



Marcos Antonio Da Silva

REDES ÓPTICAS DE ACESSO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE EPON E SUPERPON

Recife

2024

Marcos Antonio Da Silva

REDES ÓPTICAS DE ACESSO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE EPON E SUPERPON

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Ciências da Computação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências da Computação.

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Departamento de Computação

Curso de Bacharelado em Ciências da Computação

Orientador: prof. Dr. Danilo R.B. Araujo

Recife

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

S586r Silva, Marcos Antonio da.
Redes ópticas de Acesso: uma análise comparativa entre EPON e SuperPON / Marcos Antonio da Silva. - Recife, 2024.
54 f.; il.

Orientador(a): Danilo Ricardo Barbosa de Araújo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Ciência da Computação, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Redes ópticas Passivas. 2. PON. 3. EPON. 4. SuperPON 5. OLT. I. Araújo, Danilo Ricardo Barbosa de, orient. II. Título

CDD 004



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO (UFRPE)
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

<http://www.bcc.ufrpe.br>

FICHA DE APROVAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho defendido por MARCOS ANTÔNIO DA SILVA às 10:00 do dia 12/12/2024, na sala virtual meet.google.com/ejy-evxq-cuv, como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, intitulado “REDES ÓPTICAS DE ACESSO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE EPON E SUPERPON”, orientado por DANILO RICARDO BARBOSA DE ARAÚJO e aprovado pela seguinte banca examinadora:

DANILO RICARDO BARBOSA DE ARAÚJO
ORIENTADOR
DC/UFRPE

JEÍSA PEREIRA DE OLIVEIRA DOMINGUES
AVALIADOR
DC/UFRPE

Meu Pai, José Severino da Silva
Minha Mãe, Maria Aparecida da Silva

Agradecimentos

Quero expressar minha profunda gratidão a vocês. Vocês são os pilares da minha vida, os alicerces que me sustentam em tempos bons e difíceis.

Pai, o senhor sempre esteve presente comigo em todos os momentos desse duro desafio, o caminho não foi fácil mas cheguei e suas palavras de encorajamento e de incentivo, foi o que me moveu a continuar minha maior motivação para ter continuado.

Mãe, seu cuidado comigo, suas ligações, sua preocupação constante e o que me manteve de pé. Suas mãos sempre estiveram lá para secar minhas lágrimas e celebrar minhas vitórias.

“Não espere o futuro mudar tua vida, porque o futuro será a consequência do presente ”
(Racionais MC's)

Resumo

A demanda por elevadas taxas de transmissão para serviços de internet tem aumentado ao longo do tempo, resultando em um grande fluxo de dados. Este projeto foca nas redes de acesso, que fornecem internet de qualidade para residências e pequenas empresas. A fibra óptica, conhecida por prometer altas taxas de transmissão tanto para *upstream* quanto para *downstream*, pode transportar vários Gbps, dependendo da arquitetura da rede e dos equipamentos utilizados, como o OLT (Optical Line Terminal). Redes ópticas passivas, que utilizam fibras ópticas interligadas na topologia estrela e na configuração ponto-multiponto, são compostas apenas por componentes ópticos passivos entre o terminal de linha óptica (OLT) e a unidade de rede óptica (ONU). Como uma estratégia de evolução tecnológica, essas redes podem ser utilizadas para aproveitar a infraestrutura existente de cabos de cobre e coaxiais na rede de acesso, servindo como cabo alimentador para tecnologias como *Digital Subscriber Line* (DSL), *Cable Modem*, e *Local Multipoint Distribution System* (LMDS), e, futuramente, para levar a fibra óptica até as instalações dos usuários. Todo o projeto foi realizado em um simulador devido ao alto custo e à novidade da tecnologia SuperPON, que é difícil de encontrar em lojas convencionais. Porém, a tecnologia EPON é extremamente acessível, pois está consolidada no mercado há bastante tempo, com vários provedores já utilizando essa tecnologia para levar internet a bairros ou cidades, dependendo do projeto, porém tanto a EPON como a SuperPON foi feita no omnet++ versão 4.1. Este projeto visa demonstrar a diferença entre as tecnologias EPON e SuperPON, ambas redes ópticas passivas, avaliando o custo-benefício de cada uma. Neste estudo, as particularidades de ambas as tecnologias são exploradas, considerando o tamanho da rede. Observa-se que a EPON (Ethernet Passive Optical Network) se destaca por seu custo significativamente mais baixo em comparação com a SuperPON ao expandir a rede para áreas menores, devido à menor necessidade de gastos com CO (Central Office) e equipamentos. Em contrapartida, a SuperPON apresenta uma vantagem de custo ao expandir para áreas maiores, pois requer menos CO, tornando-se uma opção mais vantajosa nesses cenários. Outra comparação realizada neste trabalho é a quantidade de ONUs (Optical Network Units) que podem ser suportadas pelas redes EPON e SuperPON. Na EPON, uma fibra pode suportar até 64 ONUs em uma rede com um divisor 1:8, resultando em 8 CTOs (Caixas de Terminação Óptica). Em uma rede com um divisor 1:16, é possível ter 4 CTOs. Por outro lado, na rede SuperPON, é possível acomodar até 1024 ONUs em uma única fibra com um divisor 1:8, o que se traduz em 128 CTOs. Com um divisor 1:16, podemos ter 64 CTOs.

Palavras-chave: Redes Ópticas Passivas, PON, EPON, SuperPON, OLT, ONU.

Abstract

The demand for high transmission rates for internet services has been increasing over time, resulting in a large flow of data. This project focuses on access networks, which provide quality internet services to homes and small businesses. Optical fiber offers high transmission rates, both for upstream and downstream, capable of transporting several Gbps, depending on the network architecture and equipment used, such as the OLT (Optical Line Terminal). Passive optical networks are access networks that use interconnected optical fibers in a star topology and point-to-multipoint configuration, consisting only of passive optical components between the Optical Line Terminal (OLT) and the Optical Network Unit (ONU). As a technological evolution strategy, they can be used to leverage the installed base of copper cables and coaxial cables in the access network, serving as feeder cables for technologies such as Digital Subscriber Line (DSL), cable modem, and Local Multipoint Distribution System (LMDS), and, in the future, to provide optical fiber to user premises. This project aims to show the difference between EPON and SuperPON technologies, both of which are passive network technologies, and to verify the cost-effectiveness of both. In this work, we explore the particularities of both technologies, considering the size of the network. We observe that EPON (Ethernet Passive Optical Network) stands out for its significantly lower cost compared to SuperPON when expanding the network to smaller areas. This is due to the lower need for expenses with CO (Central Office) and equipment. On the other hand, SuperPON presents a cost advantage when expanding to larger areas, as it requires less CO. Therefore, it becomes a more advantageous option compared to EPON in such network expansion scenarios. Another comparison we will address is the number of ONUs (Optical Network Unit) that we can obtain compared to EPON and SuperPON. In EPON, one fiber can support up to 64 ONUs in a network with a 1:8 splitter, resulting in 8 CTOs (Optical Termination Boxes). In a network with a 1:16 splitter, we can have 4 CTOs. On the other hand, in the SuperPON network, we can accommodate up to 1024 ONUs on a single fiber with a 1:8 splitter, resulting in 128 CTOs. With a 1:16 splitter, we can have 64 CTOs.

Keywords: Passive Optical Networks, PON, EPON, SuperPON, OLT, ONU.

Lista de tabelas

Tabela 1 – <i>Splitter</i> desbalanceado	30
Tabela 2 – <i>Splitter</i> balanceado.	31
Tabela 3 – Características EPON e SuperPON	36
Tabela 4 – Comparativo de preços entre equipamentos EPON e SuperPON.	37
Tabela 5 – Eventos capturados durante a simulação de uma rede EPON.	43
Tabela 6 – Tabela de eventos da ONU e OLT no processo de registro MPCP.	48

Lista de abreviaturas e siglas

PON	<i>Passive Optical Network</i>
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
CO	<i>Central Office</i>
OLT	<i>Optical Line Terminals</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
DIO	<i>Distribution Input/Output</i>
CCR	<i>Cloud Core Router</i>
RB	Routerboard
IP	<i>Internet Protocol</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
ISP	Provedores de serviço de internet

Sumário

	Lista de ilustrações	13
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	16
1.2	Problema e Pesquisa	18
1.3	Justificativa	18
1.4	Objetivos	18
1.4.1	Objetivo Geral	18
1.4.2	Objetivo Especifico	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Equipamentos	19
2.2	Redes Ópticas de Acesso	20
2.2.1	PON	20
2.2.2	Funcionamento Geral Da Rede PON	21
2.2.3	Protocolo MPCP (<i>Multi-Point Control Protocol</i>)	22
2.2.4	Visão Geral Do EPON	23
2.2.5	Visão Geral Do SuperPON	25
2.2.6	Comparação entre Redes EPON e SuperPON	26
2.2.7	<i>Splitter</i> Desbalanceado	29
2.2.8	<i>Splitter</i> Balanceado	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Simuladores	33
4	RESULTADOS	34
4.1	Cenário 1 EPON	38
4.2	Cenário 2 Super PON	40
4.3	Análise de Recepção e Perda de Pacotes em Redes EPON	42
4.4	Descrição dos Estados e Eventos	44
4.5	Descrição dos Eventos de Log	45
5	CONCLUSÃO	49
Apêndice		50
.1	Configurações da Simulação .ini da SuperPON	50
.2	Configurações da Simulação .ini da EPON	52

REFERÊNCIAS 54

Lista de ilustrações

Figura 1 – Arquitetura de uma rede PON (PINHEIRO, 2016)	21
Figura 2 – Downstream em rede EPON	23
Figura 3 – Upstream em rede EPON	23
Figura 4 – Arquitetura de rede óptica passiva Ethernet (EPON)	25
Figura 5 – Arquitetura de rede óptica SuperPON	26
Figura 6 – <i>Central Office</i> da rede EPON	27
Figura 7 – <i>Central Office</i> da rede SuperPON	28
Figura 8 – simulando uma rede EPON no omnet++	33
Figura 9 – Comparativo rede EPON e rede SuperPON	35
Figura 10 – Cenário de uma rede EPON. Fonte: Elaboração Própria.	38
Figura 11 – Cenário dos resultados da rede EPON	40
Figura 12 – Cenário de uma rede SuperPON	41
Figura 13 – Cenário dos resultados da rede super pon	42
Figura 14 – Log da simulação de uma rede EPON.	43
Figura 15 – Log da simulação de uma rede EPON.	45

1 Introdução

A seguir, serão discutidos os principais aspectos técnicos dessas soluções e sua aplicabilidade no cenário atual. Pesquisas realizadas nas últimas décadas indicam que, cada vez mais, os usuários necessitam de elevadas taxas de transmissão para serviços, que vão evoluindo com o tempo, surgindo assim novos serviços. Atualmente, a demanda por largura de banda por parte dos usuários das redes é cada vez maior devido ao surgimento de novos serviços prometidos pelas operadoras, entre os quais se destacam redes privadas virtuais, telefonia sobre IP, videoconferência, televisão de alta definição, vídeo sob demanda e jogos online (ZHANG et al., 2020)

Vários serviços tiveram um aumento significativo na demanda nos últimos tempos, como o consumo excessivo de e-commerce, IPTV, streaming de filmes e séries por assinatura. Com o avanço das tecnologias, há uma crescente demanda por maior taxa de transmissão. Atualmente, a resolução de imagem em 8K exige um meio físico adequado para transmitir essa qualidade. Além disso, os jogos online estão em constante evolução, com novos títulos e atualizações surgindo regularmente, proporcionando entretenimento contínuo aos usuários. A telefonia IP possibilita chamadas de voz pela internet com qualidade comparável às chamadas telefônicas convencionais. Após a pandemia que afetou o Brasil entre 2020 e 2022, videoconferências e outros serviços online tornaram-se ainda mais relevantes e populares. (ZHANG et al., 2020)

Durante a pandemia, o lazer online ganhou grande adesão. Quase 90% dos entrevistados assistiram a filmes ou séries online, e 86% ouviram músicas via internet. Além disso, a taxa de pessoas que pagaram por serviços de filmes e séries aumentou de 29% para 43% (MORENO, 2022).

Através da fibra óptica, que é um meio de comunicação não tão recente, foram estudados os meios de transmissão até o usuário final, conhecido como FTTH (*Fiber-to-the-Home*), onde a fibra óptica é levada diretamente ao usuário final. Com isso, a fibra deixou de ser algo restrito apenas ao backbone e passou a ser utilizada dentro das residências, graças à tecnologia PON.

A rede PON (*Passive Optical Network*) é a evolução da arquitetura de redes ponto-multiponto. Ela se destaca por não precisar de energia no meio de transmissão, sendo, portanto, definida como passiva. As tecnologias de rede PON mais conhecidas e mais usuais em projetos de tráfego de dados são a EPON e a GPON. (CAMACHO, 2020)

O principal mérito da arquitetura das redes ópticas passivas está na redução dos custos de implantação e manutenção, além da ampliação da largura de banda disponível sem a necessidade de aumento no número de componentes ópticos ativos na rede, como

lasers e amplificadores ópticos ([ATFEH, 2020](#)). As redes ópticas de acesso são fundamentais para a expansão da infra estrutura de telecomunicações, possibilitando maior velocidade e qualidade de serviço. Este trabalho tem como foco a análise comparativa entre EPON e SuperPON, duas tecnologias promissoras no contexto das redes de acesso

1.1 Motivação

A EPON (Ethernet PON), também conhecida como GEAPON (*Gigabit Ethernet PON*), utiliza fibra óptica para transmitir dados em redes ponto-multiponto, prometendo uma capacidade de banda de 1,25 Gb/s tanto no sentido descendente (do OLT para a ONU) quanto no sentido ascendente (da ONU para o OLT). Essa tecnologia usa quadros Ethernet padrão 802.3 com taxas simétricas de 1 gigabit por segundo em ambos os sentidos (FERREIRA, 2018).

Já o Super-PON é uma extensão do conceito de PON, projetada para alcançar distâncias maiores e suportar um número significativamente maior de assinantes. Com amplificação óptica, o Super-PON pode estender o alcance até 50 km e, utilizando a tecnologia DWDM, pode atender até 1024 assinantes. Totalmente passivo, o Super-PON não requer eletrônica ativa entre a central e os assinantes, prometendo vantagens como a necessidade de menos COs (*Central Offices*), resultando em menores custos de construção, menos fibras saindo de um CO e uma maior consolidação de COs. Essa tecnologia é especialmente adequada para novas infraestruturas ópticas, economizando em cabeamento e construção, além de ser uma opção viável em redes existentes, como para implantações de 5G e consolidação de COs (DESANTI et al., 2020).

O EPON é uma tecnologia de rede ponto-multiponto baseada em Ethernet, enquanto o Super-PON é uma extensão projetada para aprimorar o alcance e a escalabilidade das redes ópticas passivas. O principal objetivo deste estudo é realizar uma comparação de custos entre essas duas abordagens, mantendo um padrão de desempenho equivalente e garantindo a mesma quantidade de clientes atendidos.

Uma motivação crucial para a análise detalhada dos custos entre EPON e Super-PON reside na importância de tomar decisões estratégicas e informadas sobre investimentos em infraestrutura de rede. Ambas as tecnologias prometem benefícios significativos, como largura de banda expandida, desempenho otimizado e suporte a serviços de próxima geração. No entanto, compreender minuciosamente as diferenças de custo entre essas opções é fundamental para garantir a eficiência financeira e maximizar o retorno sobre o investimento. Ao comparar o custo entre EPON e SuperPON, é importante considerar não apenas os custos iniciais de implantação, como equipamentos e instalações, mas também os custos operacionais e de manutenção ao longo do tempo. Isso inclui custos como energia, manutenção de equipamentos, atualizações de software e treinamento de pessoal.

Além disso, a análise de custo deve levar em conta a escalabilidade de cada tecnologia. Embora o SuperPON possa prometer maior capacidade e desempenho em comparação com o EPON, pode haver diferenças de custo significativas associadas à expansão e atualização da rede para suportar o aumento da demanda por largura de banda.

Portanto, uma análise abrangente do custo entre EPON e SuperPON é essencial

para tomar decisões informadas sobre a escolha da tecnologia mais adequada às necessidades específicas de uma rede, considerando não apenas o custo inicial, mas também os custos operacionais e de manutenção a longo prazo, bem como a escalabilidade e capacidade de suporte futuro.

1.2 Problema e Pesquisa

Tendo em vista a crescente demanda por acesso à internet de alta velocidade e os avanços tecnológicos nas redes ópticas passivas, surge a necessidade de avaliar e comparar os custos associados à implementação das tecnologias EPON e SuperPON. Portanto, o problema de pesquisa deste estudo é: Qual é o custo total de propriedade (TCO) ao longo do ciclo de vida das redes ópticas passivas, considerando a implantação e operação das tecnologias EPON e SuperPON, levando em conta fatores como investimento inicial, custos operacionais, escalabilidade e desempenho?

1.3 Justificativa

Eficiência Financeira: A análise comparativa dos custos entre as tecnologias EPON e SuperPON pode constituir uma ferramenta valiosa para as organizações, auxiliando-as na identificação de oportunidades de redução de despesas e otimização de recursos. Tal abordagem reveste-se de particular relevância em contextos nos quais os recursos financeiros são escassos, demandando que as empresas maximizem o retorno sobre o investimento em infraestrutura de rede.

Competitividade no Mercado: Empresas capazes de implementar e operar redes de forma mais eficiente e econômica obtêm uma vantagem competitiva significativa. O entendimento dos custos associados às diferentes tecnologias de rede pode servir como um elemento estratégico para as empresas manterem sua competitividade, possibilitando a oferta de serviços de alta qualidade a custos mais acessíveis.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é realizar uma análise comparativa dos custos associados à implementação e operação das tecnologias EPON (*Ethernet Passive Optical Network*) e SuperPON (*Super Passive Optical Network*), visando fornecer, insights para a tomada de decisões estratégicas na escolha de tecnologias de rede óptica passiva.

1.4.2 Objetivo Específico

Analisar os custos de investimento inicial para a implantação das tecnologias EPON e SuperPON, incluindo uma simulação entre as duas tecnologias, com o simulador omnet++ junto com o framework inet. Comparar o desempenho das redes EPON e SuperPON em termos de eficiência de custos, considerando fatores como taxa de transferência de dados, latência e confiabilidade.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Equipamentos

Para compreender o funcionamento de uma rede óptica passiva (PON) e suas funcionalidades avançadas, é essencial conhecer os principais componentes que garantem a eficiência operacional da rede. Esses componentes desempenham um papel central na distribuição dos serviços de telecomunicações e na manutenção de um desempenho confiável. Além disso, diversos outros equipamentos desempenham papéis cruciais na manutenção e no desempenho de uma rede óptica de acesso, contribuindo para sua capacidade de fornecer serviços de alta velocidade e qualidade.

Os equipamentos importantes de uma rede óptica incluem: CCR (*Centralized Control and Reporting*): O CCR é utilizado em sistemas PON para controle centralizado da rede, incluindo funções como coordenação de transmissões, alocação de largura de banda e coleta de informações operacionais.

OLT (*Optical Line Terminal*): A OLT é um componente essencial em redes ópticas, sendo responsável por gerenciar e controlar a comunicação entre a rede de acesso e os terminais do cliente. Ela converte dados elétricos provenientes da rede de transporte em sinais ópticos para transmissão até as unidades do cliente (ONU/ONT).

Caixa de Emenda: A caixa de emenda é um componente essencial em redes de fibra óptica, utilizada para proteger e conectar as extremidades das fibras ópticas. Promete um ambiente seguro para emendar, conectar ou derivar cabos de fibra óptica, protegendo as emendas contra danos físicos, poeira, umidade e outras condições adversas. É crucial para a manutenção e expansão da rede óptica, permitindo acesso fácil e seguro às emendas de fibra quando necessário. Existem diferentes tipos de caixas de emenda, como caixas de emenda vertical, horizontal, subterrânea, entre outras, cada uma projetada para atender a requisitos específicos de instalação e ambiente.

Splitter: Trata-se de um dispositivo passivo utilizado em redes ópticas para dividir um sinal óptico em várias vias ou caminhos. O objetivo principal do splitter é distribuir o sinal óptico a partir de uma única fibra óptica para várias fibras ópticas, permitindo, por exemplo, que um único cabo óptico proveniente da OLT seja compartilhado por múltiplas ONUs ou ONTs em uma rede PON (*Passive Optical Network*). *Splitters* podem ter diferentes razões de divisão, como 1:2, 1:4, 1:8, etc., dependendo da aplicação e da quantidade desejada de caminhos de distribuição. ONU (*Optical Network Unit*): A ONU está localizada ao lado do cliente em redes PON e converte sinais ópticos da OLT em sinais elétricos utilizados pelos dispositivos do usuário final, gerenciando também o tráfego

e funções de controle.

ONT (*Optical Network Terminal*): Semelhante à ONU, a ONT também está ao lado do cliente, convertendo sinais ópticos para sinais elétricos. A ONT é frequentemente associada a arquiteturas mais complexas, como a GPON.

2.2 Redes Ópticas de Acesso

As redes ópticas de acesso são componentes vitais da infraestrutura de comunicação, proporcionando aos usuários finais o acesso à vasta rede óptica global por meio de redes ópticas. Essas redes podem ser classificadas em três categorias principais: de alta capacidade/transporte, metropolitana e acesso. A rede de alta capacidade/transporte opera em uma escala ampla, abrangendo níveis nacional, continental e até mesmo global. Sua capacidade de tráfego varia significativamente, alcançando desde centenas de gigabits por segundo até alguns terabits por segundo (CONECTADO; SANTARÉM-MANAUS, 2022).

Por outro lado, a rede metropolitana atua em escala regional, assemelhando-se às áreas metropolitanas das grandes cidades, com uma taxa de tráfego que varia de centenas de megabits por segundo até dezenas de gigabits por segundo (CONECTADO; SANTARÉM-MANAUS, 2022).

A rede de acesso, foco central deste estudo, proporciona aos usuários o acesso às redes ópticas globais por meio das redes metropolitanas. Operando em escala local, sua taxa de tráfego varia desde dezenas e centenas de kilobytes por segundo até dezenas de megabits por segundo (CONECTADO; SANTARÉM-MANAUS, 2022).

2.2.1 PON

Rede Óptica Passiva (PON) é uma tecnologia que vem ganhando destaque no mercado gradualmente. Vamos explorar o conceito e os principais aspectos dessa tecnologia. A Rede Óptica Passiva (PON) é um sistema de transmissão de dados que utiliza fibra óptica para conectar uma fonte central a vários pontos de acesso sem a necessidade de componentes eletrônicos ativos intermediários. A palavra “passiva” refere-se ao fato de que os dispositivos na rede não requerem energia elétrica para distribuir o sinal após ser enviado pela fibra óptica. Alguns ISPs (Provedores de Serviço de Internet) utilizam ONU (Unidade de Rede Óptica) nos postes para estabelecer a conexão com um switch, permitindo assim atingir mais clientes. No entanto, essa rede deixou de ser totalmente passiva, pois agora inclui um componente elétrico no meio. O único ponto que deve ter conexão elétrica é na Central do ISP e no cliente final, para alimentar a ONU.

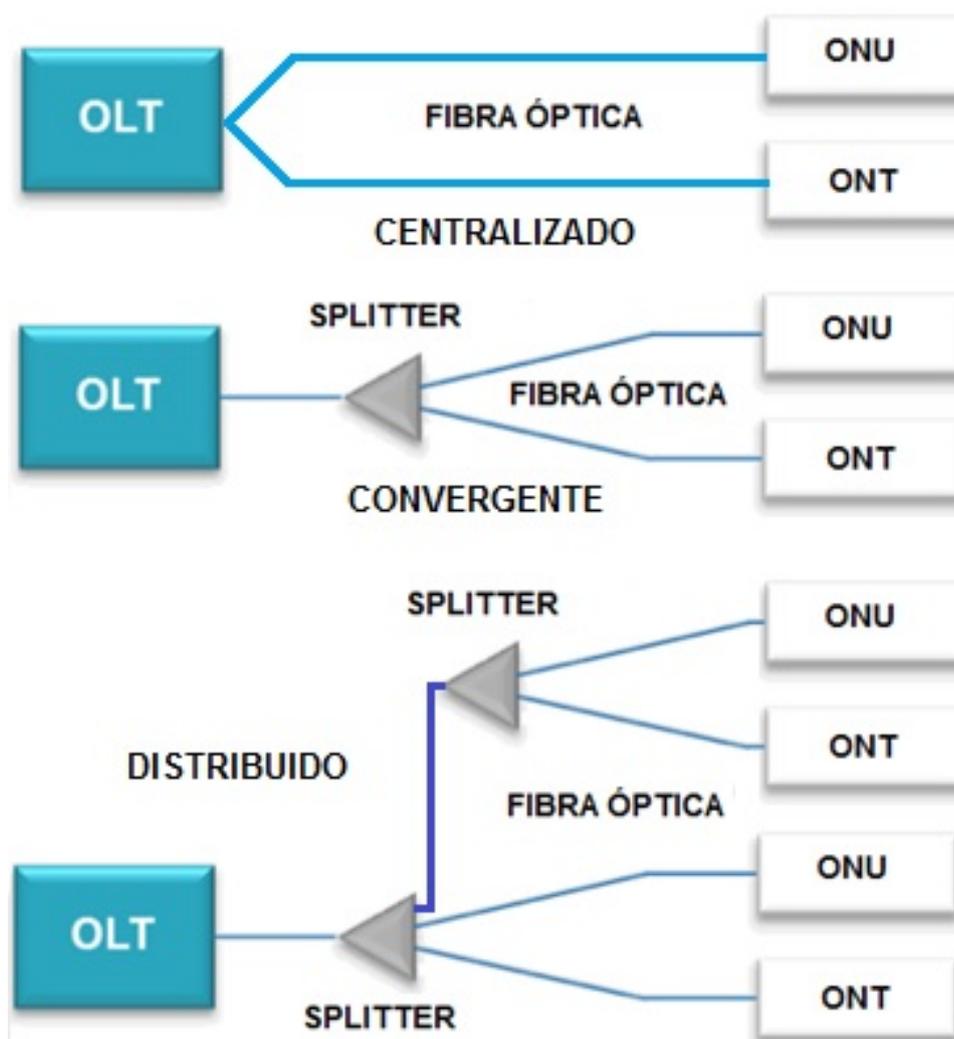


Figura 1 – Arquitetura de uma rede PON (PINHEIRO, 2016)

Conforme ilustrado na Figura 1, a arquitetura apresentada é comum a todas as tecnologias PON, como EPON, GPON, XGPON e XGSPON. Nessa arquitetura, uma OLT está conectada diretamente a uma ONU e uma ONT, em uma configuração ponto a ponto. Além disso, uma segunda OLT está conectada a um splitter, que distribui o sinal para uma ONU e uma ONT, além de conectá-lo a outro splitter, que também envia o sinal para outra ONU e ONT.

2.2.2 Funcionamento Geral Da Rede PON

A rede PON (*Passive Optical Network*) funciona de maneira a utilizar o *Optical Line Terminal* (OLT) na extremidade central da rede, responsável por enviar o sinal óptico para os usuários finais. Esses usuários estão conectados através do *Optical Network Terminal* (ONT), dispositivos localizados nos pontos de acesso, como residências ou empresas. Entre o OLT e as ONTs, um divisor óptico atua como um componente passivo, multiplicando o sinal e encaminhando-o para várias ONTs. Esse processo de divisão é unidirecional,

com as ONTs filtrando os pacotes destinados aos diversos dispositivos conectados. A criptografia é utilizada para garantir que cada ONT leia apenas os conteúdos endereçados aos dispositivos conectados a ela.

A PON promete diversas vantagens, como a economia de fibra, ao reduzir a quantidade necessária para conectar vários usuários finais. Além disso, elimina a necessidade de componentes ativos intermediários, já que não há dispositivos eletrônicos ativos entre a central e o usuário final. A PON também é eficiente na distribuição de serviços na "última milha", sendo ideal para áreas residenciais, hotéis, hospitais, entre outros.

Embora a PON tenha sido inicialmente focada na conectividade de fibra até a casa (FTTH), outros tipos de usuários de rede também estão adotando essa tecnologia para otimizar a distribuição de fibra e energia na "última milha".

A energia elétrica é necessária apenas na central do provedor de serviços de internet (ISP) e no cliente final para alimentar a ONT. A PON é uma solução eficiente para conectar usuários finais à rede de fibra óptica, eliminando a necessidade de componentes eletrônicos ativos no meio da rede.

2.2.3 Protocolo MPCP (*Multi-Point Control Protocol*)

O Protocolo MPCP (*Multi-Point Control Protocol*) desempenha um papel fundamental nas redes PON (*Passive Optical Networks*). Seu principal objetivo é gerenciar de forma eficiente o compartilhamento da largura de banda entre as ONUs (*Optical Network Units*) e o OLT (*Optical Line Terminal*), que são os principais componentes de uma rede PON. Essas redes operam no formato ponto-multiponto, em que várias ONUs compartilham o mesmo meio de transmissão até o OLT.

Em redes sem controle adequado, esse compartilhamento de canal pode resultar em colisões, afetando a eficiência e a qualidade do serviço. No entanto, o MPCP evita esses problemas ao utilizar o mecanismo de controle de acesso ao meio TDMA (*Time Division Multiple Access*), que organiza o tempo de transmissão de cada ONU, alocando janelas de tempo específicas para cada uma. Dessa forma, o MPCP assegura que as ONUs transmitam de maneira coordenada, evitando colisões e garantindo um uso otimizado da largura de banda na rede.

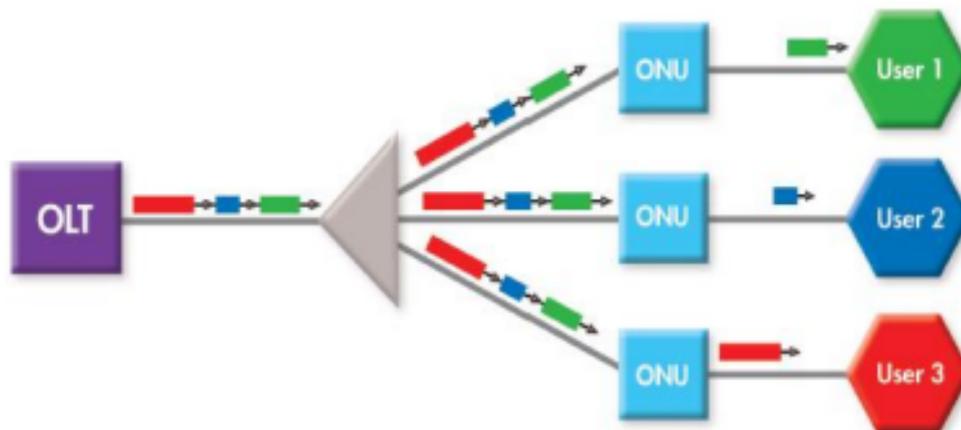


Figura 2 – Downstream em rede EPON
. (OLIVEIRA, 2017)

Na Figura 2, cada ONU descodifica os pacotes destinados a ele e descarta os que são destinados aos outros. Isto é feito através do campo LLID (Logical Link Identifier), que é utilizado para identificar cada ONT. (OLIVEIRA, 2017)

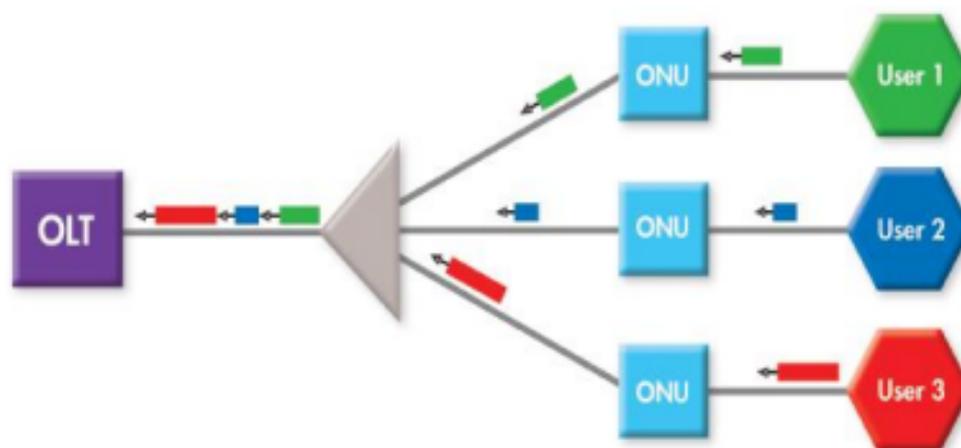


Figura 3 – Upstream em rede EPON
. (OLIVEIRA, 2017)

Na Figura 3 para não haver colisões de duas tramas que cheguem simultaneamente ao OLT usa-se o protocolo MPCP (MultiPoint Control Protocol), este faz com que cada ONU transmite durante um intervalo de tempo que são atribuídos pelo OLT. (OLIVEIRA, 2017)

2.2.4 Visão Geral Do EPON

A EPON (*Ethernet Passive Optical Network*), também conhecida como GEAPON (*Gigabit Ethernet Passive Optical Network*), foi uma das primeiras tecnologias em fibra óptica a permitir a conexão direta com a casa do assinante ou prédios. Ela promete uma

conexão rápida e uma taxa de banda expressiva, tanto para downstream quanto para upstream. Com o aumento dos serviços, como a resolução 12K, é essencial ter uma boa taxa de transmissão para obter essa qualidade. Além disso, o trabalho remoto e o ensino à distância também se tornaram cada vez mais comuns.

A EPON é uma rede óptica passiva que utiliza a arquitetura ponto-multiponto e a transmissão de fibra óptica para fornecer diversos serviços através do protocolo Ethernet. Ela combina as vantagens da tecnologia PON (*Passive Optical Network*) e da Ethernet: baixo custo, alta largura de banda, escalabilidade e facilidade de gerenciamento.

O sistema EPON é composto pelo OLT (*Optical Line Terminal*), que é o equipamento central responsável por se conectar à rede IP por meio de fibras ópticas. Além disso, inclui a ONU (*Optical Network Unit*), que fornece interfaces de fibra para os usuários e converte o sinal óptico em formatos desejados, como Ethernet, IP e telefone. O sistema também é composto pela ODN (*Optical Distribution Network*), a rede de distribuição óptica que conecta a OLT e a ONU. A EPON possibilita a integração de voz, dados, vídeo e serviços móveis, destacando-se como uma tecnologia de acesso óptico importante no campo das redes.

Outras características dessa modalidade incluem um alcance físico de até 20 km e a capacidade de splittagem de até 64 ONUs (*Optical Network Unit*) por porta PON. O sistema opera com comprimentos de onda de 1490 nm para *downstream* e 1310 nm para *upstream*, suportando serviços de internet, incluindo vídeo. Além disso, a EPON apresenta um sistema simples de gerenciamento e utiliza o serviço de OAM (Operação, Administração e Gerenciamento) definido pela Ethernet. A transmissão de dados ocorre com um cabeçalho fixo em pacotes de 1518 bytes, sendo os pacotes transmitidos no padrão Ethernet, e o tráfego é transportado em protocolo IP (SILVA; MENDES et al., 2021). Uma das tecnologias notáveis nesse contexto é a EPON, uma rede óptica passiva baseada em Ethernet que promete uma solução eficaz para a distribuição de serviços de banda larga.

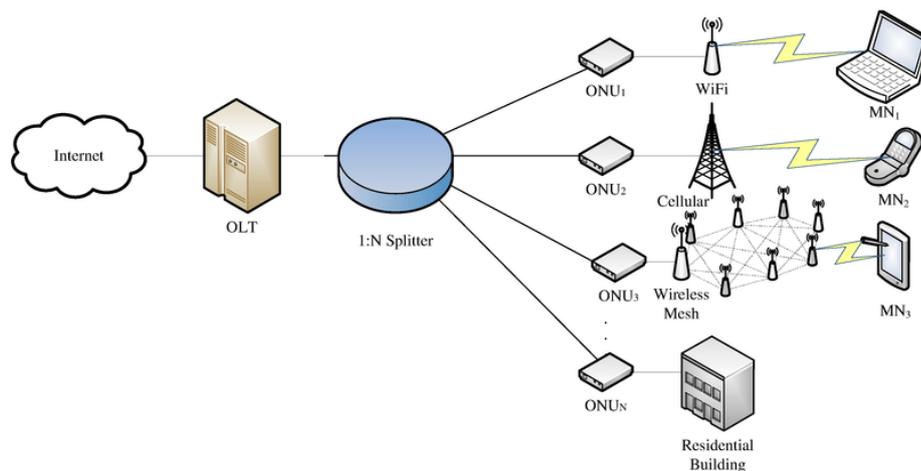


Figura 4 – Arquitetura de rede óptica passiva Ethernet (EPON)
 Fonte (CABLING, 2019)

Na Figura 4, temos a arquitetura de uma rede EPON, onde várias ONU/ONT podem ser conectadas, permitindo atender a diversos pontos utilizando um único *splitter*. Isso é possível porque essa tecnologia segue o modelo ponto-multiponto.

2.2.5 Visão Geral Do SuperPON

A SuperPON (DESANTI et al., 2020) é uma evolução significativa das redes PON tradicionais. Comumente, os provedores de serviços de internet (ISPs) optam por redes EPON ou GPON, devido à sua viabilidade e custo reduzido. Contudo, à medida que estes provedores se expandem para novas cidades, eles se deparam com as limitações inerentes às tecnologias EPON e GPON, que proporcionam um alcance limitado a 20 km. Esta limitação implica em custos adicionais, uma vez que se faz necessário estabelecer uma nova central para ampliar o acesso à rede.

Em contrapartida, a SuperPON promete um alcance superior, chegando a 50 km, o que possibilita a redução no número de centrais na rede. Esta característica resulta em uma diminuição considerável dos custos operacionais. Assim, à medida que os ISPs se expandem, a SuperPON se apresenta como uma opção cada vez mais vantajosa.

A SuperPON não só promete um alcance superior, mas também uma taxa de transmissão impressionante de 10Gbps, tanto para download quanto para upload. No entanto, o que realmente destaca a SuperPON é a sua capacidade de alcance, que permite a construção de menos COs, resultando em uma economia significativa. (ELETRONET, 2024).

As redes PON de última geração são ideais para fornecer o acesso à fibra e às taxas de dados necessárias ao fronthaul e backhaul do 5G, tornando a tecnologia um recurso preparado para o futuro. (ALBUQUERQUE, 2023)

É importante ressaltar que, apesar das vantagens, a implementação inicial da SuperPON pode ser mais custosa, devido ao valor elevado dos equipamentos, quando comparado aos da EPON e da GPON. por se tratar de uma tecnologia nova o acesso de encontrar material para ela e mas complicado e também a compatibilidade da tecnologia antiga pois se o ISp ta querendo migrar ou ver a necessidade de migrar para essa nova tecnologia ele vai esbarrar no contexto de ter que trocar as ONU/ONT do cliente o divisor óptico, dependendo do seu projeto de rede tem que ser trocado essas desvantagens faz os provedores fica com um pé atrás de migrar de tecnologia muitos o que fazem e acrescentar o custo na mensalidade do cliente final.

As tecnologias PON e última geração prometem aos provedores de serviços um caminho para redes convergentes, com múltiplos serviços coexistindo na mesma infraestrutura de rede de fibra óptica. Os operadores podem aumentar as capacidades da rede enquanto protegem receita para um processo de atualização eficiente, seguro e eficaz (IORGA et al., 2018).

A Super PON, outra tecnologia relevante, representa um avanço significativo na capacidade e eficiência das redes ópticas de acesso, prometendo benefícios consideráveis em termos de largura de banda e escalabilidade.

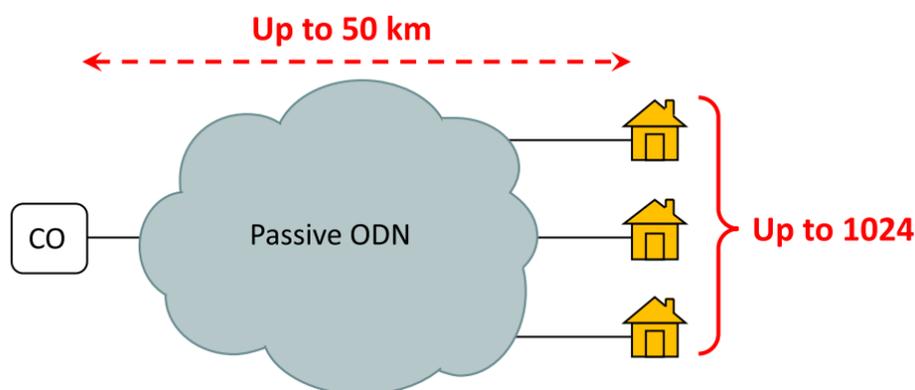


Figura 5 – Arquitetura de rede óptica SuperPON (DESANTI et al., 2020)

Conforme ilustrado na Figura 5, a conexão pode atender até 1024 assinantes em uma área de 50 km² a partir de uma *Central Office*

2.2.6 Comparação entre Redes EPON e SuperPON

Ao comparar as tecnologias EPON e SuperPON, além do custo, é importante considerar a influência das Centrais de Operação (COs). No caso da EPON, é necessário utilizar várias centrais para cobrir uma área relativamente pequena, onde cada CO é responsável por um bairro ou cidade, com um alcance de até 20 km. A cada 20 km, é

necessário instalar uma nova CO para expandir a cobertura para uma nova área, como ilustrado na imagem abaixo, criada na ferramenta Google Earth Pro.

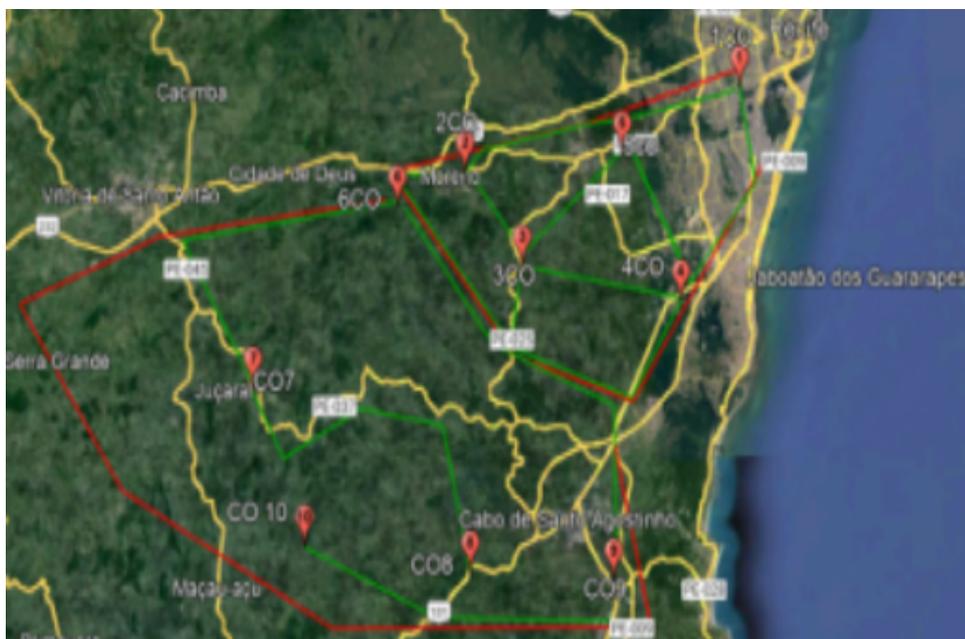


Figura 6 – *Central Office* da rede EPON
Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 6, gerada pelo *software Google Earth Pro*, é ilustrada a configuração de uma rede EPON na área de Pernambuco. A cada 20 km², é necessário adicionar uma *Central Office* (CO), totalizando assim dez COs para cobrir a região. A imagem destaca a distribuição dessas COs e como elas atendem à área específica.

Ao analisar a tecnologia SuperPON, observa-se uma diferença significativa em relação à EPON, principalmente na quantidade de Centrais de Operação (COs) necessárias. A SuperPON requer um número consideravelmente menor de COs, o que representa uma vantagem em termos de infraestrutura e custo operacional. Além da quantidade de fibras que saem das Centrais de Operação (COs), cada central é responsável por uma determinada área de 50 km².

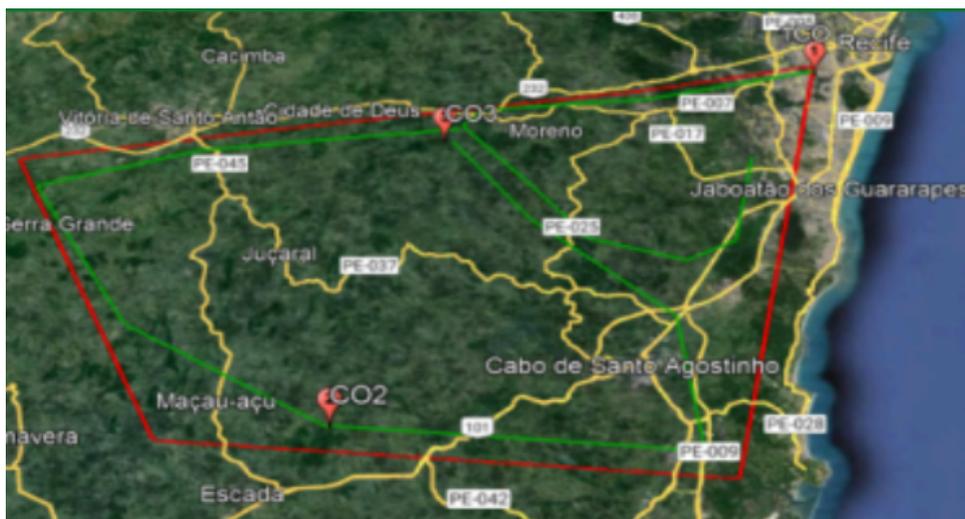


Figura 7 – *Central Office* da rede SuperPON
Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 7, este exemplo, gerado pelo *software Google Earth Pro*, ilustra a eficiência da tecnologia SuperPON em comparação com a EPON. A imagem demonstra uma rede SuperPON que foi capaz de atender a uma área específica de Pernambuco com um número menor de Centrais de Operações (COs).

Isso indica que a SuperPON pode fornecer a mesma cobertura de rede que a EPON, mas com menos COs. Isso é possível devido à maior capacidade de divisão e ao maior alcance da SuperPON. Portanto, a SuperPON pode ser uma opção mais eficiente e econômica para a implementação de redes de fibra óptica, especialmente em áreas geograficamente grandes. Isso implica que o provedor deve avaliar a área de cobertura da rede e determinar qual tipo de *splitter* é mais adequado. Além disso, o provedor deve considerar o caminho que as fibras ópticas percorrerão, tanto do assinante quanto da fibra que conecta as Caixas de Atendimento. Por exemplo, em grandes centros urbanos, onde as redes são densas e complexas, um *splitter* balanceado pode ser a melhor opção.

Este tipo de *splitter* divide o sinal de forma igual entre todas as suas saídas, o que pode ser ideal para redes com muitos usuários próximos uns dos outros. Por outro lado, em áreas rurais ou suburbanas, onde as redes são mais esparsas, um *splitter* desbalanceado pode ser mais eficaz. Este tipo de *splitter* divide o sinal de forma desigual entre suas saídas, permitindo que uma maior quantidade de sinal seja enviada para usuários que estão mais distantes do ponto de origem (INTELBRAS, 2024).

No entanto, é importante lembrar que a escolha do tipo de *splitter* também afeta o custo da rede. Um *splitter* desbalanceado pode ser mais caro do que um balanceado, mas pode prometer uma melhor relação custo-benefício em determinadas situações. Portanto, o provedor deve realizar uma análise cuidadosa para determinar qual tipo de *splitter* é o mais adequado para a sua rede.

Esta análise deve levar em conta vários fatores, incluindo o custo, a área de cobertura da rede e as necessidades específicas dos usuários. É uma decisão estratégica que pode ter um impacto significativo no desempenho e na eficiência da rede.

2.2.7 *Splitter* Desbalanceado

O *splitter* desbalanceado, também conhecido como FBT (*Fused Biconical Taper*), é um componente essencial em uma rede óptica. Sua principal função é distribuir o sinal óptico de uma única fibra para várias outras, ampliando assim a ramificação da rede PON e proporcionando maior capilaridade (ZULUAGA, 2023).

Quando se trata de qualquer tipo de projeto, é fundamental pensar na estrutura da rede desde o início até o final, para evitar a necessidade de realizar várias manobras de sinal. Por exemplo, enviar toda a potência de uma porta para um *splitter* que está a apenas alguns metros de distância e, em seguida, ter que retornar com o sinal para atender uma área que os ISPs não previram que teria assinantes pode resultar em gastos adicionais. Isso ocorre porque não houve um planejamento adequado desde o início.

Portanto, é crucial para os ISPs planejar cuidadosamente a estrutura da rede, levando em consideração todos os possíveis cenários e demandas futuras. Isso não só otimiza a eficiência da rede, mas também pode resultar em economia de custos a longo prazo. As características gerais desse modelo de *splitter* são: Baixa polarização dependente por perda, alta estabilidade e confiabilidade; vários modelos de acoplamento.

Operação de comprimento de onda (nm)	Perda de inserção	Temperatura de Operação
50/50 (Operação de comprimento de onda de 50)	$i=3,60$ (Perda de inserção quando dividido igualmente)	-40 +85°C (Faixa de temperatura na qual o dispositivo ou sistema pode operar)
40/60(Operação de comprimento de onda de 40 e 60)	$i=4,70/2,70$ (Perda de inserção a saída com 40% não excederá)	
30/70 20/80	$i=6,00/1,90$ $i=7,90/1,20$	
15/85	$i=9,60/1,00$	
10/90	$i=11,30/0,65$	
5/95 2/98	$i=14,60/0,40$ $i=18,80/0,30$	
1/99	$i=22,50/0,25$	
Polarização depende de perda (dB)	$i=0,15$ (Perda máxima de polarização permitida)	

Tabela 1 – *Splitter* desbalanceado
através desta fonte (FURUKAWA, 2021) foi elaborada a tabela.

Na tabela 1 apresenta-se um infográfico que detalha as especificações de um *Splitter* desbalanceado.

2.2.8 *Splitter Balanceado*

O *splitter* balanceado, também conhecido como PLC (*Planar Lightwave Circuit*), é um dispositivo essencial em redes ópticas. Ele divide o sinal de entrada de forma simétrica entre todas as suas saídas, garantindo que a mesma perda ocorra em todas elas. Este tipo de *splitter* é comumente utilizado quando se necessita de uma divisão maior que 2 (TANI, 2023).

Em projetos de redes ópticas, o *splitter* balanceado pode ser empregado para realizar uma divisão de potência mais adequada, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Nestes locais, a rede tende a ter mais ruas e bifurcações, e a população é geralmente maior. Com o uso de um *splitter* balanceado, é possível distribuir o sinal de forma eficiente para vários locais. Isso inclui a alimentação de Terminações de Rede Óptica do Cliente (CTOs), caixas de emenda e torres.

Dessa forma, o *splitter* balanceado permite uma distribuição de sinal mais eficiente e equilibrada, facilitando a gestão da rede e garantindo uma entrega de sinal de qualidade para todos os usuários, independentemente de sua localização na rede. Portanto, o planejamento

cuidadoso e a utilização estratégica de splitters balanceados podem ser fundamentais para o sucesso de uma rede óptica.

configuração do splitter	1X2	1X4	1X8	1X16	1X32	1X64
operação de comprimento de onda	1260 1650		1260 1650 1260 1650	1260 1650	1260 1650	1260 1650
Tipo de fibra	G.657A1	G.657A1	G.657A1	G.657A1	G.657A1	G.657A1
Perda por inserção (db)	4	7,3	10,5	13,7	16,9	21
Perda de Uniformidade (db)	0,5	0,7	0,8	1,2	1,5	2
Polarização dependente de perda (db)	0,2	0,2	0,2	0,25	0,3	0,4
Perda de retorno (db)	55	55	55	55	55	55
Diretividade (db)	55	55	55	55	55	55
Perda dependente do comprimento de onda (db)	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1
variação relativa a temperatura (-40 85°C) (db)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dimensão do módulo (mm) (CxLxA)	60x7x4	60x7x4	60x7x4	60x12x4	60x20x6	100x40x6

Tabela 2 – *Splitter* balanceado.
através desta fonte ([FURUKAWA, 2022](#)) foi elaborada a tabela.

Na tabela 2 temos as configurações dos *splitters* onde um *splitter* balanceado ele dividir igualmente o sinal óptico de uma fibra em várias saídas, mantendo a potência de cada divisão proporcional. onde uma única fibra que sai da OLT pode ser dividida entre várias ONUs. O *splitter* balanceado garante que o sinal seja distribuído de forma igual para todos os pontos de saída, permitindo que cada ONU receba uma quantidade similar de sinal óptico.

3 Metodologia

Este estudo emprega uma abordagem metodológica que inclui a análise de dois cenários específicos: EPON e Super PON. Cada cenário é cuidadosamente examinado para compreender a eficiência e o desempenho das respectivas tecnologias, proporcionando insights valiosos para a avaliação comparativa. Foram realizados estudos de diferentes simuladores para dar início ao projeto. Essa pesquisa preliminar foi essencial para adquirir um entendimento de como iniciar as simulações e identificar se já havia alguma pesquisa existente que pudesse ser utilizada como referência para assim começar o trabalho de pesquisa. Além disso, a seleção dos simuladores foi feita com base em critérios como a capacidade de simulação de redes PON, facilidade de uso, flexibilidade e desempenho.

Para realizar um comparativo entre as tecnologias EPON e SuperPON, foram conduzidas simulações utilizando diferentes simuladores de rede. A escolha desses simuladores foi baseada em sua popularidade na comunidade de pesquisa e na disponibilidade de módulos específicos para redes ópticas passivas. Inicialmente, tentou-se utilizar o (NS3,), mas surgiram diversos problemas, como dificuldades na configuração correta da quantidade de ONUs, na simulação dos pontos de acesso nas residências dos assinantes, e na conexão entre os COs. Esses desafios técnicos foram um obstáculo significativo para obter resultados precisos e confiáveis. Apesar do esforço significativo, não foi possível obter resultados satisfatórios com o Ns3.

Em seguida, optou-se pelo simulador (OMNET++...), que já inclui canais implementados de 10 Gbps, ideais para o SuperPON. No entanto, o módulo PON apresentou incompatibilidades nessa versão do OMNeT++. Diversas abordagens foram tentadas, incluindo a criação de novas VLANs para resolver os erros do módulo, mas sem sucesso. Após pesquisas adicionais, descobriu-se que os módulos PON funcionam adequadamente apenas nas versões 4.0 e 4.1 do OMNeT++. Conseqüentemente, as simulações foram realizadas na versão 4.1, onde foi possível conduzir os testes de forma eficaz. No entanto, ainda houve uma limitação: não foi possível simular a conexão entre centrais devido a falhas no simulador. Este problema destacou a importância de garantir a compatibilidade entre os módulos simulados e as versões do simulador para evitar resultados incorretos. Em um cenário real, essa conexão seria realizada de forma simples, utilizando equipamentos como uma fibra óptica conectada de uma OLT a um servidor, possibilitando a interligação entre cidades e fornecendo internet de banda larga, no caso da SuperPON, para até 1024 assinantes. A implementação prática dessas tecnologias também foi discutida, considerando os desafios técnicos e logísticos, além dos benefícios potenciais em termos de custo e desempenho.

3.1 Simuladores

A utilização de simuladores desempenha um papel crucial na avaliação e otimização de redes ópticas de acesso, permitindo análises detalhadas antes da implementação prática.

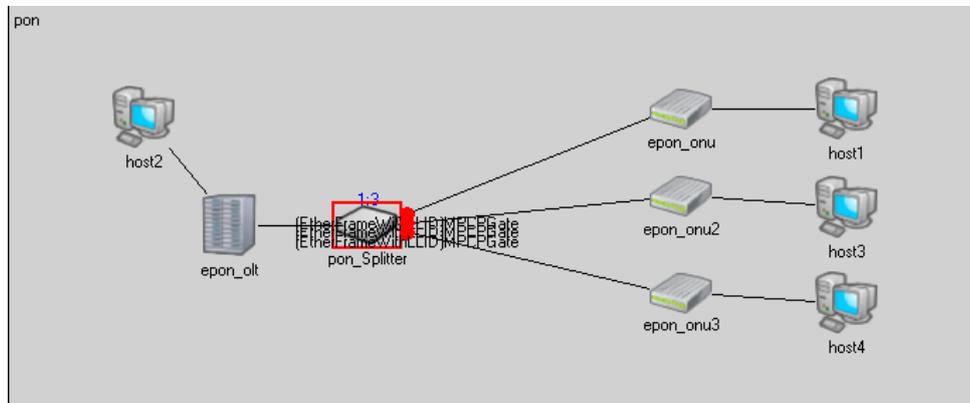


Figura 8 – simulando uma rede EPON no omnet++
fonte (OMNET++, ...)

Na Figura 8, elaborada no simulador OMNET++, é apresentada uma rede EPON onde um único *splitter* conecta três ONUs, cada uma atendendo a um assinante. Essa arquitetura ponto-multiponto maximiza a eficiência da rede, permitindo que uma única OLT atenda a múltiplos usuários através da divisão passiva do sinal óptico. A escalabilidade da rede EPON permite que, com o aumento da divisão do *splitter*, mais assinantes possam ser conectados sem a necessidade de novas fibras, otimizando o uso da infraestrutura

4 Resultados

Para obter resultados sobre as duas tecnologias abordadas, EPON (*Ethernet Passive Optical Network*) e SuperPON (*Super Passive Optical Network*), é fundamental compreender suas diferenças e características. Enquanto a EPON se destaca por sua capacidade de oferecer conectividade de alta velocidade utilizando a infraestrutura Ethernet padrão, a SuperPON apresenta avanços significativos em termos de alcance e escalabilidade, permitindo atender a um número maior de usuários com eficiência ainda maior. Ambas as tecnologias prometem melhorar a experiência de conectividade para os usuários finais, mas cada uma possui especificidades que podem torná-las mais adequadas para diferentes cenários de aplicação.

As principais vantagens da rede EPON incluem sua maior velocidade de transmissão de dados, que é simétrica, com uma taxa de transferência de 1,25 Gbps tanto no downstream quanto no upstream (FERREIRA et al., 2018). Além disso, a EPON permite enlaces com maior distância, alcançando até 20 km. Outra vantagem é a imunidade a interferências eletromagnéticas externas, isolando eletricamente os equipamentos interligados (FLORES, 2020). O menor consumo de energia nos equipamentos ativos também é uma característica importante, já que a comunicação se baseia na transmissão e recepção do sinal de luz, sem a necessidade de energia elétrica entre o OLT e a ONT/ONU (INTELBRAS, 2024). As redes EPON também se destacam pela redução de gastos com espaço e material, devido a seus recursos tecnológicos modernos, além da facilidade de instalação e gerenciamento. No entanto, a EPON apresenta desvantagens como uma banda menor e um overhead maior, o que na prática distribui menos de 1 Gbps na rede, além de ser menos robusta que a tecnologia GPON (FERREIRA et al., 2018).

A SuperPON, além de já possuir diversas das vantagens apontadas para EPON, promete vantagens como altas velocidades de transmissão de dados, a capacidade de atender a muitos usuários simultaneamente, e eficiência energética (DESANTI et al., 2020). Contudo, as desvantagens da SuperPON incluem a necessidade de equipamentos mais caros e a dificuldade de atualização ou expansão da rede (ZHANG et al., 2020). O protocolo utilizado pelo EPON é o MPCP (*Multi-Point Control Protocol*) do padrão Ethernet. Algumas características do EPON incluem a utilização do protocolo Ethernet para trafegar dados, com especificações definidas no IEEE 802.3ah. Os dados são transmitidos em pacotes de 1518 bytes, e as portas PON das OLTs EPON podem se conectar a 64 ONUs/ONTs. A velocidade de transferência na EPON é simétrica, de 1,25 Gbps, tanto no sentido de downstream quanto no upstream (SILVA et al., 2020).

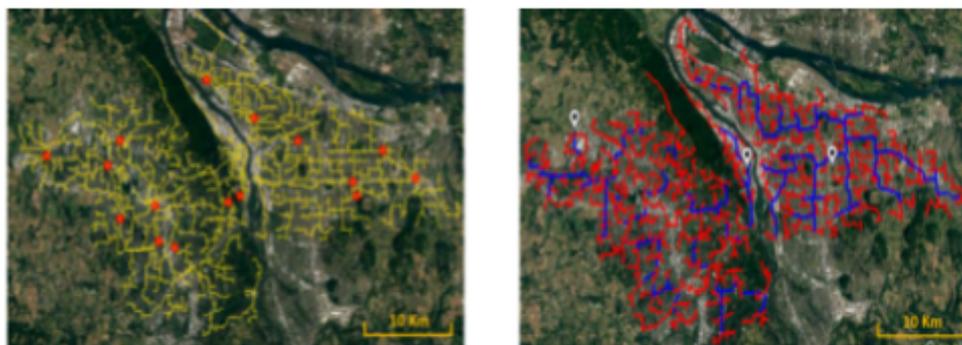


Figura 9 – Comparativo rede EPON e rede SuperPON

Fonte: (DESANTI et al., 2020)

Na Figura 9, é apresentada uma comparação entre as tecnologias EPON e SuperPON em relação à cobertura de uma mesma área. À esquerda, observamos a arquitetura da EPON, que requer 15 Centrais de Operação (COs) para atender à demanda de assinantes nessa região, utilizando exclusivamente fibra óptica. Embora esse modelo implique um investimento considerável em centrais, ele garante a cobertura total da área, com a criação de uma nova central a cada 20 km².

À direita, analisamos a mesma área, mas com a tecnologia SuperPON, que apresenta um custo significativamente menor em termos de Centrais de Operação. Nesse caso, apenas 3 COs são necessárias para atender à demanda, com a instalação de uma nova central a cada 50 km², dependendo do planejamento do projetista de rede. Essa eficiência na utilização de recursos destaca uma das principais vantagens da tecnologia SuperPON em comparação com a EPON.

Observa-se que a implementação de Centrais de Operação (CO) é significativamente maior na parte da figura representada em amarelo, que corresponde à EPON. Dessa forma, o custo de implementação de Centrais é consideravelmente menor na SuperPON, refletindo sua maior viabilidade econômica.

Característica	EPON	SuperPON
Padrões	IEEE 802.3	IEEE 802.3
Taxa de Transmissão	1 Gbps (Downstream) 1Gbps (Upstream)	10 Gbps (Downstream) 1 Gbps (Upstream)
Distância Máxima (KM)	10-20	40-60
Capacidade ONU	Até 64 ONUs por porta	Até 256 ONUs por Porta
Técnica de Modulação	TDMA	WDMA
Custo de Implementação Largura de Banda	Moderado Baixa	Elevado Alta
Latência Média (ms)	Media	Baixa
Disponibilidade de Componentes no Mercado	Comum	Limitada
Facilidade de Escalabilidade Comprimento Onda	Media 1310nm	Alta 1270nm/1577nm

Tabela 3 – Características EPON e SuperPON
tabela criada pelo autor através dessa fonte ([ADMINISTRACAO, 2023](#))

A Tabela 3 apresenta um comparativo das duas tecnologias sendo a EPON uma solução mais simples e econômica para redes de curto e médio alcance, atendendo a um número limitado de assinantes com velocidades moderada. SuperPON, por outro lado, é projetada para ser mais eficiente em termos de cobertura e número de usuários, suportando distâncias maiores com menor custo de operação a longo prazo. Essas diferenças tornam a SuperPON mais adequada para redes de grande escala e com maiores demandas de largura de banda, enquanto o EPON continua sendo uma opção viável para implementações menores e menos complexas. Observamos que é possível obter um custo menor ao utilizar a Super-PON em termos de Centrais Ópticas. Os equipamentos necessários para uma Central Óptica (CO) incluem: CCR, OLT, GBIC, DIO e Cordão Óptico. Vale ressaltar que a conexão entre centrais não ocorre diretamente de OLT para OLT, mas sim de uma OLT para um servidor de borda. Esse servidor pode ser uma CCR ou uma RB, que atua como controlador, gerenciando a divisão do link e o controle dos assinantes em uma determinada localidade. A Super-PON (Rede Óptica Passiva) é uma tecnologia que utiliza fibras ópticas para transmitir dados de uma fonte para vários pontos finais, sem a necessidade de energia intermediária. Ela é altamente escalável e promete maior largura de banda, sendo ideal para melhorar a conexão em diversos cenários.

A escolha entre EPON (*Ethernet Passive Optical Network*) e GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) depende das necessidades específicas do projeto, considerando velocidades de conexão e eficiência da taxa de tráfego. Em geral, os equipamentos de rede óptica são essenciais para construir uma infraestrutura confiável. O custo varia dependendo do tipo de rede, especificações técnicas e fornecedores. Certifique-se de escolher os equipamentos adequados com base nas necessidades da sua rede e no orçamento disponível. A Tabela 4 apresenta um comparativo de custos de equipamentos e os dados foram obtidos da plataforma Mercado Livre¹.

Equipamentos	EPON	Super-PON
CCR	R\$ 3.551,00	R\$ 7.585,00
OLT	R\$ 4.203,24	R\$ 23.889,99
GBIC	R\$ 379,00	R\$ 4.500,00
DIO	R\$ 680,00	R\$ 1.420,25
Cordão óptico	R\$ 17,70	R\$ 17,70

Tabela 4 – Comparativo de preços entre equipamentos EPON e SuperPON.

Vale ressaltar que esses valores podem variar ao longo do tempo e de acordo com a localização.

¹ Veja os anúncios em: [CCR EPON - R\\$ 3.551,00](#), [CCR SuperPON - R\\$ 7.585,00](#), [OLT EPON - R\\$ 4.203,24](#), [OLT SuperPON - R\\$ 23.889,99](#), [GBIC EPON - R\\$ 379,00](#), [GBIC SuperPON - R\\$ 1.299,00](#), [DIO EPON - R\\$ 680,00](#), [DIO superpon - R\\$ 1.420,25](#) [Cordão óptico - R\\$ 17,70](#) (Acesso em: 24 de outubro de 2024)

4.1 Cenário 1 EPON

Utilizando o simulador OMNeT++ 4.1 e o módulo EPON, é possível construir uma rede óptica que maximize a capacidade da OLT, conforme as necessidades do projeto. No nosso modelo, configuramos uma rede EPON com 8 CTOs (Caixas de Terminação Óptica), cada uma equipada com um splitter de proporção 1:16. Assim, teoricamente, cada CTO conecta-se a 16 ONUs, com cada ONU atendendo um computador, que representa um assinante. A OLT nesse cenário suporta até 256 ONUs, que é o máximo de terminais que consegue atender dentro dos limites de sua potência óptica, tornando o EPON uma solução prática para conectar áreas menores, como bairros, com uma única infraestrutura. Entretanto, quando a demanda de assinantes excede essa capacidade, provedores de internet podem complementar a rede com cabeamento de par trançado, expandindo a cobertura.

Todo o cenário foi simulado no OMNeT++ para proporcionar uma comparação detalhada entre as tecnologias EPON e SuperPON, permitindo uma análise aprofundada do desempenho, da cobertura e da eficiência de cada solução. Como parte desta pesquisa, a rede EPON foi simulada na plataforma OMNeT++ com o objetivo de avaliar a compatibilidade dos resultados obtidos em relação às expectativas do referencial teórico, viabilizando uma comparação direta com o cenário SuperPON. Essa abordagem possibilita verificar a viabilidade e as vantagens específicas de cada tecnologia na prática.

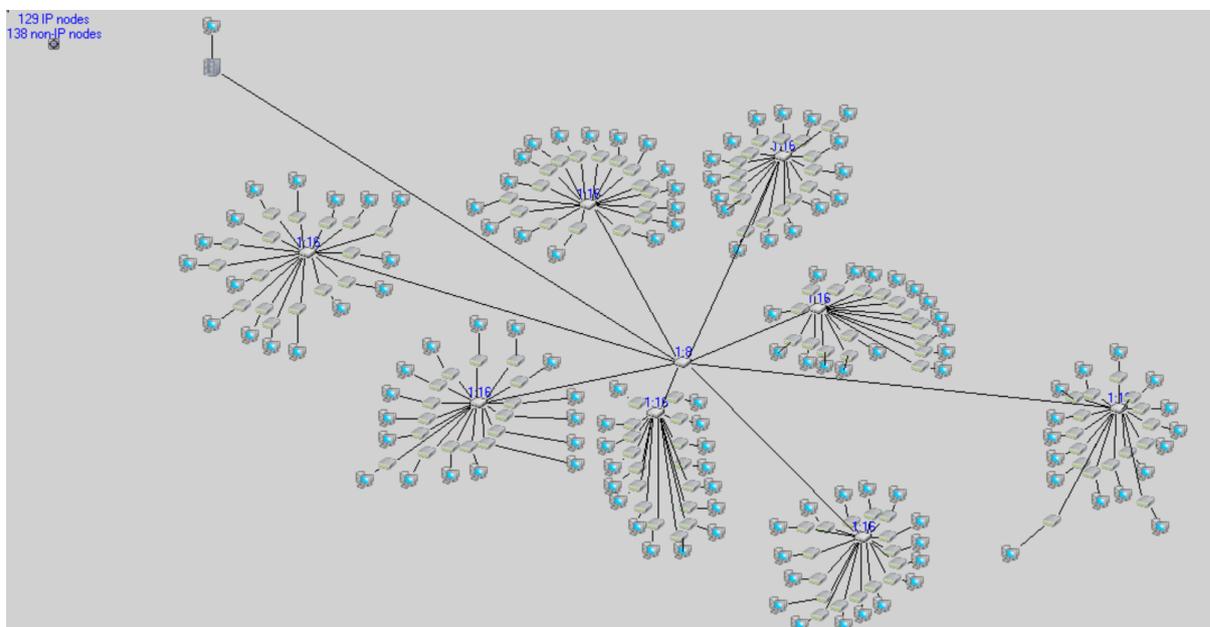


Figura 10 – Cenário de uma rede EPON. Fonte: Elaboração Própria.

A figura 10 ilustra graficamente o cenário EPON que foi montado para simulação no OMNET++.

O OLT (*Optical Line Terminal*) Está localizada no centro da imagem, ao lado esquerdo. O OLT é responsável por fazer o gerenciamento e a transmissão dos dados entre a rede central e os usuários finais. Ele distribui o sinal óptico para os *splitters*. Na figura 10, temos 8 *splitters*, representados como dispositivos intermediários que são responsáveis por dividir o sinal que chega da OLT em vários sinais menores. Como na imagem, está utilizando uma proporção de 1:16, o que significa que cada *splitter* divide o sinal em 16 saídas independentes.

ONUs (*Optical Network Units*) são conectadas às saídas dos *splitters*, as ONUs são responsáveis por converter o sinal óptico em sinal elétrico para os dispositivos dos usuários finais. Na figura 10, cada *splitter* está conectado a 16 ONUs, totalizando 128 ONUs.

Por fim, na Figura 10 há os computadores dos assinantes, em que cada ONU está conectada a um computador, representando os assinantes da rede. De cada *splitter* saem 16 sinais para 16 ONUs, sendo cada sinal destinado a uma ONU, totalizando 128 ONUs. Na imagem, isso é ilustrado por linhas que saem das ONUs e se conectam a figuras de computadores.

Em resumo, a imagem nos permite concluir que se trata de uma rede EPON bem estruturada, onde é mostrada a utilização de equipamentos de rede passiva, como *splitters* e ONUs, que permitem uma distribuição eficaz do sinal óptico que sai da OLT para múltiplos assinantes. Trata-se de uma configuração ideal para atender um bairro ou uma área com alta demanda de assinantes que necessitam de uma conexão de banda larga estável. Sendo assim, temos a quantidade máxima de uma porta ou de duas portas PON, dependendo do fabricante do OLT, pois a cada porta PON pode-se ter 64 ONUs conectadas. Há fabricantes que desenvolveram OLTs com uma porta conectando 128 ONUs, porém, isso não indica que o OLT EPON consiga ultrapassar 256 ONUs, que é o seu limite máximo.

Os resultados em termos de taxa de transferência de uma rede para outra são expressivos. Fizemos um comparativo marcando em tempo real a simulação executando durante 5 minutos.

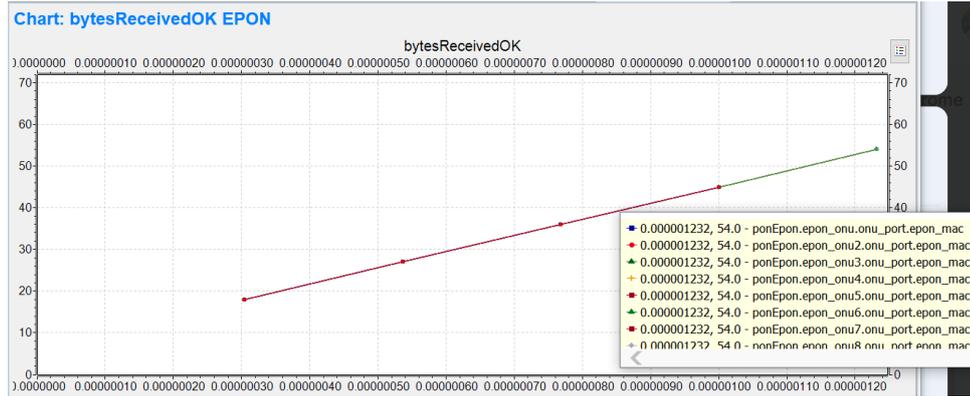


Figura 11 – Cenário dos resultados da rede EPON
Fonte Elaboração Própria.

Na Figura 11 o resultado foi um Tempo de 0,000001232 segundos (1,232 microsegundos) e Bytes Recebidos 54.0 bytes para obter o valor em taxa de transferência utilizaremos esta fórmula. (CALCULADORA..., 2024)

$$\text{Taxa de Transferência (Mbps)} = \frac{\text{Bytes Recebidos} \times 8}{\text{Tempo (s)} \times 10^6} \quad (4.1)$$

Vamos aplicar a fórmula recebidos 54 bytes em 1,232 microsegundos.

$$\text{Taxa de Transferência} = \frac{54 \times 8}{1,232 \times 10^{-6} \times 10^6} \approx 350,65 \text{ Mbps} \quad (4.2)$$

Para gerar o gráfico dos resultados, utilizei algumas funções oferecidas pelo OMNeT++, especificamente aquelas relacionadas à gravação de métricas, tanto no arquivo da OLT quanto no da ONU. Essas métricas permitiram mostrar a taxa de dados do caminho da OLT até a ONU.

4.2 Cenário 2 Super PON

Neste cenário, foi desenvolvida uma simulação de rede SuperPON utilizando o framework OMNeT++ versão 4.1. A partir da comparação entre as tecnologias, pode-se observar que a SuperPON promete um alcance significativamente maior e permite atender um número muito maior de assinantes com uma única porta. Com essa tecnologia, é possível conectar até 64 CTOs de splitters 1:16, alcançando assim 1.024 assinantes em uma única porta. A SuperPON representa uma tecnologia mais avançada. Essa tecnologia se destaca por sua eficiência na transmissão de dados em alta velocidade, garantindo alta qualidade de serviço mesmo em cenários de grande demanda. Além disso, a SuperPON é projetada para suportar as necessidades futuras das redes de telecomunicações, prometendo uma solução escalável e preparada para a evolução contínua das demandas por largura de banda. Ao comparar com outras tecnologias, a SuperPON não apenas aumenta a cobertura

e capacidade, mas também proporciona uma infraestrutura mais econômica e sustentável para provedores de serviços.

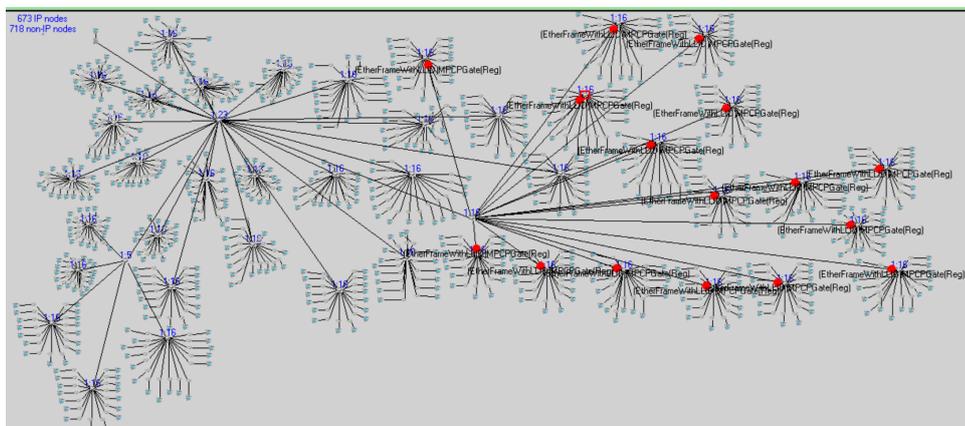


Figura 12 – Cenário de uma rede SuperPON
Fonte Elaboração Própria.

O OLT (*Optical Line Terminal*) está localizado no centro da imagem, à esquerda. Utilizamos o exemplo de uma única fibra saindo de uma porta do OLT para transmitir o sinal óptico até os *splitters*. Na Figura 12, temos um *splitter* central que representa uma caixa de emenda, de onde todos os outros *splitters* derivam. Esse é um ponto de distribuição que conduz o sinal para 23 *splitters*, cada um conectando-se a uma ONU, que por sua vez conecta-se a um assinante.

O cenário de uma rede SuperPON é mais fácil de estruturar devido à capacidade do OLT de enviar um volume considerável de sinal sem a preocupação de perda de potência que impeça a cobertura de um bairro inteiro. Na Figura 12, a fibra que sai do primeiro *splitter* conecta-se a um outro *splitter*, que por sua vez se ramifica em mais 16 *splitters*, todos com uma proporção de 1:16. Na figura 12, há uma fibra que sai da caixa de emenda para outro *splitter*, que se conecta a mais 5 *splitters*, todos com a mesma proporção de 1:16, possibilitando assim a conexão de 16 ONUs. Esse tipo de rede tem a capacidade de enviar sinais para até 1024 ONUs conectadas. Na Figura 12, são apresentadas 718 ONUs conectadas, número escolhido para melhorar a clareza e o entendimento da figura. A inclusão de todas as 1024 ONUs poderia dificultar a visualização dos detalhes importantes do cenário.

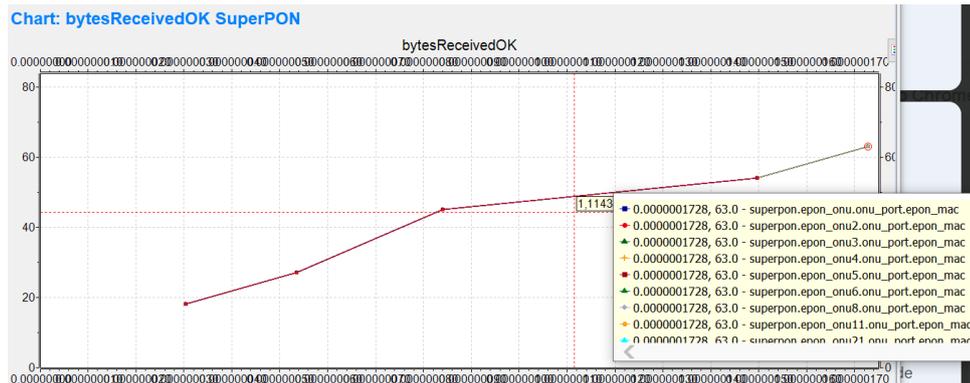


Figura 13 – Cenário dos resultados da rede super pon
Fonte Elaboração Própria.

Na figura 13, o resultado foi Tempo de 0,0000001728 segundos (172,8 nanosegundos) Bytes Recebidos: 63.0 bytes Para obter o valor em taxa de transferência, utilizaremos a mesma fórmula:

$$\text{Taxa de Transferência} = \frac{63 \times 8}{0,0000001728 \times 10^6} \approx 2,92 \text{ Gbps} \quad (4.3)$$

Os resultados das simulações mostram uma diferença significativa entre as taxas de transferência das redes EPON e SuperPON.

Taxa de Transferência EPON: Aproximadamente 350,65 Mbps.

Taxa de Transferência SuperPON: Aproximadamente 2,92 Gbps.

A rede SuperPON demonstra uma taxa de transferência superior em relação à rede EPON. Essa diferença de desempenho pode ser atribuída à tecnologia mais avançada da SuperPON, que permite maior capacidade de transmissão de dados em comparação com a EPON. A SuperPON é claramente superior em termos de taxa de transferência, o que a torna mais adequada para aplicações que exigem grandes volumes de dados e alta velocidade de comunicação. Já a EPON, embora tenha uma taxa de transferência menor, ainda pode ser uma opção viável dependendo das necessidades específicas da rede.

4.3 Análise de Recepção e Perda de Pacotes em Redes EPON

A recepção e perda de pacotes são elementos críticos para a avaliação de desempenho em redes ópticas passivas (PON), especialmente em cenários com alta demanda de tráfego. O protocolo MPCP (*Multi-Point Control Protocol*) desempenha um papel fundamental na gestão eficiente da comunicação entre a OLT (*Optical Line Terminal*) e as ONUs (*Optical Network Units*), assegurando o controle de acesso e a alocação de largura de banda de forma eficaz.

```

Scheduled after 7.096e-006ns
EndTx Scheduled after 7096000 time_now: 5251920024
Sending...
Received frame from upper layer: (EtherFrameWithLLC)req-37-7-resp-0
Control Info FDUUND
Packet (EtherFrameWithLLID)req-37-7-resp-0 arrived from higher layers, enqueueing
After enc Size 875
Orig. Size 873
Self-message (cMessage)EndIFG received
IFG elapsed, now begin transmission of frame (EtherFrameWithLLID)req-37-7-resp-0
Starting frame burst
Transmitting a copy of frame (EtherFrameWithLLID)req-37-7-resp-0
Starting transmission of (EtherFrameWithLLID)req-37-7-resp-0
Frame (EtherFrameWithLLID)req-37-7-resp-0 arrived on port portu$.
sending to clients
transmitState: TRANSMITTING_STATE, receiveState: RX_IDLE_STATE, backoffs: 0, numConcurrentTransmissions: 0, queueLength: 1
Self-message (cMessage)EndTransmission received
Transmission of (EtherFrameWithLLC)req-17-16 successfully completed
No more frames to send, transmitter set to idle
transmitState: TX_IDLE_STATE, receiveState: RX_IDLE_STATE, backoffs: 0, numConcurrentTransmissions: 0, queueLength: 0
transmitState: TX_IDLE_STATE, receiveState: RECEIVING_STATE, backoffs: 0, numConcurrentTransmissions: 1, queueLength: 0
Self-message (cMessage)EndReception received
Frame reception complete
transmitState: TX_IDLE_STATE, receiveState: RX_IDLE_STATE, backoffs: 0, numConcurrentTransmissions: 0, queueLength: 0
Frame (EtherFrameWithLLC)req-17-16 arrived on port ethIn...
Updating entry in Address Table: 0A-AA-00-00-00-03 -> port ethOut -> llid 1
Frame (EtherFrameWithLLC)req-17-16 arrived on port upperLayerIn...
ONUQPerLLIDBase: Incoming from higher layer...
Enqueue
Self-message (cMessage)EndTransmission received
Transmission of (EtherFrameWithLLID)req-37-11 successfully completed
No more frames to send, transmitter set to idle
IT HAD LLID INFO ... : 763
Frame (EtherFrameWithLLC)req-37-11 arrived on port lowerLayerIn...
OLTMacChl_NP: Message from PON area, forwarding to higher layer
Frame (EtherFrameWithLLC)req-37-11 arrived on port lowerLayerIn...
OLT_Q_mgmt_PerLLID: Incoming from lower layer
Frame (EtherFrameWithLLC)req-37-11 arrived on port toPONIn...
Updating entry in Address Table: 0A-AA-00-00-00-09 -> port toPONOut -> llid 763
transmitState: TRANSMITTING_STATE, receiveState: RECEIVING_STATE, backoffs: 0, numConcurrentTransmissions: 1, queueLength: 1
Received frame from upper layer: (EtherFrameWithLLC)req-37-11
Packet (EtherFrameWithLLC)req-37-11 arrived from higher layers, enqueueing
transmitState: TRANSMITTING_STATE, receiveState: RECEIVING_STATE, backoffs: 0, numConcurrentTransmissions: 1, queueLength: 2

```

Figura 14 – Log da simulação de uma rede EPON.

Na simulação de uma rede EPON, conforme ilustrado na Tabela 5, foram observados diversos eventos que descrevem o fluxo de pacotes e as mudanças de estado durante a transmissão e recepção. A análise dos dados coletados da simulação revela interações detalhadas entre os pacotes e a rede, destacando condições de congestionamento, perdas de pacotes e como o protocolo MPCP gerencia essas situações. ²

Evento	Descrição	P/F	ET	ER	T(bytes)	Fila	Backoffs	TC
Agendamento	Evento agendado ocorrer 7.096e-006ns	-	-	-	-	-	-	-
Início da transmissão	Pacote enfileirado para transmissão	req-37-7-resp-0	TRANSMITTING.STATE	RX_IDLE.STATE	875	1	0	0
Término da transmissão	Transmissão do pacote completada	req-17-16	TX_IDLE.STATE	RX_IDLE.STATE	-	0	0	0
Transmissão iniciada	Transmissão do pacote para os clientes	req-37-7-resp-0	TRANSMITTING.STATE	RX_IDLE.STATE	-	1	0	0
Recepção do pacote	Pacote recebido da rede	req-37-7-resp-0	TX_IDLE.STATE	RECEIVING.STATE	-	0	0	1
Fila e estados atualizados	Nenhum pacote adicional a ser transmitido	-	TX_IDLE.STATE	RX_IDLE.STATE	-	0	0	0
Recepção concluída	Recepção de um pacote completada	req-37-7-resp-0	-	RX_IDLE.STATE	-	-	-	-

Tabela 5 – Eventos capturados durante a simulação de uma rede EPON.

A Tabela 5 descreve os principais eventos ocorridos durante a simulação. A coluna “Evento” especifica as principais ações, enquanto a coluna “Descrição” explica suas implicações no estado de transmissão e recepção dos pacotes. A simulação mostra como o protocolo MPCP atua em redes com múltiplas ONUs, garantindo a coordenação da transmissão, evitando colisões e otimizando a utilização de largura de banda.

² P/F: Pacote/Frame, ET: Estado de Transmissão, ER: Estado de Recepção, T(bytes): Tamanho (bytes), Fila: Fila(Pacotes), TC: Transmissões Concorrente.

4.4 Descrição dos Estados e Eventos

- **Agendamento:**

- Evento foi agendado para ocorrer em um tempo específico (7.096e-006 ns).
- Nenhuma transmissão ou recepção envolvida neste momento.

- **Início da Transmissão:**

- Um pacote foi colocado na fila de transmissão, pronto para ser enviado.
- O transmissor entra no estado *TRANSMITTING STATE*, e o receptor permanece no estado *RX IDLE STATE*.

- **Término da Transmissão:**

- A transmissão do pacote foi completada.
- O transmissor retorna ao estado *TX IDLE STATE* e o receptor permanece ocioso (*RX IDLE STATE*).

- **Transmissão Iniciada:**

- O pacote foi iniciado para transmissão aos clientes.
- O transmissor está no estado *TRANSMITTING STATE* e o receptor está aguardando para receber o pacote (*RX IDLE STATE*).

- **Recepção do Pacote:**

- O pacote foi recebido pela rede.
- O transmissor entrou em *TX IDLE STATE*, e o receptor mudou para *RECEIVING STATE*.

- **Fila e Estados Atualizados:**

- Nenhum pacote adicional está na fila para ser transmitido.
- O transmissor e receptor estão em *TX IDLE STATE* e *RX IDLE STATE*, respectivamente.

- **Recepção Concluída:**

- A recepção do pacote foi completada.
- O receptor retorna ao estado *RX IDLE STATE*.

- ***ONUQPerLLiDBase: Type is MPCP GATE:***
 - Tipo do quadro identificado como MPCP Gate. A ONU identifica o tipo do quadro como um quadro de controle MPCP Gate, que aloca tempos de transmissão.
- ***ONUMacCtl: MPCP REGISTER GRANT (DOOUUU):***
 - Concessão de registro recebida da OLT. A ONU recebe uma concessão de registro da OLT, permitindo que se registre na rede.
- ***Sending MPCP REGREQ in 148(j312):***
 - Enviando requisição de registro MPCP. A ONU está enviando uma solicitação formal de registro para a OLT (MPCP REGREQ).
- ***Self-message (cMessage) regSendMsg received:***
 - Mensagem interna recebida para enviar registro. Uma mensagem interna da ONU foi recebida, acionando o envio do registro MPCP.
- ***Frame (MPCPRegReq) arrived on port lowerLayerIn:***
 - Quadro MPCP RegReq chegou na porta inferior. O quadro de requisição de registro chegou à OLT, onde será processado.
- ***OLTMacCtl NP: Message from PON area, forwarding to higher layer:***
 - Mensagem recebida da área PON, encaminhando para a camada superior. A OLT encaminha a mensagem recebida da PON para as camadas superiores, onde será processada.
- ***OLT Q mgmt PerLLiD: Incoming from lower layer:***
 - Mensagem recebida da camada inferior. A OLT processa a mensagem recebida da ONU na camada inferior.
- ***OLTMacCtl: MPCP Frame processing:***
 - Processamento do quadro MPCP pela OLT. A OLT começa a processar o quadro MPCP recebido da ONU.
- ***Log the LLIDs temporarily and add a TO timer:***
 - Registrando os LLIDs temporariamente e adicionando um timer. A OLT registra temporariamente os identificadores de links lógicos (LLIDs) e adiciona um temporizador.

- ***OLT Q mgmt PerLLiD: Incoming from higher layer:***
 - Mensagem recebida da camada superior. A OLT recebe uma mensagem da camada superior e a processa para transmissão à ONU.
- ***Direct tx: (MPCPRegister)MPCPRegister:***
 - Transmissão direta do quadro MPCP Register. A OLT envia diretamente o quadro de registro para a ONU.
- ***OLTMacCtl NP: Incoming to PON area:***
 - Mensagem recebida na área PON. Uma mensagem foi recebida na área de rede PON da OLT.
- ***OLTMacCtl NP::Enqueue Frame:***
 - Quadro adicionado à fila para transmissão. A OLT adiciona o quadro à fila para futura transmissão.
- ***OLTMacCtl NP::We were IDLE... starting transmission:***
 - OLT estava ociosa... iniciando transmissão. A OLT estava ociosa e agora está começando a transmissão do quadro.
- ***Bytes: 29 bits: 232 TX RATE: 1000000000:***
 - Dados transmitidos a 1 Gbps. O quadro é transmitido a uma taxa de 1 Gbps.
- ***TX State: 2:***
 - Estado de transmissão atualizado. O estado de transmissão foi atualizado.
- ***Scheduled after 2.32e-007ns:***
 - Transmissão agendada para 2.32e-007 ns. A transmissão foi agendada para ocorrer após um pequeno

Evento	Descrição
ONUMacCtl_NP: CHANGING STATE FROM _ON_ TO _OFF_	Mudança de estado da ONU de ligado para desligado.
Frame (MPCPGate) arrived on port lowerLayerIn...	Quadro MPCP Gate chegou na porta inferior.
ONUQPerLLiDBase: Incoming from lower layer...	Mensagem recebida da camada inferior.
ONUMacCtl: MPCP Frame processing	Processamento do quadro MPCP iniciado.
ONUQPerLLiDBase: Type is MPCP_GATE	Tipo do quadro identificado como MPCP Gate.
ONUMacCtl: MPCP REGISTER GRANT (DOOUUU)	Concessão de registro recebida da OLT.
Sending MPCP REGREQ in 148(<312)	Enviando requisição de registro MPCP.
Self-message (cMessage)regSendMsg received	Mensagem interna recebida para enviar registro.
Frame (MPCPRegReq)MPCPRegReq arrived on port lowerLayerIn...	Quadro MPCP RegReq chegou na porta inferior.
OLTMacCtl_NP: Message from PON area, forwarding to higher layer	Mensagem recebida da área PON, encaminhando para a camada superior.
Frame (MPCPRegReq)MPCPRegReq arrived on port lowerLayerIn...	Quadro MPCP RegReq chegou na porta inferior novamente.
OLT_Q_mgmt_PerLLiD: Incoming from lower layer	Mensagem recebida da camada inferior.
OLTMacCtl: MPCP Frame processing	Processamento do quadro MPCP pela OLT.
Log the LLIDs temporarily and add a TO timer	Registrando os LLIDs temporariamente e adicionando um timer.
OLT_Q_mgmt_PerLLiD: Incoming from higher layer...	Mensagem recebida da camada superior.
Direct tx: (MPCPRegister)MPCPRegister	Transmissão direta do quadro MPCP Register.
Frame (MPCPRegister)MPCPRegister arrived on port upperLayerIn...	Quadro MPCP Register chegou na porta superior.
OLTMacCtl_NP: Incoming to PON area...	Mensagem recebida na área PON.
OLTMacCtl_NP::Enqueue Frame	Quadro adicionado à fila para transmissão.
OLTMacCtl_NP::We were IDLE... starting transmission	OLT estava ociosa... iniciando transmissão.
Bytes: 29 bits: 232 TX RATE: 1000000000	Dados transmitidos a 1 Gbps.
TX State: 2	Estado de transmissão atualizado.
Scheduled after 2.32e-007ns	Transmissão agendada para 2.32e-007 ns.
EndTx Scheduled after 232000 time_now: 3078400	Fim da transmissão agendada.
Sending...	Enviando quadro.
Received frame from upper layer: (MPCPRegister)MPCPRegister	Quadro recebido da camada superior.
Packet (EtherFrameWithLLID)MPCPRegister arrived from higher layers, enqueueing	Pacote recebido e adicionado à fila.
After enc Size 17	Tamanho após codificação: 17.
Orig. Size 15	Tamanho original do quadro: 15.
Self-message (cMessage)regSendMsg received	Mensagem interna recebida para envio de registro.
Frame (MPCPRegReq)MPCPRegReq arrived on port lowerLayerIn...	Quadro MPCP RegReq chegou na porta inferior.
OLTMacCtl_NP: Message from PON area, forwarding to higher layer	Mensagem recebida na área PON, encaminhando para a camada superior.
Direct tx: (MPCPRegister)MPCPRegister	Transmissão direta do quadro MPCP Register.
OLTMacCtl_NP::We were IDLE... starting transmission	OLT estava ociosa... iniciando transmissão.

Tabela 6 – Tabela de eventos da ONU e OLT no processo de registro MPCP.

A Tabela 6 lista os principais eventos do protocolo MPCP capturados durante a simulação, descrevendo o processamento dos quadros MPCP e a troca de mensagens entre a OLT e as ONUs. Estes eventos são cruciais para o funcionamento eficiente da rede EPON e a correta alocação de recursos de largura de banda.

Os dados da simulação apresentados reforçam que é obtido por meio de experimentos os dados de desempenho esperados no referencial teórico. Portanto, considerando redes EPON e SuperPON projetadas para atender a mesma quantidade de clientes e com mesmo desempenho, a rede SuperPON exige um maior custo no início, mas o valor é compensado no longo prazo.

5 Conclusão

Este trabalho teve como objeto de estudo duas famílias de redes PON, a saber EPON e SuperPON. Uma das contribuições do trabalho foi fornecer a viabilidade de simular redes SuperPON no software OMNET++, pois embora estejam disponíveis comercialmente, o OMNET++ possui suporte nativo apenas para EPON. A análise comparativa realizada revelou uma série de aspectos distintos entre essas duas soluções, desde sua arquitetura até seu desempenho e aplicabilidade. O EPON demonstrou ser uma escolha sólida em termos de simplicidade, custo e compatibilidade com infraestruturas Ethernet existentes, como vimos também nas figuras, que dependendo do tamanho que o ISP vai atingir com sua rede, se torna melhor em questão de custo trabalhar com EPON. Sua arquitetura baseada em protocolos bem estabelecidos pois foi uma das primeiras a ser implantada está bem sólida no mercado, promete uma transição suave para redes ópticas de acesso, além de proporcionar uma largura de banda satisfatória para a maioria das necessidades de acesso residencial e empresarial.

Por outro lado, o SuperPON se destaca pela sua capacidade de fornecer larguras de banda ultra-altas e baixa latência, sendo especialmente adequado para cenários que exigem altas demandas de tráfego, como serviços de streaming de vídeo em 8K, realidade virtual e Internet das Coisas em larga escala. No entanto, sua implementação pode ser mais complexa e exigir investimentos significativos em infraestrutura, porém em aspecto de atingir uma área territorial maior comparado a EPON e a SuperPON o custo de construir com rede SuperPON sai mais barato pois o custo de CO vai diminuir significativamente.

É importante ressaltar que a escolha entre EPON e SuperPON depende das necessidades específicas de cada operadora de rede. Enquanto o EPON promete uma solução robusta e econômica para a maioria dos casos de uso, o SuperPON se destaca em ambientes que demandam o máximo desempenho e escalabilidade. À medida que a demanda por largura de banda continua a crescer e novas aplicações emergem, é provável que tanto o EPON quanto o SuperPON desempenhem papéis importantes na evolução das redes ópticas de acesso. Esta análise comparativa fornece uma base sólida para operadoras e fornecedores de tecnologia tomarem decisões informadas sobre a implantação de redes ópticas de acesso, levando em consideração o que é mais relevante para você provedor ou amante da tecnologia, entre custo, desempenho e complexidade.

Para trabalhos futuros, propõe-se a implementação da ligação entre duas Centrais de Operações (CO), ou seja, conectar uma OLT a uma CCR ou RouterBoard no framework OMNeT++ versão 4.1. Durante o desenvolvimento, toda a parte do simulador foi testada em versões mais recentes do OMNeT++, no entanto, o módulo específico não funcionou

corretamente nessas versões. Após várias tentativas, verificou-se que o módulo funciona perfeitamente nas versões 4.0 e 4.1 do OMNeT++.

Com o avanço contínuo da tecnologia, as versões mais atualizadas do framework já suportam conexões de 10 Gbps e até 100 Gbps, prometendo um potencial ainda maior para simulações de redes ópticas de alta velocidade. Isso abre caminho para futuras atualizações e expansões no projeto, permitindo simulações mais complexas e realistas de infraestrutura de redes, incluindo a integração com dispositivos de última geração.

Apêndice

.1 Configurações da Simulação .ini da SuperPON

A seguir estão as configurações utilizadas para a simulação da rede SuperPON no OMNeT++:

```
[General]
network = SuperPON
sim-time-limit = 10s # Tempo de simulação

[Config SuperPON]
description = "Simulação da rede SuperPON"
**.eth[*].mac.txrate = 10Gbps # Taxa de transmissão dos enlaces na SuperPON

# Configurações ARP
**.arp.retryTimeout = default
**.arp.retryCount = default
**.arp.cacheTimeout = 100s

# Configuração das ONUs e da OLT na SuperPON
SuperPON.epon_olt.olt_if.olt_Q_mgmt.regTimeInt = 5ms
SuperPON.epon_olt.olt_if.olt_Q_mgmt.slotLength = 200us
SuperPON.epon_olt.mac.txrate.scalar-recording = true
SuperPON.epon_onu.mac.txrate.scalar-recording = true
SuperPON.epon_olt.mac.txrate.vector-recording = true
SuperPON.epon_onu.mac.txrate.vector-recording = true

# Configurações do Host e Aplicações TCP
**.TCPHost*.numTcpApps = 1
**.TCPHost*.tcpAppType = "TCPSessionApp"
```

```
**TCPHost*.tcpApp*.connectAddress = "superpon.Server"
**TCPHost*.tcpApp*.connectPort = 1000
**TCPHost*.tcpApp*.tOpen = 0.3s
**TCPHost*.tcpApp*.sendBytes = 100MB
**TCPHost*.tcpApp*.tClose = 0
**TCPHost*.tcpApp*.active = default
**TCPHost*.tcpApp*.address = default
**TCPHost*.tcpApp*.port = -1
**TCPHost*.tcpApp*.tSend = 0
**TCPHost*.tcpApp*.sendScript = default

# Configurações do Servidor
**Server.numTcpApps = 1
**Server.tcpAppType = "TCPSinkApp"
**Server.tcpApp*.port = 1000

# Configuração de coleta de métricas
**scalar-recording = true
**vector-recording = true
**tcp.recordStats = true
**tcp.mss = 1024
**tcp.advertisedWindow = 14 * 1024
**mac.packetSent.vector-recording = true
**mac.packetReceived.vector-recording = true
**tcpApp*.packetSent.vector-recording = true
**tcpApp*.rcvdRate.vector-recording = true
**tcpApp*.sendRate.vector-recording = true

# Configurações IP
**ip.procDelay = 10us
**TCPHost*.IPForward = false
**Server.IPForward = false

# Configurações Ethernet
**TCPHost*.eth*.mac.address = default
**Server.eth*.mac.address = default
**epon*.mac.txrate = 10Gbps
**mac.promiscuous = true
```

```
# Configuração de fila TCP
**.tcp.sendQueueClass = default
**.tcp.receiveQueueClass = default
**.tcp.tcpAlgorithmClass = default
```

.2 Configurações da Simulação .ini da EPON

```
[General]
network = EPON
sim-time-limit = 10s # Tempo de simulação

[Config EPON]
description = "Simulação da rede EPON"
**.eth[*].mac.txrate = 1Gbps # Taxa de transmissão dos enlaces na EPON

# Configurações ARP
**.arp.retryTimeout = default
**.arp.retryCount = default
**.arp.cacheTimeout = 100s

# Configuração das ONUs e da OLT na EPON
EPON.epon_olt.olt_if.olt_Q_mgmt.regTimeInt = 5ms
EPON.epon_olt.olt_if.olt_Q_mgmt.slotLength = 200us
EPON.epon_olt.mac.txrate.scalar-recording = true
EPON.epon_onu.mac.txrate.scalar-recording = true
EPON.epon_olt.mac.txrate.vector-recording = true
EPON.epon_onu.mac.txrate.vector-recording = true

# Configurações do Host e Aplicações TCP
**.TCPHost*.numTcpApps = 1
**.TCPHost*.tcpAppType = "TCPSessionApp"
**.TCPHost*.tcpApp*.connectAddress = "EPON.Server"
**.TCPHost*.tcpApp*.connectPort = 1000
**.TCPHost*.tcpApp*.tOpen = 0.3s
**.TCPHost*.tcpApp*.sendBytes = 100MB
**.TCPHost*.tcpApp*.tClose = 0
**.TCPHost*.tcpApp*.active = default
**.TCPHost*.tcpApp*.address = default
```

```
**TCPHost*.tcpApp*.port = -1
**TCPHost*.tcpApp*.tSend = 0
**TCPHost*.tcpApp*.sendScript = default

# Configurações do Servidor
**Server.numTcpApps = 1
**Server.tcpAppType = "TCPSinkApp"
**Server.tcpApp*.port = 1000

# Configuração de coleta de métricas
**scalar-recording = true
**vector-recording = true
**tcp.recordStats = true
**tcp.mss = 1024
**tcp.advertisedWindow = 14 * 1024
**mac.packetSent.vector-recording = true
**mac.packetReceived.vector-recording = true
**tcpApp*.packetSent.vector-recording = true
**tcpApp*.rcvdRate.vector-recording = true
**tcpApp*.sendRate.vector-recording = true

# Configurações IP
**ip.procDelay = 10us
**TCPHost*.IPForward = false
**Server.IPForward = false

# Configurações Ethernet
**TCPHost*.eth*.mac.address = default
**Server.eth*.mac.address = default
**epon*.mac.txrate = 1Gbps
**mac.promiscuous = true

# Configuração de fila TCP
**tcp.sendQueueClass = default
**tcp.receiveQueueClass = default
**tcp.tcpAlgorithmClass = default
```

Referências

- ADMINISTRACAO. *Conheça a diferença entre as redes EPON, GPON, XG-PON e XSG-PON - Fibracem — FBC — fibracem.com*. 2023. <https://www.fibracem.com/conheca-a-diferenca-entre-as-redes-epon-gpon-xg-pon-e-xsg-pon/>. [Accessed 17-09-2024]. Citado na página 36.
- ALBUQUERQUE. *Como a tecnologia PON de última geração transforma ativamente as redes — infranewstelecom.com.br*. 2023. <https://www.infranewstelecom.com.br/como-a-tecnologia-pon-de-ultima-geracao-transforma-ativamente-as-redes/>. [Accessed 17-09-2024]. Citado na página 25.
- ATFEH, N. A. Diseño de enlaces de fibra óptica de larga distancia y alta capacidad. ETSIS_Telecomunicacion, 2020. Citado na página 15.
- CABLING, F. O. *What are relations between OLT, ODN, ONU and ONT? - FOC — fiber-optic-cabling.com*. 2019. <http://www.fiber-optic-cabling.com/fiber-optic/what-are-relations-between-olt-odn-onu-and-ont/>. [Accessed 17-09-2024]. Citado na página 25.
- CALCULADORA de Transferência de Dados — calculator-online.net. 2024. <https://calculator-online.net/pt/data-transfer-calculator/>. [Accessed 13-11-2024]. Citado na página 40.
- CAMACHO, D. R. d. M. *Ferramenta para análise de implementação de redes de acesso*. Tese (Doutorado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2020. Citado na página 14.
- CONECTADO, P. N.; SANTARÉM-MANAUS, R. Documento técnico rede metropolitana óptica. 2022. Citado na página 20.
- DESANTI, C. et al. Super-pon: an evolution for access networks. *Journal of optical communications and networking*, Optica Publishing Group, v. 12, n. 10, p. D66–D77, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 16, 25, 26, 34 e 35.
- ELETRONET. *Para Que Serve A Tecnologia XGPON — eletronet.com*. 2024. <https://www.eletronet.com/blog/xgpon/>. [Accessed 17-09-2024]. Citado na página 25.
- FERREIRA, A. M. Conceito de tecnologia na arquitetura ftth. 2018. Citado na página 16.
- FERREIRA, L. A. et al. Estudo de viabilidade de implantação de uma rede ftth. Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Citado na página 34.
- FLORES, J. T. Alocação de recursos de uma rede óptica passiva bs-ofdma-pon usando otimização multiobjetivo. 2020. Citado na página 34.
- FURUKAWA. *desbalanceado*. 2021. <https://www.furukawatam.com/pt-br/versao-et-pdf/splitter-optico-1xn-desbalanceado>. [Accessed 17-09-2024]. Citado na página 30.

- FURUKAWA. *balanceado*. 2022. <https://www.furukawatam.com/pt-br/versao-et-pdf/=a0A6100000blnoA>. [Accessed 17-09-2024]. Citado na página 31.
- INTELBRAS. *Splitter balanceado e desbalanceado: quando e por que utilizar* — *blog.intelbras.com.br*. 2024. <https://blog.intelbras.com.br/splitter-balanceado-e-desbalanceado-quando-e-por-que-utilizar/>. [Accessed 17-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 34.
- IORGA, M. et al. Fog computing conceptual model. Michaela Iorga, Larry Feldman, Robert Barton, Michael J. Martin, Nedim S . . . , 2018. Citado na página 26.
- MORENO. *Acesso à internet cresceu na pandemia, mas não garantiu qualidade* — *agenciabrasil.ebc.com.br*. 2022. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/pesquisa-e-inovacao/audio/2022-04/aceso-internet-cresceu-na-pandemia-mas-nao-garantiu-qualidade>. [Accessed 17-09-2024]. Citado na página 14.
- NS3. *ns-3* — *nsnam.org*. <https://www.nsnam.org/>. [Accessed 24-10-2024]. Citado na página 32.
- OLIVEIRA, A. C. M. *Redes de acesso em fibra ótica: situação atual e evolução*. Tese (Doutorado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2017. Citado na página 23.
- OMNET++ Downloads — *omnetpp.org*. <https://omnetpp.org/download/>. [Accessed 24-10-2024]. Citado na página 32.
- OMNET++ EPON Module download for Windows — *onworks.net*. <https://www.onworks.net/software/windows/app-omnet-epon-module>. [Accessed 17-09-2024]. Citado na página 33.
- PINHEIRO jose mauricio. *PON - Conheça como é estrutura dessa rede - ISPBLOG* — *ispblog.com.br*. 2016. <https://www.ispblog.com.br/2016/09/16/estrutura-pon/>. [Accessed 17-09-2024]. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 21.
- SILVA, A. C. da et al. Redes de computadores. *Revista Tecnológica da UniFatec-PR*, v. 2, n. Edição Especial, 2020. Citado na página 34.
- SILVA, A. L. O. d.; MENDES, E. d. S. et al. Redes híbridas (ópticas e sem fio): um levantamento conciso de possibilidades de arquiteturas de rede para cidades inteligentes. Instituto Federal do Amapá, 2021. Citado na página 24.
- TANI, E. *Projeto de implantação, rede GPON FTTH, em cinco setores da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023. Citado na página 30.
- ZHANG, D. et al. Progress of itu-t higher speed passive optical network (50g-pon) standardization. *Journal of Optical Communications and Networking*, IEEE, v. 12, n. 10, p. D99–D108, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 34.
- ZULUAGA, D. A. *Análisis y evaluación de modelos de despliegue de una red fttx con tecnología gpon para solución con splitter balanceado vs. solución preconectorizada con splitter desbalanceado*. Medellín-Colombia, 2023. Citado na página 29.