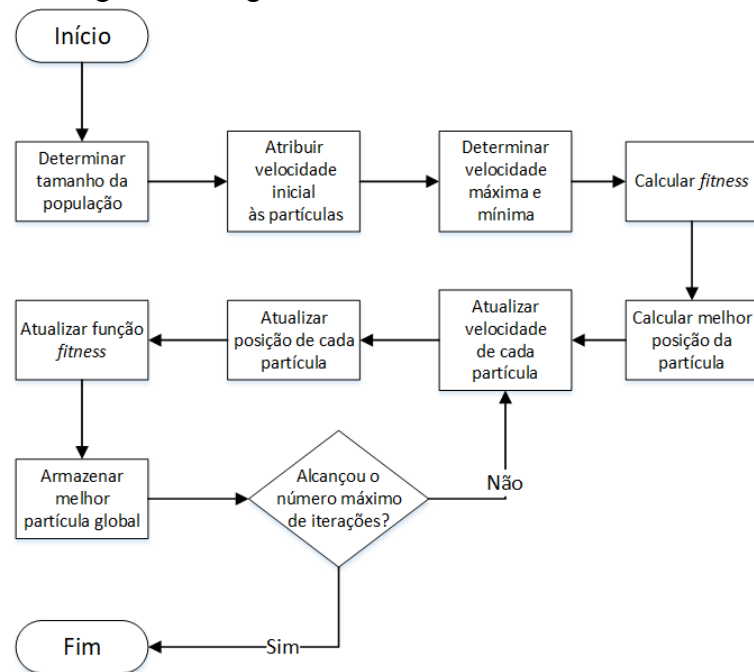
onde:

- $\mathbf{x}_i(t + 1)$ é a nova posição da partícula;
- $\mathbf{x}_i(t)$ é a posição atual da partícula;
- $\mathbf{v}_i(t + 1)$ é a velocidade calculada na Equação (2.5).

As Equações (2.5) e (2.6) foram desenvolvidas com base nos conceitos da sociopsicologia, onde a movimentação dos indivíduos em um quadro sócio-cognitivo é influenciada por seu último comportamento e pelo de seus vizinhos (colocados próximos na rede social e não necessariamente no espaço). Logo, a atualização da posição das partículas é dependente da direção de seu movimento, sua velocidade, a melhor posição anterior individual e a melhor posição global entre os vizinhos (DRÉO *et al.*, 2006).

Para a utilização do algoritmo, é necessário que o problema seja modelado com uma função *fitness* responsável por avaliar a posição de cada partícula, com isso, é armazenado a melhor posição da partícula global e local, então verifica-se se o número máximo de iterações foi alcançado. Caso tenha sido alcançado o algoritmo é finalizado, senão as posições e velocidades das partículas continuam sendo atualizadas (SILVA, 2017), como ilustrado na Figura 34. O algoritmo também pode empregar parâmetros \mathbf{v}_{max} e \mathbf{v}_{min} , para limitar a velocidade do movimento das partículas, para evitar a demora ou “explosão” do sistema. De forma semelhante também pode-se estabelecer fronteiras \mathbf{x}_{max} e \mathbf{x}_{min} , na posição das partículas.

Figura 34 – Fluxograma do algoritmo PSO.



Fonte: (SILVA, 2017).

3 METODOLOGIA

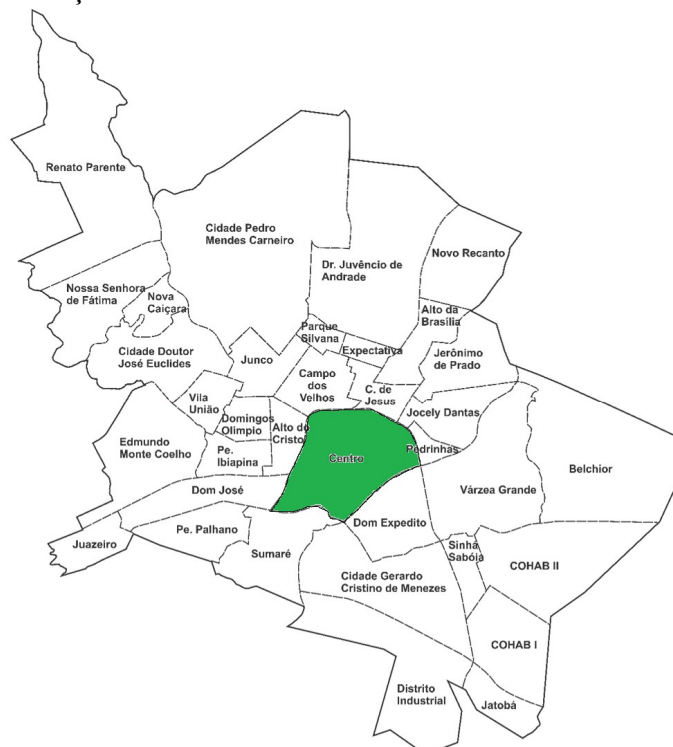
O planejamento e otimização de redes é um desafio diário para pequenas e grandes empresas de telecomunicações que desejam reduzir custos, melhorar os serviços e otimizar novos projetos de redes ópticas. Em vista disto, este capítulo descreve a proposta de projetos de infraestrutura de redes ópticas de acesso PON, desde a escolha da região geográfica do projeto até a implementação do PSO.

3.1 Região Geográfica do Projeto

A elaboração de um projeto FTTH deve seguir certas etapas para garantir o melhor resultado de forma prática e rápida. A primeira etapa é conhecer a região do projeto, podendo ser realizada fisicamente em campo, ou usando *softwares* como o *Google Earth* em conjunto com os dados censitários da cidade.

Para este trabalho foi escolhida uma região no entorno da Universidade Federal do Ceará (UFC) que fica na cidade de Sobral-CE, mais especificamente no bairro Centro. Em termos quantitativos o mesmo possui 19.662 habitantes, em cerca de 2.389.529 m² (SOBRAL, 2020), tal como ilustrado na Figura 35.

Figura 35 – Localização do bairro centro na cidade de Sobral-CE.



Fonte: Adaptado de (SOBRAL, 2020).

Para a infraestrutura do projeto FTTH, serão utilizados os postes da concessionária *Ente nazionale per l'energia elettrica* (ENEL), cabe ressaltar que durante a fase de execução do projeto torna-se necessário a sua autorização para o uso de seus recursos. Esta autorização é solicitada através de um projeto de compartilhamento de poste. O valor sugerido pelo uso de cada poste é de R\$ 3,19 por mês com base na Resolução Conjunta ANEEL/ANATEL Nº 4 DE 2014.

Para o projeto foi selecionada uma área de 0,15 km², perímetro de 1,59 km no bairro Centro, com maior prevalência de imóveis residenciais, totalizando 674 imóveis. Entretanto, na região existem outros ISPs, tendo em vista que não serão todos os imóveis da região que irão utilizar o serviço, será considerado uma taxa de penetração de 40 %, assim, o número de clientes inicialmente previsto para serem atendidos será de 270.

A Figura 36 apresenta a área de atendimento proposta (região em verde), indicando alguns pontos de referência e a localização da central de atendimento e da OLT.

Figura 36 – Área de atendimento e localização da OLT.



Fonte: Google Earth, 2022.

3.2 Topologia Adotada para Projeto de Rede GPON

Com a área de atendimento definida e com a utilização da arquitetura FTTH, a próxima etapa é definir a topologia para o projeto. A topologia deve estar presente na literatura e

não aumentar a complexidade do simulador ¹.

Mediante as restrições citadas, foi escolhida a topologia mista centralizada, uma topologia que existe na literatura e possui uma média complexidade de implementação. Nesta topologia utiliza-se um único nível divisores ópticos com fator de divisão de 1x64. Este divisor óptico estará sempre disposto na rede passiva de distribuição em uma CTO². Nesta topologia tem-se uma redução do número de dispositivos passivos na rede externa. Entretanto, há um aumento considerável na quantidade de cabos do tipo *drop* (DIAS, 2018).

Para exemplificar a topologia adotada, são utilizados quatro tipos de cabos: cordão óptico, *backbone* (cabo tronco da rede), distribuição e *drop*. O cordão óptico realiza a ligação entre a OLT do ISP com o DIO, o cabo *backbone* realiza a ligação entre as CEOs através de emendas, já o cabo de distribuição realiza a ligação entre as CEOs e CTOs, que por fim subdividem a rede através de *splitters* e realizam a conexão dos usuários na rede utilizando o cabo do tipo *drop*. Entretanto, vale ressaltar que a topologia mista centralizada não é muito difundida em ISPs nacionais. Contudo simplifica o projeto em termos computacionais (LAGE, 2006), visto que:

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

3.3 Processo de Importação da Região Geográfica do Projeto

Com a região geográfica do projeto definida, é realizado o processo de importação dos dados. Os dados que serão importados devem conter as informações detalhadas da infraestrutura existente na região, ou seja, a localização dos postes e as ligações entre os mesmos. Para o processamento dos dados torna-se necessário preparar um arquivo que será usado no *software* científico para computação numérica ³. As principais etapas desse processo são:

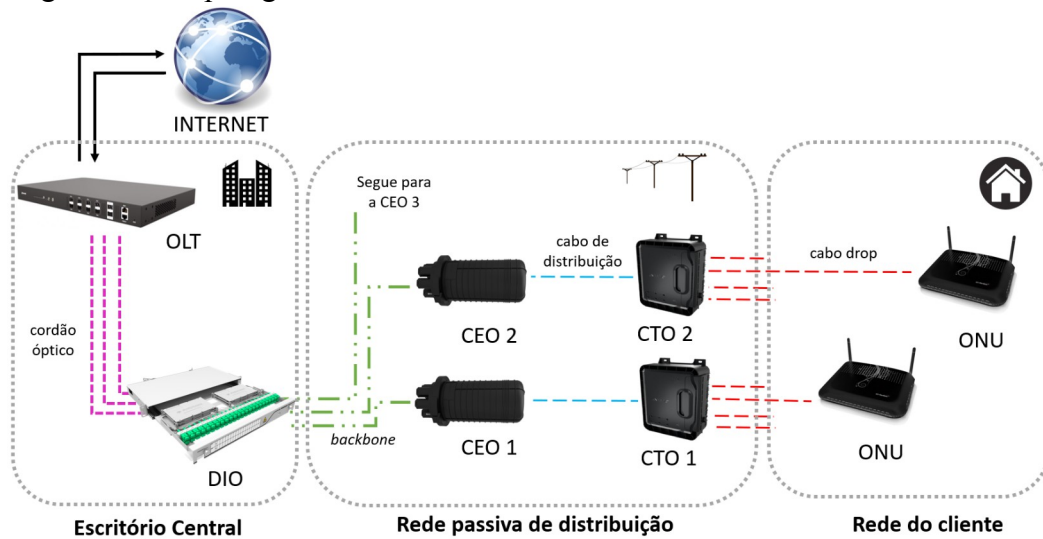
1. Coleta de postes e criação das ligações;
2. Junção das bifurcações;

¹ O simulador é o programa responsável por calcular o custo da rede óptica, quanto mais detalhes e regras possuir a topologia mais blocos de funções são necessários adicionar ao simulador.

² Outro termo usada para esse tipo de CTO é *Fiber Distribution Hub* (FDH)

³ Na monografia foi usado o software Matlab®

Figura 37 – Topologia mista centralizada.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

3. Conversão dos dados;
4. Importação dos dados no *software* científico.

3.3.1 Coleta de postes e criação das ligações

Nesta etapa, foram definidos 121 postes para o projeto da rede GPON FTTH utilizando o *software Google Earth*, além da coleta das coordenadas (latitude e longitude) de cada poste, foram definidos os caminhos de ligação entre cada poste. A Figura 38 mostra em verde os postes coletados e as ligações pertinentes entre cada um, representadas por linhas contínuas.

3.3.2 Junção das bifurcações

Após a coleta e marcação das coordenadas dos postes e a criação das ligações entre eles no *software Google Earth*, é necessário criar as junções das bifurcações nos caminhos. Devido às limitações do programa os caminhos entre os postes não ficam conectados e relacionados com os demais caminhos, com isso, foi utilizado o *software Java OpenStreetMap Editor (JOSM)* para realizar a junção das bifurcações.

Para a edição dos dados no JOSM, é necessário exportar apenas os dados dos caminhos criados no *Google Earth* em formato kml⁴. Para que o JOSM reconheça o arquivo a extensão *Opendata* deve estar previamente instalada no programa, ela permitirá a edição dos

⁴ Recomenda-se criar duas pastas no *Google Earth* para melhor organização, uma pasta para as marcações dos postes e outra para os caminhos entre eles.

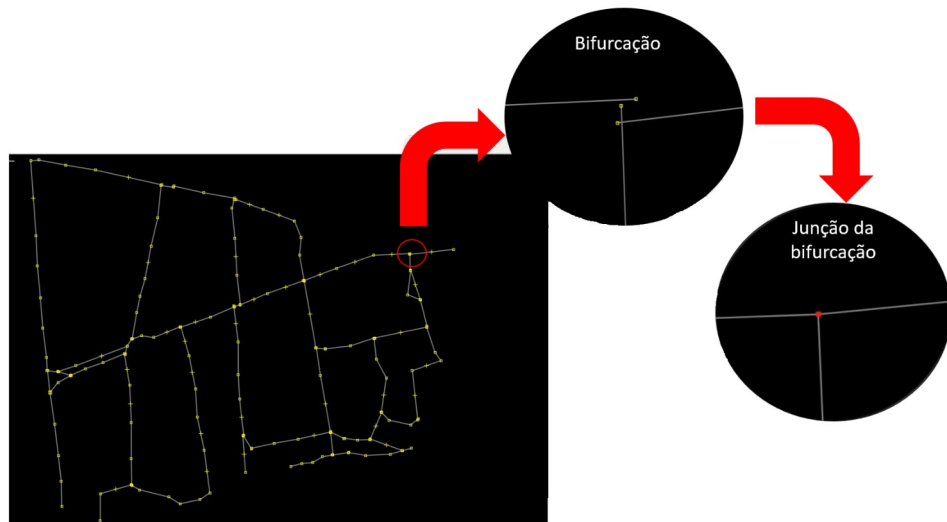
Figura 38 – Postes mapeados através da latitude e longitude.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

arquivos no formato kml. Após a criação de caminhos bifurcados⁵ é criado um novo arquivo no formato gpx que será utilizado no processo de importação dos dados.

Figura 39 – Junção das bifurcações.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

3.3.3 Conversão dos dados

Com o arquivo gpx criado na etapa anterior pelo JOSM, é necessário realizar a conversão do arquivo para que o *software* científico Matlab® trate os dados da maneira esperada.

⁵ Para realizar a junção das bifurcações é necessário selecionar os pontos no JOSM e pressionar a tecla "M".

Para a conversão do arquivo gpx foi utilizado o *GPS Visualizer*⁶, um site online que cria mapas e perfis a partir de dados geográficos. Esta é uma ferramenta gratuita e de utilização simples.

Utilizando o *GPS Visualizer*, os dados foram convertidos do formato gpx para o formato txt, de forma simples e rápida. Cabe ressaltar que existem outras ferramentas para realizar a conversão dos dados, entretanto o *GPS Visualizer* converte e organiza os dados de latitude e longitude dos postes e caminhos, tornando o tratamento dos dados no Matlab® mais simples.

3.3.4 Importação para o MATLAB e criação do grafo

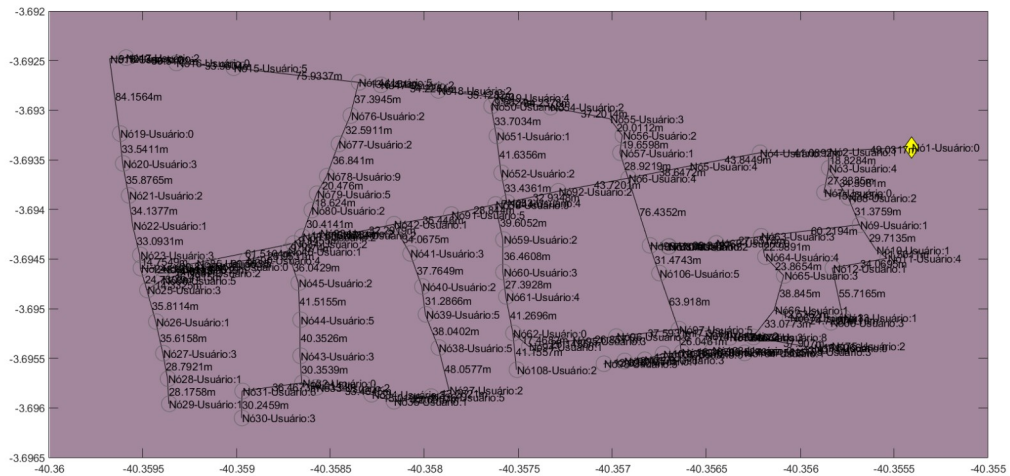
Com o arquivo txt contendo os dados de latitude e longitude dos postes e caminhos, será realizado a importação dos dados para o *software* científico Matlab®. Inicialmente, deve-se selecionar a opção *Import Data* e escolher o arquivo desejado. Posteriormente, os dados devem ser importados como função, usando a opção *Generate Function*. Com os dados importados, será realizado o processamento das informações a seguir pelo simulador desenvolvido:

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

O simulador desenvolvido possui a capacidade criar um grafo representando a área de atendimento. Onde os vértices e arestas são os postes e ligações, respectivamente. A Figura 40 apresenta grafo fornecido pelo simulador.

⁶ www.gpsvisualizer.com

Figura 40 – Grafo fornecido pelo simulador da área de atendimento.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Em resumo, a Figura 41 apresenta as principais ferramentas e objetivos das etapas realizadas, onde são necessárias quatro ferramentas e a permuta de três formatos de arquivos.

Figura 41 – Ferramentas e seus objetivos no processo de importação dos dados.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

3.4 Modelagem do Sistema

Nessa seção será descrito a elaboração do modelo matemático que define o custo para a implementação da rede GPON FTTH em questão. Para o modelo, serão considerados os

gastos com os equipamentos utilizados na rede, em vista disto, será necessário definir algumas variáveis, conjuntos e restrições, que serão apresentadas no decorrer da seção.

3.4.1 Conjuntos

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

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

onde N é o número de POPs utilizados no projeto ⁷. O conjunto P , é formado pelos postes disponíveis na região de atendimento (p_d), onde D representa a quantidade de postes disponíveis, dessa forma:

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

O conjunto formado pelas OLTs em funcionamento o_m , na pop_n é descrito por:

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

na qual N_{olt} é o número de OLTs ativas em determinado POP. O agrupamento das CEOs e_l é dada por:

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

onde N_{ceo} é o número de CEOs. Já a representação matemática do conjunto de CTOs t_a é dado pelo conjunto apresentado em (3.5), onde N_{cto} é o número de CTOs:

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

Por fim, o conjunto das ONUs ativas u_i na área de atendimento é definida como:

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

onde N_{cli} é o número total de clientes atendidos pela ISP.

⁷ A rede proposta neste trabalho possui apenas um POP, no entanto, essa forma de descrição servirá para projetos futuros que abranjam uma região de atendimento maior.

3.4.2 Definições

Nesta seção será apresentado algumas definições essenciais para uma adequada compreensão do modelo matemático formulado neste trabalho.

Previamente torna-se necessário escolher a ordem das CEOs, representada por ρ_{ceo} e a ordem das CTOs, representada por ρ_{cto} . Vale a pena lembrar que na topologia adotada as CEOs possuem apenas a função de emenda das fibras, não existe divisão na mesma.

Dado que a ordem da CTO, ρ_{cto} corresponde a 1x64, o tamanho da célula⁸ T_c usando uma taxa de penetração⁹ T_p corresponde a:

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

Para quantificar o N_{cto} é necessário indicar a quantidade de residências κ na região de atendimento, equacionada abaixo:

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

Para quantificar N_{ceo} é realizado a multiplicação entre a ordem da CEO utilizada, ρ_{ceo} , pela quantidade de CTOs, fornecida por:

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

Vale ressaltar que, em alguns casos a quantidade calculada não é um número inteiro, dessa forma o valor sempre será aproximado para o maior número inteiro.

No que se refere as ligações entre os equipamentos, serão definidas quatro matrizes que relacionam a distância. Estas distâncias são provenientes do algoritmo Dijkstra, que calcula a menor rota entre dois pontos.

A primeira matriz, relaciona a ligação entre OLT e CEO sendo representado pela matriz $\Gamma_{N_{olt} \times N_{ceo}}$, onde $\mu_{,l}$ representa a distância entre a OLT_1 e a CEO_l . Sendo $\Gamma = (\mu_{ml})_{N_{olt} \times N_{ceo}}$, onde $1 \leq m \leq N_{olt}$ e $1 \leq l \leq N_{ceo}$, com $m, l \in \mathbf{N}^*$, correspondendo a:

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

⁸ O tamanho de célula é definida pela relação entre a ordem de divisão do splitter e taxa de penetração.

⁹ A taxa de penetração é definido como sendo a porcentagem de clientes que poderão aderir a rede

A segunda matriz relaciona a ligação entre as CEOs sendo representado pela matriz $\Gamma_{N_{ceo} \times N_{ceo}}^0$, onde $\mu_{1,2}^0$ representa a distância entre a CEO₁ e a CEO₂. Sendo $\Gamma^0 = (\mu_{ll}^0)_{N_{ceo} \times N_{ceo}}$, onde $1 \leq l \leq N_{ceo}$, com $l \in \mathbf{N}^*$, correspondendo a:

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

A terceira matriz relaciona a ligação entre CTO e CEO retratado pela matriz $\Omega_{N_{cto} \times N_{ceo}}$, onde $\omega_{1,1}$ representa a distância entre a CTO₁ e a CEO₁. Com $\Omega = (\omega_{al})_{N_{cto} \times N_{ceo}}$, onde $1 \leq a \leq N_{cto}$ e $1 \leq l \leq N_{ceo}$, com $a, l \in \mathbf{N}^*$, correspondendo a:

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

A quarta matriz relaciona a ligação entre ONU e CTO expresso pela matriz $\Psi_{N_{onu} \times N_{cto}}$, onde $\psi_{1,1}$ representa a distância entre a ONU₁ e a CTO₁. Sendo $\Psi = (\psi_{ia})_{N_{cto} \times N_{ceo}}$, onde $1 \leq i \leq N_{onu}$ e $1 \leq a \leq N_{cto}$, com $i, a \in \mathbf{N}^*$, correspondendo a:

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

Uma das parcelas de custo do projeto refere-se ao custo oriundo das fibras ópticas. Para isso, se faz necessário definir o preço da fibra usada no *backbone* $P_{backbone}$, distribuição $P_{distribuição}$ e atendimento $P_{atendimento}$.

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

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

Na topologia adotada o custo do cabo de distribuição é calculado a partir do traço¹⁰ da matriz Ω , que cada CEO é conectada em apenas uma CTO de mesmo índice:

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

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

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

Desse modo, o custo total de fibra corresponde a:

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

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

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

Assim como a OLT, só existirá uma DIO na rede em questão, mas pensando em projetos futuros o custo deste item foi descrito conforme a equação abaixo:

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

onde P_{dio} é o preço de uma DIO. O custo total com CEOs é dado por $C_{\text{ceo}} = N_{\text{ceo}} P_{\text{ceo}}$, onde P_{ceo} é o preço de uma CEO. De modo similar, o custo total com CTOs e ONUs são dados por $C_{\text{cto}} = N_{\text{cto}} P_{\text{cto}}$ e $C_{\text{onu}} = N_{\text{onu}} P_{\text{onu}}$, onde P_{cto} e P_{onu} é o preço de uma CTO e ONU, respectivamente.

O custo total com fusões dependerá do número de CTOs, visto que, para cada uma, serão necessárias três fusões, ou seja, $C_{\text{fus}} = 3 \times N_{\text{cto}} \times P_{\text{fus}}$. No que se refere aos conectores, existem dois tipos de conectores na rede, o tipo 1 ligará os cordões óticos na OLT e DIO e o do tipo 2 unirá os cabos *drop* nas CTOs e ONUs, no entanto, os dois terão o mesmo preço unitário P_{con} . Portanto, o custo total com os conectores é dado por:

$$C_{\text{con}} = 2 \times N_{\text{ceo}} \times P_{\text{con}} + 2 \times N_{\text{cli}} \times P_{\text{con}}, \quad (3.20)$$

¹⁰ O traço de uma matriz quadrada é uma função matricial que liga a matriz à soma dos elementos da sua diagonal principal.

onde cada cordão associado a uma CEO necessita de dois conectores, um em cada extremidade, além disso, cada usuário também precisará de dois.

Diante do exposto, o custo total da rede GPON é a soma dos custos de todos os equipamentos considerados anteriormente, para simplificar o cálculo foram desconsiderados os custos com mão de obra, como formulado abaixo:

$$C_{total} = C_{olt} + C_{dio} + C_{ceo} + C_{cto} + C_{onu} + C_{fus} + C_{con} + C_{fibra} \quad (3.21)$$

3.4.3 Restrições

De modo a não sobrecarregar a rede, são estabelecidos restrições, a fim de garantir que todos os usuários recebam um sinal aceitável e que o simulador consiga tratar, tais como:

- Uma ONU deve está conectada a somente uma CTO;
- Uma CTO deve está conectada a somente uma CEO;
- Uma CEO deve está conectada a somente uma DIO;
- Não poderá ocorrer sobreposição de equipamentos no mesmo poste;
- Potência de recepção da ONU deverá ser maior que a sensibilidade mínima do mesmo;
- Como já citado em Seção 2.8 a margem de potência não pode ser negativa.

3.4.4 Parâmetros do projeto

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

- Quantidade de residências κ : 674;
- Taxa de penetração T_p : 40%;
- Quantidade de clientes atendidos N_{cli} : 270;
- Ordem CEO ρ_{ceo} : 1;
- Ordem CTO ρ_{cto} : $\frac{1}{64}$;
- Tamanho da célula T_c : 160;
- Quantidade de POP N : 1;
- Quantidade de postes D : 121;
- Quantidade de OLT N_{olt} : 1;
- Quantidade de DIO N_{dio} : 1;
- Quantidade de CEO N_{ceo} : 5;

- Quantidade de CTO N_{cto} : 5;
- Reserva técnica ζ : 15%;
- Sensibilidade de recepção da OLT: -28 dBm;
- Sensibilidade de recepção da ONU: -27 dBm;
- Potência de transmissão da OLT: 1,5 dBm;
- Potência de transmissão da ONU: 1,5 dBm;
- Atenuação fibra óptica (*Downstream*): 0,25 dB/km;
- Atenuação conector: 0,3 dB;
- Atenuação fusão: 0,08 dB;
- Atenuação CTO: 20,5 dB.

É importante destacar que os parâmetros referentes a quantidade de residência, taxa de penetração e ao tamanho de célula dependem da região atendida, o que influenciam no quantitativo dos demais parâmetros.

3.5 Implementação do PSO

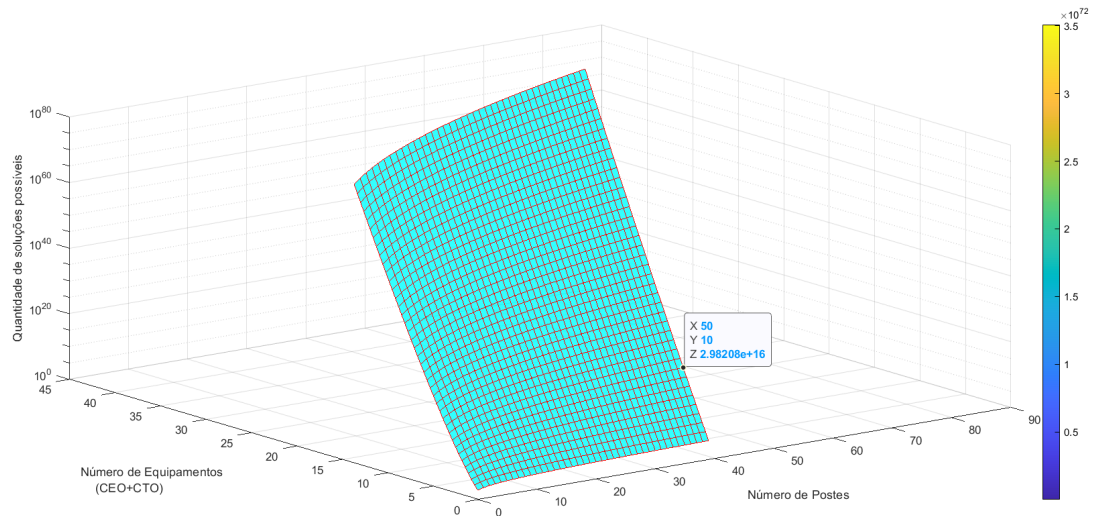
À medida que a rede GPON cresce, as possibilidades de implementação da rede aumentam consideravelmente. Com base no número de postes e no número de equipamentos é possível determinar a quantidade de soluções possíveis, como mostra a Figura 42. Com isso, é possível verificar que para um projeto manual torna-se inviável analisar o custo de cada solução, onde, por exemplo, considerando uma região com cinquenta postes e dez equipamentos, o número de soluções é aproximadamente 2.98×10^{16} .

Desta maneira, as meta-heurísticas tornam-se grandes aliadas nos problemas de otimização, visto que são técnicas capazes de encontrar soluções quase ótimas, além de diminuir o custo computacional evitando o cálculo de todas as possibilidades possíveis, o que ainda é inviável atualmente.

Deste modo, a meta-heurística PSO foi adotada nesta monografia, como explicado na Seção 2.10. O PSO é uma rotina de otimização bioinspirada projetada para modelar o comportamento de cardumes e revoada de pássaros. Para a implementação do algoritmo PSO ao problema da rede GPON foram necessárias adaptações nos parâmetros do PSO, tais como:

- Número de dimensões da partícula;
- Quantidade de partículas;
- Velocidade;

Figura 42 – Número de possíveis soluções em relação ao número de postes e equipamentos.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

- Posição;
- Fator de inércia;
- Constantes cognitiva e social da partícula.

Inicialmente foi definido que as partículas terão dimensões espaciais, correspondentes a longitude e latitude, logo a posição e velocidade das partículas no PSO serão representadas por uma matriz, conforme representado na Figura 43. Onde cada posição da partícula poderá representar a posição de um poste para o projeto.

Figura 43 – Representação matricial da posição e velocidade das partículas.

Posição das partículas	Velocidade das partículas
Partícula 01	Partícula 01
Partícula 02	Partícula 02
Partícula 03	Partícula 03
Partícula 04	Partícula 04
Partícula 05	Partícula 05
Partícula 06	Partícula 06
Partícula 07	Partícula 07
Partícula 08	Partícula 08
Partícula 09	Partícula 09
Partícula 10	Partícula 10
Partícula 11	Partícula 11
Partícula 12	Partícula 12
Partícula 13	Partícula 13
Partícula 14	Partícula 14
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
Partícula n	Partícula n

Fonte: Próprio Autor, 2022.

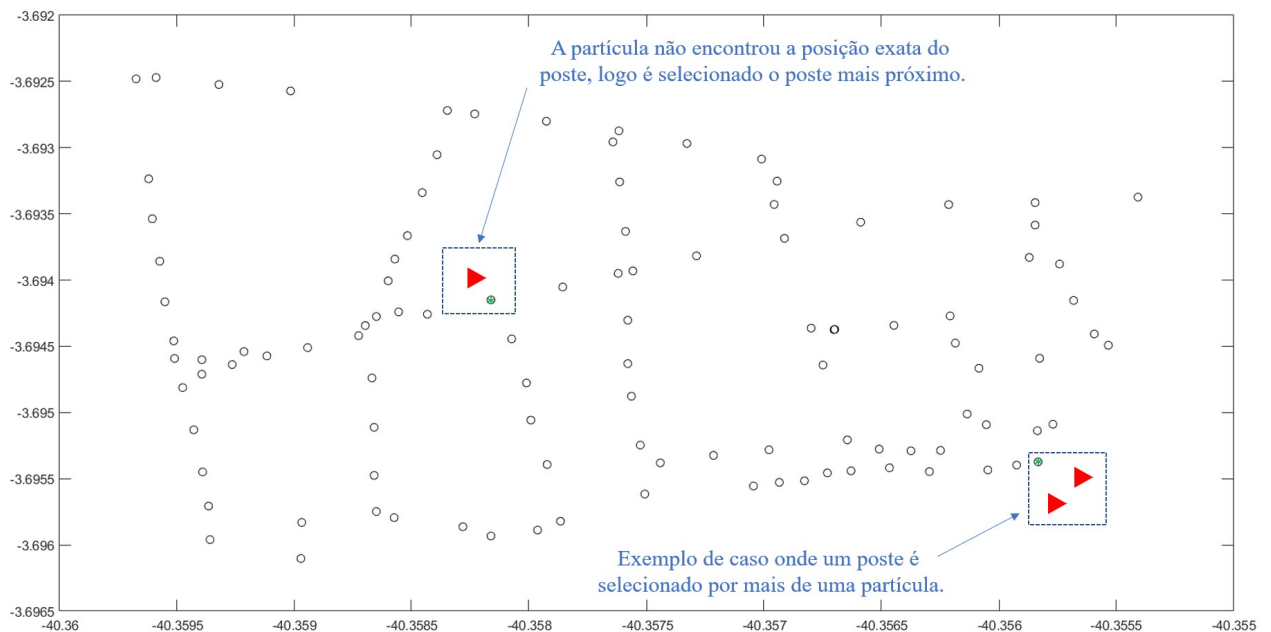
Como já citado na Seção 3.3, as coordenadas são importadas para o Matlab ® e com estas informações é possível verificar as coordenadas máximas e mínimas de longitude e latitude dos postes para o projeto, com isso definimos os limites para as partículas do PSO, evitando que um poste selecionado esteja fora do escopo requerido.

Além dos limites das coordenadas das partículas, define-se a quantidade mínima de partículas para o bom funcionamento do algoritmo como sendo a quantidade total de equipamentos da rede. Por exemplo, se a rede projetada necessita de 10 CTOs e 10 CEOs, o tamanho mínimo da população de partículas é de 20 partículas.

Contudo, para o caso proposto é possível utilizar populações maiores do que a quantidade de equipamentos, pois no algoritmo existe a possibilidade de um único poste ser representado por mais de uma partícula, além disso, com a atualização da posição das partículas através do algoritmo, haverá casos onde a partícula não corresponderá exatamente com a posição do poste, mediante isso, ela será atualizada com posição do poste mais próximo¹¹.

Na Figura 44 é demonstrado a posição de três partículas no processo de escolha dos postes, onde os eixos da ordenada e abscissa representam a latitude e longitude da região de estudo, respectivamente. As partículas são representadas por triângulos vermelhos e são elementos que irão se movimentar ao longo da região definida, já os postes são representados por círculos brancos e são elementos fixos na região.

Figura 44 – Postes selecionados pela partícula.



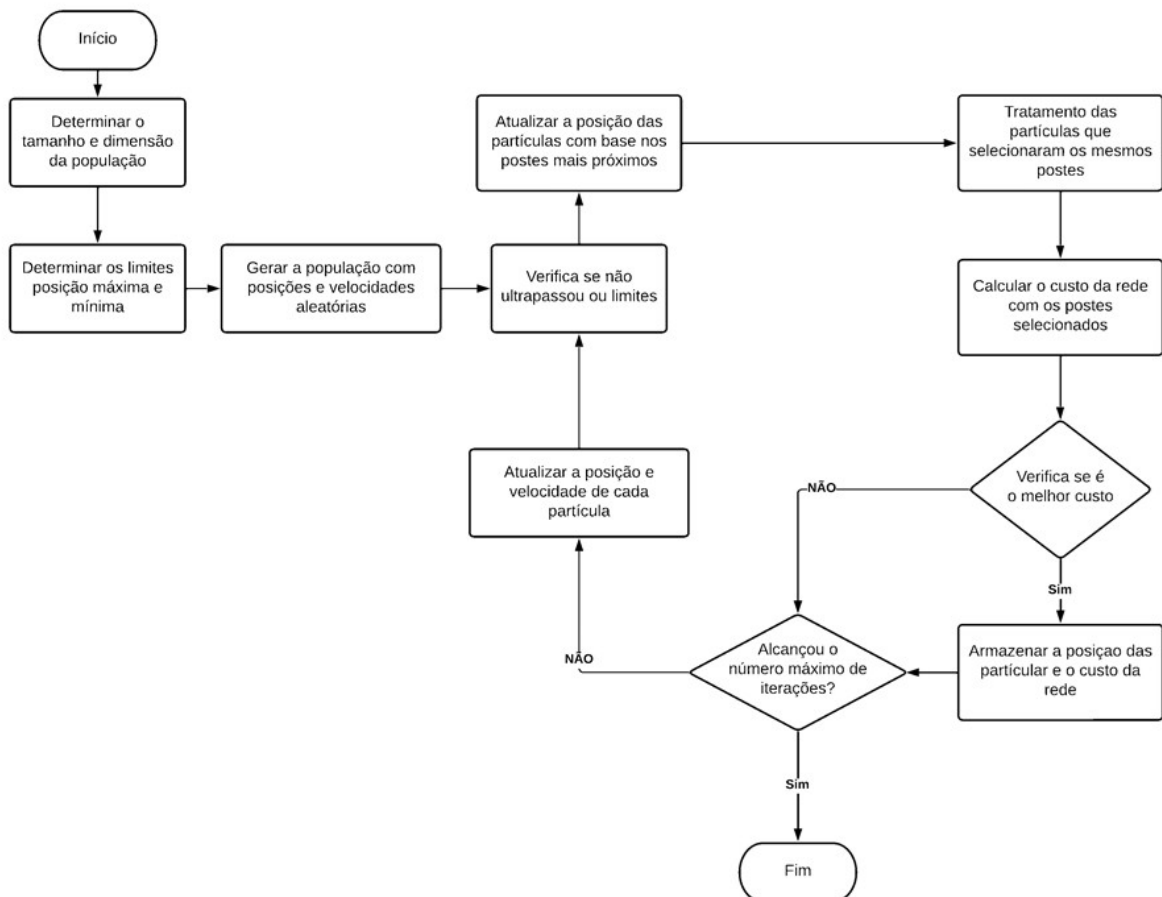
Fonte: Próprio Autor, 2022.

¹¹ É utilizado o princípio da distância Euclidiana.

Na situação hipotética da Figura 44 é possível verificar que o poste selecionado pela partícula é o poste mais próximo definido pela distância Euclidiana, sendo representado por um círculo verde-claro. Também é ilustrando os casos onde um único poste é selecionado por mais de uma partícula, com isso fica evidente utilizar uma população de partículas maior que a quantidade de equipamentos necessários para o projeto.

Diante do exposto, a Figura 45 mostra o fluxograma de implementação do PSO. A função *fitness* verifica o quão adaptado está a partícula ao ambiente com o qual ele interage, ou seja, afere o custo da rede GPON com base na posição dos postes selecionados pelo algoritmo.

Figura 45 – Fluxograma de implementação do PSO.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Na implementação do PSO, é inicialmente definido no algoritmo o tamanho da população ($TamPop$), suas dimensões, quantidade de iterações ($NumGen$) e os parâmetros do PSO: constante cognitiva ($c1$), constante social ($c2$), peso inercial máximo (W_{max}) e peso inercial mínimo (W_{min}). Posteriormente as coordenadas dos postes são importadas para o algoritmo, para que seja determinado os limites da região de atendimento, que serão as fronteiras de

movimentação das partículas, de modo que a população fique confinada na região definida.

Para a primeira iteração do algoritmo, as partículas são definidas com posições e velocidades aleatórias, com valores de posição estabelecidos no escopo da região definida. Com os valores aleatórios as posições são atualizadas de modo que as partículas recebam as coordenadas dos postes mais próximos a elas.

Na sequência é realizado a verificação dos postes selecionados por mais de uma partícula, com o intuito de definir a posição dos postes que irão comportar os equipamentos CEOs e CTOs, de modo que estes comportem apenas um único equipamento. Como cada partícula irá representar a posição de um poste, as primeiras partículas irão representar as posições das CTOs e as seguintes representarão as posições das CEOs, as demais partículas (para os casos onde a população é maior que o número de equipamentos necessários), não são utilizadas neste processo de escolha, conforme ilustra a Figura 46, onde as variáveis X e Y representam as coordenadas dos postes.

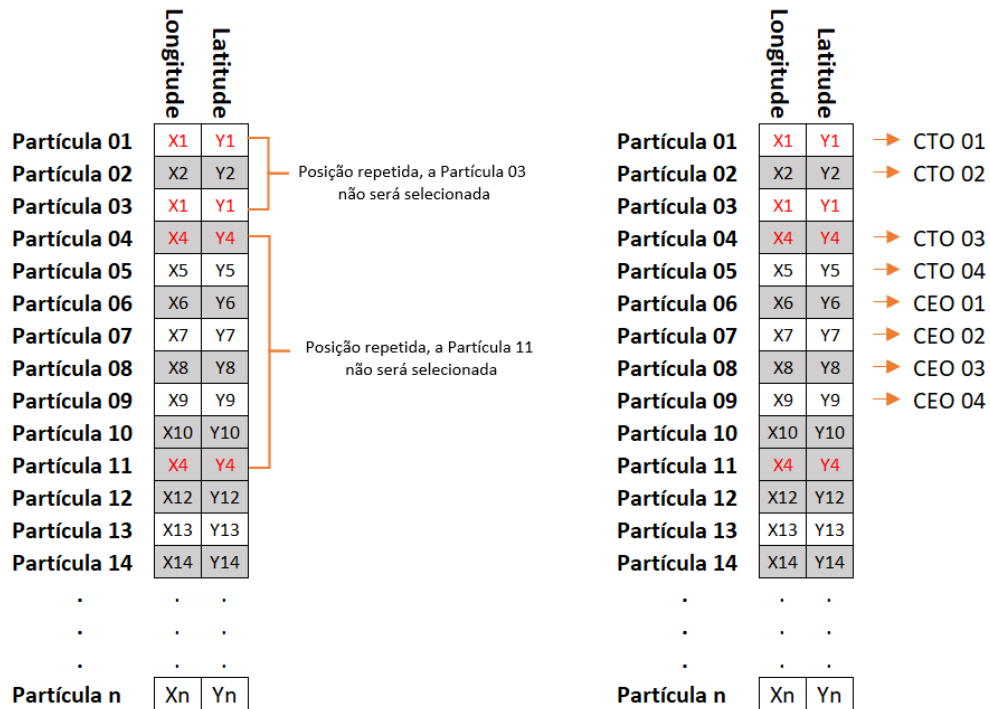
Figura 46 – Processo de escolha para 4 CTOs e 4 CEOs.

	Longitude	Latitude	
Partícula 01	X1	Y1	CTO's
Partícula 02	X2	Y2	
Partícula 03	X3	Y3	
Partícula 04	X4	Y4	
Partícula 05	X5	Y5	CEO's
Partícula 06	X6	Y6	
Partícula 07	X7	Y7	
Partícula 08	X8	Y8	
Partícula 09	X9	Y9	
Partícula 10	X10	Y10	
Partícula 11	X11	Y11	
Partícula 12	X12	Y12	
Partícula 13	X13	Y13	
Partícula 14	X14	Y14	
.	.	.	
.	.	.	
.	.	.	
Partícula n	Xn	Yn	

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Nos casos onde há postes repetidos as partículas com as posições idênticas não serão selecionadas, conforme ilustra a Figura 47, onde as partículas 01 e 03 selecionaram o mesmo poste com longitude e latitude $[X_1, Y_1]$ e as partículas 04 e 11 selecionaram o mesmo poste com longitude e latitude $[X_4, Y_4]$.

Figura 47 – Processo de escolha para 4 CTOs e 4 CEOs quando há postes repetidos.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Após definir os postes que serão usados, o custo total da rede é calculado com base na função *fitness* determinado pela Equação (3.21), e com isso, na primeira iteração o custo da rede e a posição das partículas são armazenados diretamente no algoritmo. Nas demais iterações é verificado se a nova rede gerada tem melhor custo, em caso positivo a posição das partículas e o custo é atualizado, em caso negativo não há modificação no melhor custo e na melhor posição das partículas.

Posteriormente é verificado se o algoritmo atingiu a quantidade de iterações definidas. Em caso positivo o algoritmo é encerrado e a rede com menor custo com base na posição dos equipamentos é determinada pelo algoritmo, caso contrário o programa realiza a atualização das posições de cada partícula.

Na etapa de atualização da posição e velocidade de cada partícula, são utilizados as Equações (2.5) e (2.6) já citadas na Seção 2.10, com o fator de inércia sendo atualizado a cada iteração, conforme $w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \frac{\text{Iteração}}{\text{NumGen}}$, entretanto a Equação (2.5) será ajustada para os moldes do problema, resultando em:

$$\mathbf{v}_i(t+1) = w \cdot \mathbf{v}_i(t) + c_2 \cdot r_2 \cdot [\mathbf{G}_b - \mathbf{x}_i(t)]. \quad (3.22)$$

A alteração da Equação (2.5) para (3.22) se deve ao fato da retirada da parcela $c_1 r_1 [P_b - \mathbf{x}_i(t)]$, uma vez que o termo P_b refere-se as melhores posições individuais de cada

partícula, mas para o problema proposto a posição individual não traz informações importantes, e não é possível determinar através da função *fitness* o custo da rede com base numa única posição de um poste, é o conjunto de partículas que traz possíveis soluções para o problema, em termos conceituais acerca do PSO, isso também indica que cada partícula segue o comportamento da população, tendo parâmetros c_2 estabelecidos, entretanto não há contribuição do parâmetro c_1 que corresponde a parcela cognitiva das partículas.

Após a atualização das posições, é verificado se as partículas continuam dentro dos limites da região definida, esta etapa é de fundamental importância, pois as partículas que ultrapassam os limites da região de atendimento devem ter suas posições novamente atualizadas para as coordenadas máximas ou mínimas da região definida no início do algoritmo, com isso, o algoritmo retorna a etapa de atualização da posição das partículas com base nos postes mais próximos, e as rotinas citadas anteriormente são executadas novamente a cada iteração até a quantidade de gerações ser atingida.

Vale a pena mencionar que no Apêndice A é apresentado o código desenvolvido para a otimização da GPON usando o PSO.

4 RESULTADOS

Nesse capítulo será descrito duas técnicas de projeto que auxiliará na comparação dos resultados obtidos pelo PSO. Além disso, será detalhado o processo de parametrização do algoritmo proposto, analisando qual parâmetro influencia de forma positiva ou negativa o custo do projeto GPON.

4.1 Técnicas para Comparação de Desempenho

Para avaliar os resultados das soluções propostas pelo algoritmo PSO, duas técnicas foram escolhidas:

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

Onde ambas as técnicas devem prover soluções que respeitem as restrições impostas na Seção 3.4.3 de viabilidade técnica.

4.2 Parametrização do PSO

A fim de analisar o comportamento do custo para diferentes valores de parâmetros do PSO foi usado a varredura de parâmetros¹, na qual certos valores são mantidos inalterados enquanto um é variado. Após essa etapa, fixa-se o melhor valor do parâmetro em análise e repete o processo nos parâmetros não analisados. Além desta técnica, foi utilizado o método de Monte Carlo (MC), para que seja verificado os resultados mais prováveis, visto que ao repetir o mesmo experimento podemos ter resultados diferentes. Com este método, será verificado a média do custo obtido pelo algoritmo, juntamente com seu intervalo de confiança.

Para as simulações foi inicialmente utilizado 50 repetições de MC, mas os resultados apresentaram intervalos de confiança largos demais, ou seja, não é possível ter certeza do valor real de um parâmetro, como a média. Dessa forma, modificou-se para 200 MC, no qual se obteve

¹ É um processo iterativo no qual as simulações são executadas repetidamente usando diferentes valores do(s) parâmetro(s) escolhido(s). Este processo permite que o modelador determine o “melhor” valor de um parâmetro (ou faixa de valores), ou mesmo onde no espaço de parâmetros o modelo produz comportamentos desejáveis (ou não desejáveis).

intervalos mais estreitos e um custo computacional² aceitável³. Dessa forma, os gráficos que serão apresentados possuem um intervalo de confiança de 95%.

Os parâmetros que serão analisados são: População ($TamPop$), número de gerações ($NumGen$), peso inercial máximo (W_{max}), peso inercial mínimo (W_{min}) e constante social (c_2), já a constante cognitiva (c_1) tem valor nulo, como citado na Seção 3.5.

4.2.1 Quantidade de partículas e número de gerações

A parametrização inicial foi em relação ao número de partículas da população, onde foram realizadas simulação para 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 2000, 5000, 7000 e 10.000. Para isso, fixou-se os demais parâmetros em:

- Número de gerações ($NumGen$) = 1000;
- Peso inercial máximo (W_{max}) = 1;
- Peso inercial mínimo (W_{min}) = 0.1;
- Constante social (c_2) = 4.

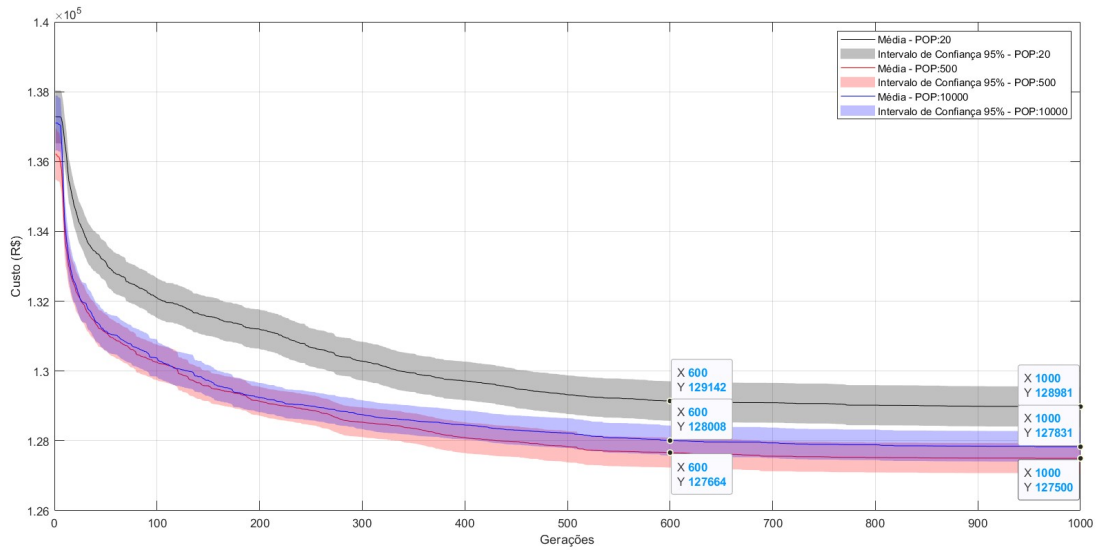
A Figura 48 apresenta os resultados para 20, 500 e 10000 partículas, onde o eixo da vertical representa o custo em reais do projeto e o eixo da horizontal indica o número de geração do PSO. Os demais resultados das populações não foram exibidos, visto que ocorre sobreposição dos resultados. Diante do exposto, o menor custo foi obtido para 500 partículas, enquanto o maior custo foi através de 20 partículas. Verifica-se também que ocorre uma sobreposição dos resultados obtidos por 10000 e 500 partículas, indicando que os custos médios podem ser considerados semelhantes. Por consequência, nota-se que o uso elevado de partículas neste problema não é garantia de uma maior redução do custo, contudo, ocorre redução do tempo médio total de processamento.

Do ponto de vista de gerações, verificou-se que a partir de 600 gerações os custos têm sutis reduções, sendo inferior a R\$180,00 até 1000 gerações, logo, afim de promover o equilíbrio entre o Tempo de Execução (TE) e o resultado das soluções, optou-se que para as demais simulações serão realizadas 600 gerações usando 500 partículas, com isso tal parametrização prover menor tempo de processamento. Cabe ressaltar, que cada geração tem duração média de

² Tempo médio total de processamento.

³ O notebook utilizado para simulações possui as seguintes especificações:
 – Processador: Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz a 2.90 GHz;
 – Placa de vídeo: Nvidia GeForce 940MX com 4,0 GB;
 – Capacidade da memória *Random Access Memory* (RAM): 16,0 GB;
 – Capacidade do armazenamento: 120GB, SSD SATA.

Figura 48 – Evolução do custo médio do projeto em relação ao número de partículas.

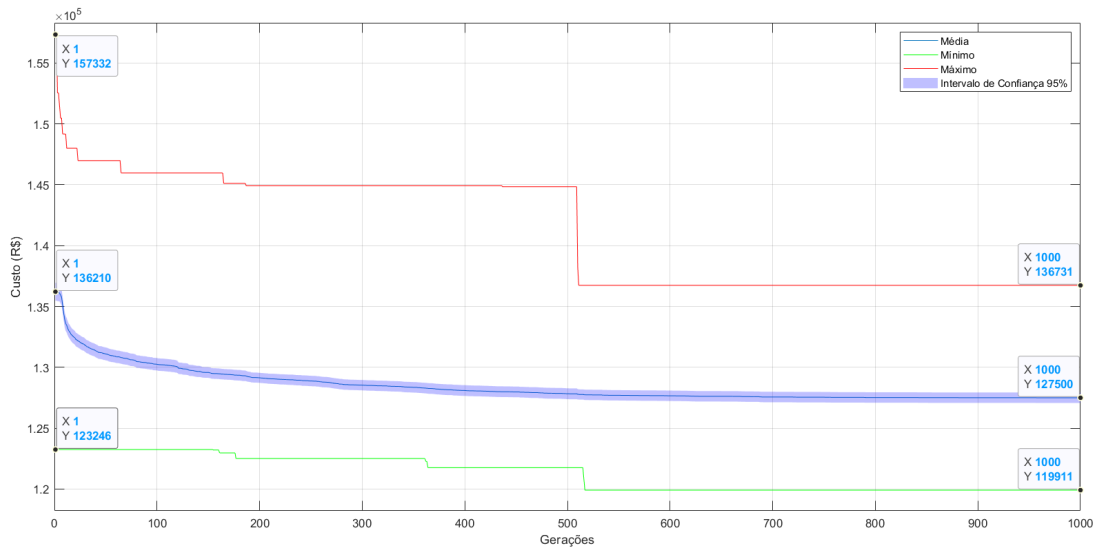


Fonte: Próprio Autor, 2022.

0,809446 segundos, logo para 1 simulação com 200 MC e 1000 gerações, tem o tempo total de 161.889,2 segundos (i.e ≈ 44,97 horas), com a redução para 600 gerações o tempo total reduz para 97.133,5 segundos (i.e ≈ 26,98 horas), o que representa uma redução de 40% no TE.

A Figura 49 exibe o resultado individual da simulação com 500 partículas, onde mostra os custos máximos, mínimos e médios de cada geração. Tendo um custo máximo de R\$157.332,00 e mínimo de R\$119.911,00 apresentando uma economia de R\$37.421,00. Nota-se que o melhor resultado médio foi de R\$127.500,00.

Figura 49 – Resultado individual da simulação com 500 partículas.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

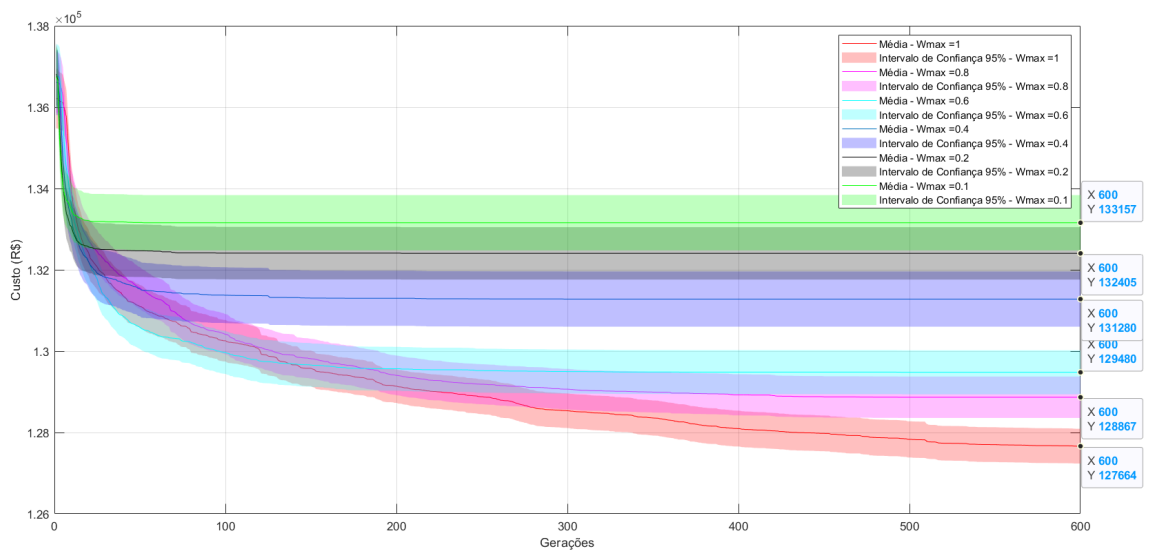
4.2.2 Peso inercial máximo

O seguinte parâmetro analisado pela varredura de parâmetros foi W_{max} , na qual foram adotados os valores 1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 e 0.1, com a finalidade de definir o melhor valor para este parâmetro, além de verificar o comportamento dos gráficos gerados nas simulações. Para isso, fixou-se os demais parâmetros em:

- População ($TamPop$) = 500;
- Número de gerações ($NumGen$) = 600;
- Peso inercial mínimo (W_{min}) = 0.1;
- Constante social (c_2) = 4.

A Figura 50 mostra a evolução dos custos para W_{max} de 1 até 0.1, onde o eixo vertical representa o custo em reais do projeto e o eixo horizontal representa o número de gerações do PSO. É importante mencionar que não foram exibidos todos os resultados, pois, dificulta a análise dos mesmos devido à poluição visual que ocasiona.

Figura 50 – Evolução do custo médio do projeto em relação a inércia máxima.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Verifica-se que o menor custo foi de R\$127.664,00, adotando $W_{max} = 1$. Além disso, pelo comportamento do gráfico observa-se que o custo tende a diminuir com base na maior diversidade de valores entre W_{max} e W_{min} , pois, a cada nova iteração a inércia é atualizada por esses parâmetros, com isso há uma maior redução dos custos. Já os efeitos nas partículas correspondem a iniciar com maior movimentação e com o passo das iterações têm suas velocidades reduzidas, pois o fator de inércia é atualizado a cada nova geração.

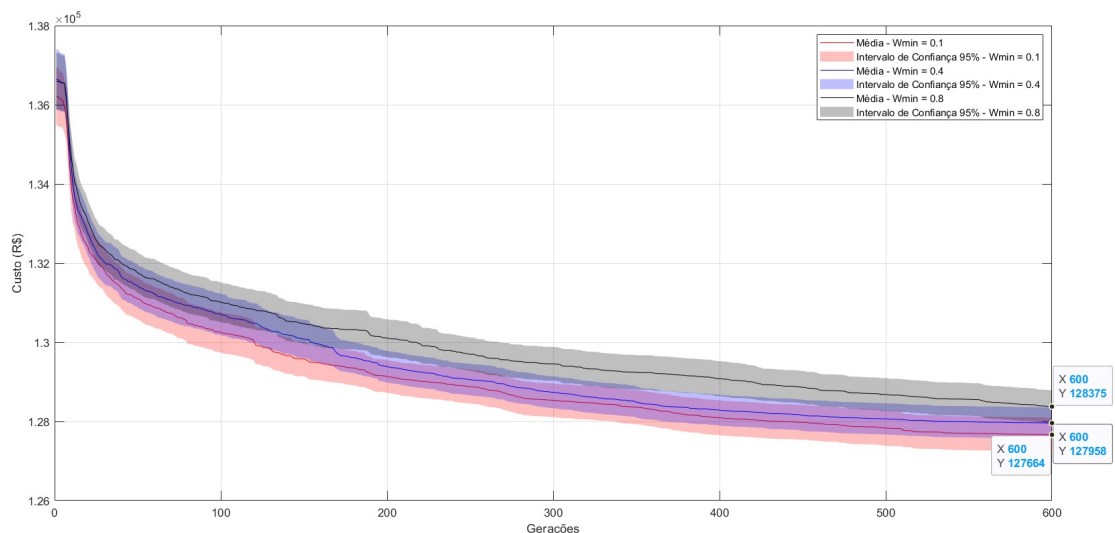
4.2.3 Peso inercial mínimo

Com relação ao peso inercial mínimo W_{min} foram realizadas simulações com: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 e 0.9, de modo que seja verificado o comportamento do PSO. Tal fator irá alterar a velocidade mínima da partícula ao passo das iterações, com os gráficos poderemos visualizar se as partículas terão melhores resultados conforme o peso deste parâmetro. Com isso, fixou-se os demais parâmetros em:

- População ($TamPop$) = 500;
- Número de gerações ($NumGen$) = 600;
- Peso inercial máximo (W_{max}) = 1;
- Constante social (c_2) = 4.

A Figura 51 apresenta os resultados para W_{min} igual a 1, 0.8 e 0.4. Verifica-se que independente do valor escolhido os custos possuem alto grau de semelhança dentro dos intervalos de gerações analisadas. Contudo, nota-se de maneira sutil que quanto maior o valor de inércia mínima, maior será o custo do projeto. Dessa forma, o uso restrito de inércias prejudica o resultado final, enquanto uma diversidade maior de valores de inércia torna-se benéfica. Diante dos resultados, verifica-se que o menor custo é obtido para $W_{min} = 0.1$, ou seja, mesmo parâmetro definido na Seção 4.2.1.

Figura 51 – Evolução do custo médio do projeto em relação a inércia mínima.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

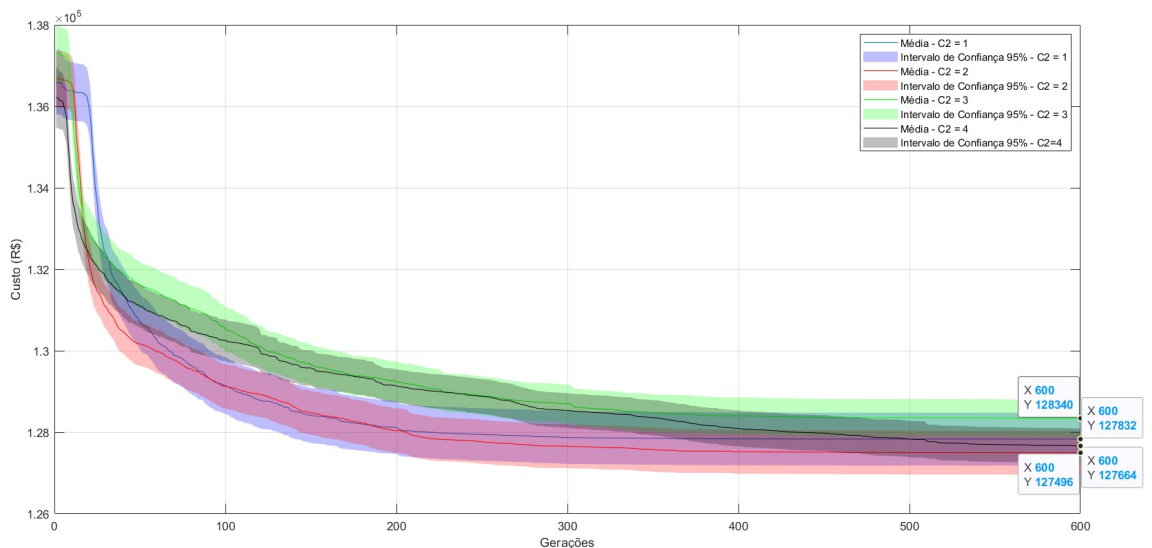
4.2.4 Constante social

A constante social c_2 no PSO, representa o grau de confiabilidade da partícula com a população, ou seja, quanto maior este parâmetro, maior a probabilidade da partícula seguir as demais, mas não necessariamente quanto maior o valor melhor o resultado. Como citado na Seção 2.10, c_2 pode assumir valores entre $[0;4]$, com isso foram realizadas simulações para 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 e 4, de modo a analisar o comportamento da população. Para os demais parâmetros, fixou-se os valores em:

- População ($TamPop$) = 500;
- Número de gerações ($NumGen$) = 600;
- Peso inercial máximo (W_{max}) = 1;
- Peso inercial mínimo (W_{min}) = 0.1.

A Figura 51 apresenta os resultados de 1 até 4. Notou-se muita sobreposição dos resultados, entretanto, o menor custo médio foi de R\$127.496,00 adotando $c_2 = 2$. Vale a pena ressaltar que ao usar um valor baixo de c_2 as partículas tendem a não ter uma confiabilidade no enxame, ou seja, em certos momentos algumas partículas não são totalmente influenciadas pelo enxame. Dessa forma, encontrar uma solução de menor custo torna-se mais célere.

Figura 52 – Evolução do custo médio do projeto em relação a constante social.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

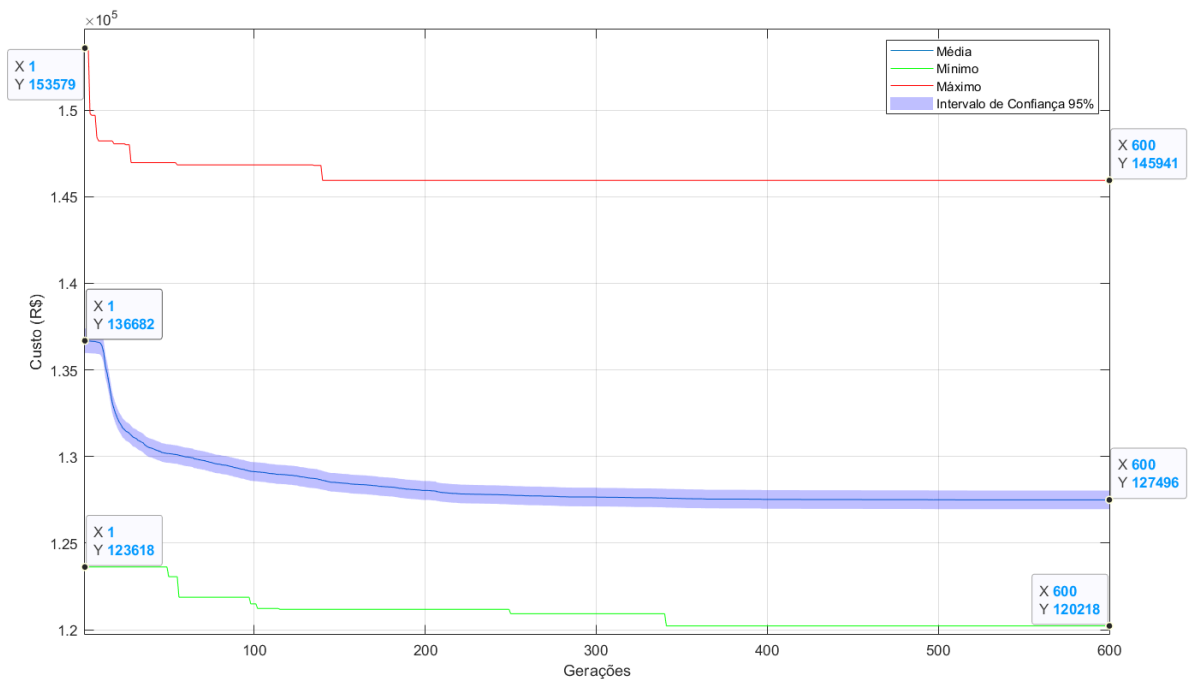
Com todas as etapas de parametrização realizadas, foi possível determinar quais parâmetros fornecem os melhores resultados:

- População ($TamPop$) = 500;

- Número de gerações ($NumGen$) = 600;
- Peso inercial máximo (W_{max}) = 1;
- Peso inercial mínimo (W_{min}) = 0.1;
- Constante social (c_2) = 2.

A Figura 53 apresenta o resultado individual da simulação com a constante social $c_2 = 2$, onde mostra os custos máximos, mínimos e médios de cada geração. Nota-se um custo máximo de R\$153.579,00 e mínimo de R\$120.218,00 (i.e., redução de R\$33.361,00), enquanto o menor custo médio foi de R\$127.496,00.

Figura 53 – Resultado simulação com c_2 igual a 2.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

A próxima etapa é verificar a rede proposta e suas características técnicas. A Figura 54 apresenta a rede proposta pelo PSO, na qual a ordenada e abscissa representam latitude e longitude, respectivamente. Os equipamentos são representados por formas geométricas, o losango de cor amarela representando a posição da OLT, enquanto os triângulos e quadrados indicam as posições das CEOs e CTOS, respectivamente, com a sequência de cores da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): verde, amarelo, branco, azul e vermelho. Em relação às fibras ópticas, foi usado o seguinte padrão: uma linha contínua de cor preta representa a *backbone*, linha tracejada representa a distribuição e a linha pontilhada o *drop*. Referente aos postes da região de atendimentos, estes serão representados por círculos tracejados e são definidos como

nós da rede, sendo numerados pelo simulador. Já a Figura 55 apresenta a potência de recepção de cada usuário da rede (barras em azul) e seu limiar de -27 dBm (linha tracejada em vermelho). Como o nível de potência situa-se acima do limiar a rede proposta é considerada viável.

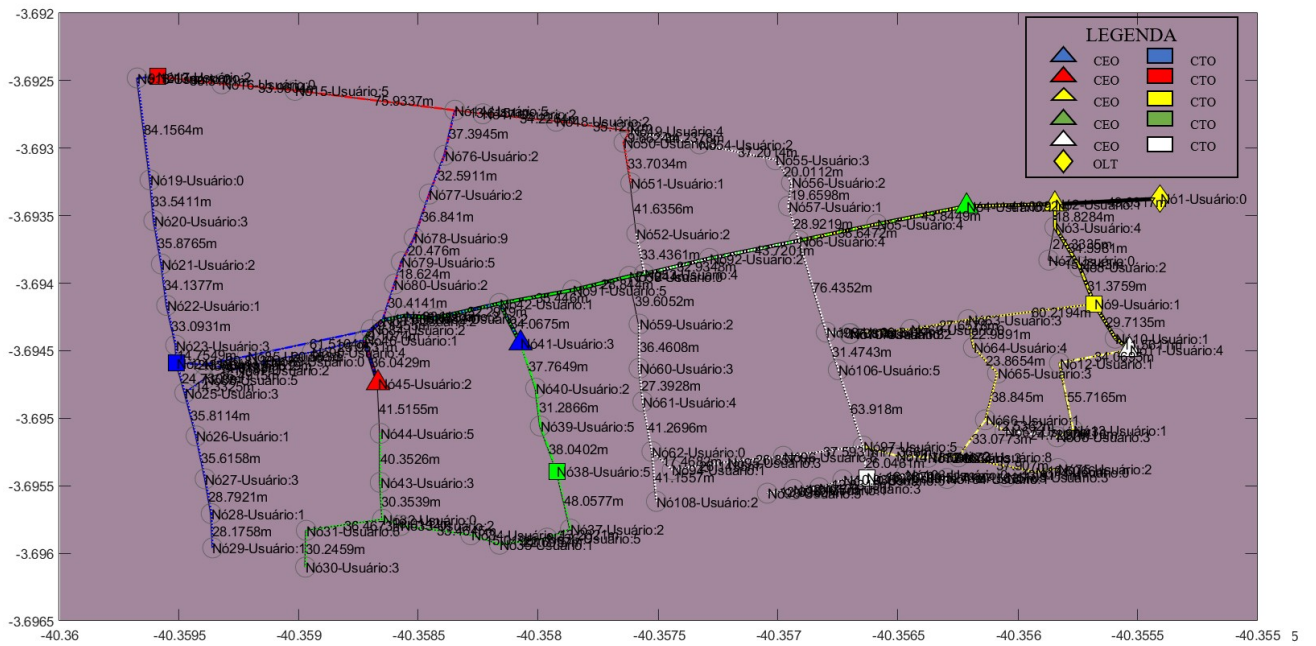
Na Tabela 3 é apresentado a posição dos equipamentos definidos, onde cada posição representa o número de identificação do poste no simulador, já a Tabela 8 no Anexo A apresenta os custos detalhados dos equipamentos da rede projetada.

Tabela 3 – Posição dos equipamentos pelo Algoritmo PSO.

TÉCNICA	POSIÇÃO DAS CEOs	POSIÇÃO DAS CTOs
PSO	[4 2 11 41 45]	[38 9 102 24 17]

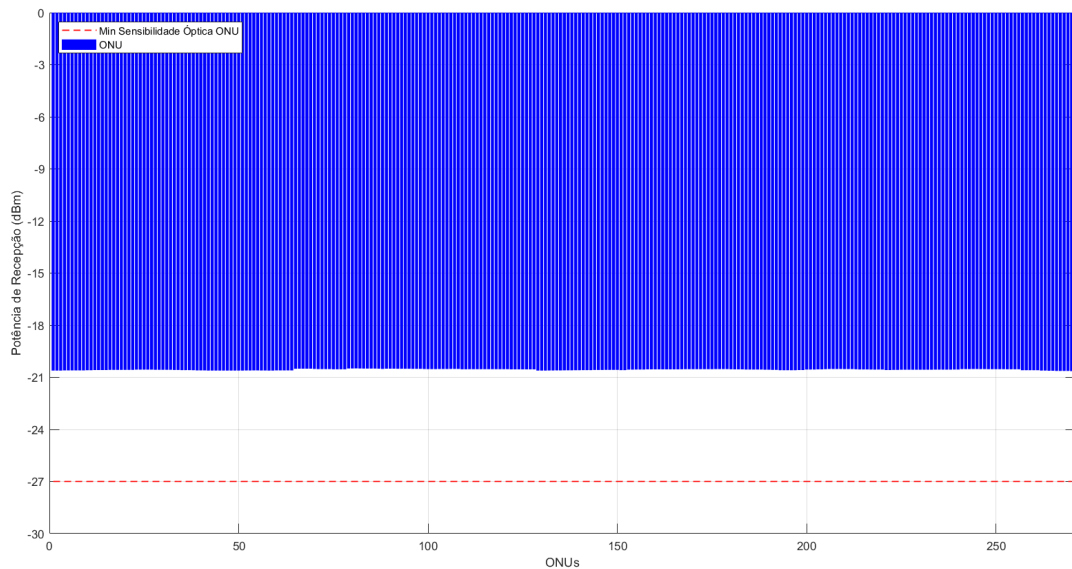
Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 54 – Rede proposta pelo algoritmo PSO.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 55 – Potência de recepção de cada ONU ao adotar projeto proposto pelo PSO.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

4.3 Resultados Comparativos

Diante dos resultados expostos utilizando o algoritmo PSO, é realizado o comparativo com as demais técnicas citadas na Seção 4.1, de modo a avaliar o desempenho do algoritmo proposto e verificar o grau de confiabilidade de cada técnica.

4.3.1 Resultados usando a técnica Randômica

Na técnica Randômica as posições dos equipamentos CEOs e CTOs são definidas aleatoriamente⁴ para o cálculo do custo da rede GPON, de modo que o resultado anterior não interfere nos resultados futuros.

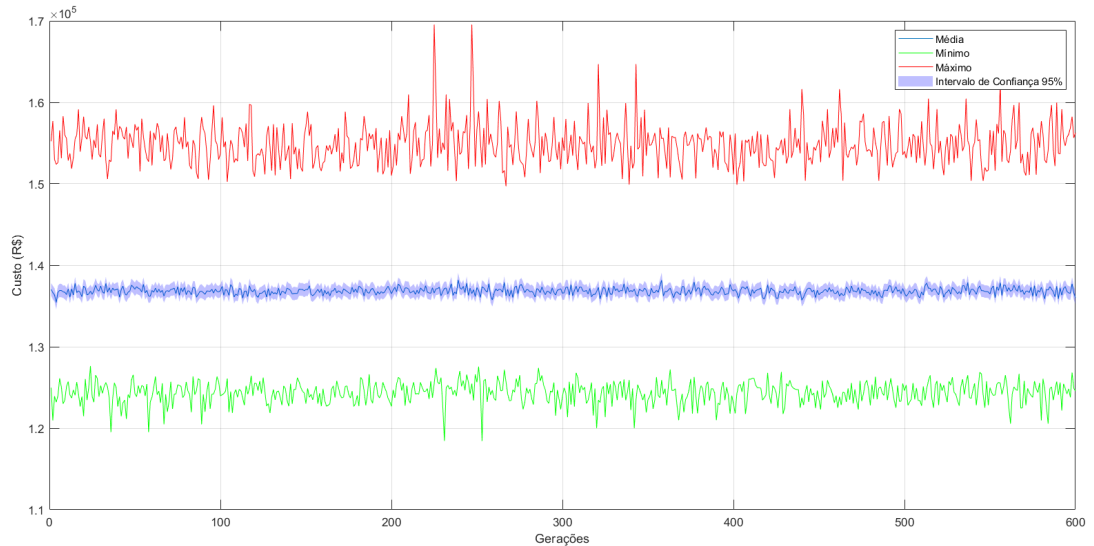
Os resultados desta técnica são exibidos no gráfico da Figura 56, onde foram realizados 200 MC com 600 gerações cada, onde cada geração corresponde a uma nova simulação visto que não há um processo de melhoria com base nas gerações anteriores, tendo um TE médio de 0,955561 segundos em cada geração, ou seja, foram 114.667,32 segundos (i.e \approx 31,85 horas).

Pelo gráfico, é possível identificar que não há nenhuma previsibilidade de resultados, pelo fato de que os resultados anteriores não interferem nos resultados futuros, com isso, os gráficos dos custos médios, mínimos e máximos apresentam aspectos estocásticos. Além disso, o intervalo de confiança de 95% mostra estatisticamente que a média dos resultados é de cerca

⁴ Respeitando as restrições impostas na Seção 3.4.3 de viabilidade técnica.

de R\$ 136.833,00, com custo máximo geral de R\$ 169.548,00 e mínimo geral de R\$ 118.439,00.

Figura 56 – Evolução do custo médio do projeto utilizando a técnica Randômica.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Nas Figuras 57 e 58 é mostrada a rede indicada pela técnica Randômica e a potência de recepção para cada usuário. Já a Tabela 4 apresenta a posição dos equipamentos definidos e a Tabela 9 no Anexo A apresenta os custos detalhados dos equipamentos da rede projetada.

Tabela 4 – Posição dos equipamentos pela técnica Randômica.

TÉCNICA	POSIÇÃO DAS CEOs	POSIÇÃO DAS CTOs
Randômico	[2 4 42 91 61]	[3 84 95 82 30]

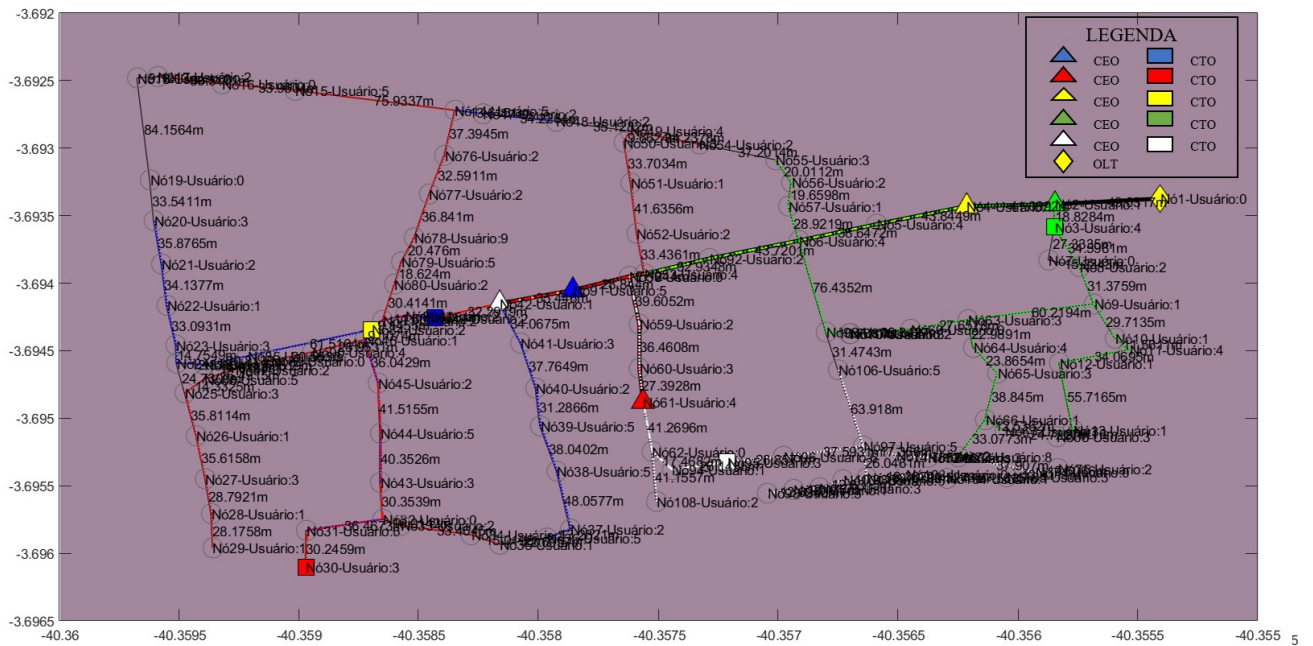
Fonte: Próprio Autor, 2022.

4.3.2 Resultados usando a técnica Manual

Na técnica Manual, as posições dos equipamentos CEOs e CTOs são definidas pelo projetista da rede com base na sua visão sobre a região definida, desse modo, são realizadas análises visuais para posicionar os equipamentos de modo que fiquem o mais distribuídos possíveis⁵. Diferentemente das técnicas abordadas nas seções anteriores, com esta técnica fica inviável realizar muitas simulações, além do TE do programa há o fator humano de verificar as combinações possíveis para realizar as simulações, com isso o fator visual torna-se o mais importante para projetar a rede nesta técnica.

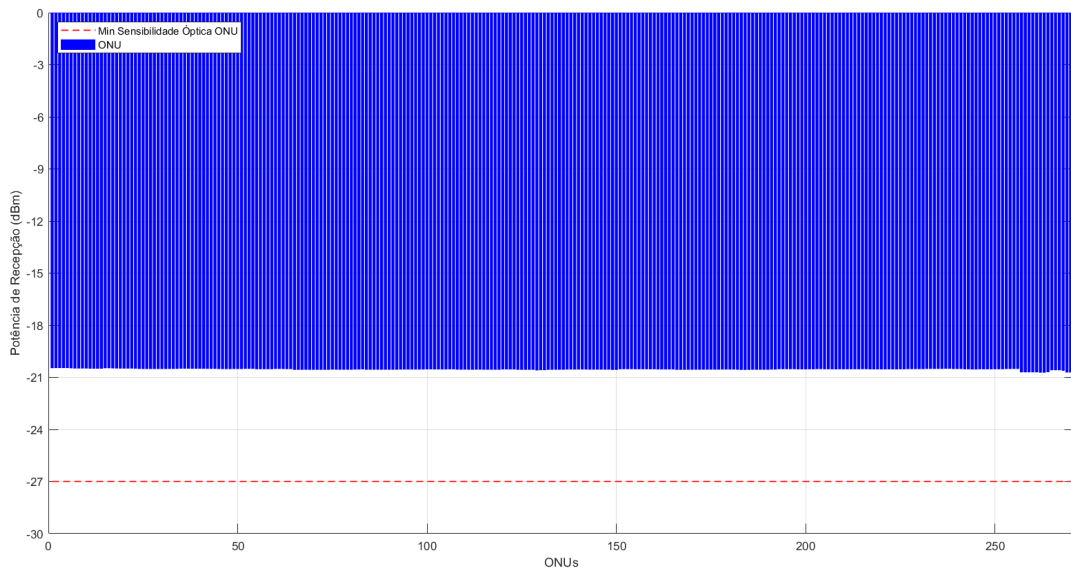
⁵ Respeitando as restrições impostas na Seção 3.4.3 de viabilidade técnica.

Figura 57 – Rede proposta pela técnica Randômica.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 58 – Potência de recepção de cada ONU ao adotar projeto Randômico.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Mediante o exposto, foram projetadas cinco redes usando a técnica manual, de modo que a rede definida por esta técnica seja a de menor custo final. Cabe ressaltar que as redes apresentadas a seguir foram projetadas por engenheiros que atuam na área e alunos do curso de Engenharia Elétrica e de Engenharia da Computação da UFC de Sobral. A Tabela 5 apresenta a posição dos equipamentos CEOs e CTOS com base no identificador do poste no simulador, além de indicar o custo de cada rede. Com isso, a rede manual 3 foi a rede que obteve melhor custo,

sendo esta a rede definida pela técnica manual, já as médias das redes geradas de forma manual foi de R\$ 144.345,00.

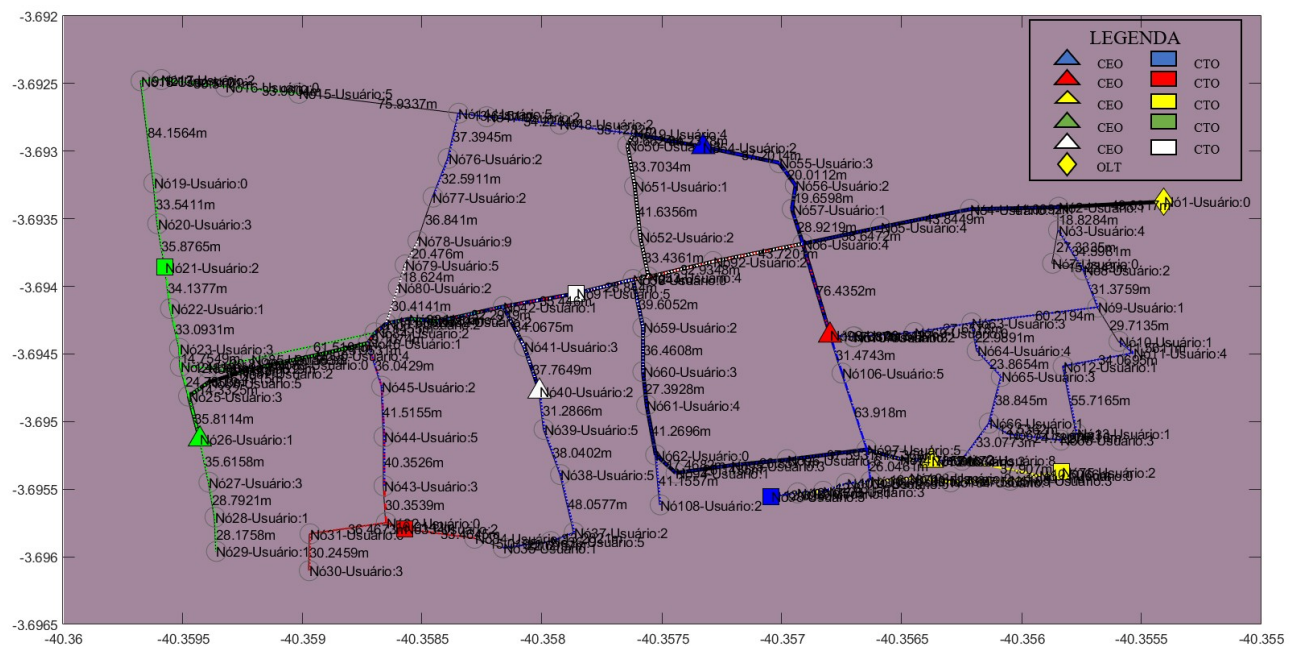
Tabela 5 – Redes projetadas manualmente.

TÉCNICA	POSIÇÃO DAS CEOs	POSIÇÃO DAS CTOs	CUSTO FINAL
Rede manual 1	[35 – 59 – 41 – 29 – 37]	[44 – 72 – 93 – 21 – 36]	R\$ 147.717,00
Rede manual 2	[69 – 29 – 35 – 33 – 40]	[74 – 79 – 85 – 70 – 93]	R\$ 142.567,00
Rede manual 3	[21 – 75 – 91 – 98 – 33]	[26 – 72 – 40 – 54 – 93]	R\$ 136.637,00
Rede manual 4	[8 – 3 – 60 – 100 – 37]	[42 – 20 – 63 – 88 – 31]	R\$ 149.667,00
Rede manual 5	[6 – 2 – 62 – 97 – 33]	[41 – 21 – 63 – 98 – 32]	R\$ 145.137,00

Fonte: Próprio Autor, 2022.

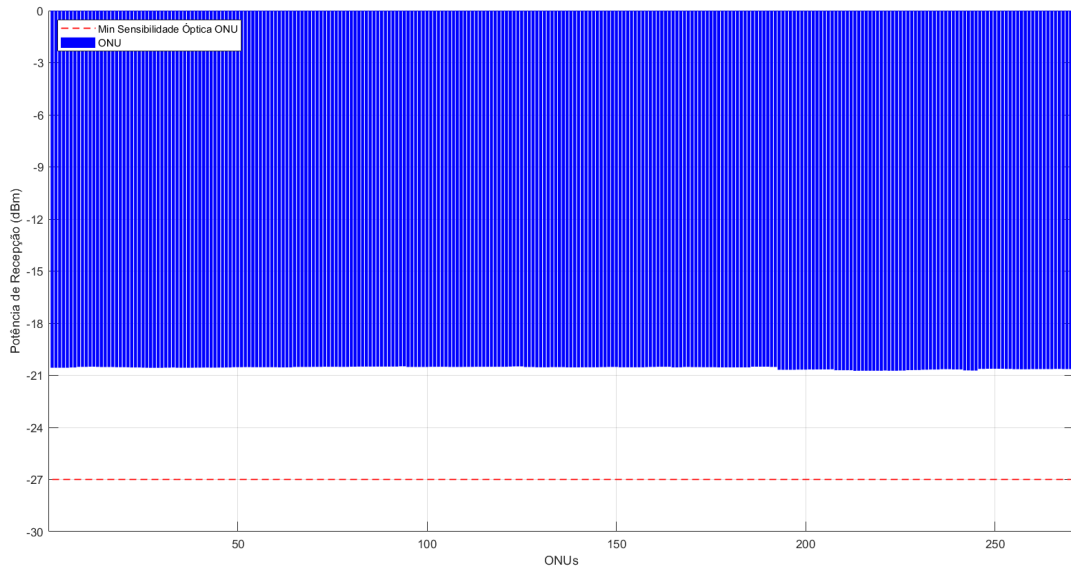
Nas Figuras 59 e 60, são mostrados a rede proposta pela técnica manual e a potência de recepção para cada usuário, na Tabela 10 no Anexo A apresenta os custos detalhados dos equipamentos da rede projetada.

Figura 59 – Rede proposta pela técnica Manual.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Figura 60 – Potência de recepção de cada ONU ao adotar projeto Manual.

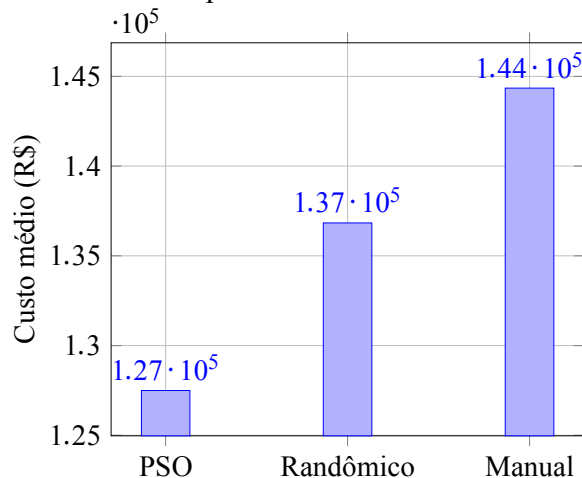


Fonte: Próprio Autor, 2022.

4.3.3 Comparativo entre as técnicas Randômica, Manual e PSO

Com os resultados das técnicas citados nas seções anteriores, é realizado o comparativo dos resultados para avaliar o custo e desempenho. A Figura 61 mostra o comparativo dos custos médios, onde as técnicas PSO e Randômico foram avaliadas com base nos seus resultados com intervalo de confiança de 95%, pois, neste intervalo as técnicas apresentam maior confiabilidade de reproduzirem os mesmos resultados se forem simuladas novamente.

Figura 61 – Custo médio obtido por cada técnica.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

A Tabela 6, apresenta o comparativo do TE de cada técnica, com ela é possível identificar que o PSO, além de apresentar melhor custo, apresenta um bom TE pela redução do

custo produzida, já a técnica Manual⁶ é a que apresenta menor TE, pois nela é contabilizado apenas o tempo para o cálculo das rotas com base nos postes definidos pelo projetista, já a técnica Randômica é analisando com base em uma única geração, visto que a realização de mais gerações não implicam em melhorias nos resultados.

Tabela 6 – Tempo de execução das técnicas.

Técnica	Tempo de Execução (s)	Tempo de Execução (h)
PSO	97133,5	26,98
Randômica	0,955561	0,00
Manual	0,798446	0,00

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Mediante as informações do gráfico da Figura 61, verifica-se que o PSO apresenta melhor custo médio, mostrando-se uma ferramenta poderosa na proposta de rede GPON, trazendo resultados viáveis e de baixo custo, além de um TE aceitável. Pelos resultados obtidos o PSO tende a deixar as CEOs próximas da OLT para que o custo com o cabo *backbone* seja o menor possível. Além disso, a utilização do PSO aliada com a técnica Manual, pode trazer ao projetista maior liberdade e possibilidades de escolha para o projeto da rede, pois, em casos de modificação do projeto, é possível realizar a personalização da rede GPON, rapidamente com um custo computacional aceitável.

⁶ Deve-se deixar claro que no caso da técnica manual o projetista informa quais as coordenadas dos equipamentos. Em seguida, o *software* indica a rota dos cabos usando Dijkstra. Assim, nesta monografia considera-se apenas o tempo de obtenção das rotas.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs uma técnica de planejamento de redes GPON com o uso da meta-heurística PSO. Diante dos resultados torna-se possível responder as Questões de pesquisa (QP), da Seção 1.2 que serviram de guia para o desenvolvimento da pesquisa:

- **QP1** . Atualmente, dada a crescente concorrência dos ISPs, como tornar o projeto FTTH mais econômico e tecnicamente aceitável?
 - **Resposta QP1:** Não é segredo que o setor de ISP está cada vez mais competitivo. E, para lidar com essa realidade, é necessário saber procurar novos meios de redução de custo. Nesse sentido, é fundamental propor novas soluções usando ferramentas matemáticas (i.e. meta-heurísticas, otimização, inteligência artificial, etc) a fim de encontrar o projeto mais adequado.
- **QP2** . A meta-heurística PSO pode ser aplicada para aperfeiçoar economicamente e tecnicamente o projeto FTTH?
 - **Resposta QP2:** Sim. Contudo foi necessário adaptar o formato original do PSO ao problema proposto. As principais mudanças foram o ajuste atualização da velocidade e filtros para eliminação de soluções não adequadas. Com tais ajustes foi possível otimizar a escolha da posição dos equipamentos para a redução dos custos, de modo a localizar as posições viáveis tecnicamente para o projeto, além de estabelecer um custo computacional aceitável.
- **QP3** . Qual a diferença econômica e tecnicamente entre um projeto com PSO quando comparado a um projeto manual?
 - **Resposta QP4:** A média de custo da solução usando a técnica Manual foi de R\$ 144.345,00, superior ao custo média da técnica usando o PSO, que foi de R\$ 127.496,00. Os resultados obtidos mostram uma economia de R\$ 16.849,00, comprovando que houve uma redução no preço final da rede. Estabelecendo que o PSO é uma ferramenta eficiente para o problema proposto.

Diante dos resultados expostos, ainda que positivos, ainda há espaço para melhorias no projeto, permitindo que o algoritmo seja ainda mais otimizado e que fique mais comercial. Pois, além de facilitar a elaboração da rede para os ISPs, busca-se promover serviços de qualidade para o usuário final com baixo custo. Mediante a isto, este trabalho possui alguns pontos de melhoria, tais como:

- Inserir uma interface gráfica amigável para usuário final;

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

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, F. R. D. Luis G. T. Zulai e T. Proposta de um mecanismo de eficiência energética em redes ópticas passivas de próxima geração. [S.I], 2017.
- ALBUQUERQUE, A. M. **PROJETO E ANÁLISE DE UMA REDE GPON**. 2018.
- ARAÚJO, F. H. **Projeto de uma rede GPON FTTH implantada na cidade de Santana do Acaraú**. 2019.
- 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.
- BRUMMELEN, G. V. **Heavenly Mathematics**. Princeton University Press, 2017. ISBN 0691175993. Disponível em: https://www.ebook.de/de/product/26870535/glen_van_brummelen_heavenly_mathematics.html.
- CARVALHO, H. Otimização por enxames de partículas (pso). [S.I], 2019.
- CARVALHO, R.; NEDJAH, N.; MOURELLE, L. Localização e mapeamento simultâneos utilizando otimização por enxame de partículas. **XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte, MG, 20 a 24 de Setembro de 2014**, 2014.
- CORTES, L. da C. Projeto de uma rede GPON implementada. **Seminário de Tecnologia, Gestão e Educação - Alcides Maya, Faculdade e Escola Técnica**, 2020.
- DIAS, L. P. **Otimização de Redes de Acesso PON 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.
- DRÉO, J.; SIARRY, P.; PÉTROWSKI, A.; TAILLARD, E. **Metaheuristics for Hard Optimization**. Springer-Verlag GmbH, 2006. ISBN 9783540309666. Disponível em: https://www.ebook.de/de/product/19292785/johann_dreo_patrick_siarry_alain_petrowski_eric_taillard_metaheuristics_for_hard_optimization.html.
- FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. [S. l.]: AMGH, 2010.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Transmission characteristics of optical components and subsystems ITU-T G.671**. 2019.
- KEISER, G. **Optical fiber communications**. New York, NY: McGraw-Hill Companies, 2011. ISBN 9780073380711.
- LAGE, L. B. **ESTUDO DE UMA REDE DE ACESSO VIA FIBRA ÓPTICA**. 2006.
- NASCIMENTO, F.; GUERRA, F.; COELHO, L. Abordagem de enxame de partículas aplicada à engenharia de confiabilidade. **VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**, 2008.
- PACIFICO, R. P. C. **Procedimento prático para elaboração de uma rede GPON FTTH balanceada**. 2018.

PAIVA, G. E. R. de. **Estudo de Esquemas de Amplificação para Redes PON de Longo Alcance**. Dissertação (Mestrado) – Dissertação – Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Telecomunicações)– Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

PEREIRA, F. C. de L. **Proposta de um método para otimização e dimensionamento de redes GPON**. Dissertação (Mestrado) – Projeto de Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada, 2013.

PINHEIRO, J. **Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações**. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2017. ISBN 8535286128.

SILVA, A. B. D. **Enxame de partículas aplicado ao problema do caixeiro viajante**. 2017.

SOBRAL, P. M. de. **Plano Diretor - Diagnóstico Consolidado**. 2020. Ur-
<https://drive.google.com/file/d/1Ag0GtDKuztbREWkmJ6VF2P51xLUAkqID/view>.

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

VILLALBA, T. V. **Distribuição de divisores de potência em redes ópticas passivas utilizando algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado) – Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Telecomunicações)–Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA OTIMIZAÇÃO GPON USANDO PSO.

```

1
2 INICIO
3
4 % %-----
5 % %Parametros da rede GPON
6 % %-----
7
8 Num_CEO= 5; % Quantidade de CEOs
9 Num_CTO= 5; % Quantidade de CTOs
10
11 % %-----
12 % %Mapa da regioao
13 % %-----
14
15 % Atraves do mapa importado eh extraido a
16 % longitude e latitude dos postes da regioao
17 [ Longitude , Latitude ]= Mapa ( ) ;
18
19 % Alem das coordenadas dos postes eh atribuido
20 % um identificado ( ID ) para cada poste
21 Coordenadas_postes = [ Id_poste , Longitude , Latitude ];
22
23 % %-----
24 % %Parametros PSO
25 % %-----
26
27 pop = 500; % Tamanho da populacao
28 nvar = 2; % Numero de dimensoes de cada particula , no caso
   ( longitude , latitude )
29 w_max = 1; % Peso maximo de inercia

```

```
30 w_min = 0.8; % Peso minimo de inercia
31 c1 = 0; % Constante cognitiva
32 c2 = 2; % Constante social
33 max_it = 600; % Quantidade de iteracoes
34
35 % %-----
36 % %Fronteiras do PSO
37 % %-----
38
39 % fonteira inferior
40 % ( menor valor possivel com base nas coordenadas )
41 var_min = minimo ( Coordenadas_postes );
42
43 % fronteira superior
44 % ( maior valor possivel com base nas coordenadas )
45 var_max = maximo ( Coordenadas_postes );
46
47 % %-----
48 % %Atribuicoes dos valores iniciais do PSO
49 % %-----
50
51 % A populacao inicial tem tamanho pop e coordenadas
    randomicas entre var_min e var_max
52 pop_x = Rand ( var_min , var_max , pop );
53
54 % A posicao das particulas eh atualizada
55 % para a coordenada do poste mais proximo
56 % atraves da distancia euclidiana , usando a funcao
57 % poste_mais_proximo especifica para o programa
58 pop_x = poste_mais_proximo ( pop_x );
59
60 % A velocidade ira receber uma parcela
```

```
61 % do valor da posicao , mas tambem pode
62 % ser um valor randomico
63 pop_v = 0.001* pop_x ;
64
65 % %-----
66 % %Custo da Rede ( Fitness )
67 % %-----
68
69 % Definine - se que as primeiras Num_CEO
70 % da populacao de particulas representam a
71 % posicao das CEOs e os Num_CTOs seguintes
72 % representam a posicao das CTOS .
73
74 % Verifica - se se nao houve repeticao de
75 % postes na populacao , pois nao
76 % podemos utilizar o poste mais de 1 vez .
77
78 % A variavel pop_unica eh uma variavel
79 % auxiliar que recebera a posicao dos
80 % postes unicos , ou seja , nao tera postes repetidos
81 pop_unica = postes_repetidos ( pop_x ) ;
82
83 % Recebea posicao das CEOs
84 posi_CEO = pop_unica (1: Num_CEO ,:) ;
85
86 % Recebea posicao das CTOS
87 posi_CTO = pop_unica (( Num_CEO +1 ):( Num_CEO + Num_CTO ) ,:) ;
88
89 % Recebe o custo da rede com base
90 % na posicao dos equipamentos
91 Custo = custo_rede ( posi_CEO , posi_CTO ) ;
92
```

```

93 % %-----
94 % %Armazenando os melhores valores
95 % %-----
96
97 % Na iteracao inicial , todos os valores sao os melhores
98 Melhor_custo = Custo ; % Melhor custo
99 Melhor_CEO = posi_CEO ; % Melhor posicao das CEOs
100 Melhor_CTO = posi_CTO ; % Melhor posicao das CTOs
101
102 pop_g = pop_x ; % pop_g representa a melhor posicao global
103 pop_i = []; % Nao ha representacao da melhor posicao
    individual
104
105 % %-----
106 % %Inicio das interacoes
107 % %-----
108
109 PARA it =1 ATe max_it FAcA
110
111     % %-----
112     % %Atualizacao PSO
113     % %-----
114
115     % Atualizacao do peso inercial
116     w = w_max - ( w_max - w_min ) * it / max_it ;
117
118     % Atualizacao da velocidade
119     pop_v = w .* pop_v + c1 .* randomico () .*( pop_i - x ) + c2 .*
        randomico () .*( pop_g - pop_x ) ;
120
121     % Atualizacao das posicoes ( populacoes )
122     pop_x = pop_x + pop_v ;

```

```
123
124 % %-----
125 % %Fronteiras
126 % %-----
127
128 % eh verificado se alguma particula ultrapassou
129 % a fronteira definida , se sim , ira receber a
130 % coordenada maxima ou minima correspondente
131 pop_x = fronteira ( pop_x , var_min , var_max ) ;
132
133 % %-----
134 % %Postes mais proximos
135 % %-----
136
137 % A posicao das particulas e atualizada para
138 % a coordenada do poste mais proximo
139 % atraves da distancia euclidiana , usando a funcao
140 % poste_mais_proximo especifica para o programa
141 pop_x = poste_mais_proximo ( pop_x ) ;
142
143 % %-----
144 % %Custo da Rede ( Fitness )
145 % %-----
146
147 % A variavel pop_unica e uma variavel auxiliar
148 % que recebera a posicao dos postes unicos ,
149 % ou seja , nao tera postes repetidos
150 pop_unica = postes_repetidos ( pop_x ) ;
151
152 % Recebea posicao das CEOs
153 posi_CEO = pop_unica (1: Num_CEO ,: ) ;
```

```
154 % Recebea posicao das CTOs
155 posi_CTO = pop_unica (( Num_CEO +1 ):( Num_CEO + Num_CTO ) ,:);
156
157 % Recebe o custo da rede com base na
158 % posicao dos equipamentos
159 Custo = custo_rede ( posi_CEO , posi_CTO ) ;
160
161 % %-----
162 % %Armazenando os melhores valores
163 % %-----
164
165 SE Custa < Melhor_custo ENTAO FACA
166     Melhor_custo = Custo ; % Melhor custo
167     Melhor_CEO = posi_CEO ; % Melhor posicao das CEOs
168     Melhor_CTO = posi_CTO ; % Melhor posicao das CTOs
169
170     pop_g = pop_x ; % pop_g representa a melhor posicao
171                 global
172     pop_i = []; % Nao ha representacao da melhor
173                 posicao individual
174 FIM SE
175
176 FIM PARA
177
178 FIM
```


ANEXO A – TABELAS DE CUSTO

Tabela 7 – Preço dos materiais.

Material	Preço Unitário
CABO ÓPTICO 2FO	R\$ 1,08
CABO ÓPTICO 48FO	R\$ 8,55
CTO 1X64	R\$ 1.185,50
CEO 24F	R\$ 232,04
OLT	R\$ 9.367,65
DIO	R\$ 432,42
ONU	R\$ 260,75
Conector	R\$ 4,69

Fonte: Próprio Autor, 2022.

As Tabelas 8, 9, 10 apresentam o custo da rede GPON com base no melhor resultado obtido na simulação da Figura 53, 56 e da Tabela 5, respectivamente.

Tabela 8 – Custo da rede pelo PSO.

Material	Preço Unitário	Quantidade	Preço
CABO ÓPTICO 2FO	R\$ 1,08	23861	R\$ 25.769,88
CABO ÓPTICO 48FO	R\$ 8,55	835,02	R\$ 7.139,42
CTO 1X64	R\$ 1.185,50	5	R\$ 5.927,50
CEO 24F	R\$ 232,04	5	R\$ 1.160,20
OLT	R\$ 9.367,65	1	R\$ 9.367,65
DIO	R\$ 432,42	1	R\$ 432,42
ONU	R\$ 260,75	270	R\$ 70.402,50
Conector	R\$ 4,69	4	R\$ 18,76
Custo Total			R\$ 120.218

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Tabela 9 – Custo da rede pela técnica Randômica.

Material	Preço Unitário	Quantidade	Preço
CABO ÓPTICO 2FO	R\$ 1,08	24958	R\$ 26.954,64
CABO ÓPTICO 48FO	R\$ 8,55	488,43	R\$ 4.176,08
CTO 1X64	R\$ 1.185,50	5	R\$ 5.927,50
CEO 24F	R\$ 232,04	5	R\$ 1.160,20
OLT	R\$ 9.367,65	1	R\$ 9.367,65
DIO	R\$ 432,42	1	R\$ 432,42
ONU	R\$ 260,75	270	R\$ 70.402,50
Conector	R\$ 4,69	4	R\$ 18,76
Custo Total			R\$ 118.440

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Tabela 10 – Custo da rede pela Técnica Manual.

Material	Preço Unitário	Quantidade	Preço
CABO ÓPTICO 2FO	R\$ 1,08	29980	R\$ 32.378,40
CABO ÓPTICO 48FO	R\$ 8,55	1983	R\$ 16.954,65
CTO 1X64	R\$ 1.185,50	5	R\$ 5.927,50
CEO 24F	R\$ 232,04	5	R\$ 1.160,20
OLT	R\$ 9.367,65	1	R\$ 9.367,65
DIO	R\$ 432,42	1	R\$ 432,42
ONU	R\$ 260,75	270	R\$ 70.402,50
Conector	R\$ 4,69	4	R\$ 18,76
Custo Total			R\$ 136.637

Fonte: Próprio Autor, 2022.