

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROTEÇÃO EM
REDES ÓPTICAS PASSIVAS UTILIZANDO CADEIAS DE
MARKOV E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO**

ISADORA MENDES DOS SANTOS

Belém
2015

ISADORA MENDES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROTEÇÃO EM
REDES ÓPTICAS PASSIVAS UTILIZANDO CADEIAS DE
MARKOV E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência da Computação na área de Redes de Computadores

Orientador: Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Belém
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROTEÇÃO EM
REDES ÓPTICAS PASSIVAS UTILIZANDO CADEIAS DE
MARKOV E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

AUTOR(A): ISADORA MENDES DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

APROVADA EM ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Drº João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
Orientador – PPGCC/UFPA

Prof. Dr. Diego Cardoso Lisboa
Membro Externo – PPGEE/UFPA

Prof. Dr. João Claudio Chamma Carvalho
Membro Externo – FACOMP/UFPA

VISTO:

Prof. Dr. Jefferson Magalhães de Moraes

Coordenador do PPGCC/UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela vida, pelas oportunidades, e por sempre mostrar o caminho certo a seguir.

À minha mãe e meu pai pelo apoio incondicional em todos os momentos e principalmente, por sempre acreditarem em mim e nunca me deixarem desistir.

Ao Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa pela oportunidade de ingresso, pelo incentivo, confiança e paciência em todos os momentos.

Aos amigos Fabrício de Souza Farias e André Lucas Pinho Fernandes pelo total apoio no desenvolvimento e melhorias deste trabalho.

Aos amigos do LEA pela convivência, parceria e pela amizade que permanecerá pra sempre.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho direta ou indiretamente, muitíssimo obrigada.

*“O que vale na vida não é o ponto
de partida e sim a caminhada”.*

(Cora Coralina)

Resumo

O aumento dos requisitos de demanda de tráfego em redes de acesso vem levando os clientes a exigirem serviços mais confiáveis e obrigando os operadores a investir mais em infraestrutura, visto que os custos associados a penalidade por interrupção do serviço e os custos de reparo da rede são altos e afetam sua reputação. Como as Redes Ópticas Passivas (PON) são uma boa tecnologia para suprir a demanda de tráfego, surgem as estratégias de proteção em PON para minimizar o problema de confiabilidade da rede, mas seus custos também devem ser levados em consideração. Este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade econômica das estratégias de proteção de PONs através de uma análise dos custos de implantação (CAPEX) e custos de operação (OPEX). A área de implantação da rede é definido por um modelo geométrico, e um modelo de custo de Markov solucionado através de Simulação de Monte Carlo é utilizado para calcular os custos associados a falha de maneira mais precisa, considerando o comportamento da rede. Resultados apontam o melhor esquema de proteção em termos de custo de implantação, redução de custos operacionais, e retorno do investimento.

Palavras Chave: PON, Proteção, Markov, Monte Carlo, CAPEX, OPEX.

Abstract

The increase in traffic demand requirements has led customers to demand more reliable services forcing operators to invest more in infrastructure since the costs associated with service interruption penalties and network repair costs are high and affect its reputation. As Passive Optical Networks (PON) is a good technology to supply the traffic demand, the PON Protection strategies are emerging to minimize the reliability problem, but their costs should also be taken into account. This study aims to determine the economic viability of PONs protection strategies through a CAPEX Analysis (Implementation costs) and OPEX (operating costs). The network deployment area is defined by a geometrical model and a Markov cost model solved through Monte Carlo simulation is used to calculate the failure associated costs with more accurately considering the behavior of the network. Results show the best protection scheme in terms of deployment cost, reduce operating costs, and cost savings.

Keywords: PON, Proteção, Markov, Monte Carlo, CAPEX, OPEX

Sumário

1. Introdução	10
1.1. Trabalhos Relacionados	12
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Geral	17
1.2.2. Específicos	17
1.3. Metodologia	18
1.4. Estrutura do Trabalho	18
2. Estratégias de Proteção em PON	20
2.1. Evolução da PON	20
2.2. Topologias	22
2.3. Arquiteturas de PON	24
2.4. Arquiteturas de Proteção em PON	25
2.4.1. Tipos de comutação de proteção	26
3. Modelagem Geométrica para Definição do Cenário	28
3.1. Modelo 1: Comprimento de Rua Simplificado	29
3.2. Modelo 2: Comprimento de Rua	30
3.3. Modelo 3: Comprimento Duplo de Rua	31
3.4. Modelagem Geométrica Adaptada para PON	32
4. Cadeias de Markov	38
4.1. Cadeia de Markov de tempo discreto (DTMC)	38
4.2. Cadeias de Markov de Tempo Contínuo	39
4.3. Modelos de Recompensa Markovianos (MRM)	40
4.4. Cadeia de Markov Monte Carlo	40
4.5. Modelos de Custo de Markov para Análise do OPEX	40
4.5.1. Total Cost of Ownership (TCO)	45
5. Estudo de Caso	47
6. Resultados	49
7.1. CAPEX	50
3.2. OPEX	51
3.3. Análise de Sensibilidade	54
7. Conclusão	57
Referências	59

Lista de Siglas

100G-EPON – 100 Gigabyte Passive Optical Network
APON – Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network
ATM - Asynchronous Transfer Mode
ATM-TDM - Asynchronous Transfer Mode – Time Division Multiplexing
BPON – Broadband Passive Optical Network
CAPEX – Capital Expenditures
CO – Central Office
CTMC – Continuous Time Markov Chain
DBA – Dynamic bandwidth allocation Protocol
DSL – Digital Subscriber Line
DTMC – Discrete Time Markov Chain
EPON – Ethernet Passive Optical Network
FIWI – Fiber Wireless
FSAN - *Full Service Access Network*
FTTB – Fiber-to-the-Building
FTTC – Fiber-to-the-Curb
FTTH – Fiber-to-the-Home
FTTN – Fiber-To-The-Node
FTTO – Fiber-To-The-Office
FTTP – Fiber-To-The-Premises
FTTU – Fiber-To-The-User
FTTX – Fiber-to-the-X
GEM – GPON Encapsulation Mode
GPON – Gigabyte Passive Optical Network
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP – Internet Protocol
ITU-T - ITU Telecommunication Standardization Sector
MCMC – Markov Chain Monte Carlo
MRM – Markov Reward Model
NG-PON – Next Generation – Passive Optical Network
NTT - Nippon Telegraph and Telephone
ODN – Optical Distribution Network

OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OLT – Optical Line Terminal

ONU – Optical Network Unit

ONU-MPP – Optical Network Unit – Mesh Point Portal

OPEX – Operational Expenditures

PMP – Point- Multipoint

PON – Passive Optical Network

RN – Remote Node

SLA – Service Level Agreement

SR – Splitting Ratio

TCO – Total Cost of Ownership

TDM-PON – Time Division Multiplexing – Passive Optical Network

TWDM-PON – Time Division Wavelength Multiplexing Passive Optical Network

WDM – Wavelength Division Multiplexing

Lista de Figuras

Figura 1 - Rede Óptica Passiva (PON)	10
Figura 2 - Esquemas de Proteção Utilizados [10]	16
Figura 3 - Evolução da Padronização de PONs [19]	21
Figura 4 - Topologia em anel	22
Figura 5 - Topologia em árvore	23
Figura 6 - Topologia em barramento	23
Figura 7 - Arquiteturas de Redes PON	25
Figura 8 - Esquema de Proteção Tipo A	26
Figura 9 - Esquema de Proteção Tipo B	26
Figura 10 - Esquema de Proteção Tipo C	27
Figura 11 - Esquema de Proteção Tipo D	27
Figura 12 - Modelo Geométrico de Manhattan	28
Figura 13 - Comprimento de Rua Simplificado	29
Figura 14 - Comprimento de Rua	30
Figura 15 - Comprimento Duplo de Rua	31
Figura 16 - Modelo Geométrico Utilizado no Estudo de Caso	33
Figura 17 - Representação do Modelo Geométrico em Dois Níveis	33
Figura 18 - Esquema de Proteção no Nível de Alimentação	34
Figura 19 - Esquema de Proteção no Nível de Distribuição	34
Figura 20 - Faixa e Localização de Equipamentos	37
Figura 21 - Representação do Vetor de Clientes Atendidos por um equipamento	37
Figura 22 - Exemplos de uma Cadeia de Markov considerando três equipamentos (a) Cadeia de Markov com equipamentos 1, 2 e 3. (b) Cadeia de Markov considerando que o equipamento 1 falhe e seja reparado logo após a falha. (c) Cadeia de Markov considerando que os equipamentos 1 e 3 falhem.	44
Figura 23 - Arquiteturas de Rede Utilizadas	47
Figura 24 - CAPEX (50% Comercial - 50% Residencial)	51
Figura 25 - OPEX (80% Comercial - 20% Residencial)	52
Figura 26 - OPEX (20% Comercial - 80% Residencial)	53
Figura 27 - OPEX (50% Comercial - 50% Residencial)	53
Figura 28 - Análise de Sensibilidade variando o custo de trenching para cenários densos	55
Figura 29 - Análise de Sensibilidade variando o custo de penalidade	56

Lista de Tabelas

TABELA I - Parâmetros do Cenário	48
TABELA II - Parâmetros Utilizados para Calcular CAPEX e OPEX	49

1. Introdução

Nos dias atuais a entrega de conteúdo a qualquer hora, em qualquer lugar tem aumentado rapidamente a demanda de tráfego banda larga por serviços e usuários, o que tem feito os provedores e operadoras se preocuparem cada vez mais com o desenvolvimento de redes de acesso banda larga que possam suprir essa demanda.

As redes de acesso baseadas em fibra se mostram uma boa alternativa para suportar a alta demanda de tráfego esperada para os próximos anos, dentre estas as redes ópticas passivas (PON) fornecem elevada largura de banda a relativos baixo custo de implantação e baixo consumo de energia.

Redes Ópticas Passivas são uma infraestrutura convergente capaz de transportar vários serviços de voz, dados e vídeo encapsulados em um único pacote através da fibra óptica. Elas são compostas por três partes definidas a seguir e ilustradas na Figura 1:

- Terminal de Linha Óptica (OLT): localizado no centro de serviço do escritório central (CO). Ele fornece a interface entre a PON e o *backbone* da rede.
- Unidade de rede óptica (ONU): localizada perto de usuários finais. Fornece a interface de serviço para os usuários finais.
- Rede de Distribuição Óptica (ODN): A ODN em PON liga o OLT e as ONUs perto de casas de usuário utilizando fibras ópticas e divisores.

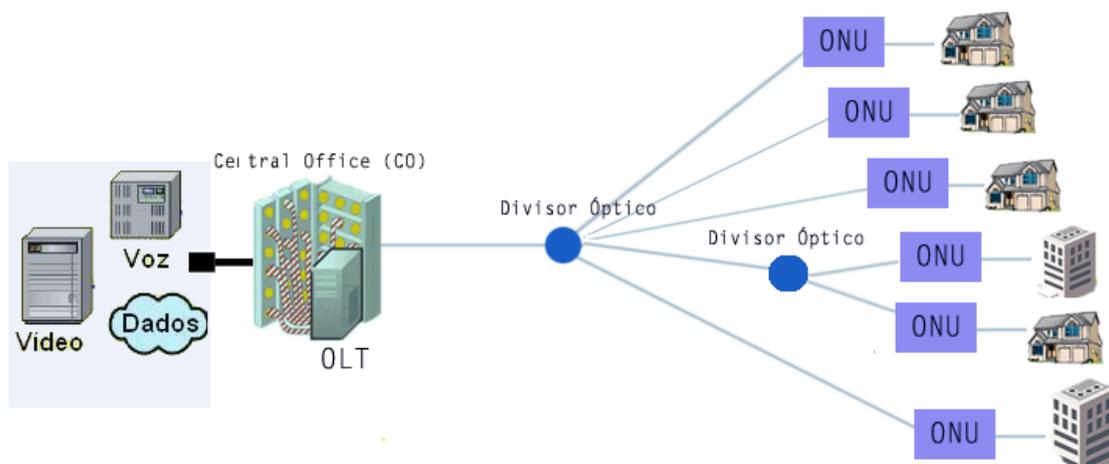


Figura 1 - Rede Óptica Passiva (PON)

As formas de aplicação são bastante variadas, por exemplo, [1], [2] propuseram a utilização de PONs como *backhaul* de tráfego de telefonia móvel, enquanto que [3] propôs a utilização de PONs para fornecimento de banda larga fixa.

Entretanto, maior largura de banda não é a única exigência dos usuários. Com o constante surgimento de serviços interativos, os usuários esperam que as redes de acesso sejam altamente confiáveis, e com isso, a importância dos Acordos de Nível de Serviço (SLAs) também está aumentando na parte de acesso da rede já que os usuários exigem um nível garantido de disponibilidade do serviço contratado.

Logo, as operadoras vêm lidando com um novo perfil de usuários: os usuários comerciais, que vem se tornando cada vez mais exigentes e mais caros em termos de penalidades por interrupção de serviço. Porém, usuários residenciais também esperam um serviço de alta disponibilidade e alta largura de banda.

Devido a isso, aumentar a confiabilidade e disponibilidade de PONs tem sido uma preocupação nos últimos anos. Enquanto a disponibilidade está mais para a perspectiva do usuário, os operadores estão mais preocupados com o número de usuários afetados por falhas, já que grandes interrupções do serviço representam uma grande perda para as operadoras, não só economicamente, mas também em sua reputação.

A disponibilidade da rede também é fortemente afetada pelo *layout* da rede. A área física onde as PONs são implantadas, e o fato de que PONs são implantados compartilhando infraestrutura, como abertura de valas (*trenches*) e pontos de distribuição também influenciam diretamente no custo de implantação. Obviamente, a adição de serviços e sistemas redundantes melhora muito a confiabilidade da rede. Entretanto como os custos são compartilhados com um número limitado de usuários, os custos de implantação (CAPEX) e manutenção (OPEX) da rede devem ser levados em consideração, para isso deve-se avaliar o Custo Total por Assinante (TCO) que é uma ferramenta que sistematicamente é responsável por todos os custos relacionados com uma decisão de investimento de tecnologia da informação. Os modelos TCO foram inicialmente desenvolvidos pela Gartner Research Corporation em 1997 e são agora amplamente aceitos. Simplificando, o TCO inclui todos os custos, diretos e indiretos, incorridos durante todo o ciclo de vida de um sistema, incluindo a aquisição e contratos públicos, operações e manutenção, e gestão de fim de vida.

Portanto, encontrar uma forma custo-eficiente de fornecer confiabilidade da rede através de estratégias de proteção de PONs com o objetivo de reduzir as falhas e perdas de receitas indesejadas se tornaram objeto de muitos estudos.

1.1. Trabalhos Relacionados

Atualmente diversos autores dedicam esforços na realização da tarefa de modelar PONs e suas estruturas de proteção. Esta seção apresenta os principais trabalhos desenvolvidos nos últimos anos.

O estudo de [4] desenvolveu um modelo de custo baseado em cadeias de Markov. Este modelo utilizou como ferramenta auxiliar um modelo geométrico para descrever a área em análise. Neste trabalho, foram avaliados o custo de reparo e o custo de penalidade esperados, os quais representaram o OPEX relacionado da PONs. Para isso, o trabalho compara dois esquemas de proteção para PONs, um proposto na literatura, que protege a fibra de alimentação duplicando-a, e outro proposto pelos autores, que protege tanto o nível de alimentação quanto o nível de distribuição da rede.

Os resultados mostram que os custos de penalidade são a maior parte do OPEX, aumentando em cenários esparsos e quando usuários comerciais são considerados. Os autores afirmam que para reduzir o OPEX torna-se necessário a utilização da proteção no nível de alimentação e que a proteção no nível de distribuição se faz necessária caso haja usuários comerciais, pois em áreas apenas residenciais, este tipo de proteção só reduziria custos de OPEX em cenários densos, e ainda assim, menos que a redução de custo gerada pela proteção no nível de alimentação.

O trabalho calcula o OPEX expressando o custo esperado por falha, no entanto, o estudo do OPEX ao longo de um período de tempo incluindo o tempo médio entre as falhas não foi abordado. Outra questão que o trabalho deixa em aberto é sobre o emprego de grandes áreas de distribuição da rede nos projetos de PON, a qual os autores assumem que precisam de uma investigação mais detalhada para determinar um padrão de projeto mais adequado. Da mesma forma, o estudo do impacto causado pelo CAPEX também não foi levado em consideração neste trabalho.

Em [5] os autores deram continuidade ao trabalho supracitado desenvolvendo uma análise de custo mais aprofundada levando em conta o CAPEX e o OPEX relacionado à confiabilidade de redes PON. Além disso, o efeito das decisões de projeto, compartilhamento de infraestrutura e o *layout* físico da rede foram incorporados à análise.

O estudo avaliou cinco arquiteturas de redes: sem proteção, com proteção no *Optical Line Terminal* (OLT), com proteção na fibra de alimentação, com proteção na fibra de alimentação e no OLT, com proteção nas fibras de alimentação e distribuição e,

por fim, com proteção nas fibras de alimentação e distribuição e no OLT. A análise considera cenários esparsos e densos, com a presença e ausência de usuários comerciais e variando a área de distribuição da rede, bem como a quantidade de equipes de reparo. Os resultados apontaram que a estratégia com melhor custo-benefício é proteger as fibras de alimentação e o OLT.

Quanto ao *layout* da rede, observou-se que uma distribuição maior da área da rede leva a um CAPEX baixo, porém um OPEX relacionado à falha mais alto. Em cenários com usuários comerciais ou cenários esparsos, o trabalho aponta que áreas de distribuição menores levam a *layouts* mais atrativos em termos de custo-benefício. Em relação à quantidade de equipes de reparo, o aumento na quantidade reduz custos em cenários esparsos, mas para cenários densos uma equipe é suficiente para lidar com a maioria das situações de falhas.

O artigo ainda propôs e analisou um novo esquema de proteção para os equipamentos do OLT que promete ser barato e eficiente. Entretanto, o estudo não apresenta uma análise de sensibilidade dos resultados, bem como não inclui o custo de consumo de energia em sua análise de OPEX. Além disso, em seu modelo de custo de Markov, os autores não incluíram custos associados às transições de estados.

O trabalho de [6] objetiva avaliar o custo de proteção em redes de acesso em termos de equipamento, infraestrutura, reparo de falhas e custos de penalidade por interrupção da conexão. O estudo compara o impacto da proteção no custo e disponibilidade para diferentes esquemas de proteção, e propõe e avalia um *design* de fibra que fornece proteção custo-eficiente para PON. Os resultados mostram um aumento significativo da disponibilidade da conexão com um pequeno aumento nos custos de infraestrutura. Eles apontam também que o custo total pode ser reduzido com a diminuição do OPEX relacionado ao gerenciamento de falhas.

Em [7] foram propostos quatro esquemas de proteção para melhorar a confiabilidade de duas tecnologias da Próxima Geração de PON (NG-PON2): Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM) e Multiplexação por Divisão de Tempo e Comprimento de Onda (TWDM-PON). Os esquemas de proteção variam entre nenhuma proteção até proteção total para usuários comerciais, e proteção no OLT e Fibra de Alimentação para usuários residenciais. O trabalho propôs também uma métrica de avaliação de confiabilidade, chamada de impacto de falha. Os esquemas propostos foram analisados considerando a cobertura da proteção, disponibilidade, impacto de falha e custo, em diferentes cenários de densidade populacional. Os

resultados mostraram que a indisponibilidade, o impacto de falha e o custo total por assinante reduz significativamente com os esquemas de proteção. Obviamente, o custo é influenciado pela penalidade paga pela perda de serviço a usuários comerciais, no entanto, até para um custo de penalidade mais baixo, as arquiteturas confiáveis são obrigatórias para um custo de implantação eficaz. Embora, a indisponibilidade da WDM e TWDM-PON sejam quase iguais, os autores perceberam que o impacto de falha para TDWM-PON devido à maior agregação de clientes.

Em [8] o foco é a proteção da fibra óptica, já que comparado aos outros componentes da rede, esta possui a maior taxa de falha e consequentemente as falhas de fibra, na maioria por quebra, são dominantes. O trabalho propõe um projeto de *layout* confiável de fibra para PONs em que um anel de alimentação fechado é construído a partir de um anel sem proteção adicionando um novo duto entre os dois *Remote Nodes* (RNs) mais distantes do *Central Office* (CO) e conectando uma fibra de proteção na direção oposta da fibra de trabalho existente. Devido à alta taxa de compartilhamento dos caminhos, tanto de trabalho quanto de proteção, o esquema proposto oferece proteção com menor custo de investimento. O trabalho considerou cinco cenários diferentes, associados a diferentes tipos de distribuição populacional e analisou o CAPEX, OPEX relacionado à falha e custo total. Resultados mostraram que o esquema proposto é uma forma custo-eficiente de fornecer proteção em redes de acesso aumentando a disponibilidade da rede com um aumento muito pequeno nas despesas de infraestrutura. Dessa forma, o trabalho mostra que o custo total por assinante pode ser efetivamente reduzido devido à economia nos custos de penalidade por indisponibilidade de conexão.

O trabalho de [9] se concentra na análise de sobrevivência das redes de acesso NG-PONs e *Fiber Wireless* (FiWi) e verifica as vantagens em melhorar algumas *Optical Network Units* (ONUs) com equipamentos *wireless* a fim de melhorar a sobrevivência da rede. O artigo possui três contribuições principais: avaliar a sobrevivência de redes *FiWi* e NG-PONs através de uma análise probabilística levando em conta proteção óptica e sem fio; propor e avaliar diferentes esquemas de seleção de ONUs para melhorar a sobrevivência de NG-PONs através de proteção *wireless* e proteção óptica parcial; e por fim, estudar, numericamente, o impacto de diferentes topologias de rede na sobrevivência de redes NG-PON e *FiWi* para uma ampla gama de cenários de falhas nos links de fibra. Os resultados alcançados indicam que, para um determinado número de ONUs, configurações de NG-PONs com maior taxa de divisão

podem alcançar um nível maior de sobrevivência em termos de conexões livres de falhas em ONUs. Além disso, verificou-se que a escolha do método de seleção tem um impacto significativo sobre a capacidade de sobrevivência das redes de NG-PONs e *FiWi*. No exemplo da topologia de cubo NG-PON, usando o método de seleção de ONU mais fraco, o número de conexões sem falhas entre ONUs é maximizada melhorando apenas 25% das ONUs com equipamentos wireless. Por fim, os autores observaram que a proteção óptica parcial, em combinação com redes *mesh*, é, um meio eficiente em termos de custo-benefício para melhorar a capacidade de sobrevivência das redes NG-PONs e *FiWi* consideravelmente, especialmente para um número baixo a moderado de *ONU-Mesh Point Portals* (ONU-MPPs). Vale ressaltar que este estudo se concentrou em analisar o impacto de falhas de link e nó na conectividade de redes de acesso *FiWi* e NG-PONs.

O artigo [10] propôs e avaliou um novo esquema de proteção para o TDM-PON que pode ser compatível com a migração para o híbrido WDM/TDM-PON. Os autores analisaram o custo, disponibilidade de conexão, tempo de recuperação e de potência óptica para três esquemas de proteção apresentados na literatura, ou seja, esquema A e B de proteção para TDM-PON, que duplica todas as fibras e *splitters* e são compatíveis com a migração TDM /WDM-PON, esquema C de proteção para redes WDM-PON proposto por [11] e o esquema proposto no trabalho, compatível com a migração WDM/TDM-PON. A Figura 2 ilustra os esquemas citados. Com base nos resultados, o estudo concluiu que o esquema proposto pode oferecer um desempenho muito bom e um custo muito menor do que os já existentes. Logo, o trabalho atesta que o esquema proposto é muito promissor para as futuras soluções de acesso devido a minimizar o custo para proteção de rede, mantendo um nível aceitável de desempenho.

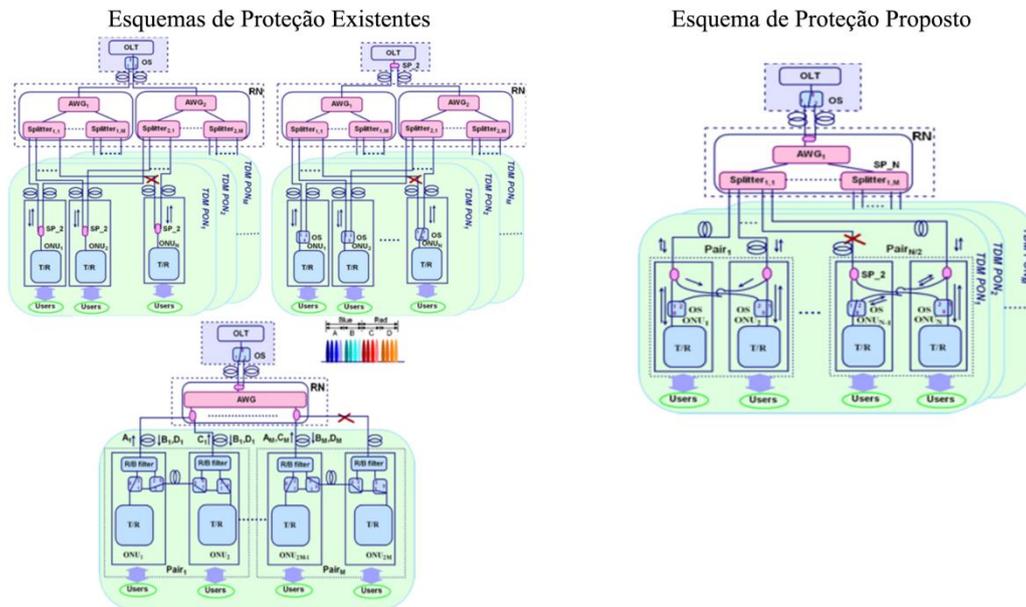


Figura 2 - Esquemas de Proteção Utilizados [10]

Seguindo a linha de estratégias de migração, o trabalho [12] foca em comparar as estratégias de migração do *Gigabit PON* (GPON) para NG-PON1 e do GPON para NG-PON2 em termos de CAPEX. O estudo é dirigido à empresa Telco na Malásia. Outro objetivo do trabalho é prever o cenário de migração com melhor custo-benefício considerando a taxa de ocupação e utilização de largura de banda. O trabalho coletou e analisou dados de custo de implantação para cada arquitetura PON. Os resultados apontaram que a migração de GPON para o NG-PON1 tem menor CAPEX que a migração para NG-PON2, entretanto NG-PON2 ainda é considerada uma alternativa, devido possuir maior largura de banda. Este trabalho aborda um tema muito atual que é a migração para as chamadas redes da próxima geração, com uma largura de banda maior que as redes PON, porém o trabalho se restringe apenas à região da Malásia.

Em [13] foi proposto um método de proteção do OLT N:1 para WDM/TDM-PONs usando a capacidade de sintonia dos comprimentos de onda das ONUs, em que estas são associadas a outra porta OLT ativa através do Protocolo de Controle Multiponto (MPCP) normal sem um procedimento de descoberta em seus comprimentos de onda reserva pré-atribuídos. O método proposto garante o menor tempo de interrupção do serviço, já que as ONUs começam a receber quadros de controle normais em alguns ciclos de alocação dinâmica de banda larga (DBA). Além disso, este método mantém um curto tempo de interrupção do serviço mesmo quando a taxa de divisão do *splitter* é maior, já que o MPCP não induz colisões entre os sinais ópticos em rajada, independentemente do número de ONUs e não requer que as ONUs

repetam o procedimento de proteção. Com base nos sistemas de 40Gbits/s testados, os autores confirmam que o método proposto alcançou tempos de proteção inferiores a 40ms em todas as 50 tentativas mesmo com o tempo de sintonia do comprimento de onda de 30ms, o que garante um tempo de interrupção do serviço menor que 50ms, que foi assegurado até para sistemas com taxa de divisão do *splitter* de até 512.

Os trabalhos relacionados apresentados focaram principalmente em propor métodos de proteção de PONs, para reduzir o tempo de interrupção do serviço, ou que sejam compatíveis com migração de tecnologias. No entanto, a maioria dos trabalhos não realizou uma análise completa do Custo Total por Assinante (TCO), alguns porque não avaliam em conjunto CAPEX e OPEX, tornando os resultados menos precisos. Diante disso, o presente trabalho tem como contribuição uma avaliação completa do Custo Total por Assinante (TCO) em estruturas de proteção baseadas em PON através de utilização de um modelo baseado em Cadeias de Markov Monte Carlo, que proporciona uma análise mais precisa considerando o comportamento da rede, a fim de encontrar a topologia de proteção com maior custo-benefício. Além disso, este trabalho fornece uma análise de sensibilidade dos resultados para comprová-los.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a topologia de PON mais custo-eficiente em termos de custos e confiabilidade da rede.

1.2.2. Específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, pode-se citar:

- Comparar três diferentes topologias de PON: Sem Proteção, com Proteção na Fibra de Alimentação e com Proteção na Fibra de Alimentação e Distribuição.
- Realizar a avaliação considerando múltiplos cenários, variando a densidade populacional, o perfil de usuários e a taxa de divisão do *splitter*. Mais detalhes no capítulo 5.
- Fornecer uma avaliação completa do Custo Total por Assinante (TCO) em estruturas de proteção baseadas em PON através de utilização de um modelo baseado em Cadeias de Markov Monte Carlo.

- Encontrar a topologia de proteção com maior custo-benefício.
- Fornecer uma análise de sensibilidade dos resultados para comprová-los.

1.3. Metodologia

O presente trabalho utilizou um modelo geométrico para definir o cenário e a topologia da rede. Para isso, foi utilizado o modelo Manhattan que é amplamente utilizado para calcular o comprimento de fibra. Dentre os modelos propostos em [14] foi utilizado o modelo de Comprimento de Rua. Mais detalhes no capítulo 4. Assumiu-se que todas as ruas são conectadas por um divisor de rua, que é um ponto ortogonal em cruz que conecta duas ruas, e a topologia é composta por assinantes representados por ONUs e a distância entre dois assinantes adjacentes.

O segundo passo foi definir os custos associados a falhas através de uma cadeia de Markov de tempo contínuo e espaço de estados finitos. Nesta cadeia, cada estado é definido em função do tipo e número de equipamentos falhos, sua distância até o CO e o número de assinantes afetados por essa falha. Além disso, as taxas de falha de um estado se dão pelas taxas de falha dos equipamentos, e a taxa de reparo do estado é calculada pelo inverso da soma total entre o tempo de viagem até o equipamento e o tempo médio de reparo. Mais detalhes podem ser obtidos na seção 4.5.

Utilizando Simulação de Monte Carlo com o método *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC) adaptou-se o modelo apresentado em [15] para simular a topologia em um período de tempo T , como apresentado com mais detalhes na seção 4.4.

O próximo passo foi obter o Custo Total por Assinante (TCO) que é a soma das Despesas de Capital (CAPEX) e as despesas Operacionais (OPEX) e por fim, foi realizada a análise dos resultados obtidos a fim de verificar qual topologia apresenta melhor custo-benefício para o objetivo proposto.

1.4. Estrutura do Trabalho

O presente estudo encontra-se estruturado em 7 capítulos, a seguir.

O capítulo 1 apresenta o contexto em que o trabalho foi desenvolvido, enfatizando a motivação, objetivo e metodologia utilizada.

O capítulo 2 aborda as características de redes PON, apresentando um breve histórico, suas topologias, e arquiteturas de proteção.

O capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho, relacionando os modelos geométricos de Manhattan, e o modelo adaptado para PON.

O capítulo 4 contém uma abordagem dos conceitos sobre Cadeias de Markov, modelos de custos de Markov adotados e Cadeias de Markov Monte Carlo.

O capítulo 5 detalha o cenário adotado para as análises, com suas características e parâmetros adotados.

O capítulo 6 discute os resultados obtidos através do estudo.

Por fim, o capítulo 7 ressalta os principais objetivos alcançados por este trabalho e as conclusões do estudo.

2. Estratégias de Proteção em PON

2.1 Evolução da PON

Estudos iniciais desta tecnologia datam de meados dos anos 90 com a criação do grupo *Full Service Access Network* (FSAN, um Comitê Internacional constituído pelas operadoras europeias *British Telecom*, *Deutsche Telekom*, *NTT* e *France Telecom*, e que hoje conta com mais de 20 operadoras) [16]. Dentre os principais objetivos das pesquisas desenvolvidas para PONs destaca-se a definição de arquiteturas de rede de acesso que visam fornecer um espectro completo de serviços de banda larga e banda estreita de telecomunicações [17].

A primeira especificação de PON definida pelo FSAN através da Recomendação ITU-T G.983.1 foi o APON ou ATM-PON, visto que o *Asynchronous Transfer Mode* (ATM) suportava simultaneamente a transmissão de voz, dados e vídeo. Como o nome APON levava os usuários a acreditarem que somente serviços baseados em ATM eram suportados, a terminologia foi alterada para *Broadband PON* (BPON), que ficou sendo padronizada pela série G.983 da ITU.

Paralelamente, no Japão, foi realizado um forte investimento no sentido de modernizar as redes de telecomunicações, mas optando por uma tecnologia diferente, padronizada pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) – a *Ethernet Passive Optical Network* (EPON). Esta utiliza protocolos *Ethernet* e *Internet Protocol* (IP), ao invés de ATM e possui taxas de transmissão simétricas [18].

A partir disso, as redes BPON passaram por muitas adaptações e melhorias padronizadas pela ITU ao longo dos anos, como a inserção do protocolo de alocação dinâmica de banda (DBA) na recomendação ITU G.983.4 e os mecanismos de proteção de rede especificados na recomendação ITU G.983.5.

Buscando um aperfeiçoamento da rede PON e o aumento das taxas de transmissão foi padronizado pela ITU série G.984 a rede *Gigabit Passive Optical Network* (GPON). Ela permite transportar ATM para voz, Ethernet para dados e encapsulamento proprietário (GEM) [18] para vídeo, permitindo assim uma rede com capacidade de serviço completo de suporte, incluindo voz, multiplexação por divisão de tempo (TDM), Ethernet, ATM e extensão sem fio. GPON suporta também rádio frequência (RF) de transmissão de vídeo na faixa de onda de 1550 a 1560nm [19].

Como se observa na Figura 3, a rede PON passou por uma constante evolução para acompanhar o crescente aumento das necessidades. Outras tecnologias foram sendo constantemente desenvolvidas como as redes de próxima geração (NG-PON), que foram divididas em duas fases: NG-PON1 e NG-PON2.

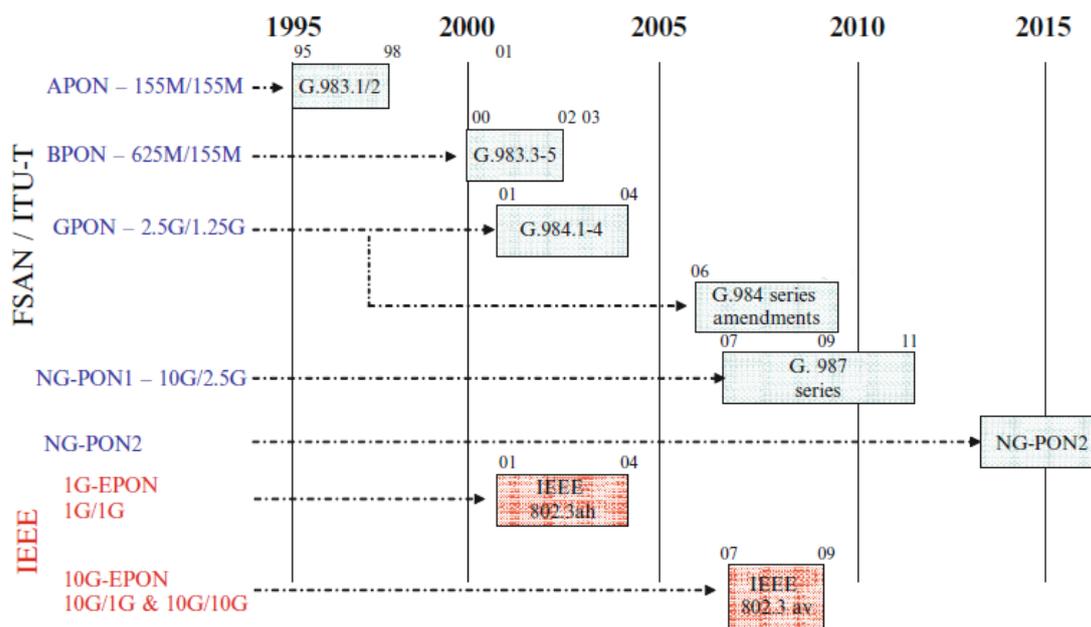


Figura 3 - Evolução da Padronização de PONs [19]

NG-PON1 são tecnologias PON compatíveis com as normas GPON, retrocompatíveis com instalações de fibra existentes, grande taxa de divisão dos *splitters*, e longo alcance da rede. Já o NG-PON2 tem o objetivo de fornecer um sistema de PON independente, sem ser limitado pelas normas GPON e para alcançar os 40Gb/s esperados para NG-PON2 há várias tecnologias que podem ser adotadas.

Em termos de multiplexação de dados as redes PON se dividem em três tipos principais: Multiplexação por divisão de Tempo (TDM), na qual o tráfego de/para as ONUs são multiplexados no tempo em um comprimento de onda no sentido *downstream* e *upstream*; Multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) e Multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) são os outros tipos. WDM utiliza múltiplos comprimentos de onda para fornecer largura de banda às ONUs enquanto OFDM utiliza subportadoras ortogonais no tráfego de/para ONUs.

Os sistemas supracitados como APON, BPON, EPON e GPON são sistemas baseados em TDM-PON, enquanto WDM-PON e OFDM-PON são consideradas tecnologias do futuro, pois são potencialmente capazes de fornecer taxas de dados acima de 40Gb/s e até Tb/s[19].

Quando a demanda é maior que a capacidade da fibra existente, acredita-se que WDM seja a melhor alternativa [20]. Mas, para NG-PON2 acredita-se que a melhor solução seja Multiplexação por divisão de tempo e comprimento de onda (TWDM) que é um híbrido dos convencionais TDM e WDM [21].

O TWDM-PON oferece quatro ou mais comprimentos de onda por fibra, cada um dos quais é capaz de proporcionar taxas de bits simétricos ou assimétricos de 10G ou 2.5G.[22]

Historicamente, o termo PON foi introduzido para descrever uma infraestrutura de fibra ponto-multiponto composta exclusivamente de elementos passivos. Entretanto, como foram introduzidos novos tipos de sistemas baseados em PON, alavancando diversos mecanismos de transporte TDM (BPON, GPON, EPON) ou métodos alternativos (WDM-PON), tornou-se comum o uso da palavra PON em referência às variações de arquiteturas [23].

2.2 Topologias

Existem várias topologias de redes de acesso como anel, estrela, árvore, malha, entre outras. Como elas são muito flexíveis, o uso de elementos passivos como acopladores e *splitters* faz com que PONs possam ser facilmente implantadas em qualquer uma destas topologias. Dentre as diversas existentes, serão apresentadas neste trabalho as topologias de anel, árvore e barramento.

Topologia de Rede em Anel: A topologia de rede em anel consiste em duas ONUs conectadas a uma OLT criando dois segmentos de PON. A partir dessas, outras ONUs são conectadas em série e as últimas ONUs se conectam fechando um anel óptico, de acordo com a Figura 4. Esta topologia fornece uma redundância de tráfego, o que permite, por exemplo, indicar a direção mais rápida e proteger a rede redirecionando o tráfego.

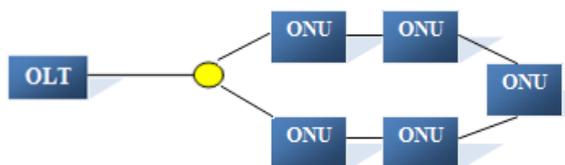


Figura 4 - Topologia em anel

Topologia em Árvore: Em uma topologia em árvore as ONUs são conectadas a uma OLT por um único segmento de fibra ligado ao *splitter* óptico, que deve ter um fator de derivação de pelo menos 1:2 até 1:N, como mostra a Figura 5. A utilização de *splitters* facilita a comunicação, por exemplo, quando as ONUs encontram-se distantes da OLT sem ONUs intermediárias.

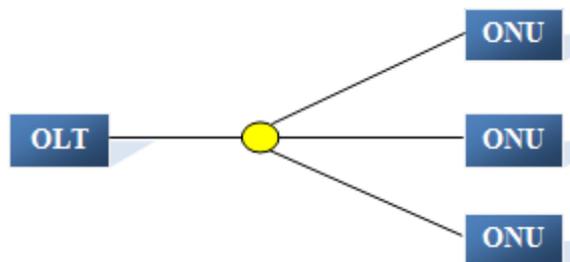


Figura 5 - Topologia em árvore

Topologia em Barramento: Na topologia em barramento um segmento de fibra de alimentação se conecta a vários *splitters* 1:2, dos quais uma porta se conecta a uma ONU e na outra porta se conecta a fibra até o próximo *splitter*, como mostra a Figura 6. Esta topologia é mais comumente usada em aplicações de *Fiber-to-the-Curb*, que será abordado com mais detalhes na seção 2.3.

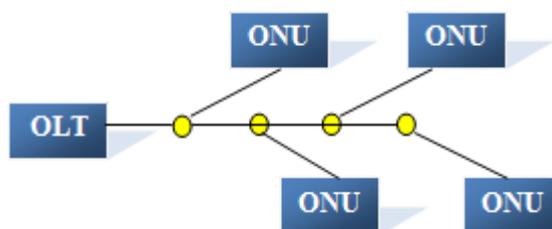


Figura 6 - Topologia em barramento

Normalmente, projetos de redes PON aplicam topologias mistas, ou seja, várias topologias em paralelo de acordo com a estratégia de implantação para garantir flexibilidade e escalabilidade da rede.

2.3. Arquiteturas de PON

Atualmente, há várias aplicações para PONs e, portanto muitas arquiteturas vem sendo desenvolvidas. Essa variedade de arquiteturas é representada genericamente como *Fiber-to-the-X* (FTTx), em que *X* representa o ponto onde termina o *link* de fibra óptica para atender o usuário.

Atualmente, são usadas diversas siglas para definir essas arquiteturas, mas algumas mais utilizadas na literatura são *Fiber-to-the-building* (FTTB), *Fiber-to-the-Curb* (FTTC) e *Fiber-to-the-Home* (FTTH), conforme Figura 7 [24]:

- FTTB, *Fiber-to-the-Building*, caracterizada pela chegada da fibra até um prédio comercial ou residencial, de onde a rede pode ser distribuída ao usuário, dentro do prédio, através de outras tecnologias de acesso, como por exemplo, cobre através do *Digital Subscriber Line* (DSL) ou microondas através de antenas denominadas de *small cells*.
- FTTC, *Fiber-to-the-Curb*, se refere à rede partindo do CO e chegando a um *switch* de comunicação localizado na rua respeitando uma distância máxima de cerca de 300 metros de uma casa ou prédio. Deste ponto até o usuário são usados cabos de par trançado, ou outros meios de transmissão. Uma arquitetura similar a esta é a *Fiber to the Cabinet* (FTTCab). Alguns estudos as diferem como sendo FTTC até um ponto no quarteirão do usuário, e FTTCab até um armário de distribuição localizado na calçada ou no poste de energia e telefonia.[25]
- FTTH, *Fiber-to-the-Home*, se refere à implantação da fibra óptica do CO diretamente até a casa do usuário. Esta arquitetura é a que a fibra óptica chega realmente mais próxima ao usuário.

Outras terminações são utilizadas para representar as mesmas arquiteturas, ou arquiteturas bem semelhantes, como é o caso de *Fiber-to-the-Node* (FTTN) que também se assemelha a FTTC, pois a fibra chega a um nó remoto na rua, porém a área de abrangência é um pouco maior [18]. Da mesma forma, há a sigla *Fiber-to-the-Office* (FTTO), análoga a FTTB.

Algumas empresas também preferem adotar uma sigla própria para seus produtos e serviços, como é o caso da sigla *Fiber-to-the-User* (FTTU) adotada pela Alcatel para descrever suas aplicações de FTTH e FTTB e até o termo genérico FTTx inclusive, também é representado na literatura por *Fiber-to-the-Premises* (FTTP) que engloba os diversos conceitos de FTTx [17].

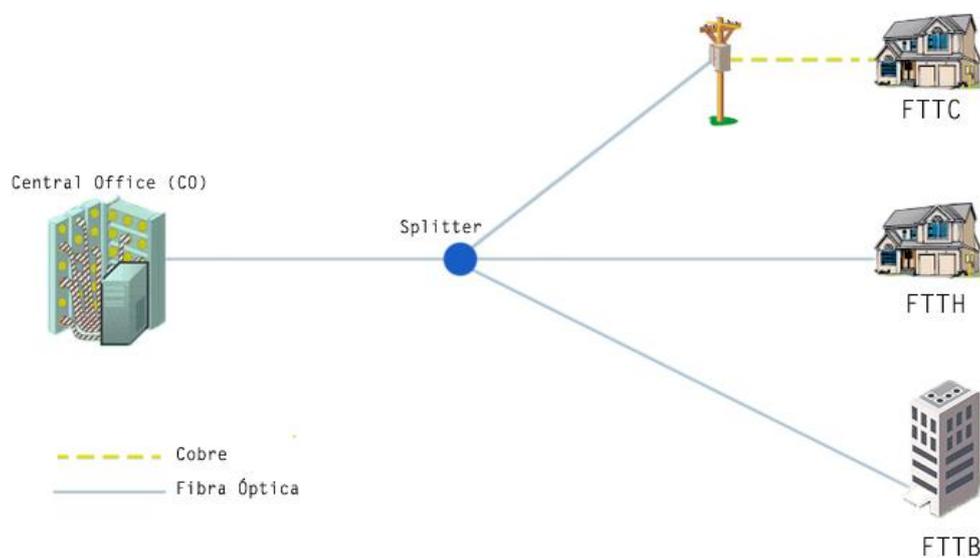


Figura 7 - Arquiteturas de Redes PON

2.4. Arquiteturas de Proteção em PON

Em proteção em PON, também denominado de gerenciamento de falhas de redes ópticas, existem duas abordagens comuns para assegurar a sobrevivência da rede, a proteção pré-planejada e a restauração dinâmica. A primeira incorpora caminhos de proteção durante a fase de planejamento da rede, sendo assim quando qualquer falha na rede é detectada, ocorre uma comutação automática para o caminho de proteção designado, o que faz com que o restabelecimento da rede seja muito rápido. Ao contrário desta, a segunda procura caminhos alternativos ou recursos de rede para restaurar o tráfego somente após a ocorrência da falha, o que torna o tempo de restabelecimento da rede mais longo haja vista que o tráfego precisa ser realocado dinamicamente. [26]

Com a necessidade de rápida restauração nas redes, normalmente se utiliza sistemas de proteção pré-planejados.

2.4.1. Tipos de comutação de proteção

Atualmente podemos encontrar dois tipos de comutação de proteção que são chamadas de comutação automática e forçada. A primeira é desencadeada pela detecção de falhas, tais como a perda de sinal, perda de quadro, degradação do sinal, entre outros. A segunda é ativada por eventos administrativos, tais como substituição da fibra, reencaminhamento da fibra, entre outros. Ambos os tipos devem ser possíveis no sistema PON, se necessário, mesmo que sejam funções opcionais.

A recomendação ITU-T Rec. G.983.1 especifica quatro tipos de proteção que serão descritas a seguir.

- **Tipo A:** Conforme ilustrado na Figura 8, esta configuração duplica somente as fibras ópticas mantendo apenas um OLT e uma ONU. A perda de sinal no período de comutação é inevitável, entretanto todas as conexões entre o terminal e nó de serviço devem ser asseguradas após a comutação da fibra.

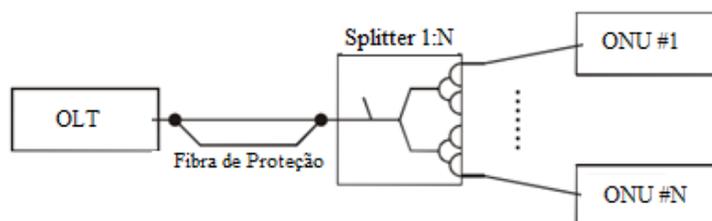


Figura 8 - Esquema de Proteção Tipo A

- **Tipo B:** Neste, os OLTs em conjunto com as fibras ópticas instaladas entre os OLTs e *splitters* são duplicados. A Figura 9 ilustra que o *splitter* tem duas portas de entrada/saída no lado do OLT. Esta configuração reduz custos de duplicação da fibra, mas apenas o lado do OLT fica protegido. Ela requer recuperação gradual do circuito reserva, e assim como no **Tipo A** também há perda de sinal no período de comutação, mas após isso todas as conexões são restabelecidas.

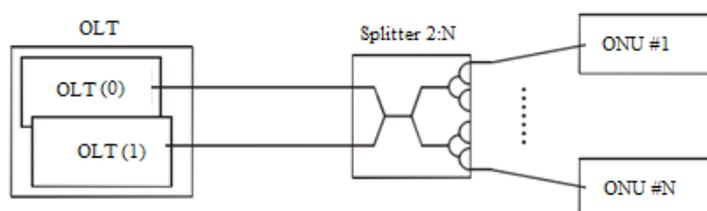


Figura 9 - Esquema de Proteção Tipo B

- **Tipo C:** A terceira configuração duplica também o lado da ONU, ou seja, todas as fibras são duplicadas, bem como cada OLT e ONU também, como pode ser observado na Figura 10. Nesta, uma falha em qualquer ponto da rede pode ser recuperada alternando para o caminho de proteção. Logo, o custo de duplicação total fornece uma alta confiabilidade. Neste caso a recuperação imediata é possível em ambos os lados, assim como a comutação sem perda de células.

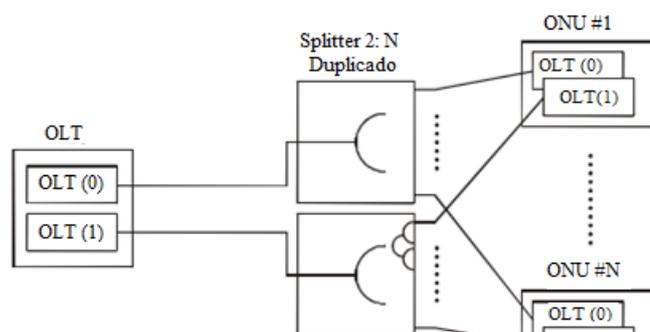


Figura 10 - Esquema de Proteção Tipo C

- **Tipo D:** Se as ONUs forem instaladas no prédio/casa do usuário, o cabeamento interno pode ser duplicado ou não. Ademais, se cada ONU pertencer a um usuário diferente, a confiabilidade depende de cada um, e apenas um número limitado de ONUs terá configuração duplicada. Baseado nisso, este tipo de proteção permite uma duplicação parcial de ONUs, de acordo com a Figura 11. Esta configuração possui as mesmas características de duplicação total do **tipo B** [27].

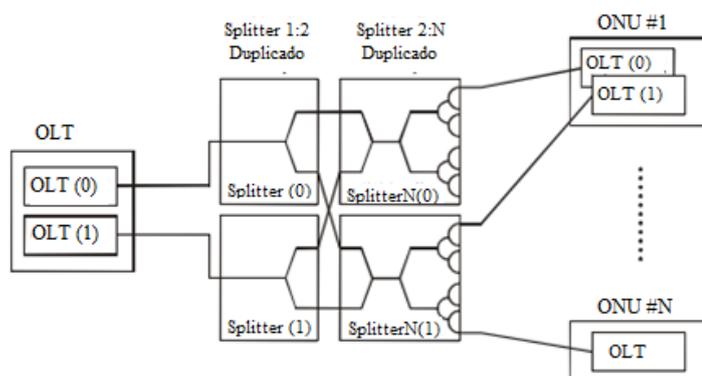


Figura 11 - Esquema de Proteção Tipo D

3. Modelagem Geométrica para Definição do Cenário

Neste capítulo são apresentados os modelos analíticos adotados na literatura [14] para estimar a distância de instalação e o comprimento da fibra em arquiteturas FTTH e os modelos matemáticos propostos por este trabalho.

Os modelos geométricos de Manhattan são conhecidos assim, pois foram desenvolvidos utilizando a infraestrutura simétrica da cidade Americana de Manhattan. Eles se dividem em três diferentes modelos: comprimento de rua simplificado, comprimento de rua, e comprimento duplo de rua. Os clientes são distribuídos uniformemente sobre uma área quadrada, como se observa na Figura 12. Um dos lados do quadrado contém n casas/prédios e a área total contém n^2 casas/prédios. A distância entre duas casas é indicada por l . Ao considerar apenas os pontos de ligação das casas, a maior distância horizontal ou vertical entre as duas casas mais distantes é $(n - 1) \times l$. A maior distância horizontal ou vertical considerando a separação entre as casas e para que o modelo gráfico ultrapasse o bloco selecionado é $n \times l$. O escritório central (CO) é sempre situado no centro do cenário e a superfície do cenário é, na maioria das vezes, $n^2 \times l$.

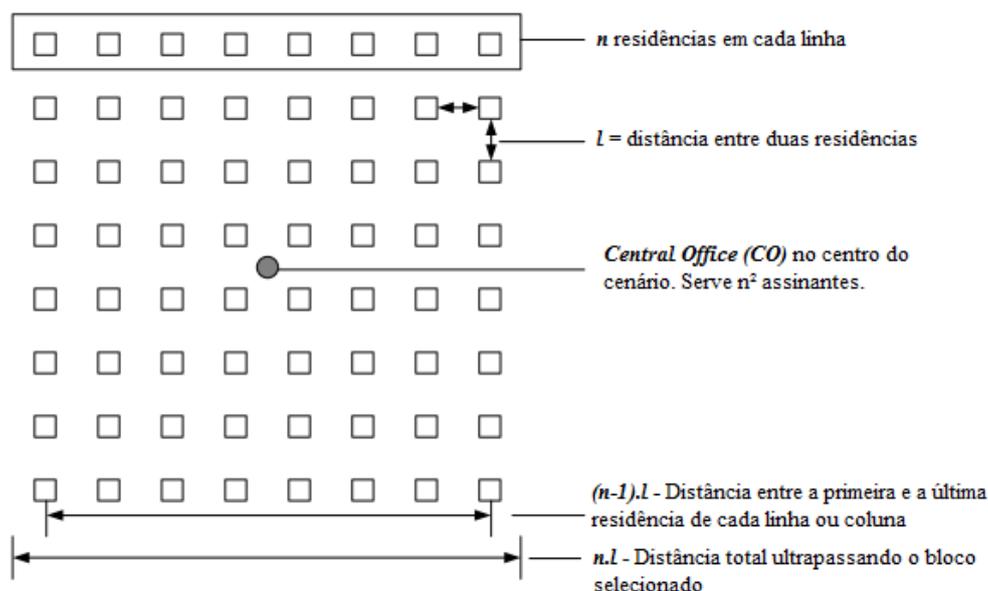


Figura 12 - Modelo Geométrico de Manhattan

3.1. Modelo 1: Comprimento de Rua Simplificado

Chamado de Modelo Simplificado de Manhattan se assemelha a instalação de uma rede FTTH, pois assume que todas as casas podem ser conectadas por uma linha que passa pelo centro da casa e todas as ruas são conectadas usando um divisor de rua, de acordo com a Figura 13.

Cada linha requer uma distância de instalação $(n - 1) \times l$, e existem n linhas. O divisor de ruas requer uma distância de instalação $(n - 1) \times l$. E combinando os dois, obtém-se a distância I representada pela Equação 1.

$$I = n \times (n - 1) \times l + (n - 1) \times l = (n^2 - 1) \times l \quad (1)$$

Como se observa na Figura 13, a estrutura é simétrica tanto na horizontal quanto na vertical, logo existem quatro quadrantes que resultam no mesmo comprimento de fibra de cada um. As distâncias são calculadas pela interseção de uma linha diagonal com o quadrante contando a partir da casa mais distante até o CO. De início, o número de casas aumenta a cada passo, porém, na metade do quadrante o número de casas passa a diminuir a cada passo. Logo, o comprimento da fibra é dado pela equação 2.

$$F = 4 \times l \times \sum_1^{n-1} [\min(i, n - i) \times (n - i)] \quad (2)$$

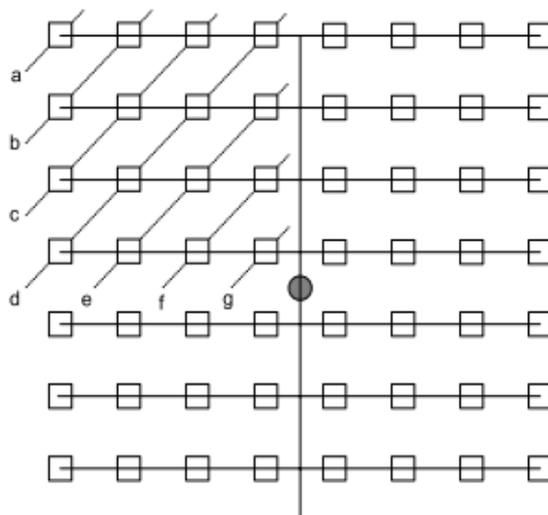


Figura 13 - Comprimento de Rua Simplificado

3.2. Modelo 2: Comprimento de Rua

O modelo de comprimento de rua liga todas as casas através de um cabo ao longo da rua. Neste modelo, o cabo está situado no meio da rua, mas poderia facilmente ser imaginado por um lado da rua também. Como tal, ele poderia considerar uma instalação aérea em que os postes são colocados de um lado ao longo da rua e todas as casas de ambos os lados pode ser conectado a partir desses postes.

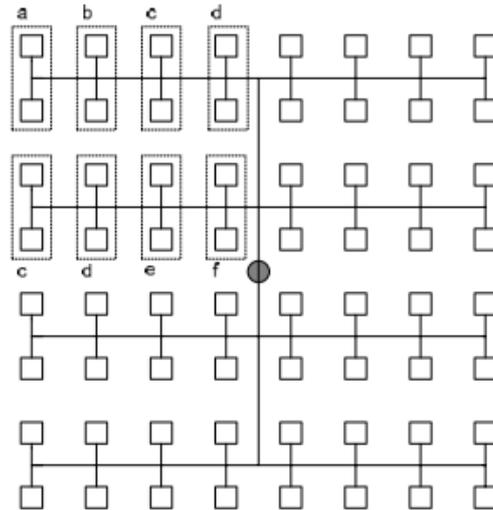


Figura 14 - Comprimento de Rua

Nesta estrutura podem-se agrupar as casas em duplas como indica a Figura 14. São $n/2$ filas adjacentes e para conectar as duplas de casas em uma rua totalmente conectada, utiliza-se um comprimento de instalação $(n - 1) \times l$ e novamente $n/2$ linhas adjacentes. Para conectar as duplas de casas em uma rua utiliza-se o comprimento de instalação $n \times l$. Por fim, a conexão ao CO se dá pelo divisor de rua que tem uma distância de $(n - 2) \times l$. Combinando as distâncias, obtém-se uma distância de instalação como na equação 3.

$$I = \frac{n^2 \times l}{2} + \frac{n \times (n-1) \times l}{2} + (n - 2) \times l = \left(n^2 + \frac{n}{2} - 2 \right) \times l \quad (3)$$

Para o tamanho da fibra, segue-se a mesma lógica do Manhattan. As distâncias também são as mesmas. O agrupamento de casas é por duplas e a distância entre duas ruas consecutivas é $2 \times l$. Como tal, pode-se agrupar novamente em $(a + b)$, $(c + d)$, $(e + f)$. Para cada um desses novos grupos, o número de casas é o mesmo e a distância é o dobro da distância da menor + 1. Finalmente toda esta informação leva ao comprimento de fibra apresentado na equação 4

$$F = 4 \times l \times \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}-1} (2 \times \min(i, \frac{n}{2} - i) \times [(\frac{n}{2} - i) \times 4 + 1]) \quad (4)$$

3.3. Modelo 3: Comprimento Duplo de Rua

O comprimento duplo de rua considera uma rua que consiste em dois lados, conforme Figura 15. Atravessar a rua é frequentemente muito mais caro do que instalar ao lado da rua. Este modelo analítico reduz o número de cruzamentos de ruas para um mínimo. Como tal, assemelha-se a uma instalação completamente subterrânea na área.

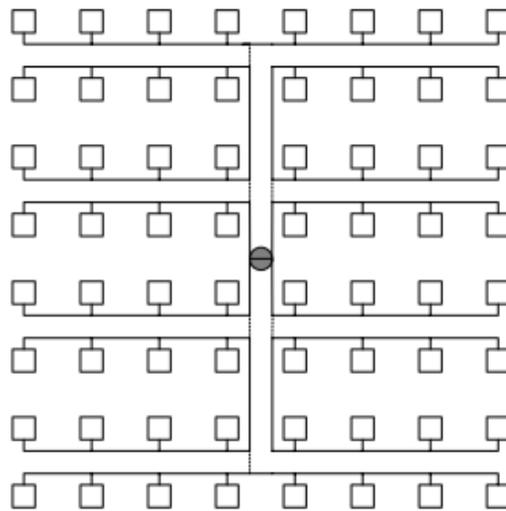


Figura 15 - Comprimento Duplo de Rua

Mais uma vez, pode-se fazer uso da equação supracitada para o agrupamento de duas casas. Neste caso, as casas adjacentes não estão diretamente ligadas uma a outra, como não há cruzamento da rua com distância w . Como tal, o comprimento de instalação nesta parte é $(l - w)$ e há de novo $n^2/2$ casas adjacentes. Considerando conectar as filas, precisa-se de uma distância de instalação em ambos os lados da rua. Em todos os casos, exceto o lado superior da rua na fileira superior e o lado inferior da rua da linha inferior, que requerem um comprimento de $(n - 1) \times l$ menos a largura w da rua do divisor que não se cruza.

Na rua superior e inferior não se leva isso em conta. Tem-se um total de $n/2$ ruas e n lados. Finalmente, considerando o divisor de rua, o comprimento de instalação em ambos os lados será o mesmo. As ruas horizontais são espaçadas a uma distância de $2 \times l$ e a distância entre duas ruas é $2 \times l - w$. O número de ruas para conectar é $n/2$ e o número de conectores nos dois lados é $2 \times (\frac{n}{2} - 1) \times (2 \times l - w)$. O comprimento de instalação resultante é dado na equação 5.

Neste cálculo, deve-se ainda acrescentar o comprimento da instalação para atravessar as ruas. Precisa-se fazer isso em ambos os lados para cada duas ruas, exceto para a parte superior e inferior da rua, em que a rua se cruza apenas de um lado. Finalmente, há também uma rua que cruza para conectar ambos os lados da rua no CO (Equação 6).

$$I = \frac{n^2}{2} \times (l - w) + [(n - 2) \times ([n - 1] \times l - w) + 2 \times (n - 1) \times l] + 2 \times \left(\frac{n}{2} - 1\right) \times (2 \times l - w) = \left[\frac{3 \times n^2}{2} + n - 4\right] \times l - \left[\frac{n^2}{2} + 2 \times n - 4\right] \times w \quad (5)$$

$$I_{sc} = \left[2 \times \frac{n}{2} - 2 + 1\right] \times w = (n - 1) \times w \quad (6)$$

O tamanho de fibra e o custo são independentes do cruzamento da rua. Ele será o mesmo que o tamanho da rua, sendo que em metades das casas. Ou seja, para cada rua horizontal este é o lado mais próximo do CO, então se economiza w de tamanho de fibra. Sendo assim, a distância de fibra se dá pela equação 7.

$$F = \text{Fibre Street Length} - \left(\frac{n^2}{2}\right) \times w \quad (7)$$

3.4. Modelagem Geométrica Adaptada para PON

Esta subseção apresenta os modelos matemáticos utilizados para descrever como são determinados os clientes associados e as distâncias dos equipamentos até o CO para calcular os custos associados ao cenário apresentado no estudo de caso.

O modelo geométrico baseado no Modelo Manhattan, tem sido amplamente utilizado em muitos estudos de PON, pois em muitos países, as cidades são organizadas em formato de grade e este modelo pode ser aplicado facilmente em diferentes áreas apenas ajustando seus parâmetros.

Ele possui distribuição uniforme dos assinantes em uma estrutura de grade e como as arquiteturas PON se dividem dois níveis, de alimentação e distribuição, o modelo geométrico é implementado seguindo esta divisão hierárquica nos dois níveis.

O nível de alimentação representa as quadras dentro da cidade, chamadas de blocos. Ele possui o CO no centro do cenário, N blocos em cada linha e a distância entre os centros de dois blocos é L , como se observa na Figura 16.

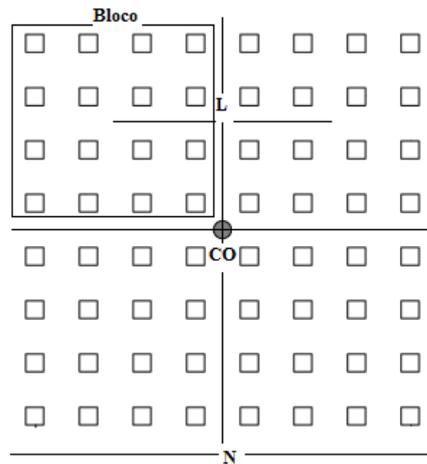


Figura 16 - Modelo Geométrico Utilizado no Estudo de Caso

Seguindo a mesma lógica, o segundo nível, de Distribuição, representa as residências dentro de um bloco do cenário. Possui ao centro um nó remoto (RN) servindo cada bloco, n ONUs em cada linha de um bloco e l sendo a distância entre duas residências adjacentes. Portanto, conforme se observa na Figura 17, $L = n \times l$.

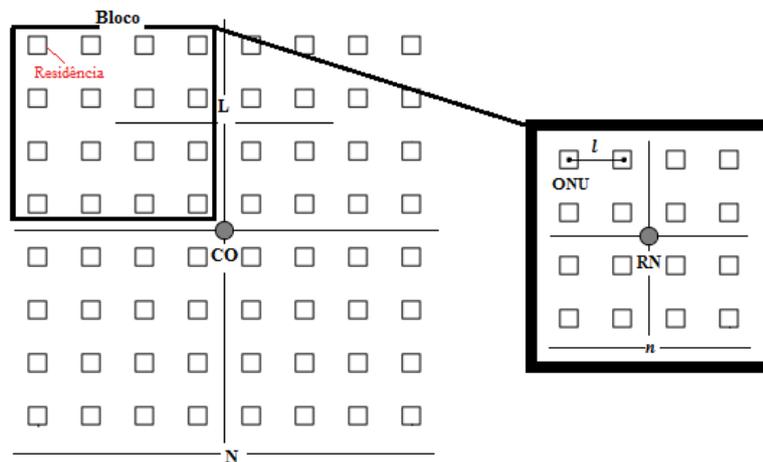


Figura 17 - Representação do Modelo Geométrico em Dois Níveis

Como o cenário é quadrado, ele possui $N^2 \times n^2$ ONUs, que representam cada assinante, e como cada bloco é associado a um nó remoto (RN), este possui n^2 assinantes. Além disso, o número de assinantes servidos por um *splitter* depende da taxa de divisão do *splitter* (SR) e o número de *splitters* em cada bloco é dado por $\left\lceil \frac{n^2}{SR} \right\rceil$. Portanto, caso a relação não resulte em um número inteiro, deve-se adicionar um *splitter* para conectar os assinantes excedentes.

Cada Chassis OLT é associado a um número máximo de portas OLT e cada uma destas conectada a um *splitter*. Então, os assinantes servidos por um OLT Chassis são também os mesmos servidos pelas portas dos OLT e pelos *splitters* relacionados a estas portas. Os assinantes servidos por uma fibra de alimentação são determinados pelos blocos conectados a esta e da mesma forma, os assinantes servidos pelas fibras de distribuição são determinados pelas ONUs associadas.

O esquema de proteção no Nível de Alimentação necessita da adição de $(N - 1) \times N$ *trenchs* de fibra, de acordo com a Figura 18. *Trench* representa a abertura de pequenas valas ao longo de vias pavimentadas para a instalação de fibras ópticas, medido em quilômetros.

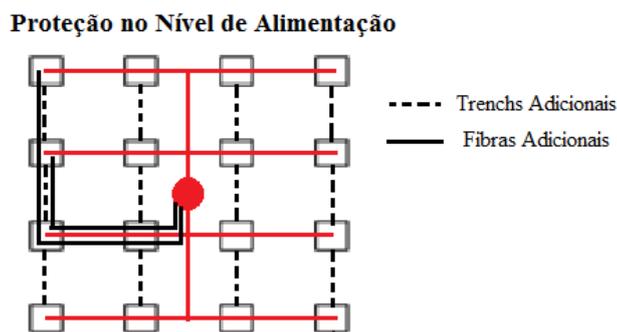


Figura 18 - Esquema de Proteção no Nível de Alimentação

Já para o esquema de proteção no Nível de Distribuição é necessário adicionar $[(n - 1) \times n] \times N^2$ *trenchs*, como mostra a Figura 19. A fim de reduzir custos, as operadoras implantam as fibras utilizando os dutos já existentes sempre que possível [14].

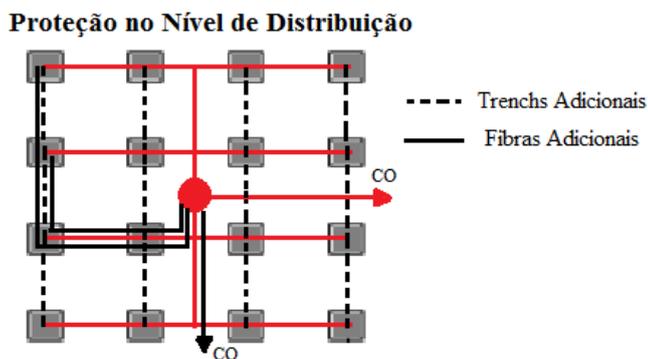


Figura 19 - Esquema de Proteção no Nível de Distribuição

Neste modelo, a localização dos equipamentos é dada por duas coordenadas, uma vertical (P_v) e uma horizontal (P_h), nos dois níveis do cenário. Tais posições variam de acordo com o tipo de equipamento e através delas se pode extrair a distância do equipamento até o CO.

A distância ($D_{q \rightarrow CC}$) de um bloco até o centro do cenário, ou seja, ao CO é definida pela equação 11,

$$D_{q \rightarrow CC} = [N - (A + B) - 1] \times L \quad (11)$$

onde N é o número de blocos em uma linha, L é a distância entre os centros de duas quadras e A e B são parâmetros que variam de acordo com as posições do bloco.

$$A = \begin{cases} P_h, & \text{se } P_h < \frac{N}{2} \\ N - P_h - 1, & \text{se } P_h \geq \frac{N}{2} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} P_v, & \text{se } P_v < \frac{N}{2} \\ N - P_v - 1, & \text{se } P_v \geq \frac{N}{2} \end{cases}$$

As distâncias de um *step* de fibra de alimentação ao Centro do Cenário ($D_{FFS \rightarrow CC}$) e de um *step* de fibra de alimentação de proteção ao centro do cenário ($D_{PFFS \rightarrow CC}$) são calculadas pela equação 12, caso $P_h \neq \frac{N}{2}$.

$$D_{FFS \rightarrow CC} = \left[N - (A + B) - \frac{3}{2} \right] \times L \quad (12)$$

Para $P_h = \frac{N}{2}$ o cálculo é realizado através da equação 13,

$$D_{FFS \rightarrow CC} = \left(\frac{N - 2B - 1}{2} \right) \times L \quad (13)$$

onde os parâmetros N , L e A e B são os mesmos utilizados na equação 11, sendo que

$$A = \begin{cases} P_h, & \text{se } P_h < \frac{N}{2} \\ N - P_h, & \text{se } P_h > \frac{N}{2} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} P_v, se P_v < \frac{N}{2} \\ N - P_v - 1, se P_v \geq \frac{N}{2} \end{cases}$$

Adaptando as equações 11, 12 e 13 pode-se calcular a distância dos diversos equipamentos da rede ao centro do cenário.

Para ONUs, *steps* de fibra de distribuição e *steps* de fibra de proteção no nível de distribuição, a distância ao CO será igual à distância da quadra em que se encontra o equipamento, calculada através da equação 11, somada à adaptação das equações 11, 12 e 13, respectivamente. Alterando as equações, o parâmetro N é substituído por n , o número de residências em uma linha do bloco; L é substituído por l , que é a distância entre os centros de duas residências; P_h e P_v se tornam as posições do equipamento dentro do bloco.

Para as distâncias dos *splitters* e do RN Chassis, considera-se a distância da quadra em que estes estão localizados, calculada através da equação 11. As portas OLT e o Chassis, como já estão localizados no centro do cenário, considera-se a distância nula.

Cada equipamento da rede está associado a um número de clientes atendidos. Por exemplo, cada ONU atende um assinante; cada quadra possui um RN *Chassis*, portanto, cada RN *Chassis* atende N^2 assinantes; os *splitters* atendem o número de assinantes equivalente a sua taxa de divisão (SR); Cada porta OLT atende o mesmo número de assinantes atendidos pelo *splitter* conectado a ela e cada OLT *Chassis* atende todos os assinantes associados às suas portas OLT.

Como o foco do trabalho são falhas na rede, é fundamental considerar os clientes que serão afetados pelas falhas, sendo assim, leva-se em consideração as características dos equipamentos, por exemplo, o tipo de equipamento, quantidade, distância até o CO, o vetor de Clientes Atendidos (V_{at}) por este equipamento e, caso o equipamento seja do tipo fibra de proteção, um vetor de Clientes Protegidos, as taxas de falha e reparo, o valor do equipamento e o tempo de instalação.

Através das quantidades de equipamentos, cria-se uma faixa de equipamentos pela qual se pode identificar qual equipamento falhou e extrair as características para os cálculos, como se pode observar na Figura 20. Nesta, por exemplo, se o equipamento de número 20 falhar, identifica-se que foi uma fibra de distribuição, onde ela está localizada e pode-se identificar quais equipamentos foram afetados por esta falha.

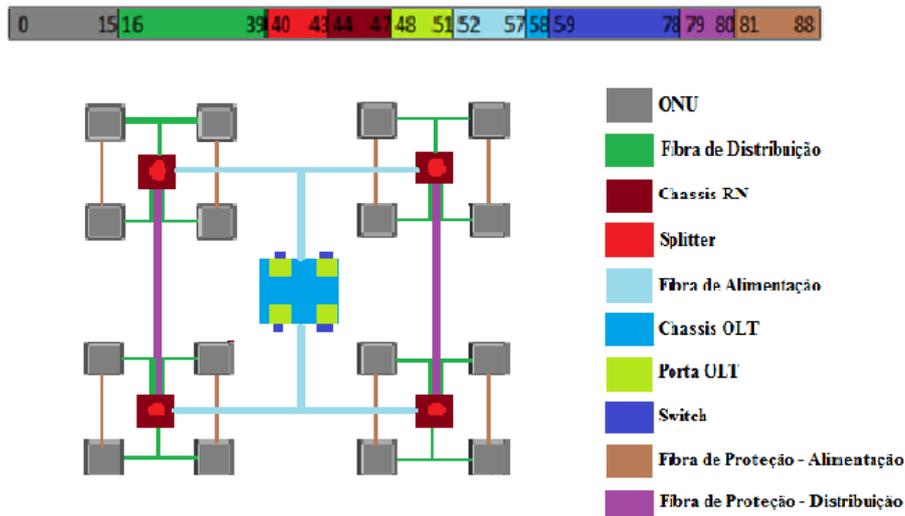


Figura 20 - Faixa e Localização de Equipamentos

O vetor de clientes atendidos (V_{at}) possui $N^2 \times n^2$ posições e cada uma representa um cliente, evitando que o cliente seja associado a dois equipamentos falhos simultaneamente e seja contabilizando duas vezes. A Figura 21 ilustra como é determinado o vetor citado, apresentando exemplos de clientes atendidos por cada equipamento da rede, que em caso de falha de algum desses equipamentos serão os clientes afetados pela falha. Conforme observa-se na figura, o cliente representado pelo número 11 no vetor está associado a uma ONU, portanto caso esta ONU falhe, este será o cliente afetado pela falha.

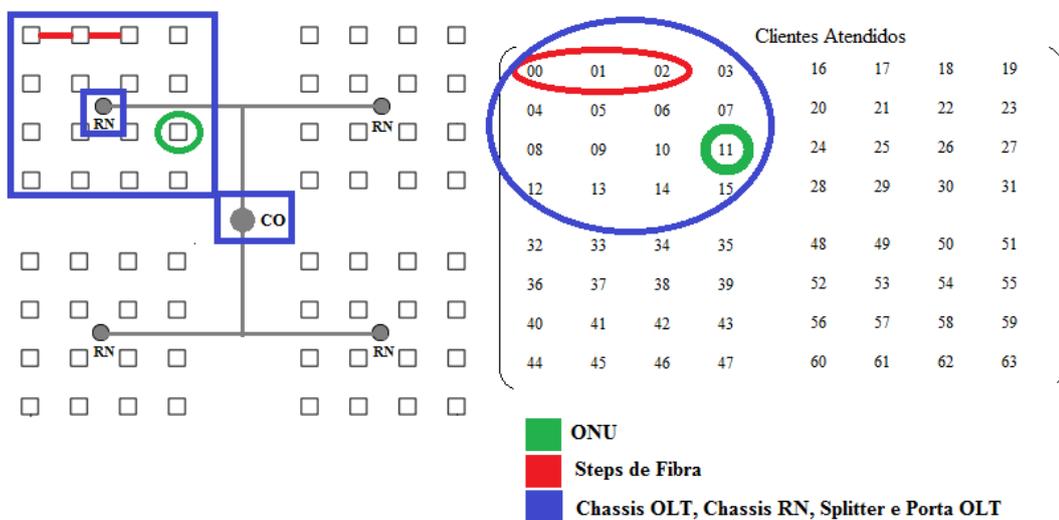


Figura 21 - Representação do Vetor de Clientes Atendidos por um equipamento

4. Cadeias de Markov

Este capítulo introduz conceitos de Cadeias de Markov e apresenta os modelos de custo de Markov utilizados para simular os custos associados a falhas na rede.

Os processos de Markov que possuem espaço de estados e espaço de parâmetros discretos são chamados de cadeias de Markov. Uma maneira simples de visualizar uma cadeia de Markov é através de uma máquina de estados finitos ou por meio de um grafo dirigido, onde cada aresta é rotulada com as probabilidades de transição de um estado para o outro, sendo estes estados representados pelos nós, conectados pelas arestas [28].

Estes modelos se subdividem em cadeia de Markov de tempo discreto (DTMC), cadeia de Markov de tempo contínuo (CTMC) e modelos de recompensa Markovianos (MRM) [29].

Nas cadeias de Markov de Tempo Discreto as transições podem ocorrer somente em intervalos de tempo conhecidos, isto é, passo-a-passo. Se as transições entre estados puderem ocorrer em instantes de tempo contínuos a cadeia é chamada de Cadeia de Markov de Tempo Contínuo. A propriedade Markoviana de ausência de memória é mantida para ambos os tipos de cadeias.

4.1. Cadeia de Markov de tempo discreto (DTMC)

Dado um estado inicial s_0 , a cadeia de Markov evolui com o tempo, mudando de estado a cada passo, seguindo as probabilidades de transição. Considerando $S = \{0, 1, 2, \dots\}$, pode-se escrever a função de probabilidade condicional da transição entre o estado i e o estado j em tempo n como:

$$p_{ij} = P(X_{n+1} = s_{n+1} = j | X_n = s_n = i)$$

Se a cadeia está em um estado i , no próximo instante de tempo ela irá para o estado j , podendo ficar no mesmo estado ($i = j$). Logo, $\sum p_{ij} = 1$, onde $0 \leq p_{ij} \leq 1$, ou seja, o somatório das probabilidades de transição de um estado i para qualquer outro estado da cadeia é sempre igual a 1.

Neste tipo de cadeias de Markov as probabilidades de transições de estados são representadas por uma matriz quadrada e positiva, chamada de Matriz de Transição, na qual a soma dos valores pertencentes a cada linha é sempre igual a 1.

Uma das aplicações de Cadeia de Markov é avaliar o desenvolvimento de um sistema através da possibilidade de calcular as probabilidades de que a cadeia esteja no estado i no instante de tempo t , após n passos. Estas probabilidades são chamadas de Probabilidades de Estado Transiente. Estas probabilidades são representadas por um vetor $v_i(n) = (P_0(n), P_1(n), P_2(n), \dots)$ que pode ser obtido multiplicando-se o vetor inicial $v_i(0) = (P_0(0), P_1(0), P_2(0), \dots)$ pela matriz $\mathbf{P}^{(n)}$.

Caso a probabilidade de acontecer o primeiro retorno para um estado i , n passos após a cadeia sair do mesmo estado i seja $f_i^{(n)}$, então a probabilidade de a cadeia retornar em outro momento para o estado i após sair dele é $f_i = \sum_{n=1}^{\infty} f_i^{(n)}$. Se $f_i = 1$ o estado é chamado **recorrente**. Se $f_i < 1$, o estado é **transiente**. [30]

Se um estado i não pode alcançar nenhum estado j da cadeia este é chamado de estado absorvente. Quando uma cadeia de Markov entra em um estado absorvente ela não mais sai deste estado. Assim a cadeia permanece infinitamente neste estado. [31]

4.2. Cadeias de Markov de Tempo Contínuo

Nestas cadeias, o tempo das transições segue uma distribuição exponencial. A matriz de transição é chamada de matriz geradora infinitesimal, pois, neste caso, as transições ocorrem com uma taxa, em vez de uma probabilidade, devido à natureza contínua desse tipo de modelo.

Considerando uma matriz \mathbf{Q} composta por elementos q_{ii} e q_{ij} , onde $i \neq j$ e $\sum q_{ij} = -q_{ii}$ tem-se que os elementos da diagonal têm seus valores definidos de forma que cada linha da matriz seja igual a 0 [28].

Sendo esta matriz $\mathbf{Q}(u, v) = [p_{ij}(u, v)]$ de probabilidades de transição de um estado i para qualquer estado j , em um intervalo de tempo (u, v) de u até v e o vetor com as probabilidades da cadeia estar no estado i no instante de tempo u sendo $\pi_i(u) = (P_0(u), P_1(u), P_2(u), \dots)$, têm-se que [30]:

$$\pi_i(v) = \pi_i(u)\mathbf{Q}(u, v)$$

As cadeias de Tempo Contínuo seguem as mesmas classificações das cadeias de tempo discreto.

4.3. Modelos de Recompensa Markovianos (MRM)

Modelos de Recompensa são normalmente usados para obter métricas compostas. Nestes modelos cada estado i é associado a uma taxa de recompensa r_i . As transições entre estados também podem ser associadas a recompensas, que são chamadas recompensas de impulso.

Geralmente, a recompensa denota o nível de desempenho obtido pelo sistema quando se encontra em determinado estado. Exemplificando através de um vetor $\bar{r} = (r_1, r_2, r_3) = (5, 0, -2)$ a taxa de recompensa esperada para o tempo t é:

$$E[X(t)] = \sum_{i \in S} r_i \pi_i = 5\pi_0(t) + 0\pi_1(t) + -2\pi_2(t) \quad (10)$$

Com a possibilidade de calcular métricas como ganho total em um determinado intervalo de tempo, os modelos de recompensa Markovianos são amplamente utilizados em estudos de avaliação de desempenho [32].

4.4. Cadeia de Markov Monte Carlo

Cadeias de Markov também se tornaram muito importantes para gerar sequencias de números aleatórios para refletir com precisão sobre complicadas distribuições de probabilidades. É a aplicação que possui maior utilização prática, principalmente em estatística, física e ciência da computação são cadeias de Markov e Monte Carlo (MCMC) [33].

Cadeia de Markov e Monte Carlo é uma técnica para estimar através de simulação a expectativa de uma estatística em um modelo complexo. Sucessivas seleções aleatórias formam uma cadeia de Markov com distribuição estacionária que é adotada como a distribuição esperada [34].

A idéia do MCMC é simular um passeio aleatório num espaço de tempo que converge para uma distribuição estacionária. Fazendo que os valores sejam gerados de forma independente sem preocupação com a convergência do algoritmo, bastando que o tamanho da amostra seja suficientemente grande, ou seja, através de método não iterativo.

4.5. Modelos de Custo de Markov para Análise do OPEX

O cenário é representado por uma Cadeia de Markov $\Omega = \{1, 2, 3, \dots, e\}$, contínua, e com espaço de estados finito, em que a definição dos estados se dá pelo

número e tipo de equipamentos falhos na rede. Sua matriz de transição $\mathbf{A} = [\lambda_{ij}]$ representa as taxas de transição do estado i para o estado j , obtidas através das taxas de falha e reparo dos equipamentos, e os elementos diagonais serão $\lambda_{ii} = -\sum_{j \neq i} \lambda_{ij}$.

As taxas de falha e o tempo médio de reparo são fornecidas pelos fabricantes de equipamentos, enquanto que a taxa de reparo dos equipamentos se dá pela soma do tempo de viagem até o equipamento falho e do tempo médio de reparo deste. Caso haja mais de um equipamento falho, aquele com maior taxa de penalidade será reparado primeiro, dessa forma reduzindo os custos.

Os modelos de custo foram definidos através do conceito de Recompensas de Markov, em que cada estado possui um valor de recompensa associado. Neste caso foram utilizados os custos de reparo (C_i^{reparo}) e penalidade ($C_i^{penalidade}$) dos equipamentos falhos, obtidos através das Equações 14 e 15,

$$C_i^{penalidade} = NB_{sub}^{falha} \times Pr_{bus} + NR_{sub}^{falha} \times Pr_{res} \quad (14)$$

$$C_i^{reparo} = Sal + \sum C_{ij} \lambda_{ij} \quad (15)$$

onde NB_{sub}^{falha} e Pr_{bus} são, respectivamente, o número de assinantes comerciais afetados pela falha e a taxa de penalidade comercial acordada na SLA; NR_{sub}^{falha} e Pr_{res} são o número de assinantes residenciais afetados pela falha e a taxa de penalidade residencial acordada na SLA, respectivamente.

O parâmetro Sal corresponde ao salário por hora da equipe de trabalho escalada para reparar a falha, C_{ij} é o custo de reparo do equipamento em transição do estado i para o estado j , e por fim, λ_{ij} é a taxa de transição entre os estados.

Para realizar a análise da cadeia em um determinado período de tempo, foi utilizado Simulação de Monte Carlo como em [15] devido a sua fácil implementação. Monte Carlo é uma técnica matemática computadorizada baseada em amostragens aleatórias massivas para obter resultados numéricos.

No estudo de caso, as simulações são baseadas nas taxas de falha e reparo dos equipamentos. Como a taxa de falha de um equipamento é muito baixa e a taxa de reparo é muito alta, torna-se baixíssima a probabilidade de ocorrerem várias falhas simultâneas na rede. Com isso, o comportamento esperado é que o reparo ocorra logo após a falha.

O equipamento ONU é o que possui maior chance de falhas na rede, já que se encontra em maior quantidade, e porque uma falha deste equipamento afeta menos clientes, já que apenas um cliente é associado a cada ONU. Portanto, para realizar a análise proposta neste trabalho, o Método de Monte Carlo foi adaptado de forma que cada tentativa de Monte Carlo seja concluída logo que alcançar o número de ONUs falhas previstas.

Uma tentativa inicia a partir de um vetor contendo todos os equipamentos da rede em estado funcional. Cada equipamento possui uma taxa de falha. Somando-se todas as taxas de falhas obtém-se uma taxa de falha geral dos equipamentos que ao ser multiplicada pelo número aleatório da Simulação de Monte Carlo irá identificar qual equipamento estará em falha no próximo estado.

A partir da taxa de falha do equipamento e do seu tempo médio de reparo (MTTR), pode-se obter a taxa de reparo através da equação 16.

$$Tx_{Reparo} = \frac{1}{MTTR} \quad (16)$$

Assumindo que um reparo ocorre logo após uma falha e seguindo a mesma lógica, se obtém a taxa de reparo geral dos equipamentos que multiplicada pelo número aleatório da Simulação de Monte Carlo identificará qual equipamento será reparado.

Em uma tentativa há várias transições de estados, entre falhas e reparos, e em cada uma destas os custos de reparo e penalidade citados nas equações 14 e 15 são calculados de acordo com o tipo de equipamento e a quantidade de clientes associados.

Além disso, são criados três vetores: o vetor $N_i^{acessos}$ para armazenar a quantidade de acessos em cada estado, o vetor D_i para armazenar o tempo que o sistema permaneceu em cada estado acessado, e o vetor z_i que armazena o tempo total que o sistema permaneceu em cada estado, obtido através da equação 17.

$$z_i = N_i^{acessos} \times D_i \quad (17)$$

O vetor z_i é calculado para cada tentativa e a partir dele pode-se calcular a equação 18 que resulta no tempo médio de permanência em cada estado, armazenado no vetor Z_i .

$$Z_i = \frac{\sum z_i}{N_{tentativas}} \quad (18)$$

A Figura 22 ilustra um exemplo de como funciona uma transição de estado. Neste exemplo, a rede tem três equipamentos, representados por 1, 2 e 3 (Figura 22 (a)). Na primeira transição ilustrada na figura 22 (b), o número de equipamentos falhos muda do estado zero a um equipamento falho. Neste exemplo, ele é representado pelo equipamento 1 em estado de falha. Em seguida, o equipamento 1 é reparado e a transição volta ao estado zero. Este é o comportamento esperado da rede devido à baixa taxa de falhas de equipamentos. Apesar disso, o comportamento esperado é reparar o equipamento antes da próxima falha, mas pode acontecer de, antes da reparação ser realizada, outro equipamento mudar para estado de falha, por exemplo, se o equipamento 1 está falho e os equipamentos 2 ou 3 falharem como representado na Figura 22 (c). Neste caso, quando dois ou mais equipamentos falharem ao mesmo tempo a simulação escolhe para reparar primeiro o equipamento que reduzirá mais os custos de penalidade em menor tempo.

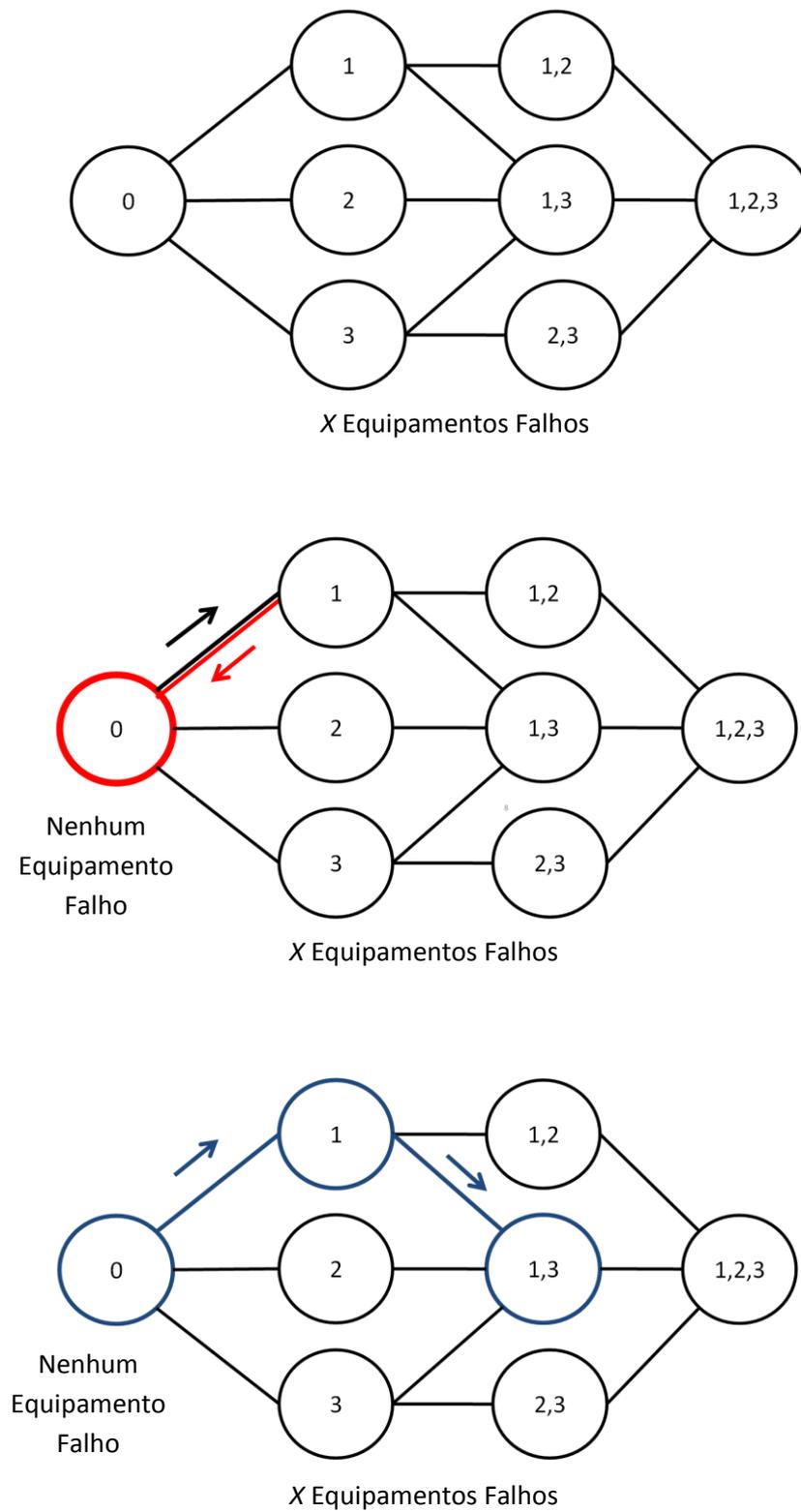


Figura 22 - Exemplos de uma Cadeia de Markov considerando três equipamentos (a) Cadeia de Markov com equipamentos 1, 2 e 3. (b) Cadeia de Markov considerando que o equipamento 1 falhe e seja reparado logo após a falha. (c) Cadeia de Markov considerando que os equipamentos 1 e 3 falhem.

Em alguns estados de falha, o equipamento falho será uma ou mais ONUs e cada falha deste equipamento é contabilizada até que atinja $NumONU$. Quando isso acontecer a tentativa é concluída.

4.5.1. Total Cost of Ownership (TCO)

Total cost of ownership (TCO) é uma estimativa financeira destinada a ajudar os consumidores e gestores de empresas a avaliar os custos diretos e indiretos comumente relacionados a *software* ou *hardware*. É uma forma de reconhecimento do custo total. Esta seção apresenta os modelos de cálculo do CAPEX e OPEX, através dos quais se pode obter o TCO.

TCO para o desenvolvimento de um serviço de comunicação compreende de duas partes; As despesas de capital (CAPEX) e as despesas operacionais (OPEX). Estes dois tipos de custos são inter-relacionados e afetam a estratégia de implantação de qualquer prestador de serviços [35].

Não há um padrão sobre quais custos estão incluídos na definição de CAPEX e OPEX, então se assume que o CAPEX é composto por custos de infraestrutura como preços de componentes e custos de instalação e que o OPEX é composto por custos operacionais como reparo de falhas, manutenção, custos de penalidades por falha, entre outros.

Para a análise do CAPEX utilizou-se a equação 19 levando em conta o custo total dos equipamentos.

$$C_{Eq}^{Tot} = \sum_{k=0}^X N_k^{Eq} \times Pr_k^{Eq} \quad (19)$$

Nesta equação, k classifica o tipo de equipamento variando de 0 a X, sendo que cada um representa um equipamento, como por exemplo, 0 representando ONU, 1 representando *splitter*, 2 para RN Chassis, 3 para porta OLT e 5 para *switch*. N é a quantidade de um tipo de equipamento e Pr o preço deste. Além disso, para o custo de instalação considera-se o tempo de instalação $T_{inst}[i]$, o tempo de viagem ao equipamento $\frac{dis[i]}{vel}$ e o salário da equipe de instalação Sal) como apresentado na equação 20,

$$C_{inst}^{Eq} = \sum_{i=0}^{NumEq-1} \left(\left(T_{inst}[i] + \frac{dis[i]}{vel} \right) \times Sal \right) \times pair_{fiber} \quad (20)$$

onde, $Pair_{fiber}$ é considerado 0 caso i seja um *step* de fibra, e 1 caso não seja.

Para calcular os custos de fibra, utilizam-se duas equações, uma para o custo da fibra C_{inst}^{Fibra} e outra para o custo de implantação da fibra C_{trench} . Para calcular o custo de fibra é necessário calcular a distância de cada *step* de fibra e multiplicá-la pelo preço Pr_{fiber}^{inst} como na equação 21.

$$C_{inst}^{Fibra} = \left[4 \times N^2 \times \left(\sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} \sum_{j=0}^{\frac{n}{2}-1} \frac{n-2 \times i-1}{2} + \frac{n-2 \times j-1}{2} \right) + 4 \times \left(\left(\sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{j=0}^{\frac{N}{2}-1} \frac{N-2 \times j-1}{2} + \frac{N-2 \times j-1}{2} \right) \right) \right] \times Pr_{fibra}^{inst} \quad (21)$$

O custo de implantação é calculado pelo preço de abertura das valas (*trenching*) Pr_{trench} multiplicado pelo tamanho total de fibra, como na equação 22.

$$C_{trench} = [(n^2-1) \times 1l \times N^2 + (N^2-1) \times 1L] \times Pr_{trench} \quad (22)$$

A análise do OPEX inclui as equações de Custo de Falha (23) que é o produto da soma dos custos de penalidade e reparo com o tempo esperado no estado i , derivada do método de Monte Carlo, e os custos de consumo de energia obtido pela Equação 24, na qual a variável i se refere aos equipamentos não-passivos da rede.

$$C_{falha} = \sum_{i=\Omega} [C_i^{penalidade} + C_i^{reparo}] Z_i \quad (23)$$

$$C_{energia}^{tot} = [\sum_i (n_i^{eq} \times P_i^{eq})] \times Pr_{energia} \times t \quad (24)$$

5. Estudo de Caso

O estudo assumiu uma cidade baseada no modelo Manhattan contendo 10.000 residências. Para a distância entre duas residências foram adotados dois valores: 0,1Km e 0,04Km caracterizando um cenário esparsos e um cenário denso, respectivamente. Foram utilizados três valores para a taxa de divisão do *splitter*: 16, 32 e 64, o que influencia diretamente na quantidade de equipamentos do cenário. O perfil dos usuários analisados se dividiu em três categorias: Maioria de usuários comerciais (80% de usuários comerciais e 20% de usuários residenciais), equilibrado (50% de usuários comerciais e 50% de usuários residenciais) e minoria de usuários comerciais (20% de usuários comerciais e 80% de usuários residenciais). Esta variação influi no custo de penalidade, variando o OPEX dos cenários analisados.

Três tipos de arquiteturas de PON foram analisadas. A primeira Sem Proteção, a segunda com Proteção no nível de Alimentação e a terceira com Proteção nos níveis de alimentação e distribuição, descritas respectivamente em Figura 23: 1 – Sem Proteção, 2 – Proteção no Nível de Alimentação, 3 – Proteção no Nível de Alimentação e Distribuição.

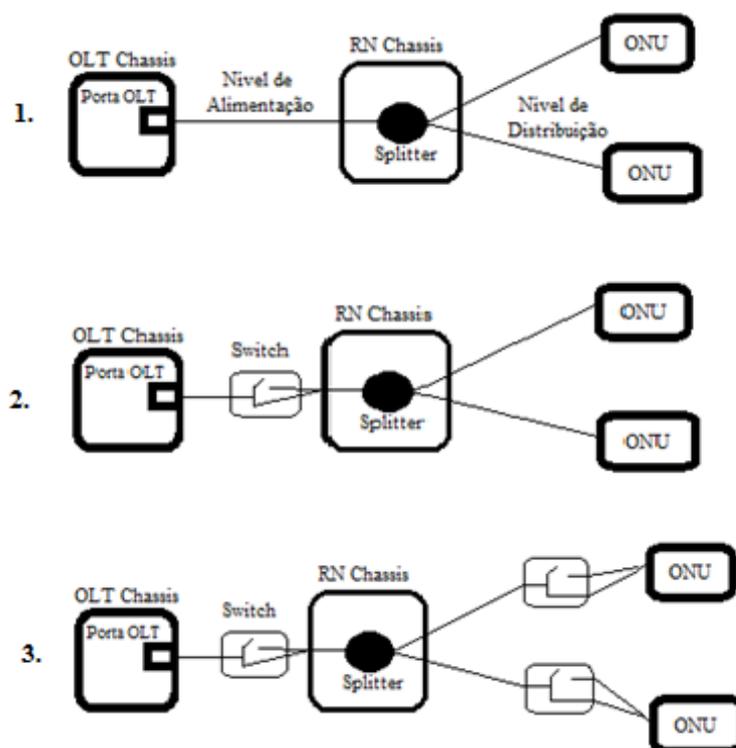


Figura 23 - Arquiteturas de Rede Utilizadas

Foram calculados o número de equipamentos no cenário, número de equipamentos falhos e *links* falhos em um período de 20 anos e por fim, apresentou-se o custo total de implantação e operação para as diferentes arquiteturas de PON e diferentes cenários analisados.

A Tabela I apresenta os parâmetros adotados para cálculo das distâncias utilizadas para a construção do modelo geométrico e os custos utilizados nas equações de OPEX, como valores de penalidades acordados na SLA e o valor do salário da equipe de trabalho. A Tabela II apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo de CAPEX e OPEX. Para os cálculos de CAPEX a tabela contém os custos de aquisição dos equipamentos da rede e o tempo de instalação de cada um destes. Para calcular o OPEX, a tabela apresenta o consumo de energia de cada equipamento, e suas taxas de falha e reparo. O custo de energia adotado foi de 0,11US\$, de acordo com [36].

TABELA I - Parâmetros do Cenário

Parâmetros	Valores
N	10
n	10
l (km)	0,04 0,1
SR	01:16 01:32 01:64
Penalidade – Usuários Comerciais (US\$/h)	100
Penalidade – Usuários Residenciais (US\$/h)	10
Salário da Equipe (US\$/h)	190

TABELA II - Parâmetros Utilizados para Calcular CAPEX e OPEX

	Custo (US\$)	Tempo de Instalação (min)	Taxa de Falha (FIT)	Tempo Médio de Reparo(h)	Consumo de Energia(W)
ONU	350	60	256	1	5
Splitter	50	10	120	1	0
RN Chassi	700	10	666	1	0
Porta OLT	7600	10	256	1	1197
OLT Chassi	4500	30	500	1	0
Switch Óptico	50	10	200	2	0
Fibra	160/km				
Trench	68500/km		570/km	7	0

6. Resultados

Os resultados obtidos através das simulações para os casos estudados são apresentados nesta seção, e alguns deles foram demonstrados também em [37]. Eles apresentam os investimentos de CAPEX e OPEX para operar uma rede PON em um período de 20 anos. Os cenários analisados são compostos por uma rede PON na qual a taxa de divisão do *splitter* é variado em 16, 32 e 64; a distância entre as ONUs varia entre 0,04 e 0,1 caracterizando o cenário em urbano denso, e esparsos; e o perfil dos usuários varia entre 80% de usuários comerciais e 20% residenciais, 50% comerciais e 50% residenciais e 20% comerciais e 80% residenciais.

Para CAPEX são apresentados os custos de investimento em infraestrutura, instalação e aquisição de equipamentos, enquanto que para OPEX são apresentados os custos de investimento em reparo, penalidade e consumo de energia. Além disso, apresenta-se uma análise de sensibilidade variando o custo dos elementos mais caros na topologia, por exemplo, abertura de *trenchs* e penalidade comercial.

7.1. CAPEX

A Figura 24 apresenta o valor de CAPEX para a PON considerando os cenários supracitados, para um tempo de operação de 20 anos. Através delas se observa que as topologias Sem Proteção e com Proteção na Fibra de Alimentação são cerca de duas vezes mais baratas que a topologia de Proteção Total. Isto se justifica pois esta topologia necessita de *trenchs* adicionais de proteção que é a despesa predominante em termos de investimentos de capital, já que a Fibra de Alimentação cobre longas distâncias para conectar somente o CO e RN, enquanto cada Fibra de Distribuição conecta o *splitter* à uma ONU, representando uma proporção maior em termos de investimentos. Observa-se também que este custo é maior em cenários esparsos devido a maior distância entre as ONUs.

Outro fator importante a ser observado é a importância da taxa de divisão do *splitter* nos custos de capital. Neste caso, observa-se uma diminuição dos custos de aquisição e instalação de equipamentos de acordo com o aumento da taxa de divisão, pois quanto maior esta taxa menos equipamentos são necessários. Por exemplo, se um único *splitter* atende 64 ONUs, são necessários menos *splitters* para atender todas as ONUs, ao contrário de um *splitter* capaz de atender somente 16 ONUs. E, conforme

explicado anteriormente, quanto mais *splitters* são necessários, mais portas OLT são necessárias também, além dos chassis OLT e RN.

O CAPEX não é alterado pelo perfil de usuários, portanto os custos de capital permanecem o mesmo independentemente se há mais usuários comerciais ou residenciais. Devido a isso, apenas o gráfico considerando 50% de usuários comerciais e 50% de usuários residenciais foi apresentado por se tratar de um cenário equilibrado em termo de perfil de usuários.

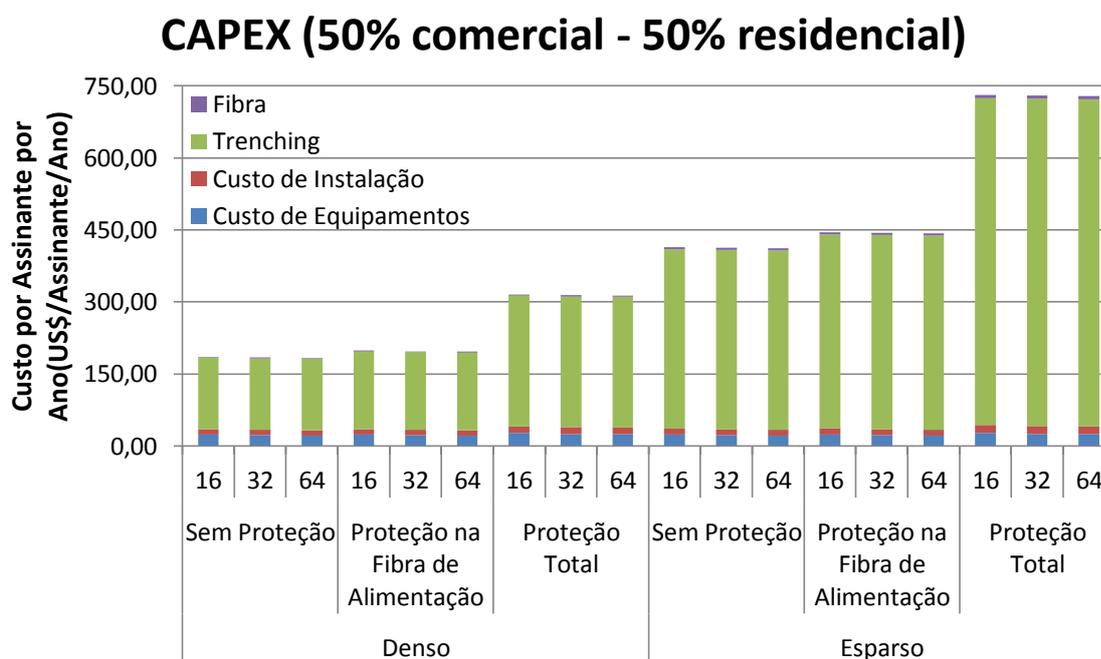


Figura 24 - CAPEX (50% Comercial - 50% Residencial)

3.2. OPEX

As Figuras 25, 26 e 27 mostram o investimento em OPEX para operar a PON por 20 anos nos cenários avaliados. Elas evidenciam o fato de que as variações nos cenários possuem grande influência nos custos operacionais.

O custo de penalidade por interrupção de serviço representa um custo importante dentre as métricas do OPEX. Quando a maioria de usuários são comerciais, de acordo com a Figura 25, o custo de penalidade cresce duas vezes mais que para cenários com maioria de clientes residenciais (Figura 27). Para o primeiro cenário, observa-se uma economia muito semelhante para as topologias de proteção, de aproximadamente 38%, em comparação a topologia Sem Proteção. Entretanto, para a topologia de Proteção Total esta economia no OPEX não compensa o investimento realizado em CAPEX.

Em cenários esparsos observa-se uma elevação dos custos para as três topologias, mas principalmente na topologia Sem Proteção. Nesses, o custo de reparo é duas vezes maior que nos cenários densos, e para a topologia de Proteção Total o custo de reparo chega a ser maior que o custo de penalidade.

As Figuras 26 e 27 demonstram que o comportamento em cenários com maioria de usuários residenciais e cenários com metade de cada perfil de usuário apresentam o mesmo comportamento, sendo que o custo diminui na mesma proporção para a diminuição do percentual de usuários.

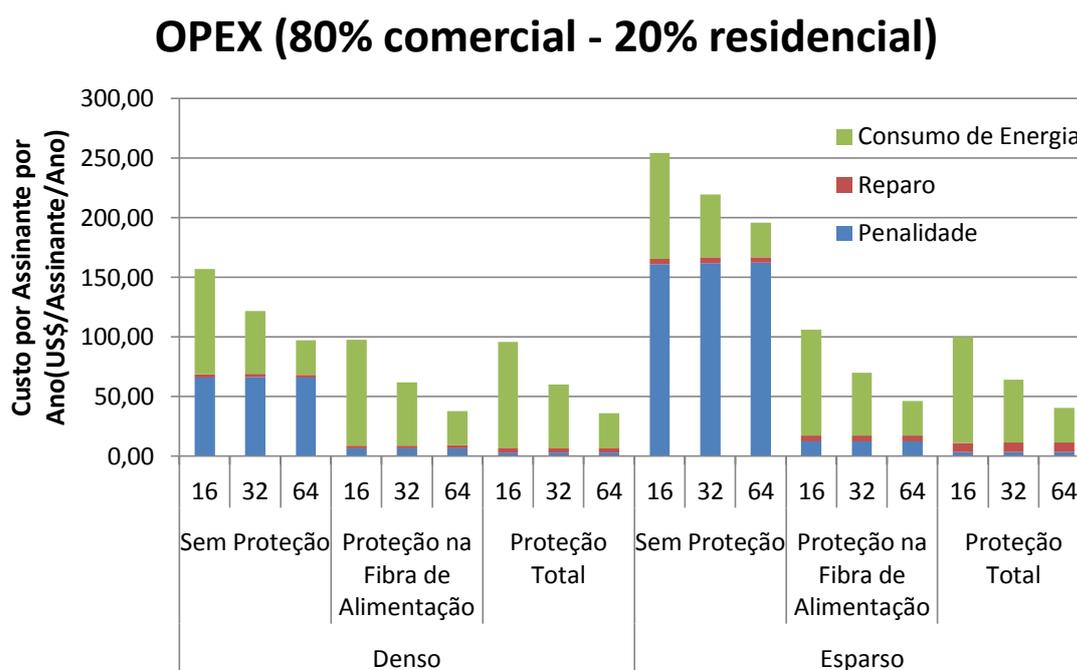


Figura 25 - OPEX (80% Comercial - 20% Residencial)

O consumo de energia também se mostra um custo relevante, que conforme se observa nas figuras, varia de acordo com a taxa de divisão do *splitter*. Apesar de ser uma rede óptica passiva, alguns equipamentos como ONU e portas OLT consomem energia, portanto conforme a taxa de divisão aumenta, menos equipamentos são necessários, reduzindo o custo de consumo de energia em quase 60,00US\$ da menor para a maior taxa de divisão.

A taxa de divisão também influi diretamente nos custos de penalidade e reparo. O custo de penalidade depende do número de assinantes afetados, portanto de acordo com o aumento da taxa de divisão do *splitter*, mais assinantes serão afetados pelas falhas, portanto o custo de penalidade será maior.

OPEX (20% comercial - 80% residencial)

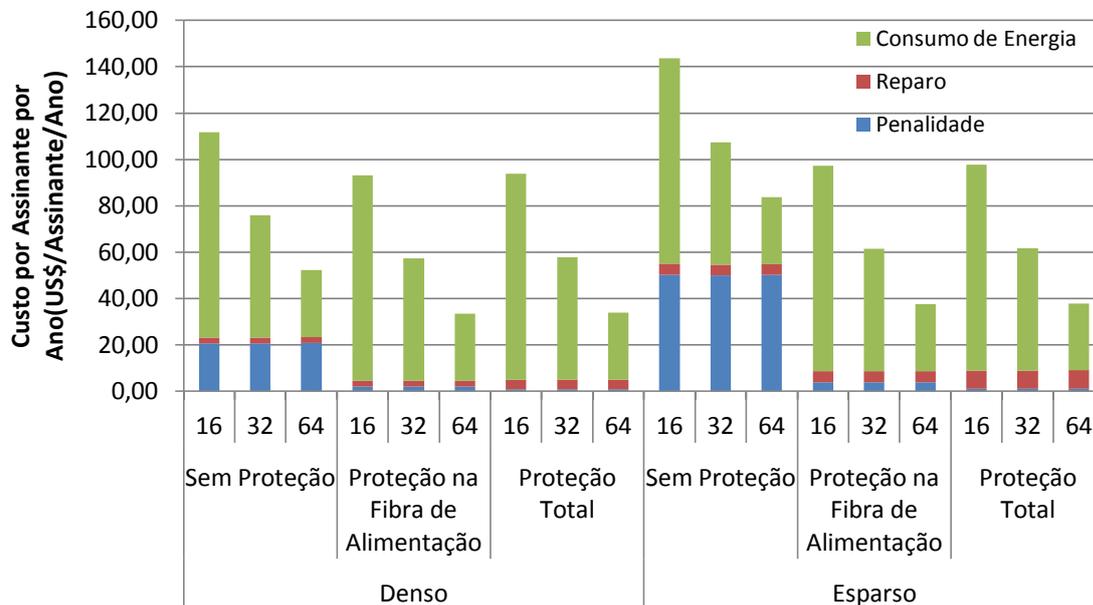


Figura 26 - OPEX (20% Comercial - 80% Residencial)

OPEX (50% comercial - 50% residencial)

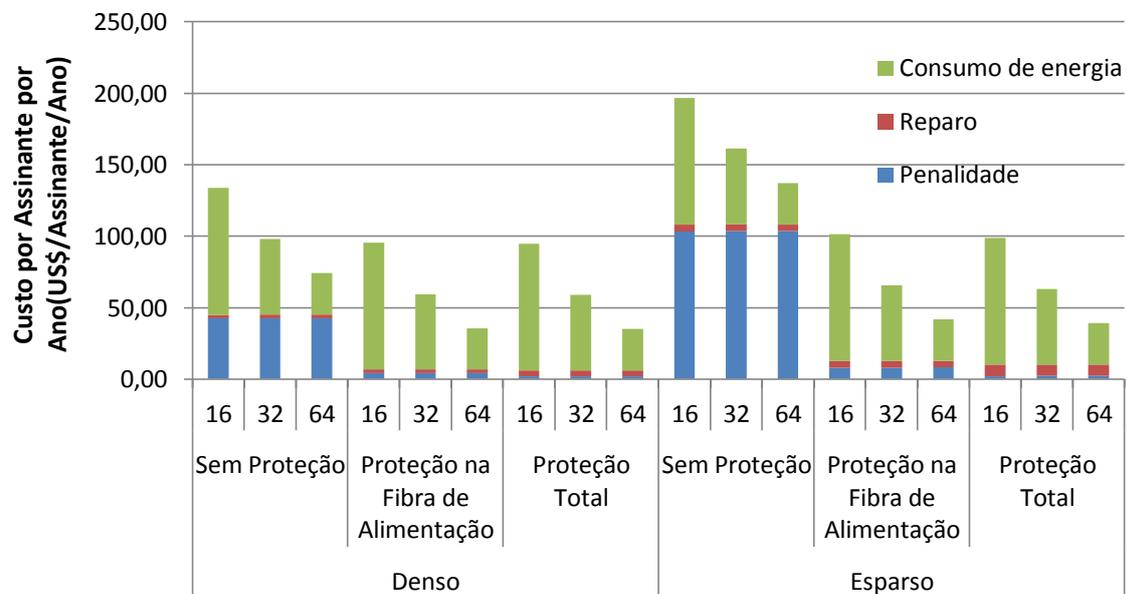


Figura 27 - OPEX (50% Comercial - 50% Residencial)

Ao contrário deste comportamento, o custo de reparo diminui conforme a taxa de divisão do *splitter* aumenta, pois a quantidade de equipamentos na rede é menor.

3.3. Análise de Sensibilidade

Esta subseção revela o impacto causado em conclusões gerais pela variação dos elementos mais caros em termos de CAPEX e OPEX. Para CAPEX o custo de abertura de *trenchs* foi variado de 7000US\$ até 400000US\$[10], enquanto que para OPEX a taxa de penalidade comercial foi variada em uma faixa de 50%, ou seja, 100US\$[4] até 1200US\$[38].

A Figura 28 apresenta o investimento adicional na abertura de *trenchs* para migrar de uma topologia Sem Proteção para a topologia de Proteção na Fibra de Alimentação em cenário denso considerando uma população de 80% de usuários comerciais e 20% de usuários residenciais e a taxa de divisão do *splitter* de 1:32. Os resultados são apresentados comparando o CAPEX adicional. Observa-se que o investimento suplementar na proteção retorna através da redução do OPEX ao longo dos anos. Além disso, para o investimento com *trenchs* de 7000US\$/Km até 332000US\$/Km e penalidade comercial de 100US\$/hora, o retorno é de 100%, e considerando o custo de abertura de *trenchs* igual a 400000US\$/Km a relação entre o investimento em CAPEX adicional contra economia em OPEX representa um investimento extra de aproximadamente 12US\$/usuário/ano para garantir proteção e melhorar a confiabilidade da rede. No caso de Proteção Total as economias em OPEX não compensam os investimentos em CAPEX.

Proteção na Fibra de Alimentação: Custos de Trenching (CAPEX) vs Economia Alcançada (OPEX) - Cenário Denso

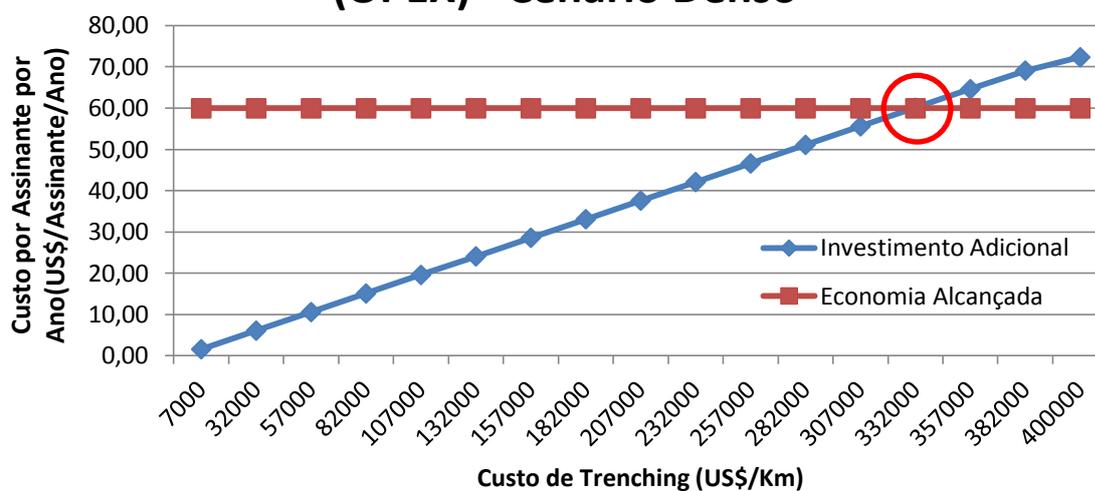


Figura 28 - Análise de Sensibilidade variando o custo de trenching para cenários densos

A Figura 29 demonstra a variação de custos de penalidade comercial versus o OPEX para as topologias Sem Proteção, Proteção na Fibra de Alimentação, e Proteção nas Fibras de Alimentação e Distribuição em um cenário denso, com 80% de usuários comerciais e 20% de usuários residenciais, e taxa de divisão do *splitter* de 1:32. O custo de penalidade comercial é variada em um intervalo de 100US\$/hora até 1200US\$/hora. A partir da figura citada, torna-se evidente que a topologia Sem Proteção não é confiável, o que resulta em perdas significativas de lucro. Por exemplo, a taxa de penalidade comercial de 1200US\$/usuário/ano aumenta os custos operacionais em aproximadamente 90%. Além disso, observa-se que a proteção reduz drasticamente os custos de OPEX em comparação com a topologia Sem proteção.

A partir desta análise de sensibilidade fica claro que a proteção na Fibra de Alimentação oferece a melhor relação entre CAPEX e OPEX. Além disso, observa-se que para qualquer valor de custo de penalidade comercial, que é representado pelo eixo x na Figura 20, a topologia Sem Proteção não é uma opção atrativa economicamente. Por exemplo, para x igual a 3000US\$/hora, o custo por usuário por ano para as três topologias analisadas são, respectivamente, 1.940,56US\$, 191,05US\$ e 25,72US\$ por usuário por ano.

Custos Associados a Falhas (Penalidade e Reparo) VS Variação do Custo de Penalidade Comercial (US\$/hora) - Cenário Denso

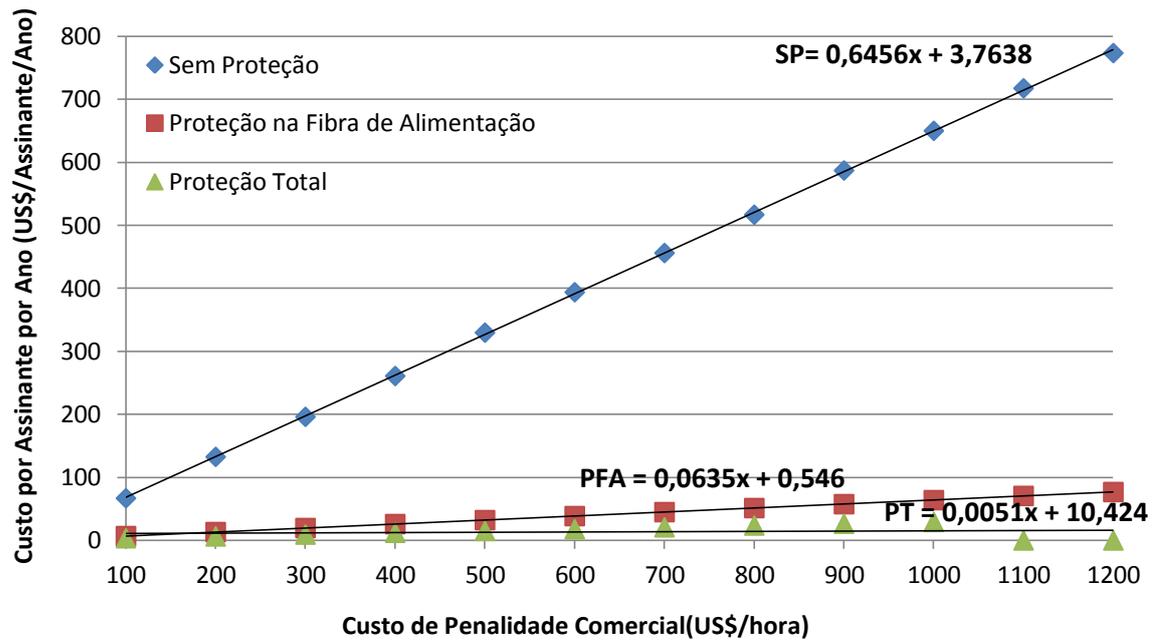


Figura 29 - Análise de Sensibilidade variando o custo de penalidade

7. Conclusão

O trabalho propôs uma comparação de três diferentes topologias de PON: Sem Proteção, com Proteção no Nível de Alimentação e com Proteção no Nível de Alimentação e Distribuição, um conjunto de modelos baseados no modelo de Markov e Monte Carlo para representação das falhas de operação da infraestrutura, variando o cenário e modelos técnico econômicos baseados no CAPEX e OPEX objetivando avaliar qual esquema de proteção possui maior viabilidade econômica de implantação.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi encontrar a topologia de PON mais custo-eficiente em termos de confiabilidade. A avaliação foi realizada através de uma análise do Custo Total por Assinante (TCO), baseados nos custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX) da rede através dos modelos propostos em diferentes cenários, variando a densidade populacional, o perfil de usuários e a taxa de divisão do *splitter*.

Através dos resultados obtidos pôde-se perceber de que forma a variação destes parâmetros afeta diretamente os custos. Por exemplo, em cenários esparsos, a maior distância entre ONUs aumenta consideravelmente o custo de *trenching*. Já o perfil de usuários afeta o custo de penalidade, visto que para usuários comerciais o valor da penalidade é maior. A taxa de divisão do *splitter* influencia na quantidade de equipamentos pois uma taxa menor culminará em maior quantidade de equipamentos necessários na rede, o que faz com que aumente o custo de aquisição de equipamentos no CAPEX e aumente o consumo de energia afetando o OPEX, mas por outro lado, diminui o custo de penalidade pois uma falha no *splitter* afetará menos clientes.

Outras variáveis como a quantidade de equipes de trabalho, ou variação do salário da equipe podem influenciar nos custos, porém não foram levados em consideração neste trabalho.

Os resultados apresentados mostram que a topologia com Proteção na Fibra de Alimentação é a melhor opção a ser implantada considerando CAPEX e OPEX. Além disso, mostram também que os custos de *trenching* e de penalidades comerciais são os custos de maior impacto nos custos de implantação e operação.

A topologia de Proteção nas Fibras de Alimentação e Distribuição, apesar ser uma boa opção para garantir a disponibilidade da rede, se torna inviável pois o custo de CAPEX é muito elevado não sendo compensado pela economia alcançada.

Uma análise de sensibilidade dos resultados mostrou que dependendo do custo de *trench*, por exemplo, menor ou igual a 357000US\$/Km, o investimento em fibra de alimentação de proteção pode ser 100% retornável através do OPEX em 20 anos. Adicionalmente, nota-se que o custo de penalidade comercial torna a topologia Sem Proteção uma opção não atrativa economicamente para cidades com regulamentação rigorosa e alto custo de penalidade.

Acredita-se que o modelo proposto seja uma ferramenta importante para automatizar processos de análise e facilitar o processo de decisão das operadoras. Além disso, como são propostos modelos genéricos, eles podem servir para avaliar vários cenários diferentes, inclusive cenários mais complexos que gastariam muito tempo em uma análise manual.

Além disso, a utilização do modelo fornecerá uma avaliação mais precisa dos resultados tornando o processo de tomada de decisão menos suscetível a erros.

Outro ponto positivo deste estudo é a abertura de várias frentes para trabalhos futuros. Dentre estes, futuramente deseja-se aplicar os modelos matemáticos para diferentes topologias baseadas em fibra, como por exemplo, Fiber-to-the-Building e Fiber-to-the-Cabinet. Além disso, almeja-se a aplicação de tecnologias baseadas em cobre na última milha e microondas a fim de verificar o impacto de CAPEX e OPEX.

Referências

- [1] A. Richard, M. Lopes, and S. Farias, “An Energy Efficiency Assessment for Indoor Small Cells Using Copper-Based Backhaul,” *Int. J. Futur. Comput. Commun.*, vol. 4, no. 3, 2015.
- [2] A. Richard, M. Lopes, and S. Farias, “Evaluation of the Energy Impact on Indoor Small Cells and Backhaul,” *Int. J. Futur. Comput. Commun.*, vol. 4, no. 3, 2015.
- [3] S. Tombaz, P. Monti, F. Farias, M. Fiorani, L. Wosinska, and J. Zander, “Is Backhaul Becoming a Bottleneck for Green Wireless Access Networks ?,” *IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 4029–4035, 2014.
- [4] A. Fernandez and N. Stol, “OPEX Simulation Study of PONs Based on Network Geometric and Markov Cost Models,” pp. 19–22, 2014.
- [5] Á. Fernández and N. Stol, “CAPEX and OPEX simulation study of cost-efficient protection mechanisms in passive optical networks,” *Opt. Switch. Netw.*, vol. 17, pp. 14–24, 2015.
- [6] C. Mas Machuca, J. Chen, and L. Wosinska, “PON protection architectures achieving total cost reduction,” *2010 Asia Commun. Photonics Conf. Exhib. ACP 2010*, pp. 707–708, 2010.
- [7] A. Dixit, M. Mahloo, B. Lannoo, J. Chen, L. Wosinska, and D. Colle, “Protection strategies for Next Generation Passive Optical Networks -2,” pp. 19–22, 2014.
- [8] C. Mas Machuca, J. Chen, and L. Wosinska, “Total cost reduction achieved by offering protection in PON architectures,” *Telecommun. Syst.*, vol. 54, no. 2, pp. 129–135, 2013.
- [9] N. Ghazisaidi, M. Scheutzow, and M. Maier, “Survivability analysis of next-generation passive optical networks and fiber-wireless access networks,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 60, no. 2, pp. 479–492, 2011.
- [10] J. Chen and L. Wosinska, “Analysis of protection schemes in PON compatible with smooth migration from TDM-PON to hybrid WDM/TDM-PON,” *J. Opt. Netw.*, vol. 6, no. 5, pp. 514–526, 2007.
- [11] Tsan-Kim Chan, Chun-Kit Chan, Lian-Kuan Chen, and F. Tong, “A self-protected architecture for wavelength-division-multiplexed passive optical networks,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 15, no. 11, pp. 1660–1662, Nov.

2003.

- [12] N. S. Ahsan, M. S. Salleh, and F. Abdullah, "Migration Strategy From Legacy PON System Into Next Generation PON System For Low CAPEX Telco Deployment in Malaysia," *J. Teknol.*, vol. 3, pp. 31–42, 2014.
- [13] S. Kaneko, T. Yoshida, S. Kimura, K. Suzuki, and A. Otaka, "Fast OLT-Protection Method Based on Normal MPCP and Backup Wavelength Pre-assignment on WDM / TDM-PONs [Invited]," vol. 7, no. 11, pp. 29–37, 2015.
- [14] K. Casier, "Techno-economics of FTTH deployment in the presence of competition," *Fac. Ingenieurswetenschappen Vakgr. Informatietechnologie*, vol. PhD, 2010.
- [15] G. J. Anders and A. M. Leite Da Silva, "Cost related reliability measures for power system equipment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 654–660, 2000.
- [16] "FSAN Full Service Access Network." [Online]. Available: <https://www.fsan.org/>. [Accessed: 05-Aug-2015].
- [17] G. Keiser, *FTTX Concepts and Applications*. 2006.
- [18] J. M. Benzinho, "Avaliação Económica de Redes FTTH em Diferentes Cenários Geográficos," Universidade de Aveiro, 2011.
- [19] N. Ansari and J. Zhang, *Media Access Control and Resource Allocation - For Next Generation Passive Optical Networks*. Springer New York, 2013.
- [20] K. M. Sivalingam and S. Subramaniam, *Optical WDM Networks: Principles and Practice*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [21] K. Asaka and J. Kani, "Standardization Trends for Next-Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON2)," 2015.
- [22] J. Kunstler, "TWDM PON Is on the Horizon Facilitating fast FTTx network monetization," 2014.
- [23] ITU-T, "Recommendation ITU-T G.987: 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms," 2012.

- [24] G. Keiser, *FTTX Concepts and Applications*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [25] P. Takeuti, “Projeto E Dimensionamento De Redes Ópticas Passivas (PONs),” 2005.
- [26] C. F. Lam, *Passive Optical Networks Principles and Practices*. 2007.
- [27] ITU-T, “Recommendation ITU-T G.983.1: Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks (PON),” 2005.
- [28] D. A. Levin, Y. Peres, and E. L. Wilmer, *Markov Chains and Mixing Times*. American Mathematical Society, 2009.
- [29] R. Melo, A. Santos, M. Nogueira, and D. Mehdi, “Modelagem e Projeto de Redes sem Fio Heterogêneas Resilientes e Sobreviventes,” in *31^o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC 2013*, 2013, pp. 1–50.
- [30] L. A. Barreto, “Modelagem de Sistemas Computacionais utilizando o formalismo matemático de Cadeias de Markov,” Universidade Federal de Pernambuco, 2009.
- [31] S. A. De Souza, “Uma Medida de Contribuição Local Para Sequências de Processos Fora de Regime Permanente,” Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- [32] R. Matos, J. Araújo, F. Vieira, and P. Maciel, “Planejamento de capacidade de sistemas através de Cadeias de Markov,” in *Escola Regional de Informática dos Estados do Ceará, Maranhão e Piauí*, 2011, pp. 32–53.
- [33] J. R. Norris, *Markov Chains*. Press Syndicate Of The University Of Cambridge, 1997.
- [34] W. R. Gilks, “Markov Chain Monte Carlo,” in *Encyclopedia of Biostatistics*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [35] P. Goudarzi, “Stochastic total cost of ownership optimization for video streaming services,” *Telemat. Informatics*, vol. 31, no. 1, pp. 79–90, Feb. 2014.
- [36] “U.S. Energy Information Administration (EIA),” 2015. [Online]. Available: http://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.cfm?t=epmt_5_6_a.

[Accessed: 23-Nov-2015].

- [37] A. L. P. Fernandes, F. S. Farias, I. M. Santos, and J. C. W. A. Costa, “Economic Analysis on Passive Optical Networks Using Markov Chain and Monte Carlo Simulation,” in *XXXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT2015*, 2015.
- [38] J. Chen, L. Wosinska, C. M. MacHuca, and M. Jaeger, “Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 2, pp. 56–65, 2010.