



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Avaliação Técnica e Econômica de Esquemas de Proteção para Redes Óticas Passivas

André Lucas Pinho Fernandes

Belém-Pa
Fevereiro, 2018

André Lucas Pinho Fernandes

**Avaliação Técnica e Econômica de Esquemas de
Proteção para Redes Óticas Passivas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Fabricio de Souza Farias

Coorientador: Roberto Menezes Rodrigues

Belém-Pa
Fevereiro, 2018

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

- F363a Fernandes, André Lucas Pinho
 Avaliação Técnica e Econômica de Esquemas de Proteção para Redes Óticas Passivas / André Lucas Pinho Fernandes. - 2018.
 71 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
 Orientação: Prof. Dr. Fabricio de Souza Farias
 Coorientação: Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues.
1. PON. 2. Proteção. 3. Confiabilidade. 4. Markov. 5. TCO. I. Farias, Fabricio de Souza, *orient.* II.
 Título
-

CDD 621.3811

ITEC - INSTITUTO DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ
BELÉM - PARÁ

Avaliação Técnica e Econômica de Esquemas de Proteção para Redes Óticas Passivas

Este trabalho foi julgado em 05/02 adequado para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, e aprovado na sua forma final pela banca examinadora que atribuiu o conceito excelente.

APROVADO EM: 05/02/ 2018

BANCA EXAMINADORA:

Fabricio Farias

Prof. Dr. Fabricio de Souza Farias
(Orientador - CUNTINS/UFPA)

Roberto Menezes Rodrigues

Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues
(Coorientador - ITEC/UFPA)

João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
(MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA - ITEC/UFPA)

Miércio Cardoso De Alcântara Neto

Prof. Dr. Miércio Cardoso De Alcântara Neto
(MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA - ITEC/UFPA)

Dedico a Deus e minha avó materna.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus.

Agradeço aos meus pais, Ana e Antônio Fernandes, minha irmã, Amanda Fernandes, e minha avó materna, Maria Pinho, por sempre acreditarem no meu futuro, nunca deixando de me incentivar e apoiar.

Agradeço a minha namorada, Aline Ohashi, pelo apoio e dedicação.

Agradeço ao professor Dr. Fabricio Farias, meu amigo e orientador, que mesmo quando me perdi colocou-me no caminho certo.

Agradeço ao professor Dr. João Weyl por me dar uma oportunidade no mundo da pesquisa.

Agradeço a Universidade Federal do Pará (UFPA), em especial ao instituto de tecnologia (ITEC), pelos cinco incríveis anos de meu curso.

Agradeço aos amigos e colegas de trabalho, em especial a Alison Ribeiro, Daynara Dias, Daniel Levy, Kárytha Nascimento, Marx Miguel, Moisés Felipe, Reginaldo Santos, Waldeir Brito e Wederson Medeiros.

Agradeço às instituições CNPq, CAPES, Fapespa, Vale S.A. e UFPA pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

“ Algo só é impossível até que alguém duvide e prove o contrário. ”
(Albert Einstein)

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Trabalhos Relacionados	2
1.2	Objetivos	6
1.2.1	Objetivo Geral	6
1.2.2	Objetivos Específicos	7
1.3	Organização	7
2	Arquitetura e Propriedades de PON e Proteções	8
2.1	Redes Passivas Óticas (PONs)	8
2.1.1	Redes de Acesso Óticas	8
2.1.2	Estrutura de PONs	10
2.2	Proteção de Dutos de Fibra	11
2.2.1	Nível de Alimentação	11
2.2.2	Nível de Distribuição	12
2.3	Proteção do OLT	13
2.4	Proteção Usando Redes Sem Fio	14
2.5	<i>Service Level Agreement</i> (SLA)	14
2.6	Fator de Impacto	15
2.7	Redes Alugadas e Fator de Sobrecarga	15
3	Modelos Matemáticos	16
3.1	Modelo de Dimensionamento de Rede (MDR)	16
3.1.1	A Quantidade de Equipamentos na Rede	18
3.1.2	A Distância dos Equipamentos na Rede em relação ao CO	19
3.1.3	A interconexão dos equipamentos e os clientes atendidos	23
3.2	Modelo de Custos de Operação de Rede (MCOR)	25
3.3	Modelo de Custos da Implantação de Rede (MCIR)	30
4	Simulador	32
5	Resultados	37
5.1	Caso de Estudo	37
5.2	Resultados	39
5.2.1	Comparativo: Custo Total Proprietário	40
5.2.2	Comparativo: Custo de Instalação da Rede (CAPEX)	40
5.2.3	Comparativo: Custo de Operação da Rede (OPEX)	43
5.3	Análises de Sensibilidade	47

5.3.1	Variação do Custo de Penalidade	47
5.3.2	Proteção no Nível de Alimentação, Variação do Custo de instalação de Dutos de Fibra	48
5.3.3	Proteção do OLT, Variação da Taxa de Divisão	49
5.3.4	Proteção Alugada, Variação do Fator de Sobrecarga	50
5.3.5	Proteção Sem Fio, Proprietária vs Alugada, Variação da Área de Cobertura	51
6	Conclusões	53
	REFERÊNCIAS	55

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Arquiteturas de proteção apresentadas em Wosinska et al. (2009).	2
Figura 2	Arquitetura de proteção em anel proposta em Machuca, Chen e Wosinska (2010) para diversos cenários de densidade.	3
Figura 3	Arquiteturas de proteção apresentadas em Dixit et al. (2014).	4
Figura 4	Arquiteturas de proteção apresentadas em Fernandez e Stol (2015).	5
Figura 5	Tipos de redes de acesso baseadas em fibra.	9
Figura 6	Topologia de redes de acesso baseadas em fibra.	9
Figura 7	Topologia básica de uma rede ótica passiva.	10
Figura 8	Rede ótica passiva com subníveis de alimentação e distribuição.	11
Figura 9	Proteção no nível de alimentação.	12
Figura 10	Proteção no nível de distribuição.	12
Figura 11	Proteção do OLT.	13
Figura 12	Proteção usando redes sem fio.	14
Figura 13	Representação do modelo de ruas manhattan simples.	16
Figura 14	Representação do MDR para uma topologia PON sem proteção.	17
Figura 15	Representação de uma quadra com proteção no nível de distribuição.	17
Figura 16	Representação das posições das quadras no cenário (à esquerda) e dos edifícios na quadra (à direita) para quando $n = 4$ e $N = 4$	20
Figura 17	Representação das posições das seções de fibra de alimentação no cenário (à esquerda) e das seções de fibra de distribuição na quadra (à direita) para quando $n = 4$ e $N = 4$	21
Figura 18	Representação das posições das seções de fibra de alimentação de proteção no cenário (à esquerda) e das das seções de fibra de distribuição de proteção na quadra (à direita) para quando $n = 4$ e $N = 4$	22
Figura 19	Representação do cenário em forma de matriz quando $n = 4$ e $N = 4$	24
Figura 20	Pseudo-código para a disposição das células no cenário	25
Figura 21	Árvore de conexões entre os equipamentos considerando as diversas topologias.	26
Figura 22	Representação da metodologia para a determinação de A_i e P_i para equipamentos diferentes de ONUs.	27
Figura 23	Cadeia de Markov descrevendo os estados de um sistema de três equipamentos distintos	28

Figura 24	Exemplo de cadeia criada para a simulação de uma rede com três equipamentos distintos.	32
Figura 25	Fluxograma do processo de simulação que obtém os diversos t_i	33
Figura 26	Interface gráfica: visualização inicial	34
Figura 27	Interface gráfica: arquitetura selecionada (PON com proteção no nível de alimentação e de redes sem fio).	34
Figura 28	Opções de construção de arquitetura para cada seção de rede.	35
Figura 29	Interface gráfica: definição de cenário e custos.	35
Figura 30	Interface gráfica: sistema de alteração, importação e exportação de taxas de falhas e custo de equipamentos.	35
Figura 31	Interface gráfica: apresentação de resultados.	36
Figura 32	Arquiteturas PONs analisadas,(a) desprotegida, (b) protegida no nível de alimentação,(c) protegida no OLT e nível de alimentação,(d) protegida no <i>OLT</i> e níveis de alimentação e distribuição, (e) protegida por uma rede sem fio proprietária, (e) protegida por uma rede sem fio proprietária, (g) protegida no nível de alimentação e por uma rede sem fio alugada.	38
Figura 33	Custo total proprietário (TCO).	40
Figura 34	Custos de instalação (CAPEX).	41
Figura 35	Diagrama de participação dos custos que compõem o CAPEX.	42
Figura 36	Custos operacionais (OPEX).	44
Figura 37	Diagrama de participação dos custos que compõem o OPEX.	45
Figura 38	Análise de sensibilidade da participação de gastos no TCO para a arquitetura (a) variando-se o custo de penalidade comercial.	47
Figura 39	Análise de sensibilidade para arquitetura (b) envolvendo custos de instalação de dutos de fibra e custo de penalidade comercial.	48
Figura 40	Análise de sensibilidade do custo salvo pela proteção do OLT considerando o número de saídas do elemento divisor de sinal.	49
Figura 41	Análise de sensibilidade dos custos de aluguel de redes sem fio de acordo com o fator de sobrecarga.	50
Figura 42	Análise de sensibilidade: custo de aluguel de espectro vs aluguel de infraestrutura, arquitetura (e) vs (f)	51

Lista de tabelas

Tabela 1	Parâmetros de construção do cenário (MACHUCA et al., 2011)(WEL- DON; ZANE, 2003)(FERNANDEZ; STOL, 2015)(FARIAS et al., 2013).	37
Tabela 2	Parâmetros de custo do cenário (MACHUCA et al., 2011)(WELDON; ZANE, 2003)(FERNANDEZ; STOL, 2015)(CHEN et al., 2010).	39
Tabela 3	Parâmetros de equipamentos (MACHUCA; CHEN; WOSINSKA, 2012)(OASE, 2011)(CASIER, 2009)(CHEN; WOSINSKA, 2007)(CHEN et al., 2010)(WEL- DON; ZANE, 2003).	39

Lista de abreviaturas e siglas

AON	<i>Active Optical Network.</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure.</i>
CO	<i>Central Office.</i>
CTMC	<i>Continuous Time Markov Chain.</i>
FiWi	<i>Fiber-Wireless.</i>
FTTB	<i>Fiber-To-The-Building.</i>
FTTC	<i>Fiber-To-The-Curb.</i>
FTTH	<i>Fiber-To-The-Home.</i>
FTTX	<i>Fiber-To-The-X.</i>
GPON	<i>Gigabit-Capable Passive Optical Network.</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector.</i>
MCIR	Modelo de Custos de Instalação de Rede.
MCMC	<i>Markov Chain Monte Carlo.</i>
MCOR	Modelo de Custos de Operação de Rede.
MDR	Modelo de Dimensionamento de Rede.
MW	<i>Microwave.</i>
NA	Nível de Alimentação.
ND	Nível de Distribuição.
NG-PON2	<i>Next-Generation Passive Optical Network 2.</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal.</i>
ONU	<i>Optical Network Unit.</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure.</i>
P2P	<i>Point-To-Point.</i>

PG	Placa de Gerenciamento.
PON	<i>Passive Optical Network.</i>
RN	<i>Rede Metropolitana.</i>
RN	<i>Remote Node.</i>
SiCRds	Simulador de Custos de Rede.
SLA	<i>Service Level Agreement.</i>
TCO	<i>Total Cost Of Ownership.</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing.</i>
TWDM	<i>Time and Wavelength Division Multiplexing.</i>
UC	Unidade de Custo.
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing.</i>
XGPON	<i>Ten-Gigabit-Capable Passive Optical Network.</i>

RESUMO

Nos últimos anos, uma gama de novas aplicações se tornaram parte do cotidiano dos usuários da Internet. Dessa forma, a demanda por tráfego e disponibilidade tem aumentado, principalmente por parte de clientes que fazem uso da Internet como ferramenta de comércio eletrônico e marketing. Além disso, espera-se que no futuro essas demandas só venham a se fortalecer. Nesse contexto, a rede ótica passiva (PON-*passive optical network*) surge como solução para o atendimento das expectativas atuais e futuras dos clientes. A PON compartilha fibras entre usuários, fornecendo grande capacidade com um custo reduzido. Entretanto, o compartilhamento de fibras tem como consequência a diminuição de confiabilidade da rede, o que pode resultar no aumento de consequências monetárias por indisponibilidade de serviço. Dessa maneira, arquiteturas de proteção que visem aumentar a confiabilidade de redes PON podem ser necessárias para a garantia de sua viabilidade econômica. Neste trabalho estuda-se o efeito técnico e econômico da instalação de proteções em redes PON, comparando-se diferentes esquemas de proteção em diversos cenários de densidade. Para viabilizar a análise econômica desenvolveu-se um modelo de custos baseado em cadeias de Markov. Para solucionar o modelo proposto foi desenvolvido um simulador de custos de rede (SiCRds) baseado no método de *Markov chain Monte Carlo* (MCMC). Foram simulados sete arquiteturas PON: básica (desprotegida), protegida no nível de alimentação, protegida no nível de alimentação e no terminal de linha ótica (OLT-*optical line terminal*), protegida no OLT e em ambos os níveis (alimentação e distribuição), protegida por rede sem fio proprietária, protegida por rede sem fio alugada, protegida no nível de alimentação e por rede sem fio alugada, para três casos de densidade: 576 Ass./km² (suburbano), 1024 Ass./km² (urbano) e 2048 Ass./km² (ultra urbano). Os resultados indicam que as melhores arquiteturas, em termos de custo, são as baseadas em proteção sem fio. Além disso, este trabalho apresenta um conjunto de análises de sensibilidade as quais visam avaliar elementos de redes PON que podem causar forte influência sobre os custos totais da rede, como por exemplo, custo de dutos de fibra, penalidade comercial e fator de sobrecarga.

Palavras-chave: CAPEX, confiabilidade, Markov, MCMC, OPEX, PON, proteção, TCO.

Abstract

In recent years, new applications have become part of the Internet users daily life. Thus, the traffic and availability demands has increased, especially in the case of customers who utilize Internet as a tool for e-commerce and marketing. In addition, for the future it's expected the strengthening of the demands. In this context, passive optical network (PON) appears as a solution to meet current and future customer expectations. PON shares fiber among users, delivering large capacity with reduced costs. However, fiber-infrastructure sharing results in lower network reliability, which may result in service unavailability and penalties expenses. In this way, protection architectures that increase reliability of PONs may be necessary to guarantee their economic viability. In this work it is presented the techno-economic effects caused by the installation of protections in PON networks. For this purpose, it is compared different protection schemes considering different density scenarios. In order to make an economic analysis, a cost model based on Markov chain was proposed. In order to solve the model a network cost simulator (SiCRds) based on Monte Carlo Markov chain (MCMC) method was developed. Seven PON architectures were simulated: basic (unprotected), protected in feeder level, protected in OLT and feeder level, protected at OLT and at both levels (feeder and distribution), protected by proprietary wireless network, protected by rented wireless network and protected in feeder level and by rented wireless network, for three cases of user density under investigation: 576 Users/km² (suburban), 1024 Users/km² (urban) and 2048 Users/km² (ultra urban). The results show that the best architectures in terms of cost are the ones based on wireless protection. In addition, to evaluate some elements of PON networks a set of sensitivity analyzes were presented, where the analyzed elements may cause a strong influence on network total costs, such as fiber trench cost, commercial penalty and overage factor.

Keywords: CAPEX, Markov, MCMC, OPEX, PON, protection, reability, TCO.

1 Introdução

Nos últimos anos, a dependência da sociedade e população em relação a Internet tem aumentado. Hoje, o acesso a rede mundial de computadores permite o uso de diferentes serviços e aplicações para a realização de inúmeras ações que já fazem parte do cotidiano de pessoas, empresas ou governos, como por exemplo: *streaming* de vídeo, comunicação instantânea por mensagens, vídeo ou voz, acesso a conteúdos e serviços disponibilizados em redes sociais, armazenamento em nuvem, transações bancárias ou entre empresas, comércio eletrônico, entre outros.

Os serviços deixaram de ser somente facilitadores para tornarem-se elementos essenciais aos usuários e até mesmo para a saúde financeira de muitas empresas. Além disso, diversos empreendedores já perceberam o potencial econômico advindo do uso da Internet como ferramenta de comércio eletrônico e marketing. Para estes clientes e seus serviços a ausência de conexão com a Internet é economicamente impraticável, pois gera prejuízos monetários e de imagem.

Para atender a exigente requisição por disponibilidade de serviço, assim como, a crescente demanda de tráfego, as operadoras investem em planejamento, dimensionamento e estruturação de redes baseadas em fibra óptica. Dentre as redes baseadas em fibra, a rede óptica passiva (PON-*passive optical network*) tem sido considerada como uma das melhores alternativas para redes de acesso, já que suporta elevada taxa de transmissão e possui custos reduzidos em comparação a outras arquiteturas com enlaces de fibra. Além disso, as despesas de Redes PONs são menores que outras arquiteturas de fibra, como rede óptica ativa (AON-*active optical network*) ou ponto-a-ponto (P2P), devido ao compartilhamento de fibras e equipamentos entre usuários e a utilização de equipamentos não consumidores de energia elétrica (AGRAWAL, 2011).

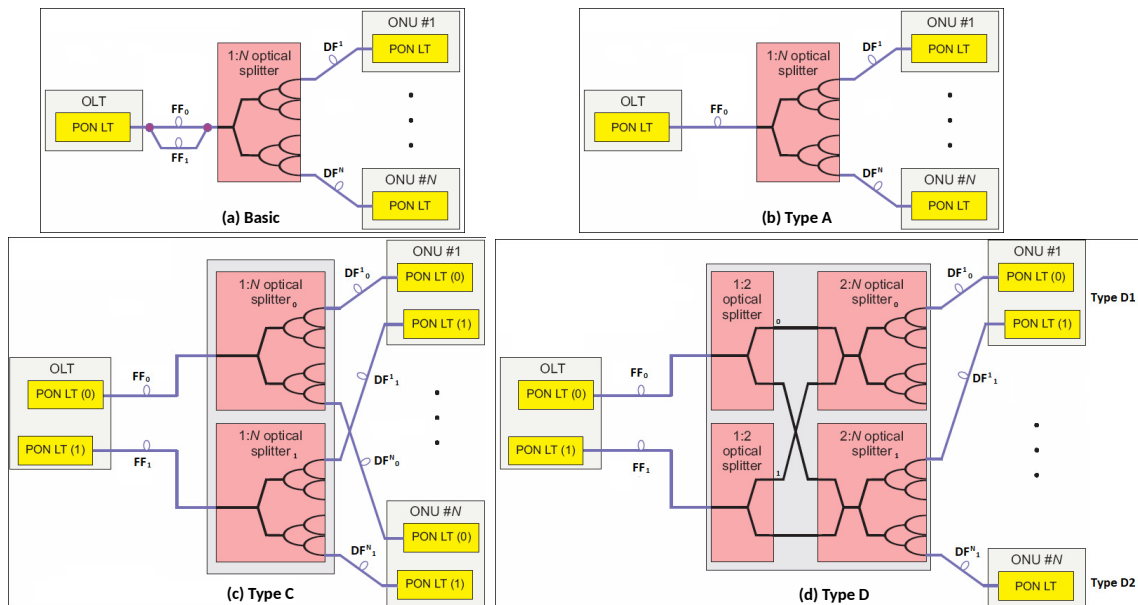
Embora a PON tenha suas vantagens, essa solução não é naturalmente capaz de evitar quedas de serviço causadas por diferentes motivos, como falha de equipamentos ou quebra/rompimento do enlace de fibra. Além disso, nessa arquitetura um pequeno conjunto de equipamentos é responsável por fornecer conexão e serviço a um grande número de clientes, sendo seu funcionamento essencial para a operação adequada da rede, como exemplo cita-se as fibras de alimentação. Desta forma, a PON é incapaz de evitar multas e penalidades provenientes da falta ou queda do serviço de Internet oferecido, sendo até mesmo passível de graves casos de indisponibilidade. Uma alternativa para esta problemática é a utilização de soluções baseadas em esquemas de proteção da rede, os quais entram em operação no caso de falha do serviço primário.

1.1 Trabalhos Relacionados

Essa seção apresenta um conjunto de trabalhos desenvolvidos nos últimos anos que tratam sobre proteção em redes PON.

Wosinska et al. (2009) apresenta uma comparação econômica entre diferentes esquemas de proteção para redes PON. Foram analisadas oito arquiteturas, sendo quatro delas mostradas pela Figura 1, as arquiteturas restantes são semelhantes as quatro apresentadas pela figura anteriormente citada, porém interligando pares de unidade de rede ótica (ONU-*optical network unit*) adjacentes entre si (dois clientes vizinhos tem as ONUs interligadas). Além disso, levou-se em conta as tecnologias de acesso PON: TDM (*Time-Division Multiplexing*), WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexed*). Para comparar economicamente as arquiteturas, os autores desenvolveram um modelo matemático baseado no custo total de propriedade (TCO-*Total cost of ownership*), que é a soma de despesas operacionais (OPEX -*Operation Expenditures*) e despesas de capital (CAPEX-*Capital Expenditures*). O estudo conclui que não se pode negligenciar a contribuição do OPEX nas despesas totais e que o desenvolvimento de novos esquemas de proteção deve considerar os custos de ambos, CAPEX e OPEX. Apesar do estudo conter análise de CAPEX, os custos de instalação de fibra foram desconsiderados, segundo os autores, a remoção ocorreu para evitar o mascaramento dos efeitos de outros custos sobre o TCO.

Figura 1 – Arquiteturas de proteção apresentadas em Wosinska et al. (2009).

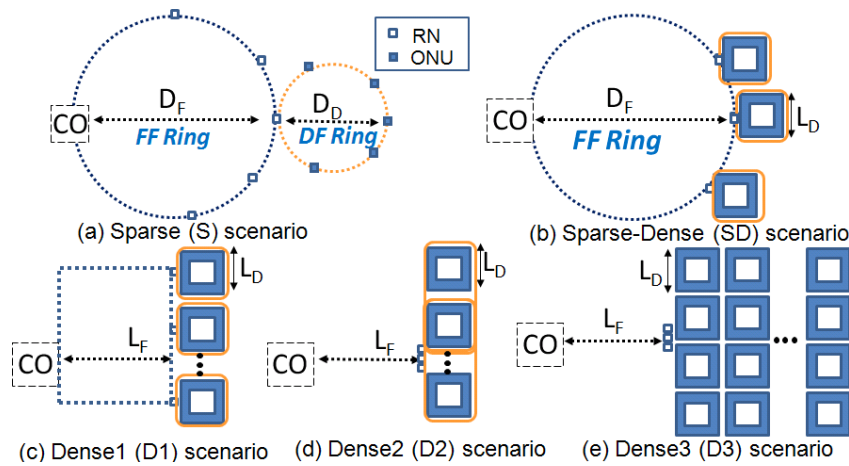


Fonte: (WOSINSKA et al., 2009).

Machuca, Chen e Wosinska (2010) propoaram e avaliaram um esquema de proteção para TDM PON. A proposta consiste na instalação de um anel para os dutos de fibra de alimentação e distribuição, como pode ser visto na Figura 2, a qual apresenta o esquema

em diferentes configurações de distribuição e densidade. Os autores usaram o mesmo modelo de custos de Wosinska et al. (2009), mas dessa vez consideraram o custo de instalação da fibra. Os resultados mostraram que o esquema proposto exigiu baixo investimento e obteve reduções significativas nos custos operacionais relacionados à penalidade por falha, provando que é possível atingir uma economia efetiva ao gastar com infraestrutura para reduzir a indisponibilidade de conexão. Apesar de fornecer uma análise completa em termos de TCO, o trabalho assume valores fixos para a distância dos clientes até o escritório central (CO-*central office*), o que não é realista. Além disso, a metodologia de custos do trabalho não tem como avaliar a interdependência entre as possíveis falhas.

Figura 2 – Arquitetura de proteção em anel proposta em Machuca, Chen e Wosinska (2010) para diversos cenários de densidade.



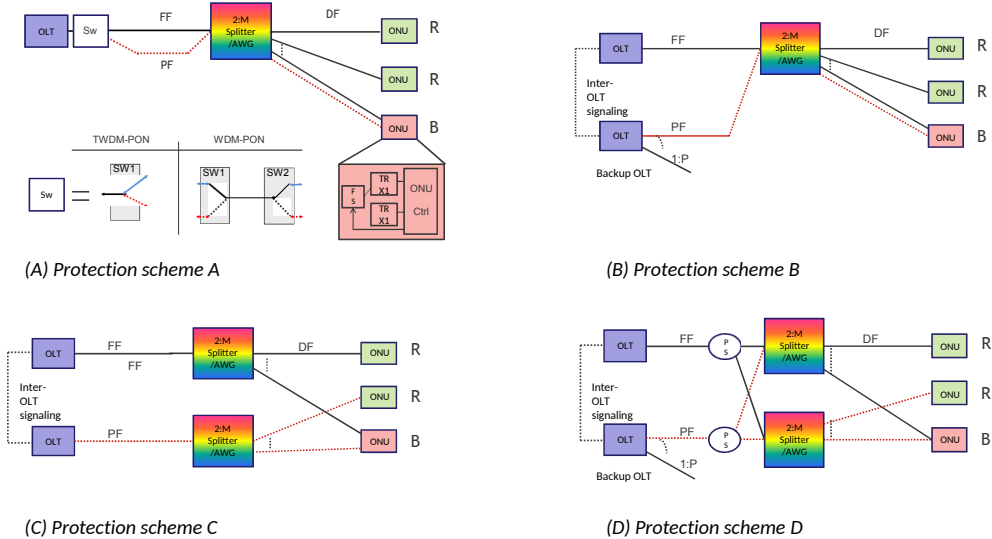
Fonte: (MACHUCA; CHEN; WOSINSKA, 2010).

Machuca et al. (2011) analisou os investimentos necessários para a proteção de diferentes tecnologias de acesso óptico (TDM PON, WDM PON, AON - *Active Optical Networks*, P2P - *Point-to-Point*). Foi usado o esquema de proteção e o modelo de custo apresentados em Machuca, Chen e Wosinska (2010), adicionando-se ao modelo despesas com consumo de energia elétrica, considerando distribuição ultra-densa de usuários (sendo 80% deles comerciais) e custos de penalidade por falha mais elevados. O trabalho conclui que proteger a rede reduz fortemente o TCO e que as melhores tecnologias em relação a custos para redes de acesso baseadas em fibra são redes PON TDM e WDM, devido ao compartilhamento de infraestrutura e menores despesas com energia. Analisando o estudo, nota-se que apesar de soluções PON usarem alguns elementos passivos, seria incorreto desconsiderar o consumo de energia na análise de tais redes.

Dixit et al. (2014) propôs e analisou diversos esquemas de proteção aplicados ao padrão NG-PON2 (*Next Generation Passive Optical Networks 2*), para as tecnologias WDM e TWDM. A Figura 3 mostra os esquemas de proteção abordados, onde os esquemas (a) e (b) fazem proteção de componentes estratégicos em PON, como por exemplo, fibra de alimentação e terminal de linha óptica (OLT-*optical line terminal*), enquanto que os

esquemas (c) e (d) realizam proteção até o usuário, garantindo cobertura no caso de falhas da maior parte dos equipamentos, protegendo sem distinção usuários comerciais e residenciais. A análise de custos é feita em relação ao TCO, que é obtido por meio de um modelo matemático possuindo um parâmetro que coloca peso adicional para as falhas mais graves na rede, o fator de impacto, pois uma falta simultânea de muitos clientes é mais danosa que a desconexão de um único cliente várias vezes no decorrer do tempo. O estudo mostra que a indisponibilidade e o número de falhas consideradas mais danosas são reduzidos de forma significativa ao utilizar-se qualquer dos esquemas de proteção, resultando em redução do TCO. Ademais, o trabalho conclui que as arquiteturas de proteção conseguem melhorar o desempenho econômico do sistema mesmo para baixos custos de penalidade.

Figura 3 – Arquiteturas de proteção apresentadas em Dixit et al. (2014).

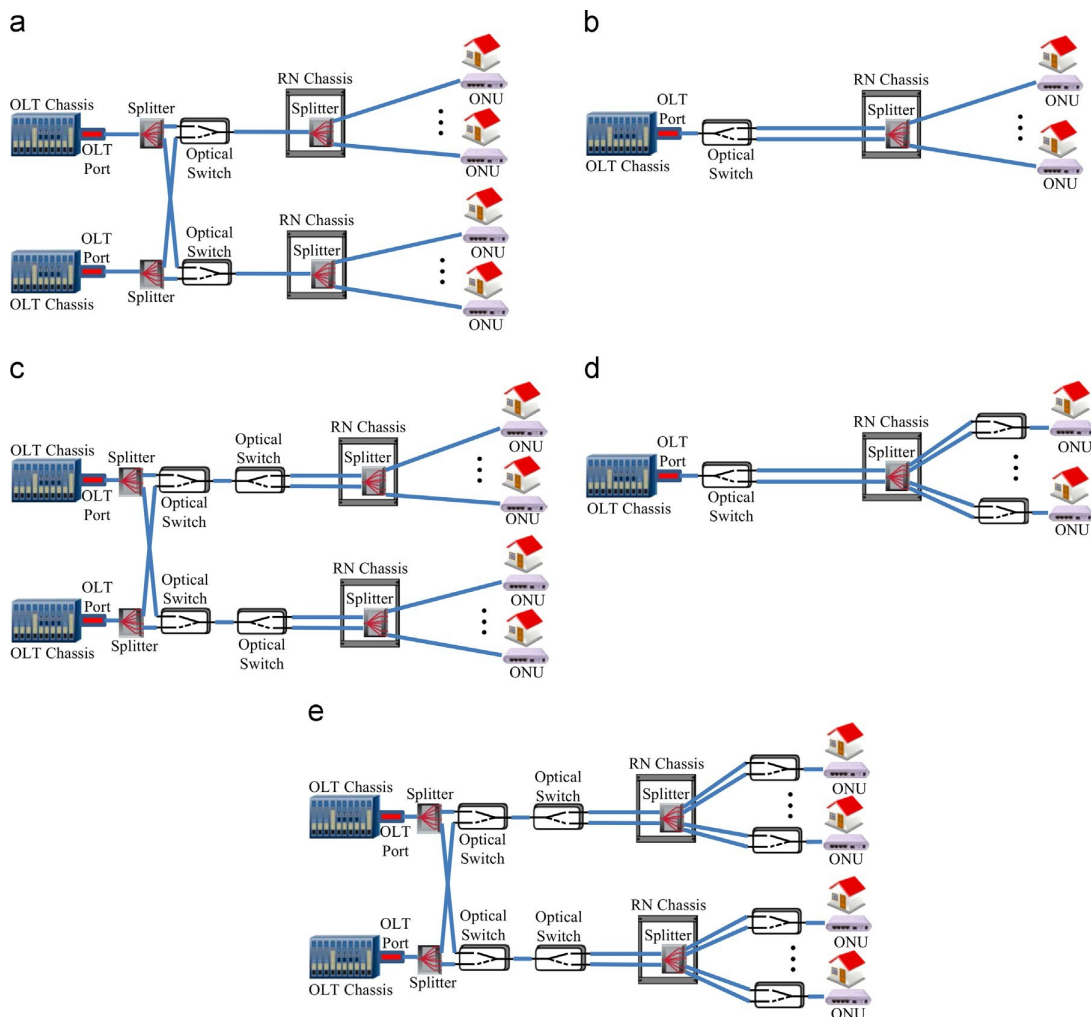


Fonte:(DIXIT et al., 2014).

Fernandez e Stol (2015) avaliaram os custos relacionados à instalação e operação de redes PON, propondo um novo método de proteção para o OLT, que segundo os autores possui baixo custo e boa eficiência. As arquiteturas analisadas são mostradas na Figura 4, onde (a) representa proteção do OLT, que é o método de proteção proposto, (b) corresponde a proteção das fibras de alimentação, (c) simboliza a proteção das fibras de alimentação e distribuição, (d) equivale a proteção das fibras de alimentação e distribuição e, por fim, (e) reflete a arquitetura de proteção das fibras de alimentação e distribuição juntamente a proteção do OLT. Como ferramenta para a análise apresentou-se um modelo econômico baseado em cadeias de markov e num modelo geométrico de disposição de equipamentos. Considerou-se a existência de uma ou duas equipes de trabalho, 0% ou 80% de clientes comerciais, e de dois cenários de densidade, um contendo aproximadamente 576 assinantes por quilômetro quadrado e outro onde o assinante mais distante está a

20 km do CO. Os resultados apresentados indicam que para todos os cenários estudados o menor custo é atingido pela arquitetura com proteção das fibras de alimentação e do OLT, sendo que a maior parte da redução de custo está relacionada à proteção da fibra de alimentação. Além disso, concluiu-se que usar apenas uma equipe de trabalho resulta em menores despesas para a maioria dos cenários e que a proteção no OLT possui melhor custo-benefício com o aumento da densidade do número de clientes, principalmente em cenários com muitos usuários comerciais. Apesar de realizar uma análise de CAPEX, o modelo dos autores não leva em consideração o custo de consumo de energia, que segundo (MACHUCA et al., 2011) podem ser elevados. Além do mais, o modelo markoviano de custos do trabalho não considera os despesas associadas às transições de estados.

Figura 4 – Arquiteturas de proteção apresentadas em Fernandez e Stol (2015).



Fonte:(FERNANDEZ; STOL, 2015).

Fernandez e Stol (2017) continuaram o último trabalho adicionando considerações de confiabilidade de *software* e de acordo de nível de serviço (SLA-*Service Level Agreement*), fazendo uma análise focada em TDM-PONs. O trabalho analisou arquiteturas desprotegidas e os esquemas (a) e (b) da Figura 4. O modelo de custos é um aperfeiçoamento

do modelo de Fernandez e Stol (2015), pois considera custos de falhas de *software* no OLT e um SLA (elemento definidor do custo de penalidade pago) não binário, que só é acionado no caso de superação de um limar de indisponibilidade. O estudo considera 25 % de usuários comerciais nas configurações de densidade apresentadas em Fernandez e Stol (2015) e níveis de disponibilidade aceitável de 99 %, 99,9 % e 99,99 % ao ano. Os resultados indicam que a instalação de proteção resulta em economia apenas para um SLA mais rígido, de fato, para 99 % o custo total esperado da instalação de proteção é superior ao da arquitetura sem proteção e para 99,9 % praticamente inexistente economia. Quanto às falhas de *software*, essas são apenas relevantes a partir de um SLA de 99,9 % de disponibilidade, podendo se tornar mais importantes que os custos relacionados ao corte de fibra em cenários muito rígidos.

ArÉvalo e Gaudino (2017) desenvolveram um modelo técnico-econômico para a instalação de redes PON FTTH (*Fiber-to-the Home*), em cidades grandes. Comparou-se três esquemas de proteção, o primeiro contendo OLT redundante, o segundo contendo fibra de alimentação e OLT redundantes, e o último contendo fibra de alimentação, OLT e CO redundantes. Além disso, levou-se em conta as tecnologias GPON (*Gigabit-capable Passive Optical Network*), XGPON (*Ten-Gigabit-Capable Passive Optical Networks*) e NGPON2. O modelo técnico-econômico obtém o CAPEX considerando a demanda de tráfego de dados e usando um algoritmo de distribuição de equipamentos, que minimiza os custos de instalação. Os resultados mostram que o preço para proteger a rede fica ainda mais caro quando a demanda de tráfego aumenta, tendo um comportamento exponencial para GPON e XGPON e linear para NGPON2. Dessa forma, para maiores demandas de dados (1 Gb/s) a melhor tecnologia é a NGPON2.

Em Yu et al. (2017) desenvolveu-se uma estratégia para evitar queda de serviço no caso de falhas de componentes de redes híbridas FiWi (*Fiber Wireless*). Tais redes têm aparecido como uma tecnologia promissora para a próxima geração de acesso a banda larga por usarem da capacidade da fibra ótica e versatilidade das redes micro-ondas. Nesse contexto, as PONs são as principais alternativas no lado ótico de redes FiWi devido ao custo reduzido, entretanto, o fato da falha de componentes ou fibra poderem afetar vários clientes pode se tornar um problema. Assim, o trabalho apresenta uma nova estrutura de proteção, onde a fibra de alimentação é protegida por outra fibra e as falhas em componentes e fibras de distribuição são protegidas com enlaces sem fio entre as ONUs.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de custos, que possa ser resolvido por simulação, buscando avaliar de modo técnico e econômico esquemas de proteção para topologias PON.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar economicamente sete diferentes topologias de PON:
 - Desprotegida
 - Protegida no nível de alimentação
 - Protegida no nível de alimentação e no OLT
 - Protegida no nível de alimentação, distribuição e no OLT
 - Protegida por rede sem fio proprietária
 - Protegida por rede sem fio alugada
 - Protegida no nível de alimentação e por rede sem fio alugada
- Desenvolver um simulador com interface gráfica para a resolução do modelo de custos proposto;
- Avaliar as topologias PON nas diversas configurações existentes em áreas predominantemente urbanas:
 - Caso suburbano
 - Caso urbano
 - Caso ultra urbano
- Encontrar os Esquemas de proteção com melhor custo-benefício para um caso de estudo proposto;
- Analisar de cenários fora do caso de estudo proposto buscando encontrar comportamento de despesas usando análises de sensibilidade.

1.3 Organização

Além desta introdução, este trabalho é composto por outros cinco capítulos. O capítulo 2 explica características e funcionamento de redes PON, bem como de suas proteções. O capítulo 3 apresenta o modelo matemático de custos que foi desenvolvido para a análise econômica. O capítulo 4 detalha o simulador desenvolvido para a resolução do modelo matemático. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos para um caso de estudo proposto, bem como análises de sensibilidade. Por fim, o último capítulo fecha o trabalho exibindo as conclusões.

2 Arquitetura e Propriedades de PON e Proteções

Esse capítulo busca apresentar os objetos de estudo deste trabalho, a PON e suas proteções. Inicialmente mostra-se um breve histórico seguido de definições de redes de acesso ótico, após isso foca-se na arquitetura padrão de uma PON e diversos métodos de proteção, que juntos podem formar diferentes arquiteturas de proteção. Por fim, são mostradas algumas propriedades de PONs e proteções aplicadas a redes de acesso.

2.1 Redes Passivas Óticas (PONs)

Essa seção explica as características básicas da operação de redes PON e apresenta as suas diferenças em relação a outras topologias de acesso ótico.

2.1.1 Redes de Acesso Óticas

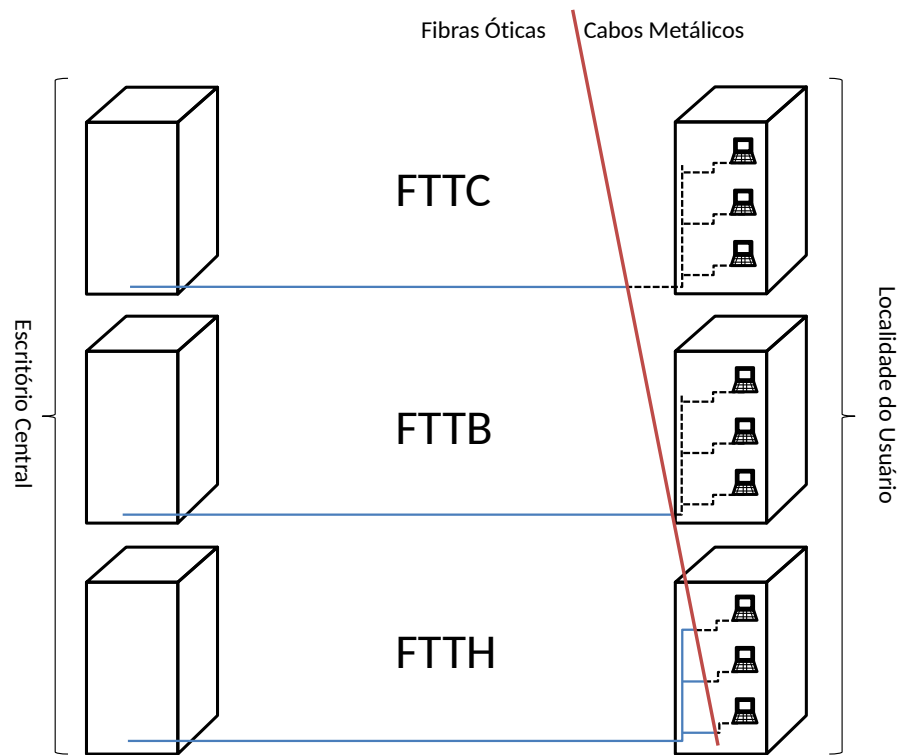
Em 1956, o Dr. Narinder Kapany do colégio imperial de ciência e tecnologia de Londres usou pela primeira vez o termo fibra ótica. Na época, a expressão foi cunhada nos planos para o primeiro laser voltado a telecomunicações. Alguns anos depois, em 1975, o primeiro enlace comercial de fibra ótica foi instalado pela policia de Dorset, na Inglaterra, desde aí as tecnologias de comunicação ótica evoluíram ao ponto de atualmente mais de 80% do tráfego de dados do mundo passar por fibras óticas, estando presentes nos mais diversos tipos de rede, seja backbone, metropolitanas ou de acesso (HECHT, 1999).

Este trabalho tem como foco a rede de acesso, a qual é o conjunto de equipamentos e conexões entre o escritório central (CO) de uma operadora e os usuários. Nos últimos anos, maiores demandas de tráfego tem sobrecarregado as redes de acesso (FERNANDEZ; STOL, 2015), exigindo investimentos adicionais por parte dos operadores naquela que já é a parte mais cara de uma rede de dados. Nesse contexto, redes de fibra ótica surgem como solução devido a sua alta capacidade de transmissão, dimensões reduzidas, imunidade à interferência eletromagnética e baixo custo por bit transmitido (AGRAWAL, 2011).

A Figura 5 apresenta diversas arquiteturas de redes de acesso baseadas em fibra ótica. Nota-se que o ponto final da rede ótica pode assumir diferentes tecnologias, uma abordagem que recebe o nome de *FTTx*, onde x pode representar casas (FTTH), construções (FTTB), calçadas (FTTC), entre outros.

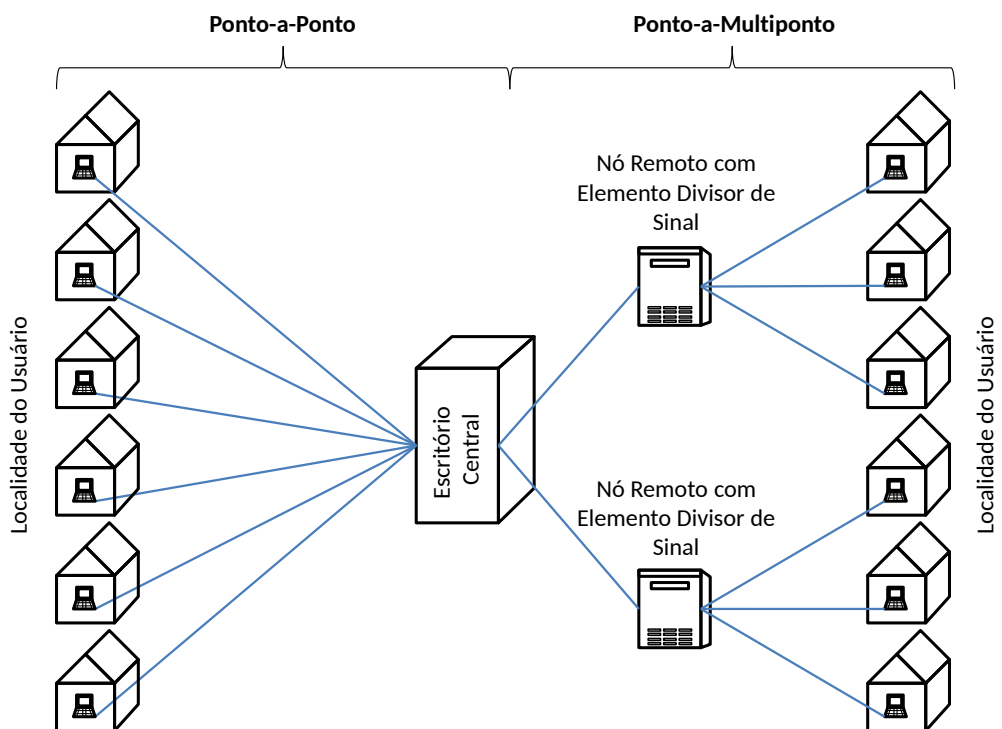
A Figura 6 apresenta as duas topologias básicas para redes de acesso baseada em fibra. A primeira é topologia ponto-a-ponto (P2P), que faz a ligação entre cada usuário e o CO por meio de fibra dedicada. A segunda é topologia ponto-a-multi ponto, caso de redes óticas ativas (AON) e passivas (PON), que liga o CO aos usuários usando pontos de

Figura 5 – Tipos de redes de acesso baseadas em fibra.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6 – Topologia de redes de acesso baseadas em fibra.



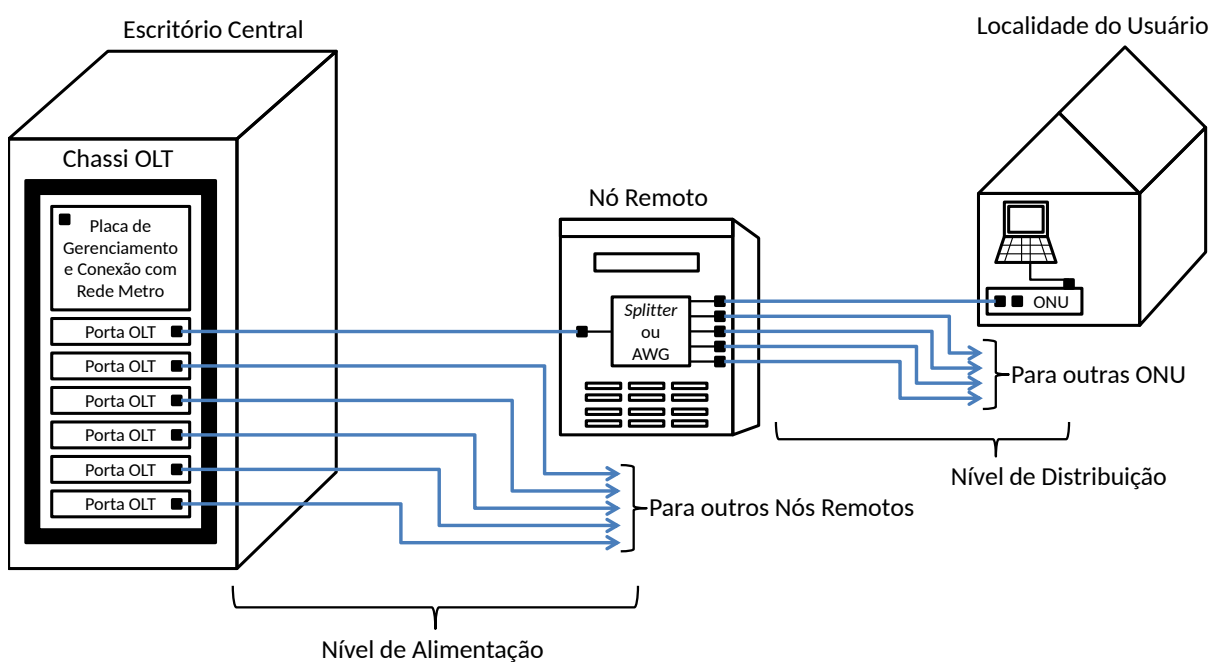
Fonte: elaborado pelo autor.

divisão de sinal, resultando no compartilhamento de fibras entre os usuários (AGRAWAL, 2011).

A PON, assim como AON, possui dois níveis de conexão divididos por um nó remoto. O primeiro é o nível de alimentação e representa a conexão entre o CO e os nós remotos. O segundo é o nível de distribuição e representa a conexão de cada nó remoto a uma parcela dos usuários da rede. Dessa forma, o nó remoto e as fibras do nível de alimentação são compartilhados por diversos usuários, resultando em menor número de equipamentos em relação a uma rede P2P. A única diferença entre PON e AON está no elemento divisor de sinal no nó remoto, que em redes PON não consome energia elétrica (passivo) (AGRAWAL, 2011).

2.1.2 Estrutura de PONs

Figura 7 – Topologia básica de uma rede ótica passiva.



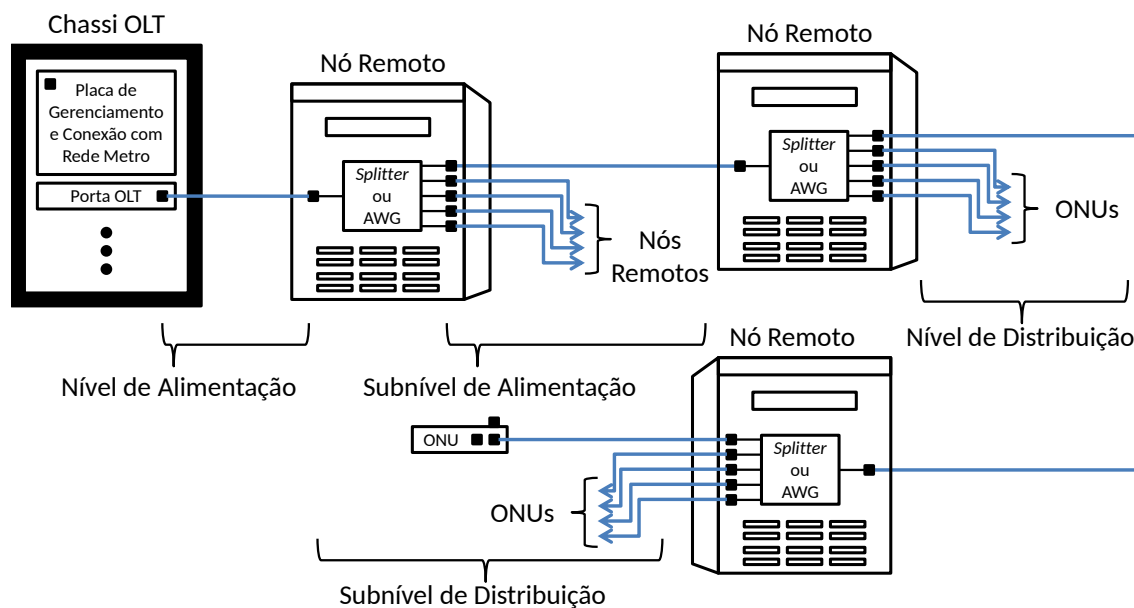
Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 7 apresenta a estrutura básica de uma rede de acesso PON. Numa das pontas da rede está o CO da operadora, que abriga diversos chassis OLT (responsáveis pelo gerenciamento da rede e pela conexão do *backbone* da operadora com a PON), onde portas OLT são encaixadas como placas em *slots* predeterminados. Na outra ponta estão localizados os usuários, que são atendidos por uma ONU, as quais convertem o sinal ótico em elétrico. Entre os usuários e o CO localizam-se nós remotos, que contêm um chassis de nó remoto e um ou mais elementos divisores de sinal passivo, como por exemplo *splitters*. A conexão entre o CO, o nó remoto e o usuário é feita por fibras óticas, sendo que as

fibras entre o CO e os nós remotos formam o nível de alimentação e as fibras entre cada nó remoto e os usuários formam o nível de distribuição.

A estrutura de PON apresentada na Figura 7 é a mais simples possível. Muitas redes PON podem conter vários subníveis de alimentação ou distribuição, objetivando um maior compartilhamento de infraestrutura, buscado redução ainda maior com despesas de instalação, um exemplo de PON de maior complexidade é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Rede óptica passiva com subníveis de alimentação e distribuição.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.2 Proteção de Dutos de Fibra

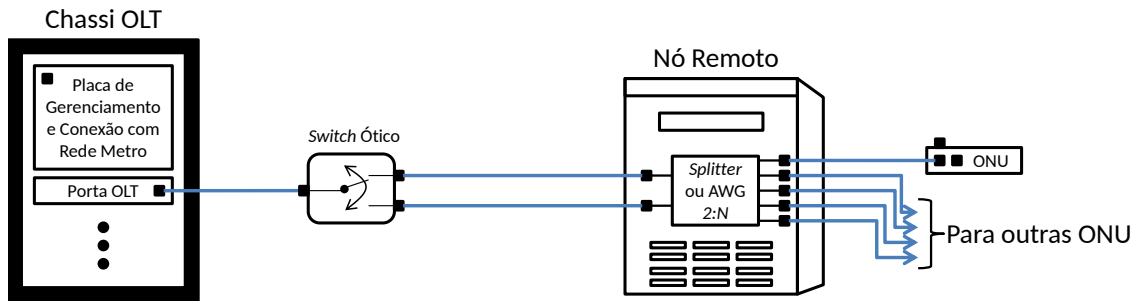
Em geral, numa PON os dutos de fibra são compartilhados por muitos usuários PONS e dependendo do comprimento podem ser considerados um dos elementos mais suscetíveis a falha na rede. Dessa forma, muitos dos esquemas de proteção propostos na literatura protegem este componente (FERNANDEZ; STOL, 2015)(DIXIT et al., 2014)(WOSINSKA et al., 2009)(ARÉVALO; GAUDINO, 2017).

2.2.1 Nível de Alimentação

Proteger o nível de alimentação foi uma das primeiras propostas de proteção de redes PON e já é uma estratégia utilizada por muitas operadoras (WOSINSKA et al., 2009).

A Figura 9 apresenta a arquitetura do método de proteção do nível de alimentação, basicamente há uma duplicação de fibras e a instalação de um *switch* ótico, que é usado para conectar ambas as fibras ao OLT. Além disso, a conexão das fibras ao elemento divisor de sinal pode ser direta se este for de configuração de divisão 2:N, como no caso

Figura 9 – Proteção no nível de alimentação.



Fonte: elaborado pelo autor.

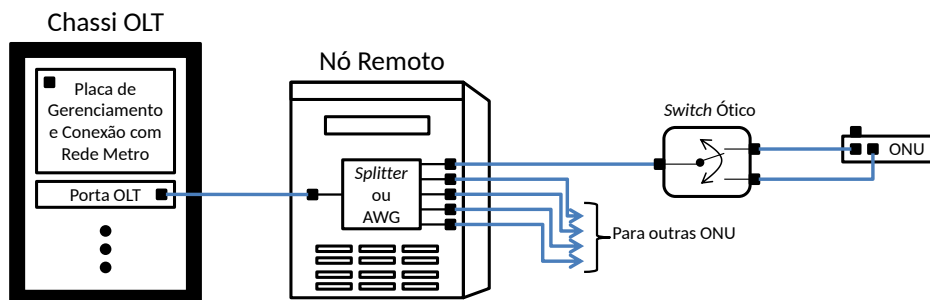
da figura. Se a configuração de divisão for 1:N outro *switch* ótico é necessário. 2:N (FERNANDEZ; STOL, 2015)(DIXIT et al., 2014)(ARÉVALO; GAUDINO, 2017)(WOSINSKA et al., 2009).

O funcionamento do método é simples, ao ocorrer uma falha na fibra de alimentação o *switch* ótico faz comutação e o OLT passa a se comunicar com a duplicata da fibra, garantindo continuidade de serviço.

2.2.2 Nível de Distribuição

Em geral, a proteção nos dutos de fibra de distribuição é considerada menos necessária, pois estes são compartilhados por menos usuários e possuem menor comprimento quando comparados aos de alimentação. Entretanto, alguns trabalhos, como por exemplo, Fernandez e Stol (2015) e Dixit et al. (2014), usam esquemas de proteção para o nível de distribuição buscando atingir maiores níveis de disponibilidade em redes óticas.

Figura 10 – Proteção no nível de distribuição.



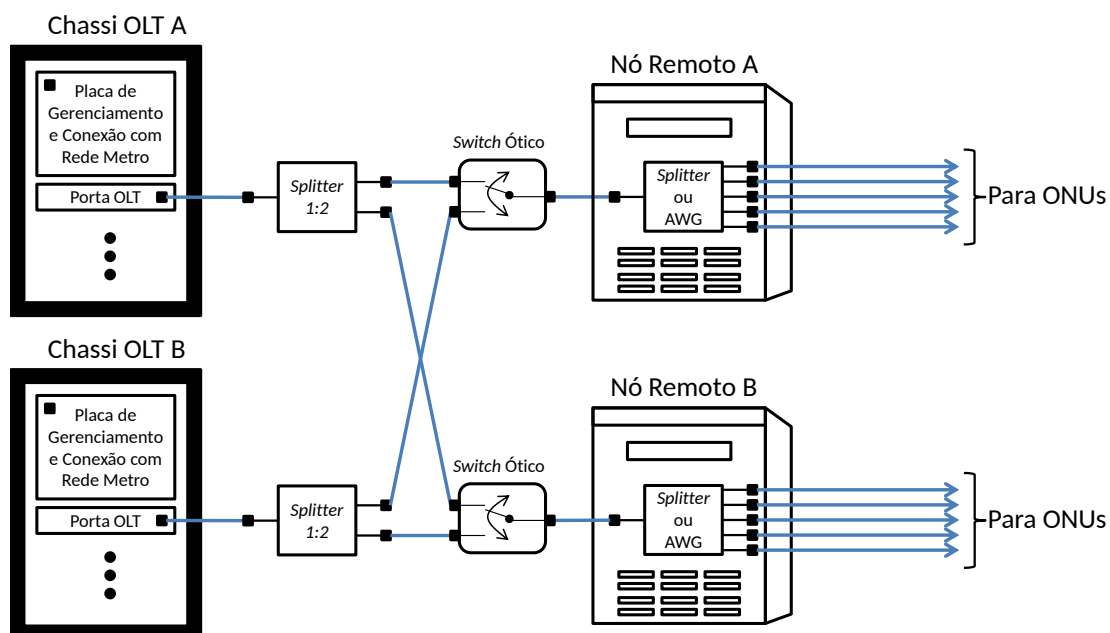
Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 10 apresenta a arquitetura do método de proteção do nível de distribuição. A configuração de equipamentos e funcionamento são os mesmos da proteção do nível de alimentação, com um *switch* ótico na saída do *splitter* e uma ONU com duas portas de acesso.

2.3 Proteção do OLT

Outro componente fortemente compartilhado por usuários em PONs são as OLT. Seguindo esse raciocínio, alguns trabalhos, como Fernandez e Stol (2015) e ArÉvalo e Gaudino (2017), usam esquemas de proteção com duplicação do OLT.

Figura 11 – Proteção do OLT.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 11 apresenta a arquitetura do método de proteção do OLT, tanto do chassi quanto das portas. A proteção considera a interligação de pares de chassi OLT, onde uma porta OLT do primeiro chassi é ligada aos usuários de uma porta do segundo chassi, e vice-versa. A ligação é feita por meio de uma estrutura cruzada de elementos divisores de sinal 1:2 e *switches* ópticos.

O funcionamento do método ocorre de maneira que quando uma falha de uma das portas OLT ocorre, o *switch* ligado a mesma comuta e os usuários são suportados por uma porta OLT funcional em um chassi diferente. No caso de uma falha de chassi, todos os *switches* das portas OLT ligadas ao chassi faltoso serão comutados e o chassi OLT funcional que completa o par assume a carga de tráfego.

Um fator importante desse método é que no caso de uma falha a OLT que evitou a indisponibilidade terá que suportar a sua carga de usuários normal e também a do OLT falho. No entanto, portas OLTs suportam até 128 usuários e geralmente atendem um número bem menor de usuários, a maioria em torno de 32.

Outra consideração importante desse método de proteção é, quando o número de chassis for ímpar um chassi extra deverá ser adicionado. Além disso, se o número de

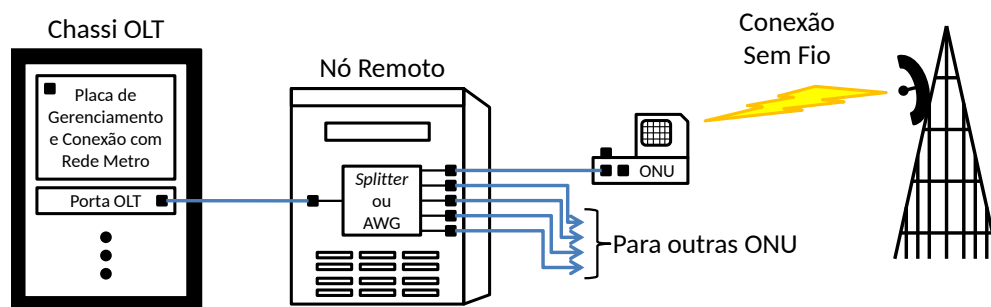
chassis for par e houver diferenças nos números de portas OLT entre pares de chassis, o número de portas deverá ser igualado.

2.4 Proteção Usando Redes Sem Fio

Além de apresentar esquemas de proteção baseados em fibra, um método de proteção usando redes sem fio também é abordado. A proposta desse método é um trabalho conjunto entre o autor deste estudo e outros (FARIAS, 2016) (FERNANDES, 2017).

Na proteção sem fio, as ONUs além de possuírem entradas para o sinal óptico também possuem capacidade de se conectar a uma rede sem fio, como a 5G, que no futuro será capaz de suportar taxas de tráfego de 1 a 10 Gbps (KAVANAGH, 2017). Dessa forma, qualquer falha na rede óptica, com exceção da falha de ONU, resulta na entrada da ONU atingida na rede sem fio. A Figura 12 mostra o método de proteção sem fio.

Figura 12 – Proteção usando redes sem fio.



Fonte: elaborado pelo autor.

A ONU entra na rede móvel através da conexão com uma estação base. Onde a última pode ser definida como o agente que conecta os dispositivos finais a rede numa determinada área. Este trabalho considera dois tipos de estação base, *small cell* e macro-célula. A primeira tem pequena área de cobertura e se conecta com as ONU. A segunda tem grande área de cobertura e tem links de visada direta para fornecer serviço as *small cells*.

2.5 Service Level Agreement (SLA)

O acordo de nível de serviço (SLA) é o que define os níveis de indisponibilidade aceitáveis para um usuário e o custo de penalidade a ser paga caso esses sofram falta de serviço. Atualmente, em geral, o SLA é apenas definido para clientes comerciais, entretanto, o aumento da exigência de disponibilidade aliado a ampla concorrência entre operadores de Internet, podem ter como consequência a adoção de contratos de Internet incluindo SLA para usuários residenciais e maiores demandas de disponibilidade e penas por indisponibilidade para usuários comerciais (MCKNIGHT; LEHR, 2000).

2.6 Fator de Impacto

Numa rede real uma falha simultânea de muitos usuários geralmente é mais danosa que múltiplas falhas que resultem em falta de serviço para um único cliente. Nesse contexto, Dixit et al. (2014) introduziu um parâmetro que tenta colocar o peso devido a falhas mais danosas, o fator de impacto, que será apresentado matematicamente no Capítulo 4.

2.7 Redes Alugadas e Fator de Sobrecarga

Uma alternativa possível para o uso de uma rede sem fio para proteger a rede fixa é aluga-la de um operador móvel. Nesse caso, considera-se que existe um aluguel anual de valor fixo a ser pago para o móvel, devendo o pagamento ocorrer independentemente da ocorrência de falhas na rede fixa. Além disso, um contrato entre os operadores especifica capacidade de tráfego máxima que o conjunto de ONU sem serviço pode utilizar sem a cobrança de custos extras.

Os custos extras por ultrapassagem do limiar de capacidade acertado em contrato são definidos pelo fator de sobrecarga, o qual modela as despesas extras de acordo com a capacidade requerida pelas ONU sem serviço, onde as despesas extras crescem muito mais rapidamente que a capacidade requerida.

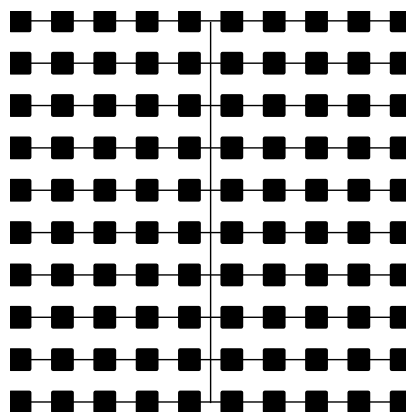
3 Modelos Matemáticos

Esse capítulo apresenta os modelos matemáticos que foram elaborados para o funcionamento do simulador e está dividido em três seções. A primeira seção descreve o modelo de dimensionamento de rede, que busca dimensionar o cenário com todas as suas distâncias e equipamentos, definindo também a interdependência de equipamentos. A segunda seção descreve o modelo de custos de operação da rede, que busca determinar os custos de operação da rede em qualquer estado de operação, sejam custos de penalidade, potência, salários ou aluguel. A terceira seção descreve o modelo de custos da instalação da rede, que busca determinar os custos de instalação dos diversos equipamentos da rede.

3.1 Modelo de Dimensionamento de Rede (MDR)

A partir do MDR é possível determinar parâmetros-chave relacionados aos custos operacionais dos equipamentos no cenário, como a quantidade de equipamentos, suas posições, distâncias em relação ao CO, seus clientes atendidos e suas relações de interconexão. O MDR foi adaptado a partir do modelo de ruas manhattan simples (GRAHAM, 1988), que é baseado na distribuição uniforme de prédios dentro de blocos de forma retangular (quadrados), onde os prédios em cada fileira horizontal do bloco são conectados por uma linha. Dessa forma, existirão diversas linhas paralelas no bloco, todas interligadas por uma linha ortogonal que cruza seus centros. A representação do modelo de ruas manhattan simples pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 – Representação do modelo de ruas manhattan simples.

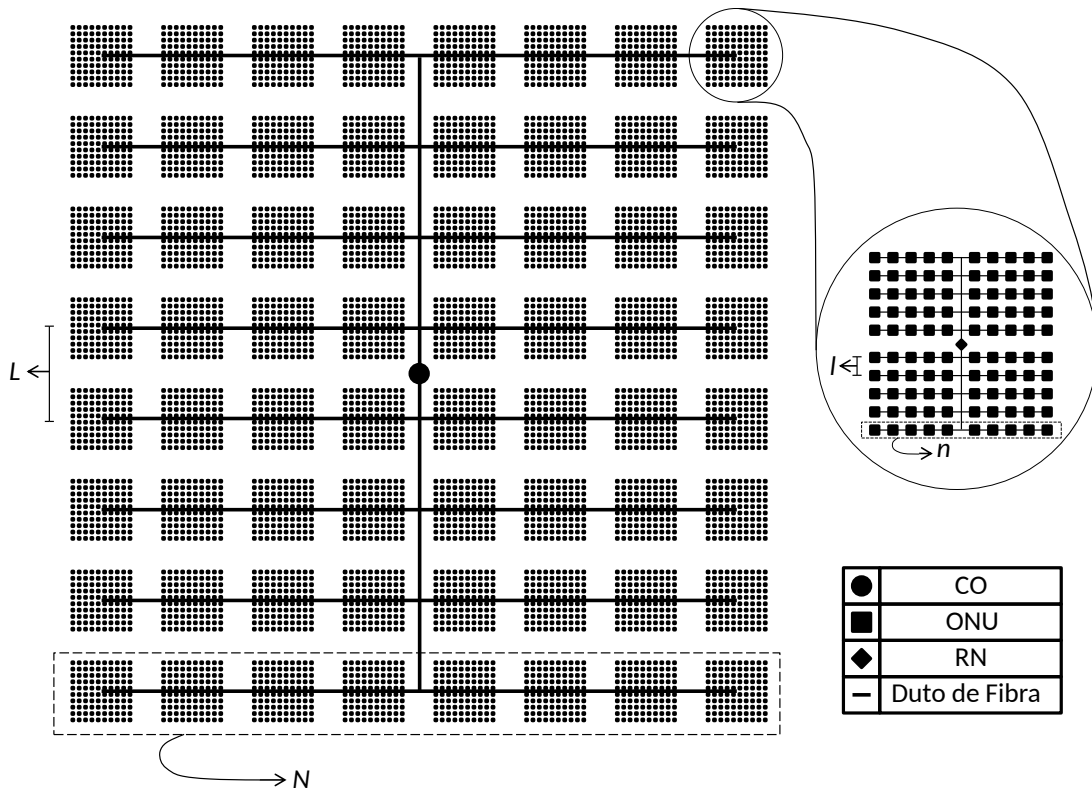


Fonte: elaborado pelo autor.

Para representar uma PON, o MDR possui dois níveis de operação, ambos baseados no modelo Manhattan, como pode ser visto na Figura 14. O nível de distribuição possui prédios distribuídos uniformemente em uma quadra, onde n é o número de prédios numa

linha ou coluna da quadra, p é o número de pisos dos edifícios, l é a distância entre prédios adjacentes e o Chassi do nó remoto está no centro. O nível alimentação possui quadras distribuídas uniformemente em um cenário, onde N é o número de quadras em uma linha ou coluna do cenário, L é a distância entre quadras adjacentes e o CO está localizado no centro, é importante notar que $L = n \times l$.

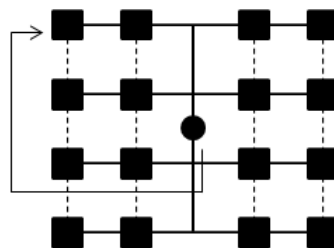
Figura 14 – Representação do MDR para uma topologia PON sem proteção.



Fonte: elaborado pelo autor.

No caso da proteção das fibras de alimentação ou distribuição, os dutos adicionais são instalados na vertical como indicado pelas linhas tracejadas na Figura 15. A seta na referida figura indica o caminho seguido por uma fibra nos dutos para proteger um cliente.

Figura 15 – Representação de uma quadra com proteção no nível de distribuição.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.1.1 A Quantidade de Equipamentos na Rede

A quantidade de cada tipo de equipamento dentro da rede é fundamental para determinar os custos de instalação, sendo esta diretamente proporcional ao número de assinantes, que é obtido a partir de N , n , p .

O número de ONUs (N_{ONU}) é igual ao de assinantes, como descrito na equação 3.1.

$$N_{ONU} = N^2 \times n^2 \times p \quad (3.1)$$

O número de elementos divisores de sinal (N_{Edv}) é fornecido pelo número de saídas do elemento (E_{NS}) e pelo número de assinantes numa quadra, $n \times n \times p$. É importante notar que o número de elementos divisores de sinal é igual ao de portas OLT (N_{pOLT}), a equação 3.2 mostra como são obtidos N_{Edv} e N_{OLT} .

$$N_{Edv} = N_{pOLT} = \left[\frac{n^2}{E_{NS}} \right] \quad (3.2)$$

Em relação aos chassis, cada quadra possui um chassi de nó remoto em seu centro e o cenário possui $N \times N$ quadras, assim o número de chassis de nó remoto (N_{RN}) é igual ao número de quadras. Quanto ao número de *OLT Chassis* (N_{OLTc}) é dependente da sua capacidade de portas OLT ($capOLTc$) e do número total das mesmas no cenário, a equação 3.3 mostra como é obtido N_{OLTc} .

$$N_{OLTc} = \left[\frac{N_{Spt}}{capOLTc} \right] \quad (3.3)$$

Quanto à fibra, considera-se como equipamento seções de fibra, tanto na alimentação como na distribuição. Na distribuição, as seções são os pequenos caminhos de fibra que ligam ONUs a ONUs, ONUs a fibras ou fibras a fibras. Na alimentação a lógica é análoga, apenas substituindo ONUs por quadras. As equações 3.4 e 3.5 mostram como são obtidos o número das seções de fibras de distribuição (N_{fd}) e alimentação (N_{fa}).

$$N_{fd} = (n^2 + n) \times N^2 \quad (3.4)$$

$$N_{fa} = (N^2 + N) \quad (3.5)$$

Ao proteger uma topologia, equipamentos adicionais relacionados ao esquema de proteção adotado se fazem necessários, no caso das proteções dos dutos de fibras de alimentação ou de distribuição, o número de seções de fibras adicionais de distribuição (N_{pfd}) e alimentação (N_{pfa}) são obtidos pelas equações 3.6 e 3.7 .

$$N_{pfd} = (N - 1)^2 \quad (3.6)$$

$$N_{pfa} = N^2 \times (n - 1)^2 \quad (3.7)$$

A proteção das fibras de distribuição ou de alimentação exige a instalação de switches ópticos, o número de switches ópticos para proteção de fibra (N_{SO}) é encontrado através da equação 3.8.

$$N_{SO} = N_{pOLT} \quad (3.8)$$

Proteger o chassi e as portas OLT pode exigir a instalação de quantidade extra dos mesmos. O número extra de chassis (N_{OLTce}) e o número extra portas (N_{pOLT_e}) são encontrados, respectivamente, pelas equações 3.9 e 3.10.

$$N_{OLTce} = \begin{cases} 0, & \text{caso } N_{OLTc} \text{ seja par} \\ 1, & \text{caso } N_{OLTc} \text{ seja ímpar} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$N_{pOLT_e} = \begin{cases} capOLTc \times N_{OLTc} - N_{pOLT}, & \text{caso } N_{OLTc} \text{ seja par} \\ N_{pOLT} - [(N_{OLTc} - 1) \times capOLTc], & \text{caso } N_{OLTc} \text{ seja ímpar} \end{cases} \quad (3.10)$$

Outro requerimento para proteção do OLT é a instalação de *switches* ópticos e elementos divisores de sinal com duas saídas. O número de *switches* ópticos para proteção de OLT (N_{SOpO}) e o número de elementos divisores adicionais (N_{Edva}) são dados, respectivamente, pelas equações 3.11 e 3.12.

$$N_{SOpO} = N_{pOLT} \quad (3.11)$$

$$N_{Edva} = N_{pOLT} - N_{pOLT_e} \quad (3.12)$$

No caso da proteção de micro-ondas, o número de *small cells* (N_{SC}) e de macro células (N_{MC}) é determinado de acordo com n , N , a distância entre os edifícios (l) e o raio de cobertura das mesmas, r e R respectivamente. N_{SC} e N_{MC} são dados pelas equações 3.13 e 3.14, respectivamente. É importante ressaltar que no caso de proteção alugada o número de células no cenário é igual a zero, uma vez que a proteção não faz parte da rede da operadora.

$$N_{SC} = \begin{cases} \frac{2 \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3r/l}} \right\rceil \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3r/l}} \right\rceil - \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3r/l}} \right\rceil}{2}, & \text{caso } \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3r/l}} \right\rceil \text{ seja par} \\ \frac{2 \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3r/l}} \right\rceil \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3r/l}} \right\rceil - \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3r/l}} \right\rceil - 1}{2}, & \text{caso } \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3r/l}} \right\rceil \text{ seja ímpar} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$N_{MC} = \begin{cases} \frac{2 \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3R/l}} \right\rceil \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3R/l}} \right\rceil - \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3R/l}} \right\rceil}{2}, & \text{caso } \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3R/l}} \right\rceil \text{ seja par} \\ \frac{2 \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3R/l}} \right\rceil \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3R/l}} \right\rceil - \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3R/l}} \right\rceil - 1}{2}, & \text{caso } \left\lceil \frac{N \times n}{\sqrt{3R/l}} \right\rceil \text{ seja ímpar} \end{cases} \quad (3.14)$$

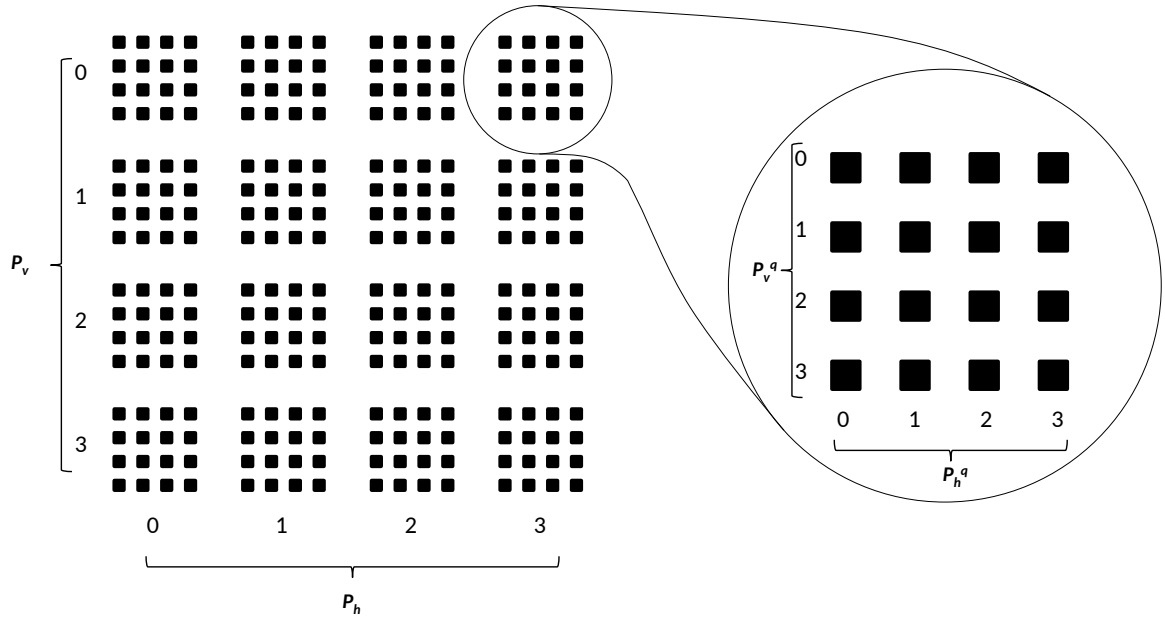
3.1.2 A Distância dos Equipamentos na Rede em relação ao CO

Tão importante quanto o número de equipamentos, é a distância dos mesmos até o local onde se encontram as equipes de trabalho, em geral o CO. Tal distância possibilita

calcular o tempo de viagem para instalar ou reparar um equipamento, que faz parte do salário por hora das equipes de trabalho. A distância ao CO é obtida a partir de N , n , p , l , das posições horizontais e verticais dos equipamentos em relação a quadra em que se localizam (P_h^q e P_v^q) e das posições horizontais e verticais em relação a localização da quadra no cenário (P_h e P_v).

Essas posições são elementos chaves para as equações que determinam as distâncias dos diversos equipamentos em relação ao CO. No caso dos edifícios e do centro da quadras, a Figura 16 apresenta um exemplo da determinação das posições quando $n = 4$ e $N = 4$

Figura 16 – Representação das posições das quadras no cenário (à esquerda) e dos edifícios na quadra (à direita) para quando $n = 4$ e $N = 4$.



Fonte: elaborado pelo autor.

A distância dos prédios do cenário até o centro das quadras ($D_{Prédio \rightarrow Quadra}$) é definida pela equação 3.15. A distância das ONUs até os RN ($D_{ONU \rightarrow RN}$) é igual a $D_{Prédio \rightarrow Quadra}$ somada a um comprimento relativo ao andar em que a ONU está instalada (h_i), onde o índice i descreve o andar em que a ONU está localizada, como descrito na equação 3.16.

$$D_{Prédio \rightarrow Quadra} = [n - (a + b) - 1]l,$$

$$a = \begin{cases} P_h^q, & \text{caso } P_h^q < \frac{n}{2} \\ n - P_h^q - 1, & \text{caso } P_h^q \geq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (3.15)$$

onde:

$$b = \begin{cases} P_v^q, & \text{caso } P_v^q < \frac{n}{2} \\ n - P_v^q - 1, & \text{caso } P_v^q > \frac{n}{2} \\ 0, & \text{caso } P_v^q = \frac{n}{2} \end{cases}$$

$$D_{ONU \rightarrow RN} = D_{Prédio \rightarrow Quadra} + h_i \quad (3.16)$$

A distância do centro das quadras, onde se localizam o RN chassi e os splitters, até o CO ($D_{Quadra \rightarrow CO}$) é dada pela equação 3.17. É importante notar que por meio de $D_{Quadra \rightarrow CO}$ e $D_{ONU \rightarrow RN}$ é possível obter a distância da ONU ao CO.

$$D_{Quadra \rightarrow CO} = [N - (A + B) - 1]L$$

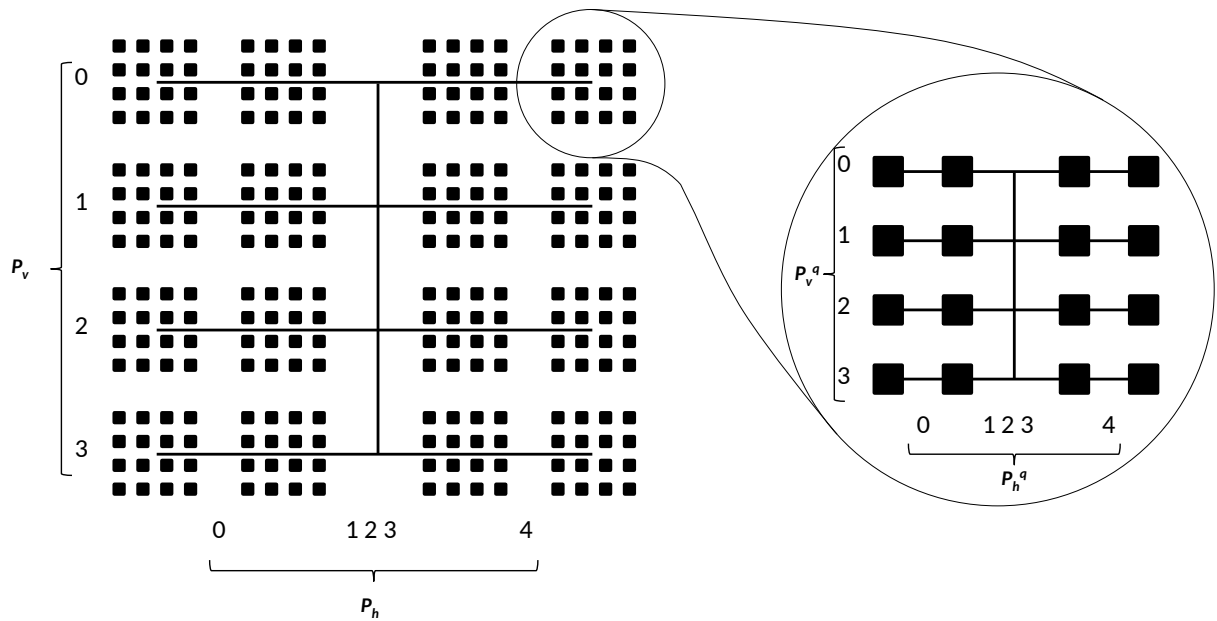
$$A = \begin{cases} P_h, & \text{caso } P_h < \frac{N}{2} \\ N - P_h - 1, & \text{caso } P_h \geq \frac{N}{2} \end{cases}$$

onde:

$$B = \begin{cases} P_v, & \text{caso } P_v < \frac{N}{2} \\ N - P_v - 1, & \text{caso } P_v > \frac{N}{2} \\ 0, & \text{caso } P_v = \frac{N}{2} \end{cases} \quad (3.17)$$

Quanto as fibras, as posições P_h^q , P_v^q , P_h e P_v não utilizaram mais como referência os edifícios ou as quadras, em vez disso usaram as localizações das seções de fibra passam a determinar as posições. A Figura 17 apresenta um exemplo para o caso de fibras, quando $n = 4$ e $N = 4$.

Figura 17 – Representação das posições das seções de fibra de alimentação no cenário (à esquerda) e das seções de fibra de distribuição na quadra (à direita) para quando $n = 4$ e $N = 4$.



Fonte: elaborado pelo autor.

A distância das seções de fibra de distribuição até o centro da quadra ($D_{FD \rightarrow RN}$) é dada pela equação 3.18 e a distância das seções de fibra de alimentação até o centro do cenário ($D_{FA \rightarrow CO}$) é dada pela equação 3.19. É importante notar que ao somar-se a distância da seção de distribuição ao centro da quadra e a distância da última ao CO,

obtem-se a distância da seção de distribuição ao CO.

$$D_{FD \rightarrow RN} = \begin{cases} \left[n - (a + b) - \frac{3}{2} \right] l, & \text{caso } P_h^q \neq \frac{n}{2} \\ \left(\frac{n-2b-1}{2} \right) l, & \text{caso } P_h^q = \frac{n}{2} \end{cases}$$

$$\text{onde: } a = \begin{cases} P_h^q, & \text{caso } P_h^q < \frac{n}{2} \\ n - P_h^q, & \text{caso } P_h^q > \frac{n}{2} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$b = \begin{cases} P_v^q, & \text{caso } P_v^q < \frac{n}{2} \\ n - P_v^q - 1, & \text{caso } P_v^q \geq \frac{n}{2} \end{cases}$$

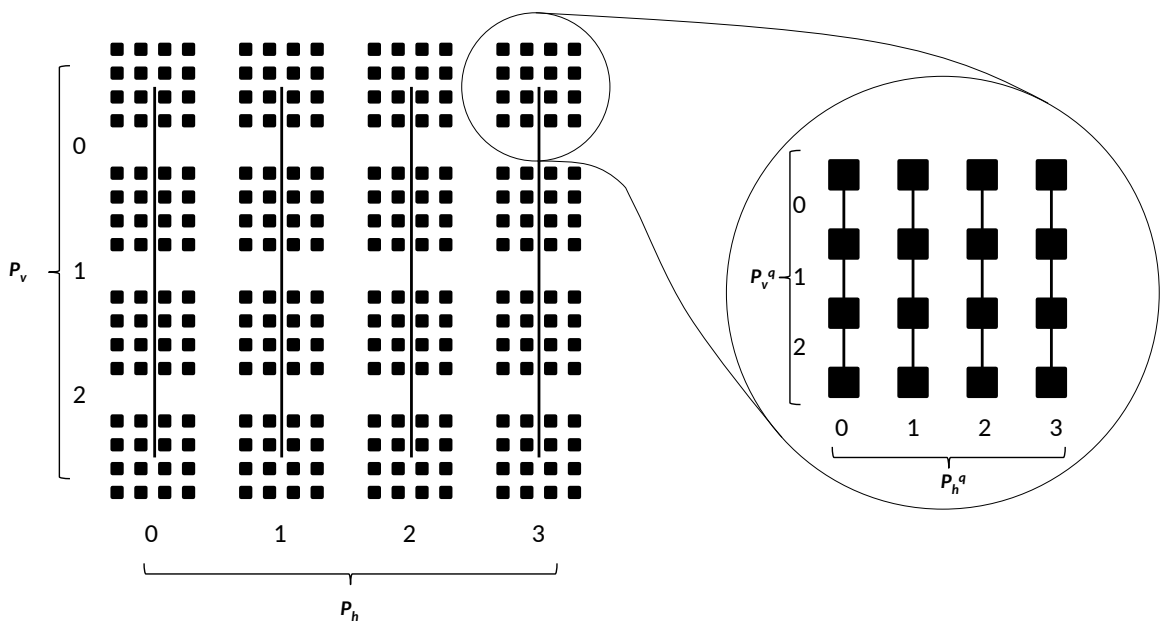
$$D_{FA \rightarrow CO} = \begin{cases} \left[N - (A + B) - \frac{3}{2} \right] L, & \text{caso } P_h \neq \frac{N}{2} \\ \left(\frac{N-2B-1}{2} \right) L, & \text{caso } P_h = \frac{N}{2} \end{cases}$$

$$\text{onde: } A = \begin{cases} P_h, & \text{caso } P_h < \frac{N}{2} \\ N - P_h, & \text{caso } P_h > \frac{N}{2} \end{cases} \quad (3.19)$$

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

Da mesma forma que no caso das fibras normais, o posicionamento das fibras de proteção também muda. A referência das posições passa a ser a localização das seções de fibra de proteção, como pode ser visto no exemplo da Figura 18, onde $n = 4$ e $N = 4$. As distâncias das seções de fibra de proteção de alimentação ($D_{PFFS \rightarrow CO}$) e distribuição ($D_{PDFS \rightarrow RN}$) até o centro do cenário e da quadra, respectivamente, são dadas pelas equações 3.20 e 3.21.

Figura 18 – Representação das posições das seções de fibra de alimentação de proteção no cenário (à esquerda) e das das seções de fibra de distribuição de proteção na quadra (à direita) para quando $n = 4$ e $N = 4$.



Fonte: elaborado pelo autor.

$$D_{PDFS \rightarrow RN} = \begin{cases} [n - (a + b) - 1] l, & \text{caso } P_v^q \neq \left(\frac{n}{2} - 1\right) \\ \left(\frac{n-2a-1}{2}\right) l, & \text{caso } P_v^q = \left(\frac{n}{2} - 1\right) \end{cases}$$

onde:

$$a = \begin{cases} P_h^q, & \text{caso } P_h^q < \frac{n}{2} \\ n - P_h^q - 1, & \text{caso } P_h^q > \frac{n}{2} \\ 0, & \text{caso } P_h^q = \frac{n}{2} \end{cases} \quad (3.20)$$

$$b = \begin{cases} P_v^q, & \text{caso } P_v^q < \left(\frac{n}{2} - 1\right) \\ n - P_v^q - 2, & \text{caso } P_v^q \geq \left(\frac{n}{2} - 1\right) \end{cases}$$

$$D_{PFFS \rightarrow CO} = \begin{cases} [N - (A + B) - 1] L, & \text{caso } P_v \neq \left(\frac{N}{2} - 1\right) \\ \left(\frac{N-2A-1}{2}\right) L, & \text{caso } P_v = \left(\frac{N}{2} - 1\right) \end{cases}$$

onde:

$$A = \begin{cases} P_h, & \text{caso } P_h < \frac{N}{2} \\ N - P_h - 1, & \text{caso } P_h > \frac{N}{2} \\ 0, & \text{caso } P_h = \frac{N}{2} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$B = \begin{cases} P_v, & \text{caso } P_v < \left(\frac{N}{2} - 1\right) \\ N - P_v - 2, & \text{caso } P_v \geq \left(\frac{N}{2} - 1\right) \end{cases}$$

Quanto as células de micro-ondas, assume-se que todas as células estão no topo dos edifícios, dessa forma, a distância até o CO se dá pela distância do prédio ao qual elas estão instaladas. A Figura 19 exemplifica a relação entre estações-base e edifícios, representando o cenário como uma matriz de 40 por 40, para um exemplo com $n = 4$ e $N = 4$, onde cada casa da matriz na figura pode ser uma posição de estação base.

A disposição das células no cenário se dará pelo pseudo-código na Figura 20. Onde *Cenário*[][] é uma matriz de mesma forma da apresentada na Figura 19, d_x é projeção horizontal distância diagonal entre as células, d_y é a distância vertical entre as células, d_h é a distância horizontal entre as células e a é o raio da estação base.

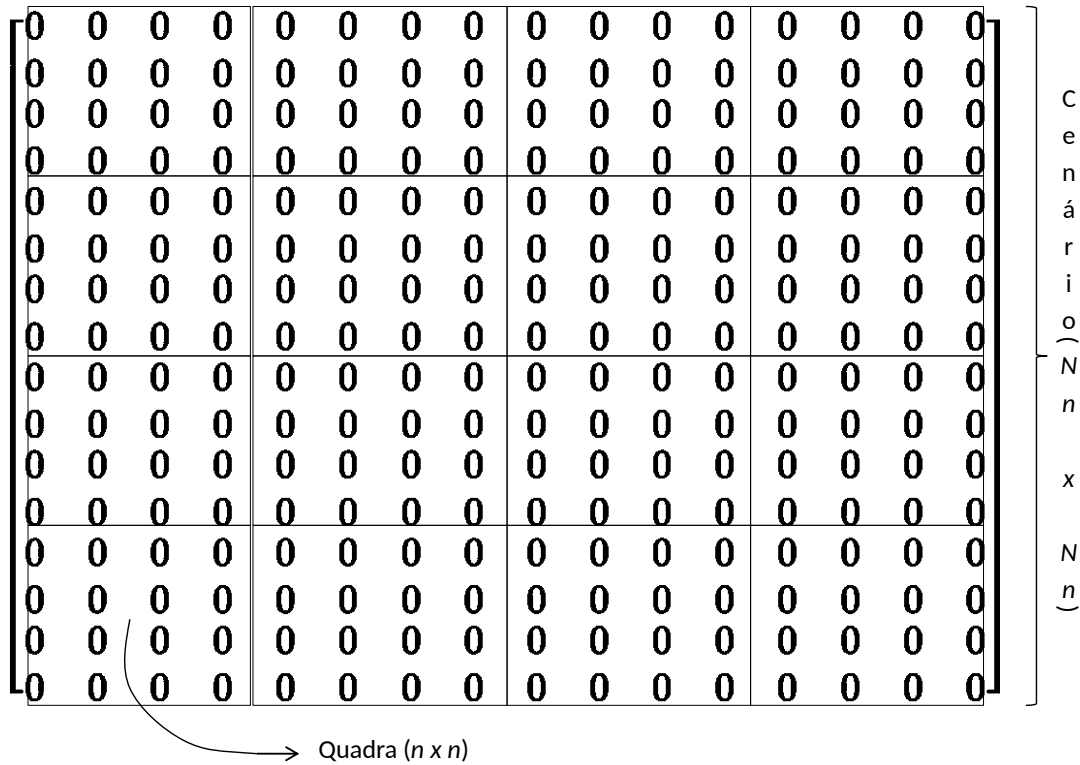
3.1.3 A interconexão dos equipamentos e os clientes atendidos

A interconexão entre equipamentos é fundamental na análise do comportamento de uma falha, pois cada equipamento possui dependências e no caso da falha todos os seus equipamentos dependentes irão falhar. Entretanto, é importante notar que os equipamentos das topologias padrão e de proteção atendem o mesmo cliente sem estarem diretamente conectados.

Apesar de não estarem diretamente conectados, os equipamentos padrão e de proteção estão conectados a outros equipamentos em comum. Dessa forma, equipamentos de proteção apenas terão efeito no caso de falha dos equipamentos que são alvo de sua proteção. A árvore de conexões entre os equipamentos é mostrada na Figura 21.

Seguindo as ligações na Figura 21, percebe-se que uma falha de um determinado equipamento na rede, não necessariamente causará falta de serviço aos clientes, desde que exista um equipamento de proteção ativo. Nesse contexto os vetores binários A_i e P_i , de

Figura 19 – Representação do cenário em forma de matriz quando $n = 4$ e $N = 4$.



Fonte: elaborado pelo autor.

tamanho N^2n^2p , tem como objetivo determinar os clientes atendidos e protegidos por cada equipamento da rede, respectivamente.

Cada posição de A_i e P_i , representa uma ONU na rede e conseqüentemente um assinante, considerando-se o cenário como uma matriz, as equações 3.22 e 3.23 apresentam a relação das posições do vetor com a posição real do assinante, pois cada número nas casas da matriz está diretamente relacionado a posição de seu valor nos vetores.

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & Nn \\ 1 & 2 & \dots & Nn \\ 1 & 2 & \dots & Nn \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 2 & \dots & Nn \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Nn \\ 2Nn \\ \vdots \\ (Nn - 1)Nn \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\left[1 \ 2 \ \dots \ Nn \ Nn + 1 \ Nn + 2 \ \dots \ 2Nn \ \dots \ (Nn)^2 \right] \quad (3.23)$$

Os equipamentos do cenário podem ser organizados em uma lista, os N^2n^2p primeiros equipamentos são ONUs e seus vetores A_i e P_i , podem ser determinados de acordo com a equação 3.24.

$$\begin{aligned} A_i(i) &= 0 \\ P_i &= [0] \end{aligned} \quad (3.24)$$

Figura 20 – Pseudo-código para a disposição das células no cenário

Variáveis: $d_x, d_y, d_h, P_l, P_c, Seletor, Cenário[][]], N, n, a, l, Contador, N_{EB}$

Início:

$$d_x = \left\lceil \frac{3a}{2l} \right\rceil;$$

$$d_y = \left\lceil \frac{\sqrt{3}a}{l} \right\rceil;$$

$$d_h = \left\lceil \frac{3a}{l} \right\rceil$$

$$P_l = \text{resto} \left(\left(\frac{N \times n}{2} - 1 \right) / d_y \right)$$

se $\left(\left\lceil \frac{N \times n}{3a/2l} \right\rceil \text{ for par} \right)$ então:

$$P_c = \text{resto} \left(\left(\frac{N \times n}{2} - 1 \right) / d_h \right)$$

$$N_{EB} = \frac{2 \lceil N \times n / d_y \rceil \lceil N \times n / d_h \rceil - \lceil N \times n / d_y \rceil}{2}$$

$$Sel = 1$$

senão:

$$P_c = d_x + \text{resto} \left(\left(\frac{N \times n}{2} - 1 \right) / d_h \right)$$

$$N_{EB} = \frac{2 \lceil N \times n / d_y \rceil \lceil N \times n / d_h \rceil - \lceil N \times n / d_y \rceil - 1}{2}$$

$$Sel = 2$$

fim(se)

para Contador de 1 até N_{EB} faça:

$$Cenário[P_l][P_c] = 1$$

$$P_c = P_c + d_h$$

se $(P_c > (N \times n - 1))$ então:

$$P_l = P_l + d_y;$$

se $(Sel = 1)$ então:

$$P_c = d_x + \text{resto} \left(\left(\frac{N \times n}{2} - 1 \right) / d_h \right)$$

$$Sel = 2$$

senão:

$$P_c = \text{resto} \left(\left(\frac{N \times n}{2} - 1 \right) / d_h \right)$$

$$Sel = 1$$

fim(se)

fim(para)

fim

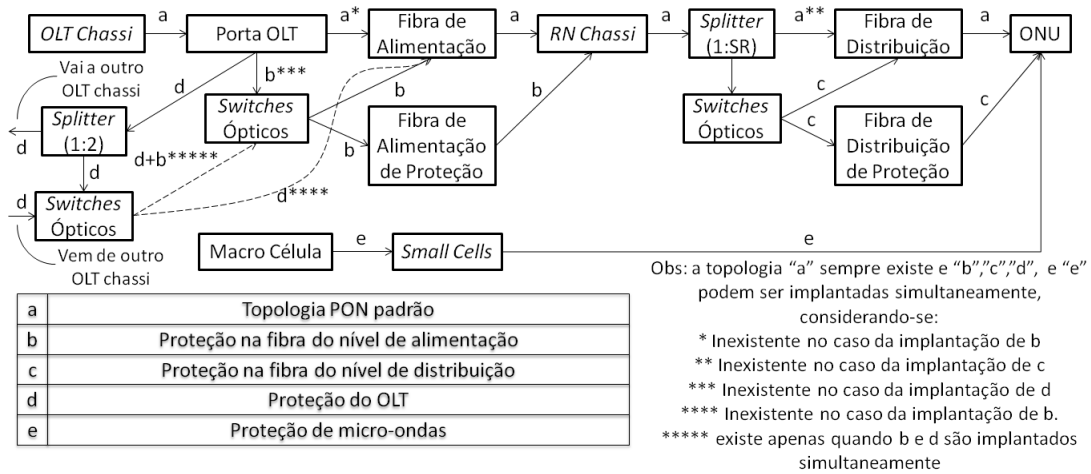
Fonte: elaborado pelo autor.

O restante da lista contém os outros equipamentos da rede, que terão seus vetores A_i e P_i , determinados de acordo com o fluxograma da Figura 22.

3.2 Modelo de Custos de Operação de Rede (MCOR)

Para determinar os custos de operação da rede em qualquer estado de operação num período T , analisando inclusive a interdependência entre eventos, representou-se os possíveis estados da rede por uma cadeia de markov, com definição de estados dada por

Figura 21 – Árvore de conexões entre os equipamentos considerando as diversas topologias.



Fonte: elaborado pelo autor.

características das falhas no sistema, como: quantidade e tipos de equipamentos falhos; a distância dos equipamentos ao CO; e o número de assinantes afetados pela falha. A Figura 23 apresenta um exemplo de uma cadeia de Markov representando um sistema de três equipamentos distintos.

Na Figura 22, os círculos inferiores representam os possíveis estados do sistema, os círculos superiores simbolizam o número correspondente de componentes em cada estado e as setas representam as transições entre os estados.

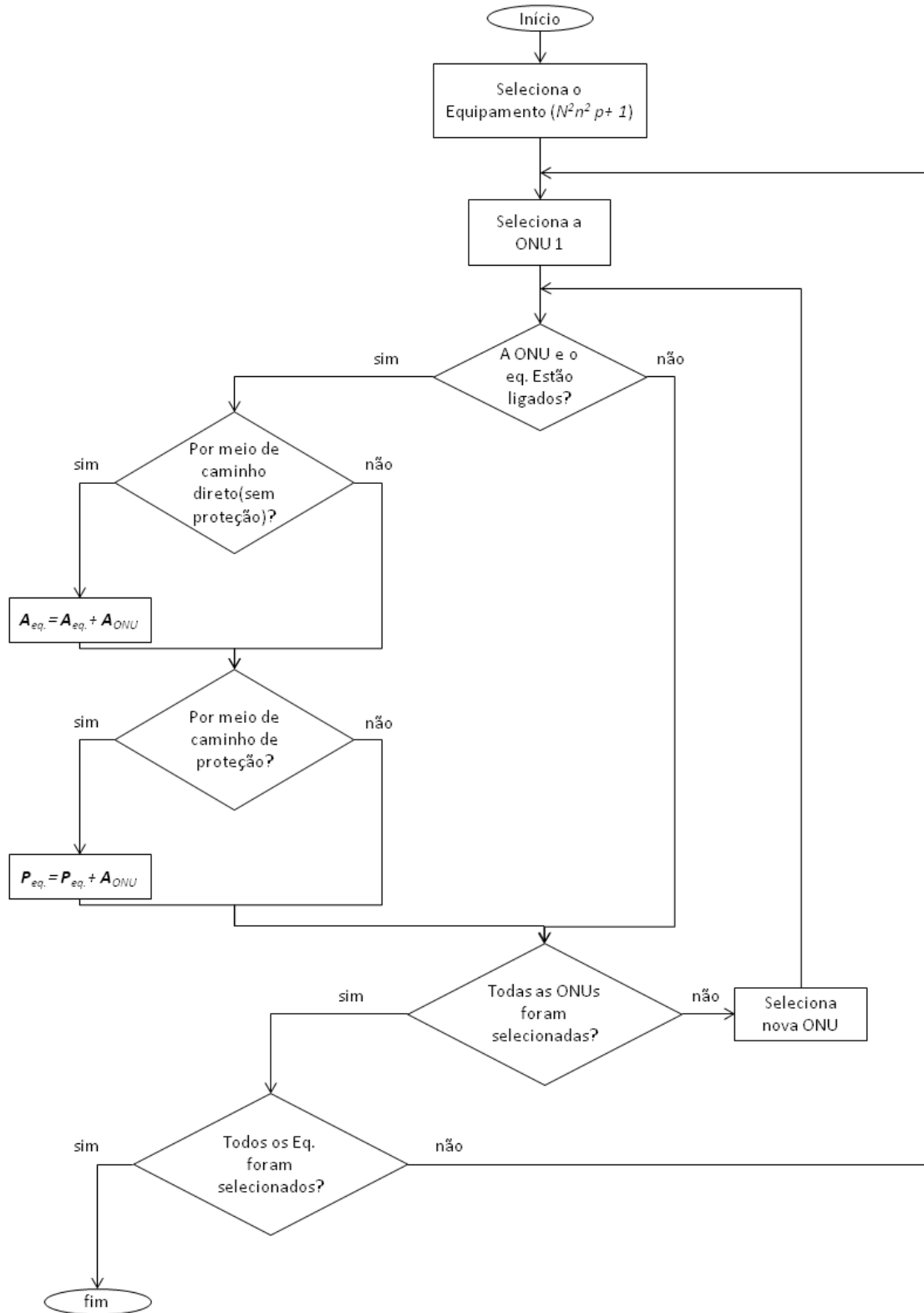
Este trabalho faz análise de cadeias de Markov de tempo contínuo (CTMC-*continuous time markov chain*) usando um método de solução cumulativo. Para esse tipo de cadeia as transições de estado ocorreram de acordo com taxas de transições (λ), as quais podem ser descritas como variação instantânea das probabilidades de transição de estado e descrevem o número médio de transições a partir de cada estado aos outros em determinada unidade de tempo. As taxas podem ser organizadas na forma uma matriz (λ), com elementos definidos pela equação 3.25 (ANDERS; SILVA, 2000).

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} \text{taxa de transição do estado } i \text{ para o estado } j, \text{ caso } i \neq j \\ \sum_{j \forall (j \neq i)} \lambda_{ij}, \text{ caso } i = j \end{cases} \quad (3.25)$$

As taxas de transição da cadeia são definidas de acordo com as taxas de falhas dos equipamentos ativos no estado e das taxas de reparo dos equipamentos falhos no estado, onde as últimas são obtidas pela equação 3.26. Onde Dis_{Eq}^{fal} é a distância do equipamento falho em relação ao CO, $V_{méd}$ é a velocidade média da equipe de trabalho responsável pelo reparo e $T_{rep}^{méd}$ é o tempo de reparo médio do equipamento falho.

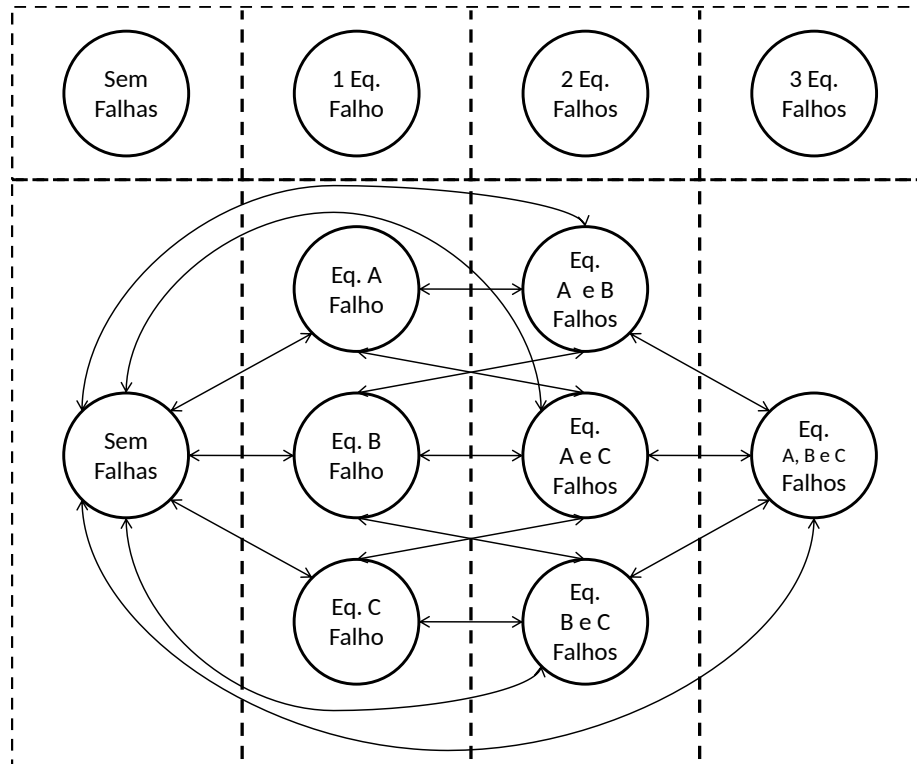
$$\text{Taxa de Reparo} = \frac{Dis_{Eq}^{fal}}{V_{méd}} + T_{rep}^{méd} \quad (3.26)$$

Figura 22 – Representação da metodologia para a determinação de A_i e P_i para equipamentos diferentes de ONUs.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 23 – Cadeia de Markov descrevendo os estados de um sistema de três equipamentos distintos



Fonte: elaborado pelo autor.

Para determinar os custos usa-se o MCOR, que é nada mais que um modelo de recompensa de Markov, ou seja, cada estado na rede está associado a uma recompensa, no caso, custos.

Os custos de operação são divididos em duas categorias, os fixos e os dependentes de falha. Os fixos são custos com aluguel de uma rede sem fio externa e o aluguel de espectro, no caso de uma proteção a micro-ondas proprietária. Os dependentes de falha são os custos de penalidade, reparo, energia elétrica, e a taxa de aluguel extra quando a capacidade requerida da rede externa de micro-ondas alugada excede aquela acertada em contrato.

O custo fixo de aluguel de uma rede externa micro-ondas ($C_{al,mwfx}$) é determinado pela equação 3.27. Onde $N_{avg}^{falhaEq}$, τ , Pr_{Gbps} e T são, respectivamente, a média do número de clientes atendidos dos equipamentos na rede, a capacidade mínima provida pela rede de micro-ondas ao assinante (definida no contrato de aluguel) em Gbps, o preço por Gbps acertado no contrato e o tempo de análise em horas.

$$C_{al,mwfx} = N_{med}^{falhaEq} \tau Pr_{Gbps} T \tag{3.27}$$

O custo de aluguel de espectro ($C_{aluguel}^{Espectro}$) é determinado pela equação 3.28. Onde $N_{Direção}$ é número de direções das conexões de antena, no caso padrão é sempre igual a 2, Pr_{link} é o preço por ano de link para interconectar a estação base ao nó de agregação e T_a é o tempo de operação em anos.

$$C_{aluguel}^{Espectro} = N_{SC} N_{Direção} Pr_{link} T_a \quad (3.28)$$

O custo de reparo por estado i (C_i^{Reparo}) é definido pela equação 3.29. Onde, o índice i representa os diferentes estados da rede, Sal é o salário por hora das equipes de trabalho, Pr_k é o preço do equipamento que será reparado no estado i , t_i é o tempo que o sistema passa no estado i em horas e η é o parâmetro que varia o custo de reparo desse equipamento, variando de 0 a 1.

$$C_i^{Reparo} = (Sal + Pr_k \eta) t_i \quad (3.29)$$

O custo de penalidade por estado i ($C_i^{Penalidade}$) é definido pela equação 3.30. Onde, o índice i representa os diferentes estados da rede, N_{ass}^{fal} é o número de assinantes falhos, Pr_{com} e Pr_{res} são, respectivamente, os valores de penalidades acertados no SLA para clientes comerciais e residenciais, β é um parâmetro que define a quantidade de clientes comerciais, variando de 0 a 1, α é o fator de impacto assumido, o qual tem definição apresentada no Capítulo 2 e possui valores iguais ou maiores a 1.

$$C_i^{Penalidade} = \left\{ \left[N_{ass}^{fal}(\beta) \right]^\alpha Pr_{com} + \left[N_{ass}^{fal}(\beta - 1) \right]^\alpha Pr_{res} \right\} t_i \quad (3.30)$$

O custo de potência por estado i (C_i^{Pot}) é definido pela equação 3.31. Onde Pr_{KWh} é o preço do kilowatt/hora, N_{eq}^{tot} é número total de equipamentos, Eq_k^{KWh} é o consumo de potência do equipamento k , o índice j denota os equipamentos falhos no estado i e P_j^{Eq} é potência de um equipamento j .

$$C_i^{Pot} = Pr_{KWh} \left(\sum_{i=k}^{N_{eq}^{tot}} Eq_k^{KWh} - \sum_j P_j^{Eq} \right) t_i \quad (3.31)$$

O custo de aluguel extra por estado i ($C_i^{Aluguel,extra}$) é definido pela equação 3.32. Onde, $N_{ass,mw,i}^{fal}$ é o número de assinantes falhos cobertos pela proteção a micro-onda no estado i e γ é o fator de sobrecarga que controla o preço para tráfego adicional, como definido no capítulo 2.

$$C_i^{Aluguel,extra} = \begin{cases} 0, & \text{caso } N_{ass,mw,i}^{fal} \leq N_{med}^{falhaEq} \\ \left[(N_{ass,mw,i}^{fal} - N_{med}^{falhaEq})^\gamma \tau Pr_{Gbps} \right] t_i, & \text{caso } N_{ass,mw,i}^{fal} > N_{med}^{falhaEq} \end{cases} \quad (3.32)$$

Dessa forma o custo total de operação da rede (C_{Tot}^{Imp}) é dado pela equação 3.33. Onde o índice i representa os diferentes estados da rede

$$C_{Op}^{Tot} = C_{al,mwfx} + C_{aluguel}^{Espectro} + \sum_i C_i^{Reparo} + C_i^{Penalidade} + C_i^{Pot} + C_i^{Aluguel,extra} \quad (3.33)$$

3.3 Modelo de Custos da Implantação de Rede (MCIR)

Atráves do MDR é possível obter todas as quantidades e distâncias de equipamentos na rede, dessa forma é possível obter o custo total de implantação da rede e de suas proteções. O MCIR terá como objetivo essa função.

O custo com compra de equipamentos é expressado pela equação 3.34. Onde, o índice i representa os diferentes tipos de equipamento, N_i^{Eq} é o numero de equipamentos do tipo i e Pr_i^{Eq} é o preço do equipamento tipo i . É importante ressaltar que o custo das fibras não é contabilizado por essa equação.

$$C_{compra}^{Eq} = \sum_{i=TiposdeEq.} N_i^{Eq} \times Pr_i^{Eq} \quad (3.34)$$

Custo total de instalação (C_{inst}^{tot}) é o custo para colocar em funcionamento todos os equipamento da rede na sua posição correta, e é expressado pela equação 3.35. Onde, C_{Inst}^{Dutos} é o custo de instalação dos dutos de fibra, C_{Inst}^{Fibra} é o custo de instalação da fibra nos dutos e C_{Inst}^{Eq} é o custo de instalação de todos os tipos de equipamentos, com exceção dos mencionados anteriormente.

$$C_{inst}^{tot} = C_{Inst}^{Dutos} + C_{Inst}^{Fibra} + C_{Inst}^{Eq} \quad (3.35)$$

O custo de instalação dos dutos de fibra (C_{Inst}^{Dutos}) é dado pela equação 3.36, onde $C_{Inst}^{Dutos, padrão}$ é o custo de instalação de dutos de fibra para uma topologia PON independente do tipo de proteção, $C_{Inst}^{Dutos, protNA}$ é o custo adicional da instalação de dutos de fibra relacionados a proteção no nível de alimentação e $C_{Inst}^{Dutos, protND}$ é o custo adicional da instalação de dutos de fibra relacionados a proteção no nível de distribuição. As três variáveis da equação 3.36 podem ser encontradas pelas equações 3.37, 3.38 e 3.39, onde Pr_{duto} é o preço do por quilometro da construção do duto.

$$C_{Inst}^{Dutos} = C_{Inst}^{Dutos, padrão} + C_{Inst}^{Dutos, protNA} + C_{Inst}^{Dutos, protND} \quad (3.36)$$

$$C_{Inst}^{Dutos, padrão} = [(n^2 - 1) \times l \times N^2 + (N - 1) \times L] \times Pr_{duto} \quad (3.37)$$

$$C_{Inst}^{Dutos, protNA} = [(N - 1)N \times L] \times Pr_{duto} \quad (3.38)$$

$$C_{Inst}^{Dutos,protND} = [(n-1)n \times l \times N^2] \times Pr_{duto} \quad (3.39)$$

O custo de instalação das fibras nos dutos (C_{Inst}^{Fibra}) é dado pela equação 3.40, onde $C_{Inst}^{Fibra,padrão}$ é o custo de instalação das fibras para uma topologia PON independente do tipo de proteção, $C_{Inst}^{Dutos,protNA}$ é o custo relacionado ao comprimento adicional de fibra necessário para a proteção no nível de alimentação e $C_{Inst}^{Dutos,protND}$ é o custo relacionado ao comprimento adicional de fibra necessário para a proteção no nível de distribuição. As três variáveis da equação 3.40 podem ser encontradas pelas equações 3.41, 3.42 e 3.43, onde Pr_{fibra}^{inst} é o preço do por quilometro da instalação da fibra no duto.

$$C_{Inst}^{Fibra} = C_{Inst}^{Fibra,padrão} + C_{Inst}^{Fibra,protNA} + C_{Inst}^{Fibra,protND} \quad (3.40)$$

$$C_{Inst}^{Fibra,padrão} = \left[\left(\frac{N^3 L}{2} \right) \left[\frac{n^2}{SR} \right] + \frac{n^3 l}{2} N^2 \right] \times Pr_{fibra}^{inst} \quad (3.41)$$

$$C_{Inst}^{Fibra,protNA} = \frac{L}{2} (N^3 + 2N^2) \left[\frac{n^2}{SR} \right] Pr_{fibra}^{inst} \quad (3.42)$$

$$C_{Inst}^{Fibra,protND} = Tot_{InstCost}^{DFProtection} = \frac{l}{2} (n^3 + 2n^2) N^2 Pr_{fibra}^{inst} \quad (3.43)$$

Por fim, o custo relacionado a instalação do restante dos equipamentos é determinado pela equação 3.44, onde o índice i representa os diversos equipamentos na rede, diferentes de fibras e dutos de fibras, T_i^{inst} é o tempo de instalação do equipamento i , dis_i é a distância do equipamento i em relação ao CO e $V_{méd}$ é a velocidade média das equipes de trabalho.

$$C_{Inst}^{Eq} = \sum_{i=1}^{Num_{Eq}} \left[\left(T_i^{inst} + \frac{dis_i}{V_{méd}} \right) \times Sal \right] \times pair_{fiber} \quad (3.44)$$

Dessa forma o custo total de implantação da rede (C_{Tot}^{Imp}) é dado pela equação 3.45.

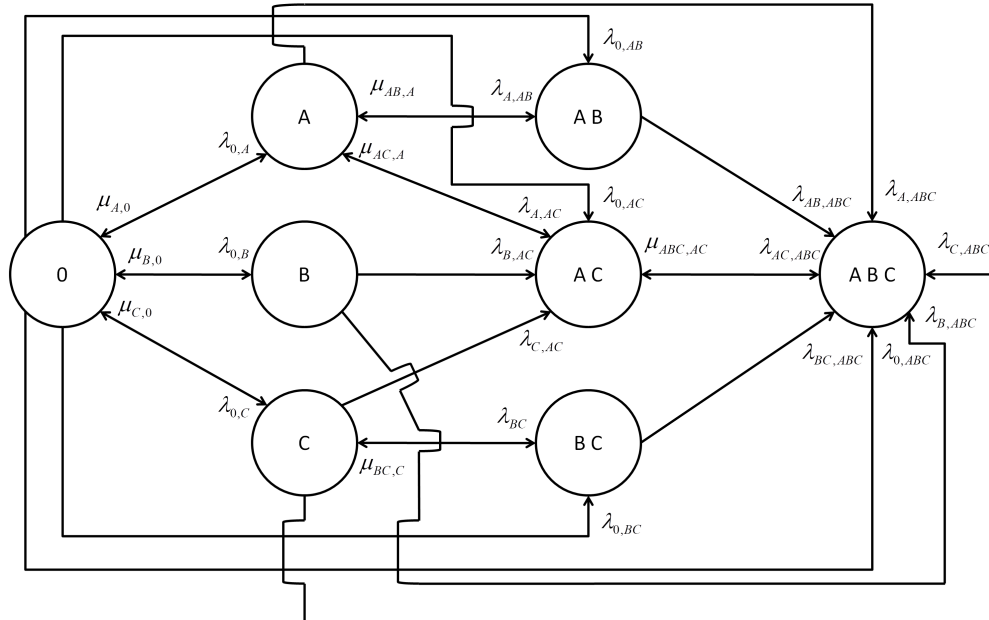
$$C_{Imp}^{Tot} = C_{inst}^{tot} + C_{compra}^{Eq} \quad (3.45)$$

4 Simulador

Por meio de análises cumulativas para CTMC é possível determinar o tempo médio de permanência em cada estado i em um período T (t_i), o qual é parâmetro fundamental do MCOR. Um dos métodos possíveis para se obter os diversos t_i é o uso de simulações computacionais, nesse contexto, o SiCRds (Simulador de Custos de Redes) foi desenvolvido em linguagem de programação Java utilizando o conceitos de MCMC (*markov chain monte carlo*).

Para as simulações, é definido o tempo de reparo médio e as taxas de falha de cada equipamento. Dessa forma, a taxa de falha de cada estado é obtida de acordo com a taxa de falha resultante de um sistema paralelo contendo os equipamentos falhos no estado. Já no caso de reparos, o simulador considera apenas uma equipe de trabalho, assim, a partir de qualquer estado existirá apenas um único outro estado alcançável com taxa de reparo diferente de zero.

Figura 24 – Exemplo de cadeia criada para a simulação de uma rede com três equipamentos distintos.



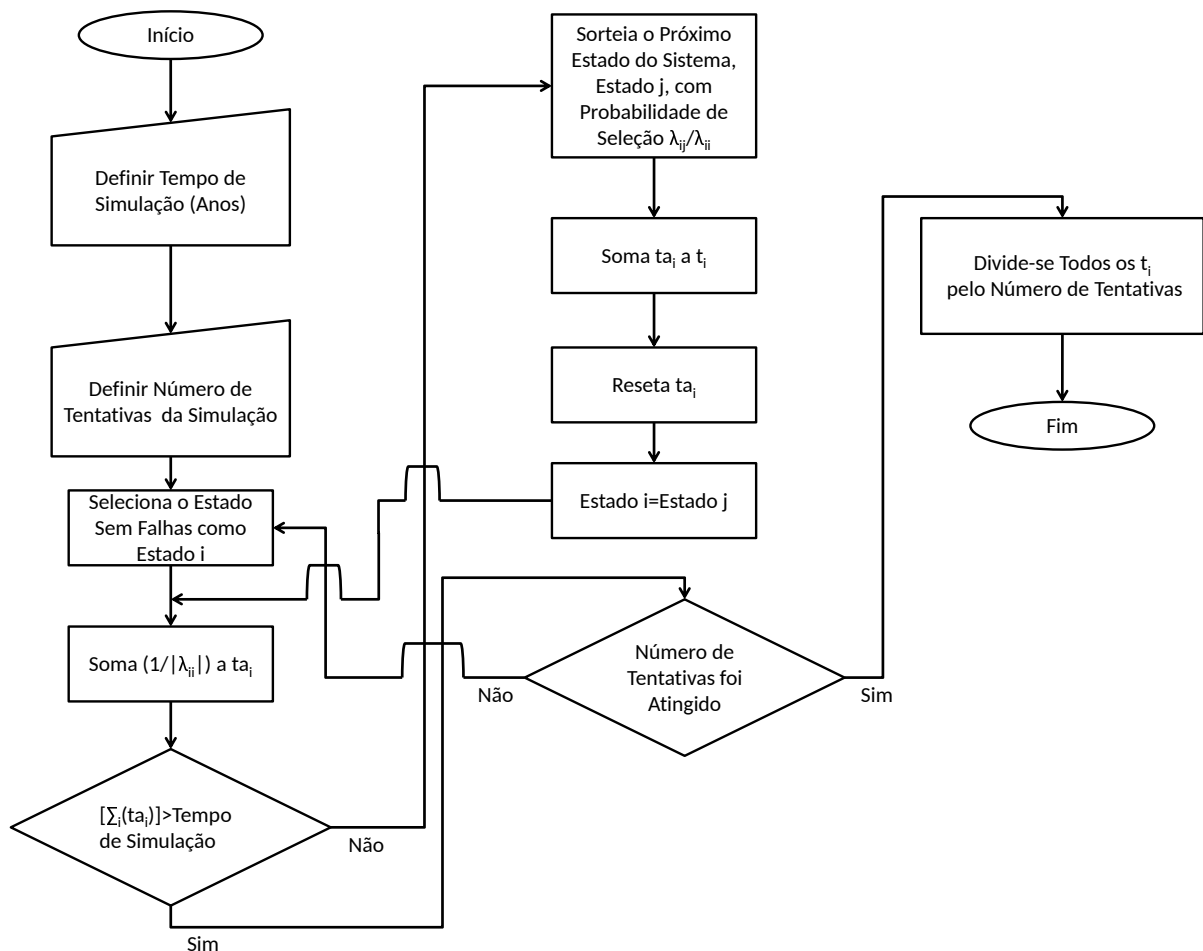
Fonte: elaborado pelo autor.

A figura 24 apresenta o exemplo de uma cadeia de Markov para uma rede de três equipamentos distintos, modelada de acordo com os critérios do parágrafo anterior. Observa-se na figura a existência de todas as taxas de falha e de apenas uma taxa de reparo por estado quando este contém falhas. O exemplo da figura é simples, já que contém apenas 3 equipamentos, no caso das redes simuladas nesse trabalho, que possuem entre 20 mil e 45

mil equipamentos, o número de estados seria muito grande, o que tornaria a simulação computacionalmente inviável. Entretanto, a taxa de falha dos equipamentos é baixíssima, de forma que falhas simultâneas desses são muito raras, sendo a probabilidade de falhas quadruplas praticamente zero. Dessa forma, assumir que falhas simultâneas de cinco ou mais equipamentos não ocorreram torna computacionalmente viável simular grandes redes.

O algoritmo de simulação para a aquisição dos t_i de cada estado da CTMC é apresentado pela Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma do processo de simulação que obtém os diversos t_i .

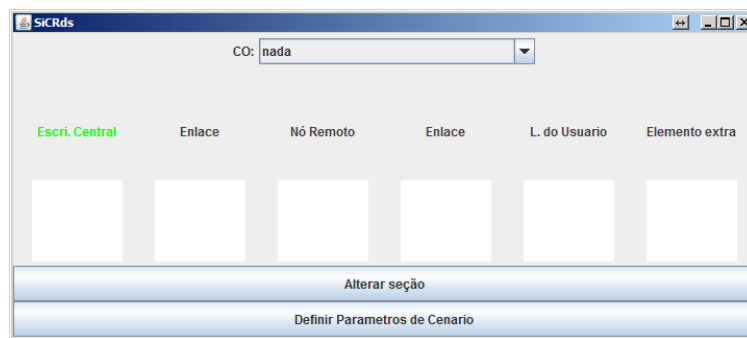


Fonte: elaborado pelo autor.

Para facilitar o uso do simulador, uma interface gráfica foi desenvolvida, uma vez que o número de simulações é extenso. A Figura 26 apresenta a interface gráfica, onde observa-se um menu na parte superior, alguns elementos gráficos na parte central e dois botões na parte inferior. O menu de opções localizado na parte superior seleciona os equipamentos que serão utilizados na seção de rede selecionada, que é ressaltada com coloração de letras verde na parte intermediária da interface. O botão alterar seção serve para selecionar a seção de rede da qual se deseja alterar os equipamentos. A Figura 27 mostra uma rede

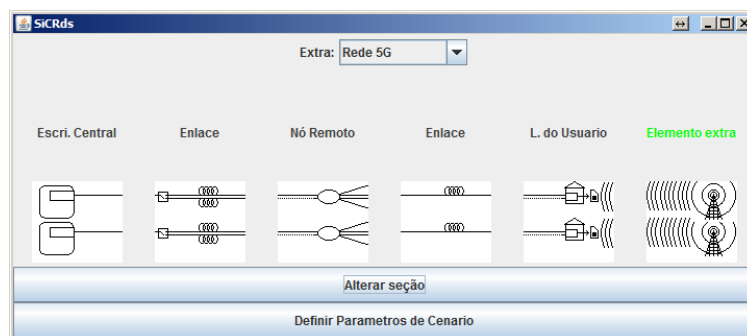
montada após a realização dos processos, no caso uma PON com proteção no nível de alimentação e de redes sem fio. Por fim, o botão definir parâmetros de cenário leva ao menu de definição do cenário e dos custos.

Figura 26 – Interface gráfica: visualização inicial



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 27 – Interface gráfica: arquitetura selecionada (PON com proteção no nível de alimentação e de redes sem fio).



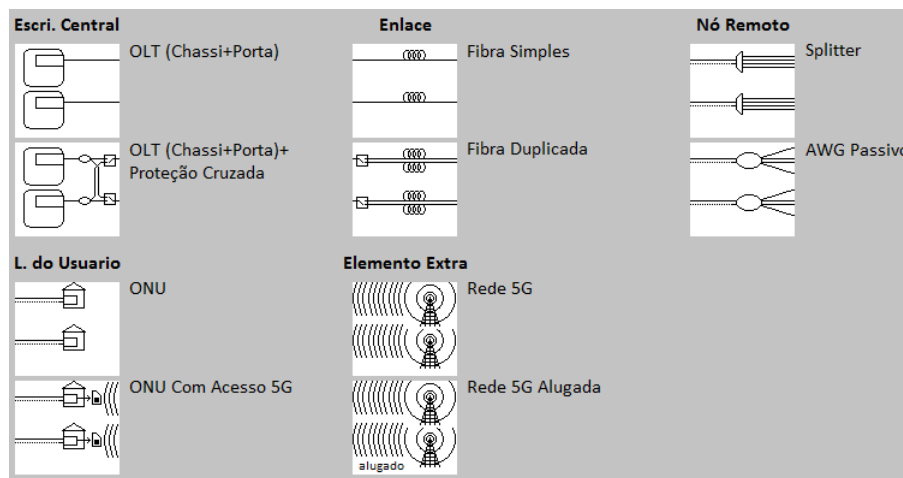
Fonte: elaborado pelo autor.

As opções disponíveis para cada seção de rede são apresentadas pela Figura 28. Ressalta-se que a possibilidade de alterar os equipamentos por seção, garante que o simulador possa operar com as mais diferentes configurações de proteção e redes óticas. Por exemplo, para uma rede P2P basta deixar a seção de nó remoto vazia.

A definição de cenário e custos, apresentado na Figura 29, contém a entrada de todos os parâmetros necessários para a realização da simulação. Contendo, além das caixas de entrada de dados, quatro botões. O botão simular realiza a simulação e o voltar retorna a interface gráfica a tela apresentada nas Figuras 26 e 27. Além disso, o simulador possui taxas de falha e custo de equipamentos padrão, que podem ser alterados com os botões remanescentes.

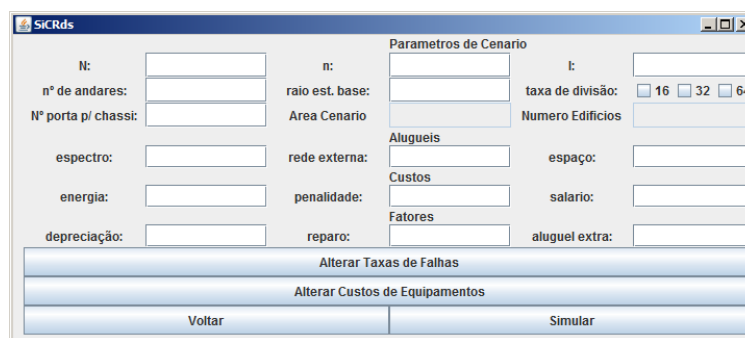
A alteração de taxas de falhas e de custos de equipamentos é feita por um sistema de importação e exportação, apresentado na Figura 30. Dessa forma, é possível ao usuário salvar uma configuração de taxas ou custos para utilização futura.

Figura 28 – Opções de construção de arquitetura para cada seção de rede.



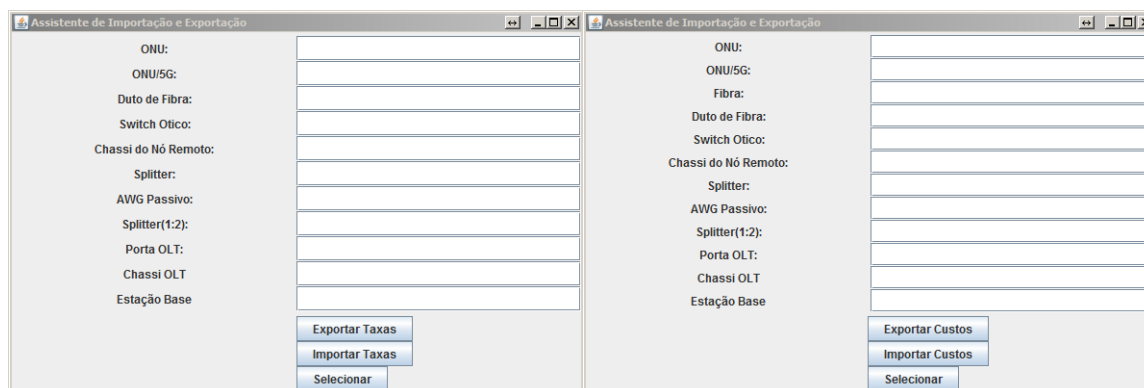
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 29 – Interface gráfica: definição de cenário e custos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 30 – Interface gráfica: sistema de alteração, importação e exportação de taxas de falhas e custo de equipamentos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, os resultados são apresentados em uma nova janela, na forma textual como é mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Interface gráfica: apresentação de resultados.



Fonte: elaborado pelo autor.

5 Resultados

Esse capítulo apresenta os resultados fornecidos pelo modelo para oito arquiteturas PON. Inicialmente são introduzidos o caso de estudo e as arquiteturas, em seguida, são apresentados os resultados para o caso de estudo proposto. Além disso, apresenta-se análises de sensibilidade visando expandir a avaliação econômica das arquiteturas para além do caso de estudo. Todas as análises são de custos, possuem intervalo de confiança de mais de 99% e levam em consideração uma unidade de custo (UC) baseada no preço de uma ONU, que na época desta escrita custava cerca de US\$ 350.

5.1 Caso de Estudo

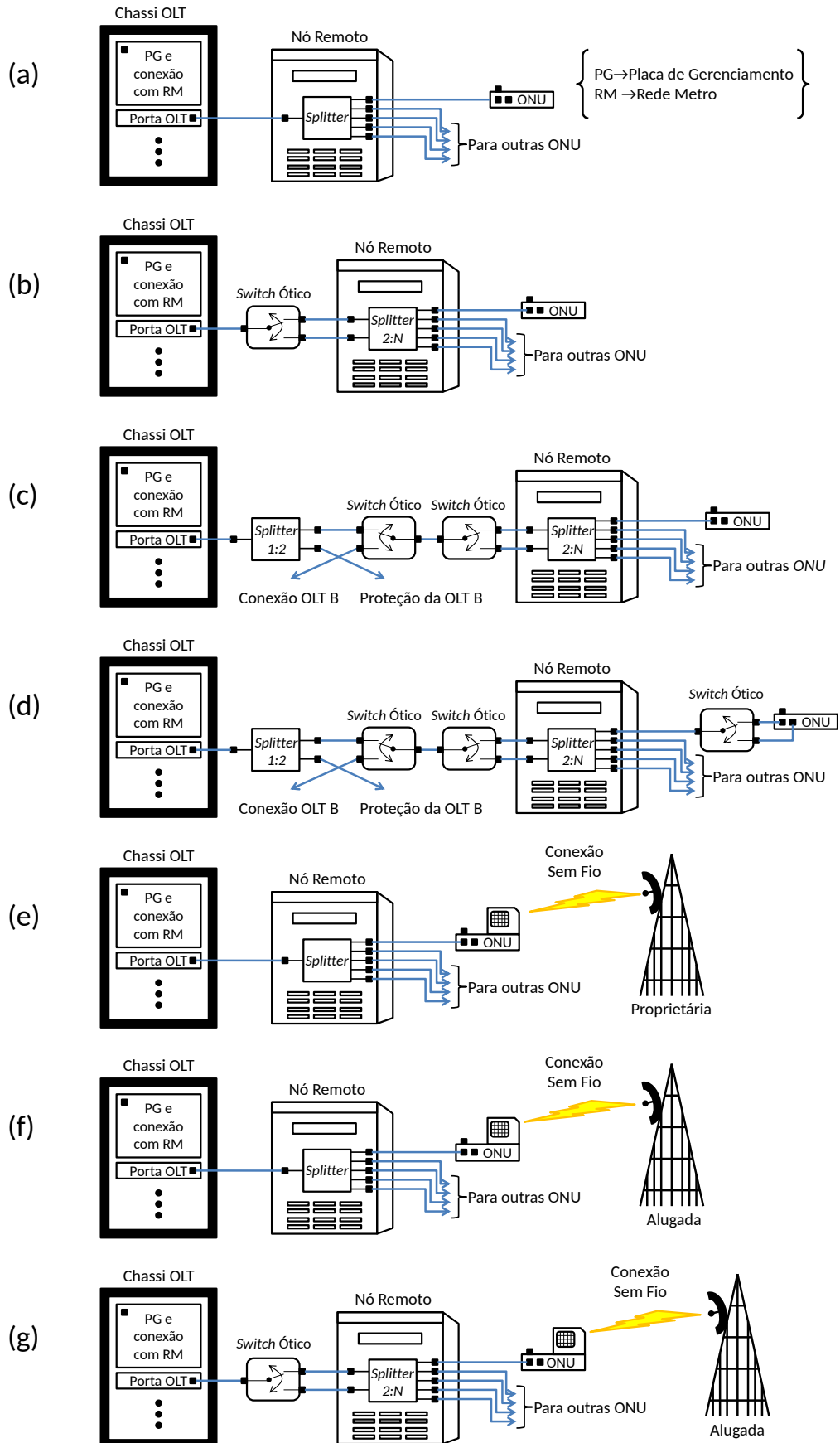
Essa seção apresenta o caso de estudo que foi aplicado ao modelo desenvolvido. Este leva em consideração sete arquiteturas PON: básica (desprotegida), com proteção do NA, com proteção do NA e OLT, com proteção do OLT e dos dois níveis (NA e ND), com proteção sem fio, com proteção sem fio alugada, e com proteção no NA e sem fio alugada. Todas as arquiteturas são ilustrados, respectivamente, na Figura 32 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g). Além disso, o tempo de operação foi de 20 anos para uma TDM-PON em configuração FTTH num cenário com 10 mil edifícios, número que é igual a capacidade de usuários de um CO Weldon e Zane (2003). Para representar subúrbios, regiões densas (urbanas) e de altíssima densidade (ultra urbanas) considerou-se, respectivamente, 576, 1024 e 2048 assinantes por metro quadrado (MACHUCA et al., 2011) (WELDON; ZANE, 2003), sabendo-se que a densidade de usuários pode ser ajustada por l (distância entre edifícios).

As dependências das equações do modelo apresentado neste trabalho para esse caso de estudo são mostradas pelas Tabelas 1, 2 e 3. Onde escolheu-se valores de forma a fornecer um cenário que possibilite verificar o desempenho econômico das arquiteturas de proteção em condições não-favoráveis, de forma realista, com valores extraídos de referências.

Tabela 1 – Parâmetros de construção do cenário (MACHUCA et al., 2011)(WELDON; ZANE, 2003)(FERNANDEZ; STOL, 2015)(FARIAS et al., 2013).

Parâmetros	Valores
N	10
n	10
l (km)	1/24 (Suburbano), 1/32 (Urbano), 1/45 (Ultra Urbano)
SR	32
$capOLTc$	72
r (km)	0,1
R (km)	5

Figura 32 – Arquiteturas PONs analisadas, (a) desprotegida, (b) protegida no nível de alimentação, (c) protegida no OLT e nível de alimentação, (d) protegida no OLT e níveis de alimentação e distribuição, (e) protegida por uma rede sem fio proprietária, (e) protegida por uma rede sem fio proprietária, (g) protegida no nível de alimentação e por uma rede sem fio alugada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Parâmetros de custo do cenário (MACHUCA et al., 2011)(WELDON; ZANE, 2003)(FERNANDEZ; STOL, 2015)(CHEN et al., 2010).

Parâmetros	Valores
Pr_{com} (UC/h)	0,29
Pr_{res} (UC/h)	0,03
Sal (UC/h)	0,54
τ (Gbps)	1
η	0,3
α	1,1
β	0,8
γ	1,5
Tempo de Simulação (anos)	20
Velocidade da Equipe de Trabalho (km/h)	20

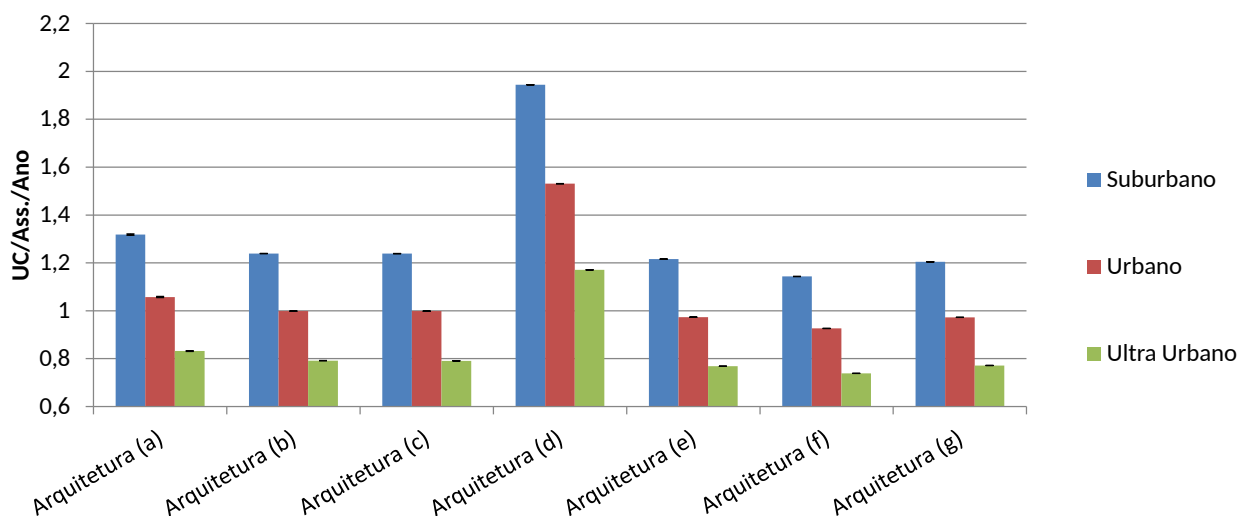
Tabela 3 – Parâmetros de equipamentos (MACHUCA; CHEN; WOSINSKA, 2012)(OASE, 2011)(CASIER, 2009)(CHEN; WOSINSKA, 2007)(CHEN et al., 2010)(WELDON; ZANE, 2003).

Componente	Custo (UC)	Tempo de Instalação (min)	Taxa de Falha (FIT)	Tempo Médio de Reparo (h)	Consumo de Potência (W)
ONU	1	60	256	1	5
<i>Splitter</i>	0,14/porta	10	120	1	0
Chassi do Nó Remoto	2	10	666	1	0
Porta OLT	21,71	10	1075	1	1197
Chassi OLT	12,86	30	500	1	200
<i>Switch</i> Ótico	0,14	10	200	2	0
<i>Small Cell</i>	4,74	60	1613	2	45
Antena	5,71	10	540	1	2000
Macro Célula	62,86	1440	32258	7	22000
Duto de Fibra	371,43/km	-	570	7	0

5.2 Resultados

Essa seção apresenta os resultados do modelo apresentado neste trabalho para o caso de estudo proposto. Inicialmente é apresentado o TCO, com posterior detalhamento dos CAPEX e OPEX.

Figura 33 – Custo total proprietário (TCO).



Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.1 Comparativo: Custo Total Proprietário

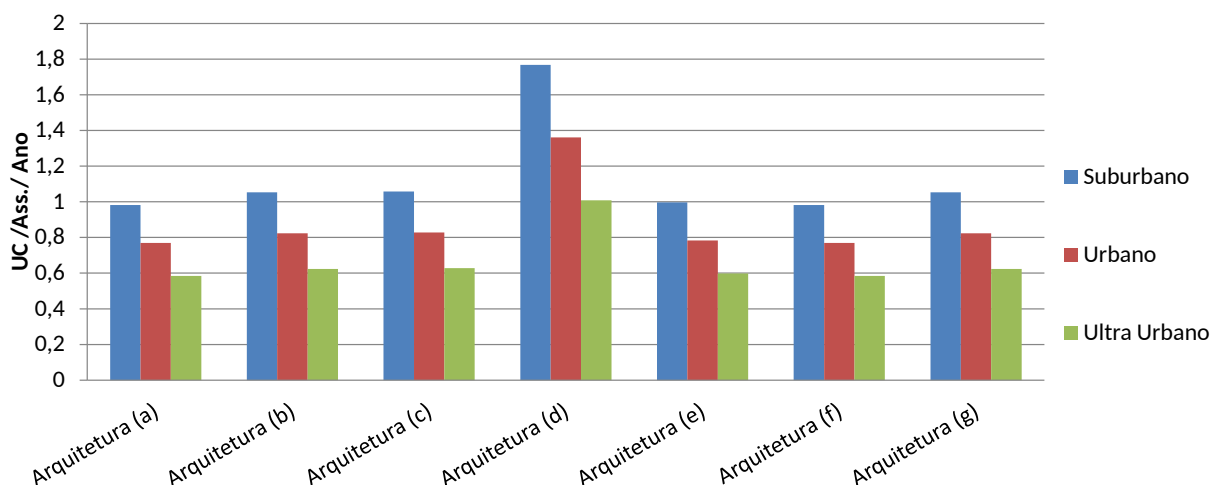
A Figura 33 apresenta o TCO para os cenários de densidade e arquiteturas apresentados no caso de estudo para 20 anos de operação. É evidente que para todos os casos de densidade que a arquitetura (d) é mais custosa, possuindo respectivamente, despesas de 1,94 e 1,17 UC/Ass./Ano para os casos suburbano e ultra urbano, sendo a única arquitetura que resulta em gastos superiores aos da arquitetura (a) (sem proteção), os quais são em média 30% menores considerando-se as diferentes densidades. Além disso, é visível que a arquitetura (f) é mais econômica para todos os casos de densidade, resultando numa redução de TCO, em relação a arquitetura (a) de cerca de 12%, com economia equivalente a 175, 131 e 93 mUC, para respectivamente, caso suburbano, urbano e ultra urbano.

Os resultados da Figura 33 também provam que arquiteturas de proteção podem aumentar a viabilidade econômica de redes PON. Uma vez que, apenas a arquitetura (d) não resultou em economias em relação a arquitetura (a). Ao utilizar-se qualquer um dos outros esquemas de proteção, obtem-se redução média do TCO de 7,98% para o caso suburbano, 7,65% para o caso urbano e 6,99% para o caso ultra urbano.

5.2.2 Comparativo: Custo de Instalação da Rede (CAPEX)

A Figura 34 mostra o CAPEX diluído no tempo de operação da rede, 20 anos, para os diversos cenários de densidade e arquiteturas. Observa-se que as arquiteturas (a), (f) exigiram os menores investimentos, ficando estes abaixo de 1 UC/Ass./Ano para o caso de densidade mais crítico (suburbano). Também percebe-se que as arquiteturas (b), (c), (e) e (g), resultam em economias no TCO, têm custo por cliente levemente maior que a arquitetura (a). Por fim, é constatado que a arquitetura (d) é a que exige mais investimentos,

Figura 34 – Custos de instalação (CAPEX).



Fonte: elaborado pelo autor.

possuindo um CAPEX em média 76% maior que no caso sem proteção considerando-se todos os casos de densidade.

O menor CAPEX das arquiteturas (a) e (f) tem origem no menor número de equipamentos das mesmas, uma vez que (a) é uma PON básica, sem nenhum equipamento adicional para proteção, e (f) também é uma PON básica, já que a rede sem fio é alugada e não faz parte da infraestrutura do operador da rede fixa.

As arquiteturas (b), (c), (e) e (g) tem CAPEX levemente maior que (a) devido aos equipamentos adicionais exigidos para a proteção da PON. As arquiteturas (a) e (g) exigem *switchs* óticos e fibras adicionais e (c) requer no mínimo, além dos equipamentos já mencionados, novos *splitters* e *switchs*. Por fim, a arquitetura (e) exige a instalação de *small cells* e macro células, possuindo menor CAPEX que (b), (c) e (g) devido ao menor custo de compra e instalação das estações base em relação a fibra ótica.

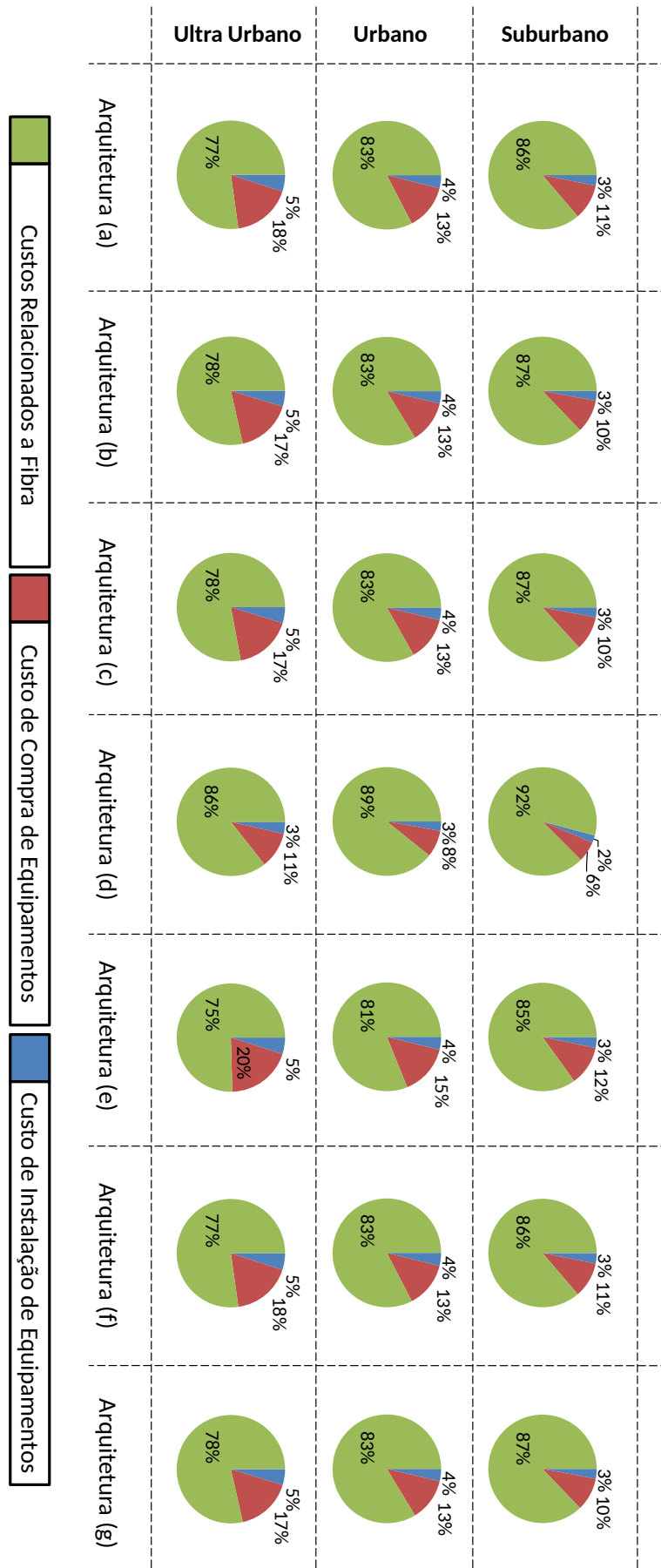
A arquitetura (d) tem o maior CAPEX porque requer grande quantidade de dutos para fibras adicionais, uma vez que a proteção é realizada tanto no nível de distribuição quanto no de alimentação.

Além do apresentado, nota-se que existe uma diminuição do CAPEX com a densidade, a qual ocorre devido as equações que determinam os custos relacionados a instalação da fibra e de seus dutos (3.37, 3.38, 3.39, 3.41, 3.42, 3.43), em virtude dessas serem dependentes do parâmetro l , que se torna maior com o aumento de densidade.

Por fim, comparando-se as Figuras 33 e 34 é possível notar que para o caso de estudo proposto o CAPEX é o fator dominante na determinação do TCO.

A Figura 35 detalha a participação, em porcentagem, dos diversos custos que compõem o CAPEX, custo relacionado a fibras (inclui os custos de construção dos dutos, de compra e instalação da fibra ótica), compra e instalação de equipamentos, para todos os cenários de densidade e proteção do caso de estudo. É possível observar que a maior parte do

Figura 35 – Diagrama de participação dos custos que compõem o CAPEX.



Fonte: elaborado pelo autor.

CAPEX é composta pelos custos relacionados a fibra (instalação de fibras e dutos) em todos os cenários apresentados. Além disso, observa-se que para todas as arquiteturas os custos de instalação de equipamentos são os que menos influenciam no CAPEX.

O grande impacto dos custos relacionados a fibra no CAPEX de redes PON vem do elevado preço de instalação dos dutos de fibra, o qual tem como origem as dificuldades de escavação em ambientes urbanos. Como exemplos de complicações para escavações de dutos em cidades tem-se: a necessidade de demolição e reconstrução de infra-estrutura urbana, legislações rígidas, transtornos a população, possibilidade de atravessar terrenos privados, entre outros.

O participação reduzida dos custos de instalação de equipamentos no CAPEX tem como origem os baixos tempos de viagem até a localidade do equipamento e de instalação. Por exemplo, o cliente mais distante no cenário menos denso (suburbano) está a 12 minutos do escritório central e o tempo de instalação de uma ONU, que é um dos maiores tempos de instalação, é de apenas uma hora.

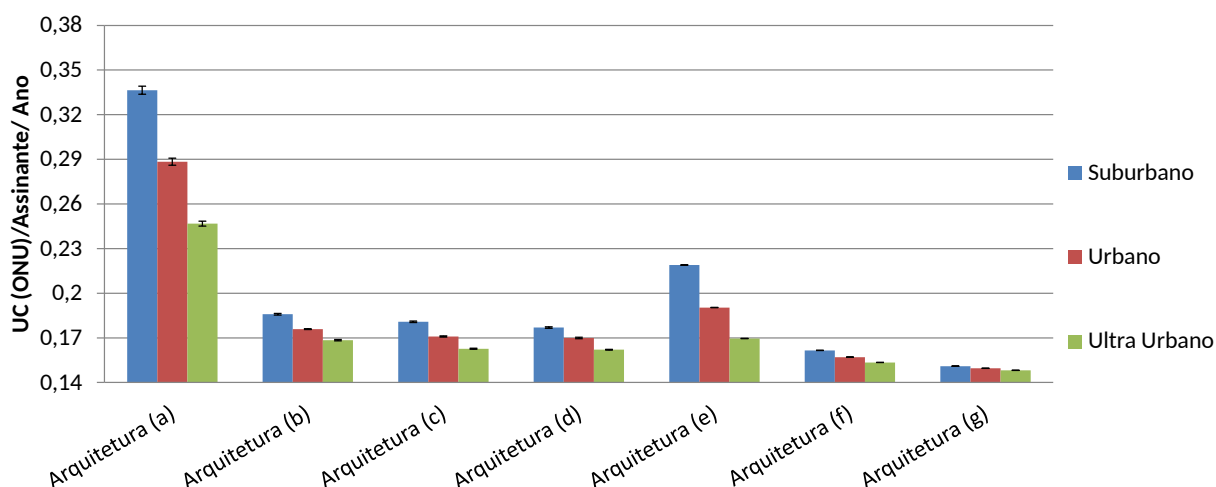
Fora o já comentado, nota-se uma diminuição de participação do custo relacionado a fibra com o aumento da densidade. As despesas com fibra são dependentes do parâmetro l e por isso reduzem com o aumento de densidade, sendo que os custos de instalação e compras de equipamentos tem, respectivamente, pouca (o máximo tempo de viagem é 12 minutos) e nenhuma dependência de l . Dessa forma, o aumento de densidade reduz fortemente os custos de fibra, mas não causa impacto nos outros custos do CAPEX, causando aumento de participação dos últimos.

Ainda analisando-se a Figura 35, observa-se que para arquiteturas com métodos de proteção baseadas em fibra ((b), (c), (d), (g)) existe um aumento da participação do custo relacionado a fibra, devido as fibras adicionais que deveram ser instaladas. Nota-se também que no caso da arquitetura (e) existe um aumento de participação do custo da compra de equipamentos, o qual ocorre devido a aquisição de antenas e estações base. Por fim, percebe-se que para as arquiteturas (f) e (g) a participação dos custos é idêntica, respectivamente, aos das arquiteturas (a) e (b), uma vez que o aluguel de uma rede sem fio não conta como CAPEX.

5.2.3 Comparativo: Custo de Operação da Rede (OPEX)

A Figura 36 mostra os investimentos em termos de OPEX para todos os cenários de densidade e arquiteturas do caso de estudo. Os resultados mostram que o maior OPEX é o da arquitetura (a), sem proteções, atingindo cerca de 0,25 UC/Ass./Ano. Além disso, todas as arquiteturas com métodos de proteção ((b), (c), (d), (e), (f), (g)) reduzem fortemente o OPEX, onde a menor e maior redução é, respectivamente, das arquiteturas (e) e (g), com redução relativa a arquitetura (a), no caso de densidade menos crítico (Ultra Urbano), de 0,06 UC/Ass./Ano para a primeira e 0,1 UC/Ass./Ano para a segunda.

Figura 36 – Custos operacionais (OPEX).



Fonte: elaborado pelo autor.

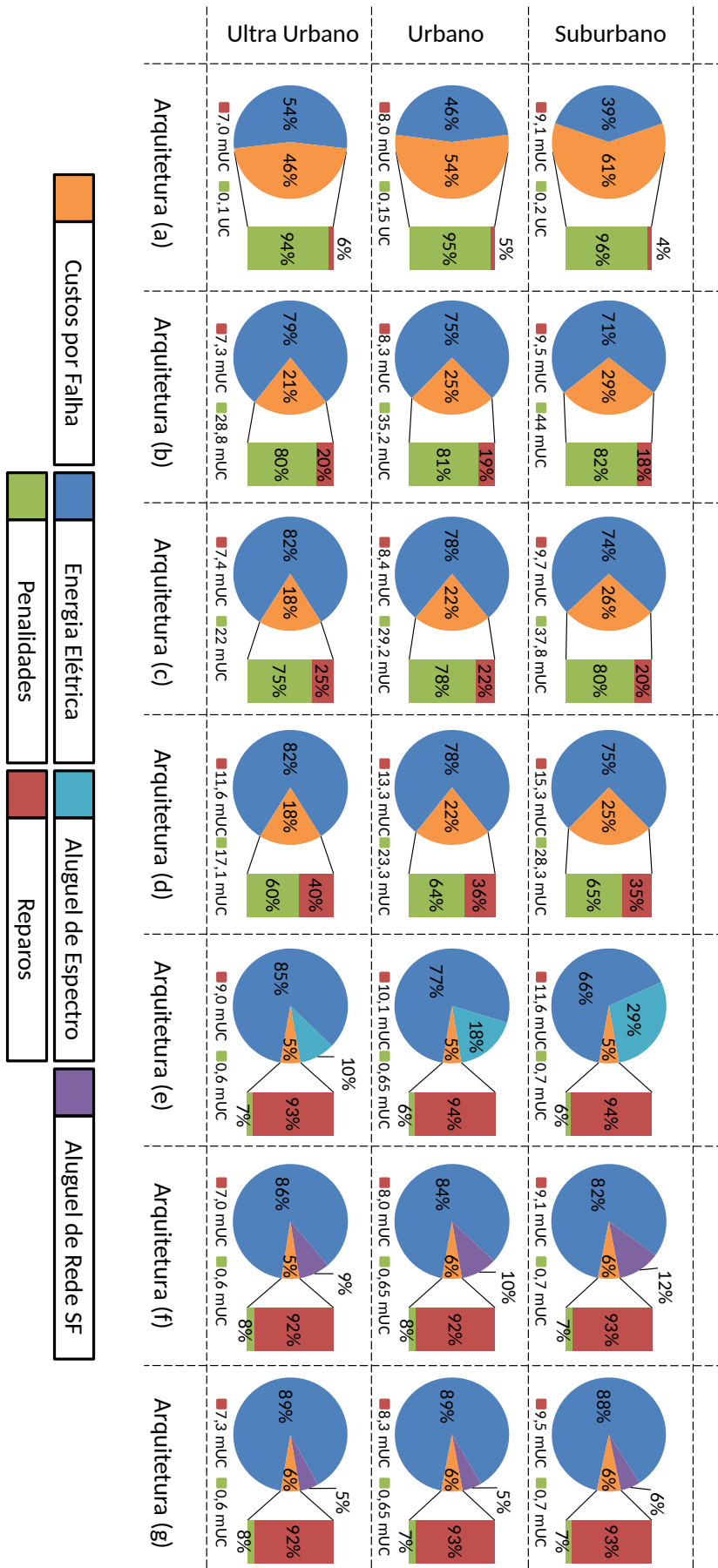
As arquiteturas (f) e (g), que alugam uma rede sem fio para proteger a rede fixa, resultam no menor OPEX entre todas as arquiteturas analisadas, porque apesar exigirem um pagamento de aluguel anual a um operador móvel (com risco de despesas adicionais no caso de sobrecarga da rede móvel), garantem baixos custos de penalidade, resultando no mesmo consumo de energia da PON básica e evitando custos com aluguel de espectro.

Outro resultado a se ressaltar na Figura 36 é o da arquitetura (d), que obteve a maior redução de OPEX em relação a (a) entre as arquiteturas com proteção não baseada no método de rede sem fio ((b), (c), (d)), que no caso de densidade menos crítico teve redução de 0,085 UC/Ass./Ano.

A maior parte das reduções de custo da arquitetura (d) está relacionada ao método de proteção do nível de alimentação e apenas uma pequena parcela das reduções está relacionada aos métodos de proteção do OLT e do nível de distribuição. Tal dedução é óbvia devido ao conjunto evolutivo de esquemas com métodos de proteção não baseados em rede sem fio formado pelas arquiteturas (b), (c) e (d). Onde cada arquitetura adiciona um novo método de proteção sem remover os métodos das anteriores. A primeira arquitetura protege apenas a o nível de alimentação, a segunda adiciona a proteção do OLT e o terceira acrescenta proteção do nível de distribuição. Dessa forma, pode-se dizer que proteger o OLT ou o nível de distribuição não traz grande retorno para o caso de estudo proposto.

A Figura 37 detalha a participação dos diversos custos que compõem o OPEX em cada cenário de densidade para todas arquiteturas analisadas, considerando custo por falha, eletricidade, aluguel de espectro e infraestrutura, incluindo uma análise, em valor e porcentagem relativa, das despesas que compõem o custo por falha, as quais são reparo e penalidade por indisponibilidade. Observa-se que, com exceção da arquitetura (a) em casos suburbano e urbano, a despesa com maior participação no OPEX é a eletricidade, provando que apesar de redes PON conterem equipamentos passivos os custos com energia

Figura 37 – Diagrama de participação dos custos que compõem o OPEX.



Fonte: elaborado pelo autor.

elétrica ainda são uma grande preocupação para operadores. Nota-se também que a implantação de proteção reduz fortemente a participação do custo associado a falhas e que a maior redução foi a das arquiteturas (e),(f) e (g), onde as despesas com falha representam de 5 a 6% do OPEX, sendo essas quase não dependentes do custo de penalidade, que só é responsável por 7 a 8% dos custos com falhas.

As arquiteturas (e),(f) e (g) obtiveram as menores fatias de despesas por falha devido ao seu alto nível de proteção, uma vez que elas cobrem falhas de quase todos os equipamentos na rede, sendo a única exceção as ONU. Tais fatores, garantem elevada disponibilidade e que a maioria das falhas na rede será isolada, dessa maneira, não havendo aumento de despesas por fator de impacto. Dessa forma, as arquiteturas (e),(f) e (g) possuem baixíssimos custos de penalidade e despesas por falha praticamente dependentes dos custos de reparo. Em relação ao nível de proteção, pode-se dizer que ele é crescente nas arquiteturas, indo de (a) até (g), com cada arquitetura protegendo cada vez mais equipamentos. Dessa forma é possível verificar que quanto mais protegida a arquitetura, menor a participação das despesas por falha, sendo que essas ficam cada vez mais dependentes dos custos de reparo, uma vez que métodos de proteção atingem apenas os custos por penalidade.

Analisando-se a Figura 37 em termos de densidade, nota-se que o aumento dessa reduz os custos de penalidade e reparos, tal fato ocorre por causa da diminuição de l , que resulta na redução do número de falhas no sistema e em um menor tempo de falha, os quais são, respectivamente, resultado dos equipamentos com taxa de falha dependente do comprimento (ex. dutos de fibra) e do menor tempo de viagem (o cliente mais distante está a 12 minutos do CO). Dessa forma, como os custos por eletricidade independem da densidade, a participação dos custos por falha diminui com o aumento de densidade.

Além do já mencionado, a Figura 37 também fornece dados de custo de aluguel, tanto de espectro quanto de infraestrutura para as arquiteturas (e), (f) e (g). Nota-se que no caso das arquiteturas (f) e (g) existe certa redução na participação dos gastos de aluguel com o aumento de densidade, isso ocorre devido as menores despesas com aluguel extra por sobrecarga da rede sem fio, já que l menores resultam em diminuição taxa de falha dos dutos de fibras, que podem sobrecarregar a rede sem fio. A arquitetura (g) ao proteger as fibras de alimentação diminui tanto o valor quanto a participação do custo de aluguel de infraestrutura, a mantendo ao redor de 5-6%. Quanto a arquitetura (e), casos mais densos requerem menos antenas para cobertura total, reduzindo a participação do aluguel de espectro no OPEX

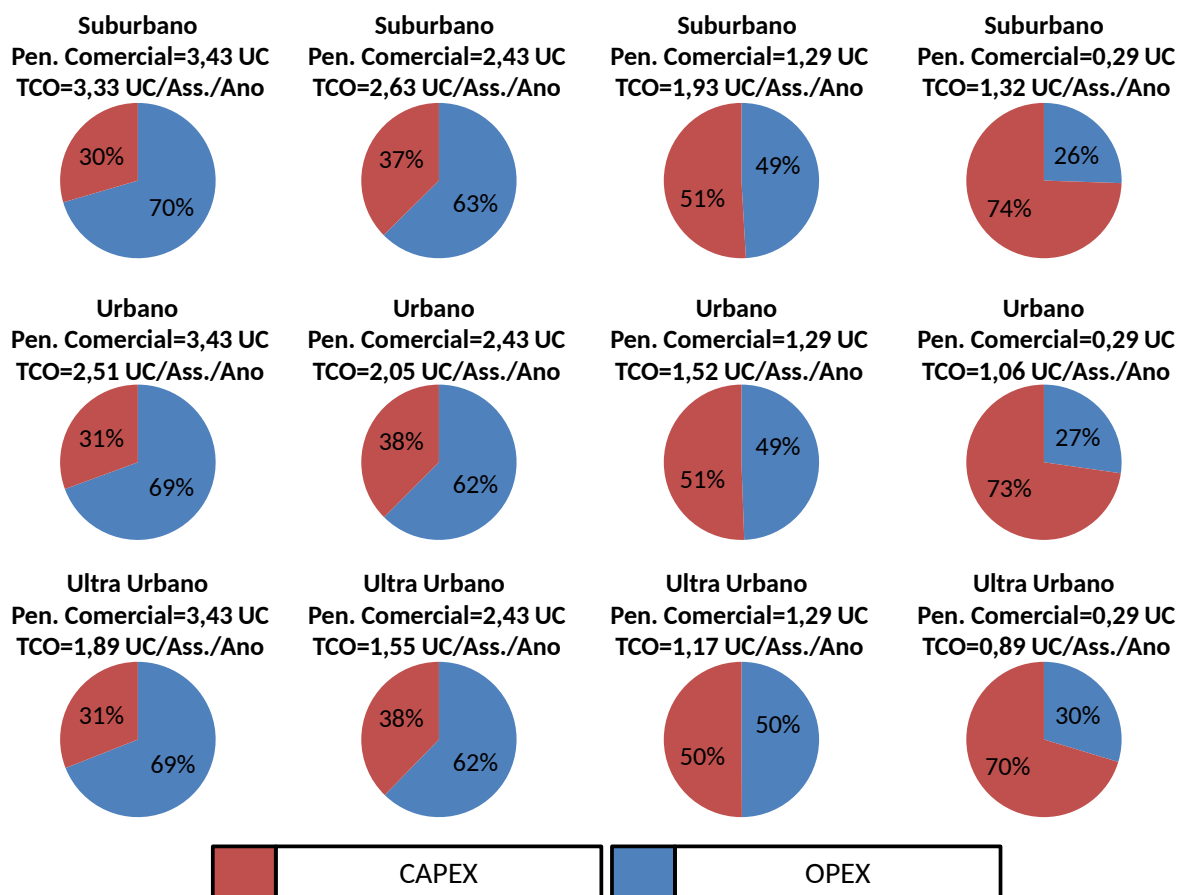
Por fim, comparando-se as Figuras 36 e 37 é possível notar que as arquiteturas com os maiores desvios padrões são aquelas com as maiores participações de custo de penalidade, isso ocorre devido a extrema aleatoriedade do mesmo, uma vez que o fator de impacto pode ter fortes influências no resultado, principalmente para arquiteturas com nível de proteção menor.

5.3 Análises de Sensibilidade

Essa seção apresenta o efeito da variação de alguns dos parâmetros utilizados pelo modelo de custo deste trabalho, visando não prender as análises ao caso de estudo proposto. As variações realizadas, por ordem de apresentação, são: custos de penalidade por indisponibilidade de clientes comerciais (Pr_{com}), custo de instalação dos dutos de fibra (Pr_{duto}), número de saídas do elemento divisor de sinal (N_{Edu}), fator de sobrecarga (γ) e raio de *small cells* (r).

5.3.1 Variação do Custo de Penalidade

Figura 38 – Análise de sensibilidade da participação de gastos no TCO para a arquitetura (a) variando-se o custo de penalidade comercial.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 38 apresenta os efeitos que diferentes custos de penalidade comercial causam na participação, em porcentagem, de OPEX e CAPEX no TCO da arquitetura (a). Os resultados são expressos por meio de doze gráficos em pizza, representando quatro diferentes custos de penalidade para os três cenários de densidade apresentados no caso de estudo, onde o valor da pena comercial varia de 0,29 (FERNANDEZ; STOL, 2015) UC a

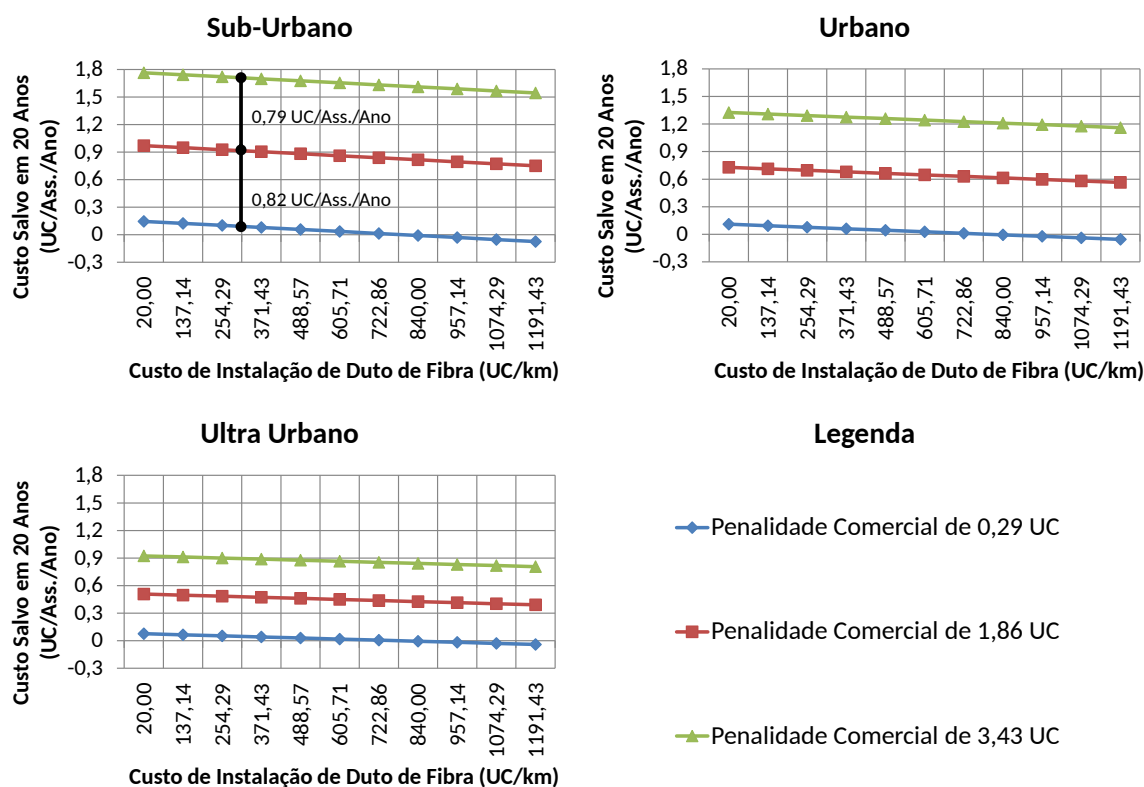
3,43(CHEN et al., 2010) UC. Observa-se que para penalidades menores, como a do caso de estudo (0,29 UC), o CAPEX é fator dominante no TCO, mas para penas acima de 1,29 UC, o OPEX se torna o fator dominante, provando a forte influência do valor de pena comercial no OPEX.

Além disso, verifica-se que as participações de CAPEX e OPEX não são muito afetadas pela mudança de densidade. Tal fato decorre do comportamento das despesas relacionadas aos dutos de fibra, uma vez que em cenários mais densos (com l menor) esses apresentam menor comprimento e número de falhas, devido a diminuição das taxas de falha dos dutos (dependentes do comprimento), reduzindo tanto CAPEX quanto OPEX.

Por fim, os resultados indicam que a instalação de proteção se torna cada vez mais necessária com o aumento de penalidades por indisponibilidade de clientes comerciais, pois métodos de proteção reduzem os custos com penalidade, sendo que para a arquitetura (a) as penalidades são dominantes no OPEX, o qual é dominante no TCO em cenários de maior densidade.

5.3.2 Proteção no Nível de Alimentação, Variação do Custo de instalação de Dutos de Fibra

Figura 39 – Análise de sensibilidade para arquitetura (b) envolvendo custos de instalação de dutos de fibra e custo de penalidade comercial.



Fonte: elaborado pelo autor.

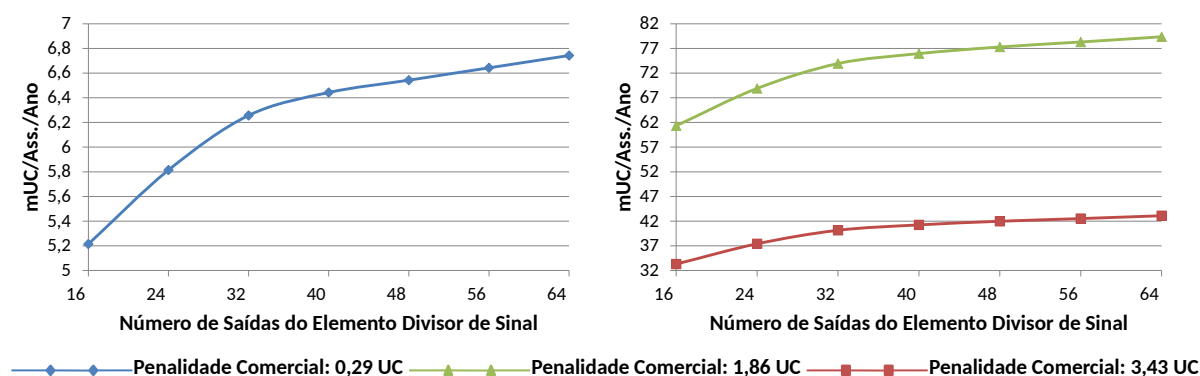
A Figura 39 mostra o efeito da variação do custo de instalação dos dutos de fibra no TCO salvo pela arquitetura (b) em relação a (a). Os resultados são expressos em três gráficos, um para cada cenário de densidade, e três curvas de custos, cada uma para diferentes valores de penalidade comercial, onde a variação do preço da instalação dos dutos vai de 0,10 UC (CHEN; WOSINSKA, 2007) a 5,96 UC (CERAGON, 2009). Verifica-se uma diminuição linear do custo salvo pela arquitetura (b) com o aumento do preço dos dutos de fibra, existindo apenas para o mínimo caso de penalidade comercial considerado um ponto de não retorno financeiro, que pode ser identificado pela passagem da curva sobre o zero, ele indica a partir de qual valor de custo de instalação de dutos de fibra a arquitetura (b) é inviável, assumindo o valor de aproximadamente 840 UC/km para todos os casos de densidade.

Além disso, nota-se que quanto maior a penalidade comercial, maior o custo salvo, dessa forma, mais viável é o método de proteção da fibra de alimentação. Percebendo-se também que a relação de aumento conjunto é não linear, uma vez que a diferença de custo salvo entre duas curvas quaisquer não é igual a entre outras duas com mesma diferença de penalidade comercial. Por exemplo, para o caso suburbano a diferença de custo salvo para um mesmo ponto entre a curva azul com losangos e a vermelha com quadrados é de 0,82 UC/Ass./Ano, já a diferença de custo salvo para um mesmo ponto entre a última curva e a verde com triângulos é de 0,79 UC/Ass./Ano, sendo que a diferença entre os valores de penalidade comercial que as curvas representam é igual para os dois casos.

A relação não linear entre penalidade comercial e custo salvo ocorre devido a presença de clientes residências, que quando sem serviço, pagam o custo de penalidade residencial, que na situação analisada se manteve constante.

5.3.3 Proteção do OLT, Variação da Taxa de Divisão

Figura 40 – Análise de sensibilidade do custo salvo pela proteção do OLT considerando o número de saídas do elemento divisor de sinal.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 40 apresenta o efeito da variação do número de saídas do elemento divisor de sinal no custo salvo pelo método de proteção do OLT. Os resultados são expressos por três curvas de valor de penalidade em dois gráficos com escalas diferentes, que servem para a facilitação de visualização do comportamento das curvas. Percebe-se que com o aumento do número de saídas o custo salvo tem um comportamento semelhante ao de uma função logarítmica deslocada, crescendo rapidamente até uma saída com 32 usuários e lentamente a partir daí.

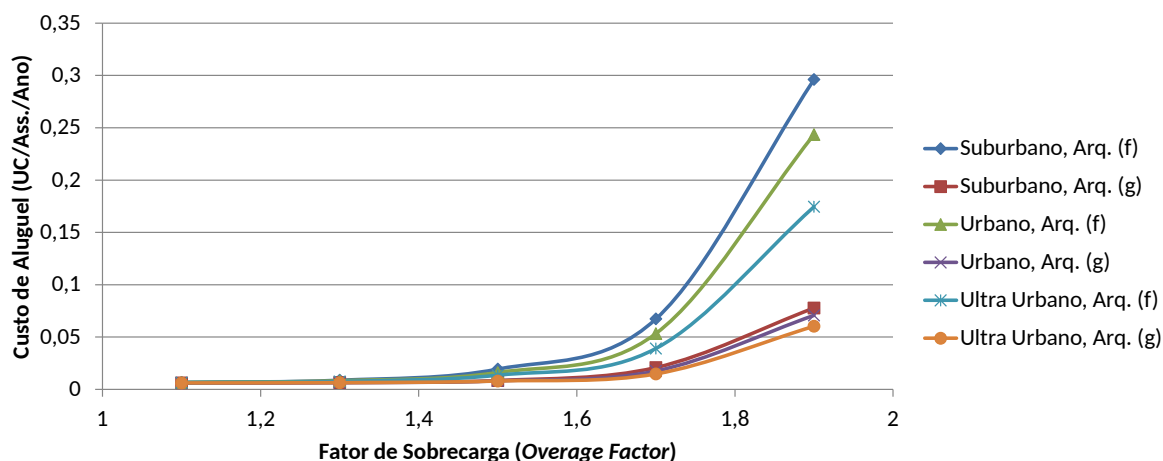
O comportamento das curvas indica efetividade maior do método de proteção para taxas de divisão iguais ou maiores a 32 usuários, o que ocorre porque nessa situação o número de clientes atingidos por falhas é grande o suficiente para que o fator de impacto tenha maiores efeitos sobre o custo de penalidade.

Além do mais, a análise de sensibilidade confirma novamente que em casos de penalidade comercial mais elevada a economia de custos é muito superior, justificando a proteção do OLT até mesmo para elementos divisores de sinal com menos de 32 saídas.

Além do apresentado, percebe-se que os resultados não são apresentados para diversos valores de densidade, a razão disso é que o custo salvo por essa proteção independe desse fator, já que as OLT estão localizadas no CO, garantindo o mesmo tempo de viagem, e consequentemente de falha, em todos os casos de densidade.

5.3.4 Proteção Alugada, Variação do Fator de Sobrecarga

Figura 41 – Análise de sensibilidade dos custos de aluguel de redes sem fio de acordo com o fator de sobrecarga.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 41 mostra o impacto da variação do fator de sobrecarga nos custos de aluguel de redes sem fio, tanto na arquitetura (f) quanto na (g). Os resultados indicam que quanto menor a densidade maior os custos de aluguel. Além disso, percebe-se que a arquitetura

(g) leva a um maior redução de custos com aluguel do que (f). Observa-se também que fatores de sobrecarga até 1,5 não elevam os custos de aluguel de forma significativa.

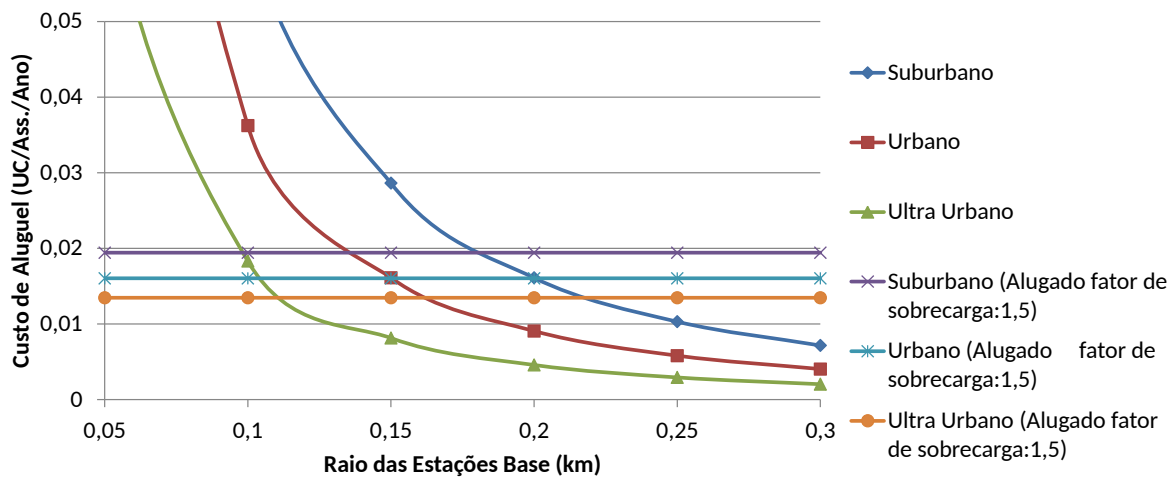
A diminuição de custo com aumento da densidade ocorre devido ao crescimento da probabilidade de falhas dos dutos de fibra em cenários mais esparsos, uma vez que esses componentes podem levar a falhas de muitos clientes simultaneamente, superando o limiar de usuários falhos e destacando a influência do fator de sobrecarga sobre os clientes que deveriam ser protegidos.

O menor custo da arquitetura (g) em relação a (f) está relacionado a cobertura ótica das falhas dos dutos de fibra de alimentação, que se protegidos pela rede sem fio teriam custos fortemente influenciados pelo fator de sobrecarga.

Fatores de sobrecarga de até 1,5 são leves devido a baixa influência que esses apresentam sobre o custo, mesmo para cenários com muitas falhas simultâneas, acima desse valor os fatores são mais graves, tendo mais impacto sobre os custos, causando um crescimento nas curvas de forma exponencial, principalmente no caso da arquitetura (f).

5.3.5 Proteção Sem Fio, Proprietária vs Alugada, Variação da Área de Cobertura

Figura 42 – Análise de sensibilidade: custo de aluguel de espectro vs aluguel de infraestrutura, arquitetura (e) vs (f)



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 41 mostra o impacto causado no custos de aluguel para redes sem fio, seja de espectro ou infraestrutura, pela variação do raio das *small cells* para as arquiteturas (e) e (f) nos diversos cenários de densidade apresentados no caso de estudo. Os resultados mostram que para a arquitetura (f) o aluguel não é afetada pela variação do raio de cobertura e é inversamente proporcional ao crescimento da densidade. Por outro lado, na arquitetura (e) os custos de aluguel possuem o comportamento de uma potência com

expoente negativo, sendo maiores para menores raios de cobertura, possuindo relação também inversamente proporcional ao crescimento da densidade.

Na arquitetura (e) o aluguel pago é o de espectro, que é inversamente proporcional a densidade, devido ao menor número de *small cells* necessárias para cobrir uma menor área. O comportamento das curvas, semelhante ao de uma função potência, vem da relação linear entre o número de estações base e da área de cobertura das células, pois a última varia de forma quadrática em relação ao raio.

Na arquitetura (f) o aluguel pago é o de infraestrutura e a relação de inversa proporcionalidade ao raio se dá devido as menores taxas de falhas dos dutos de fibra em cenários mais densos. O custo de aluguel é constante porque a rede sem fio não faz parte da infraestrutura do operador fixo, não sendo de sua preocupação a configuração da rede.

Além do já comentado, nota-se um ponto de interseção, para cada caso de densidade, entre as curvas das arquiteturas (e) e (f). Para um operador isso significa que a partir do raio de cobertura indicado nesse ponto é mais vantajoso possuir uma rede sem fio do que alugar uma. Para o caso suburbano, o ponto é o raio de 0,18 km, para o caso urbano, o ponto é o raio de 0,15 km e, por fim, para o caso ultra-urbano, o ponto é o raio de 0,11 km.

6 Conclusões

Nesse trabalho foi apresentado um modelo de custos para topologias PON e suas proteções, o qual é baseado em cadeias de Markov, podendo ser resolvido por simulação. Tendo como objetivo avaliar tecnicamente e economicamente a viabilidade de esquemas de proteção para redes PON, considerando a alta exigência de disponibilidade dos usuários, principalmente por parte dos clientes comerciais. O modelo está dividido em MDR, MCIR e MCOR, os quais buscam, respectivamente, construir a rede num cenário geométrico, encontrar o CAPEX e determinar o OPEX. Além disso, avaliou-se economicamente sete arquiteturas PON usando quatro métodos de proteção diferentes.

As arquiteturas PON abordadas no estudo foram: básica (desprotegida), protegida no nível de alimentação, protegida no nível de alimentação e no OLT, protegida no OLT e em ambos os níveis (alimentação e distribuição), protegida por rede sem fio proprietária, protegida por rede sem fio alugada, protegida no nível de alimentação e por rede sem fio alugada. Os modelos de custo foram utilizados para determinar as arquiteturas mais custo-eficientes ao longo de um período de 20 anos em três cenários de densidade típicos de ambiente predominantemente urbanos: suburbano, urbano e ultra urbano (urbano de altíssima densidade).

O simulador desenvolvido para resolver o modelo de custos e realizar a comparação econômica entre as arquiteturas usou uma metodologia baseada em MCMC e recebeu o nome de SiCRds, tendo este trabalho também apresentado uma interface gráfica para o simulador.

No que diz respeito ao CAPEX, conclui-se que as arquiteturas de proteção baseadas em fibra foram as mais caras, devido ao alto custo de instalação dos dutos de fibra, com destaque para a com proteção no OLT e em ambos os níveis, a qual é quase de duas vezes mais cara que a arquitetura básica. Ademais, todas as outras arquiteturas exigiram pouco investimento adicional, com destaque para as com proteção sem fio, tanto alugada quanto proprietária, que possuem em relação a PON básica, respectivamente, mesmo valor e 2% de aumento.

Em termos de OPEX, conclui-se que cerca da metade ou mais dos custos de uma PON básica são relacionados a falha, os quais são dependentes quase que exclusivamente dos custos de penalidade. Dessa forma, todas as arquiteturas com proteção apresentaram fortes reduções de custo, uma vez que essas focam na redução das despesas com penalidade. As arquiteturas com menor OPEX foram as com proteção por redes sem fio, que praticamente tornam os custos relacionados a falha dependentes dos custos de reparo, sendo destacado o desempenho da arquitetura com proteção no nível de alimentação e rede sem fio alugada, que ao evitar sobrecarga da rede móvel por falhas de fibra de alimentação

obtém redução dos custos de aluguel.

Considerando-se o TCO, quase todas as arquiteturas de proteção trouxeram economias, a única exceção foi a protegida no OLT e em ambos os níveis. Os melhores resultados foram o das arquiteturas com rede sem fio alugada, tanto a que possui proteção no nível de alimentação quanto a que não possui. Considerando-se as proteções não baseadas em rede sem fio, a arquitetura com menor custo foi a com proteção na fibra de alimentação e no OLT, uma vez que proteger o OLT garante a redundância de um dos dispositivos mais críticos da rede adicionando apenas 5 mUC ao CAPEX.

Por meio das análises de sensibilidade verificou-se que, quanto maior os custos por indisponibilidade de clientes comercial, maior a necessidade de proteção da rede, uma vez que, para uma rede desprotegida, o OPEX pode se tornar dominante no TCO devido as elevadas despesas com penalidade. Além disso, pode-se concluir que o aumento dos custos com dutos de fibra diminui a economia de esquemas de proteção baseados em fibra, podendo impedir a recuperação do investimento de proteção por parte do operador, principalmente para penalidades comerciais reduzidas. Outra conclusão é que a proteção do OLT é mais viável para elementos divisores de sinal com 32 ou mais saídas. As análises feitas em relação a redes sem fio indicam que um fator de sobrecarga acima de 1,5 pode resultar em custos de aluguel elevados, tornado a arquitetura com proteção no nível de alimentação e com rede sem fio alugada mais atrativa. Por fim, os resultados demonstraram que a alta densificação de *small cells* pode levar a elevados custos com aluguel de espectro, podendo ser mais barato assinar um contrato e pagar a um operador móvel pelo tráfego utilizado.

Como trabalhos futuros planeja-se considerar falha de software e aplicar o modelo a PONs suportando redes móveis. Além disso, pretende-se suportar redes diferentes de PONs e desenvolver um modelo de dimensionamento para áreas geográficas, buscando aplicá-lo ao simulador.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2011. ISBN 9780470505113. Citado 3 vezes nas páginas 1, 8 e 10.
- ANDERS, G. J.; SILVA, A. M. L. da. Cost related reliability measures for power system equipment. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 2, p. 654–660, May 2000. ISSN 0885-8950. Citado na página 26.
- ARÉVALO, G. V.; GAUDINO, R. A techno-economic network planning tool for pon deployment including protection strategies. In: *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4. Citado 4 vezes nas páginas 6, 11, 12 e 13.
- CASIER, K. *Techno-economic evaluation of a next generation access network deployment in a competitive setting*. 2009. Citado 2 vezes nas páginas XI e 39.
- CERAGON. *Mobile Backhaul: Fiber vs Microwave*. [S.l.], 2009. Disponível em: <http://www.digitalairwireless.com/files/Fiber-vs-Microwave-White-Paper_1333235596.pdf>. Acesso em: 06.01.2017. Citado na página 49.
- CHEN, J.; WOSINSKA, L. Performance analysis of protection schemes compatible with smooth migration from tdm-pon to hybrid wdm/tdm-pon. In: *OFC/NFOEC 2007 - 2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–3. Citado 3 vezes nas páginas XI, 39 e 49.
- CHEN, J. et al. Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 2, p. 56–65, February 2010. ISSN 0163-6804. Citado 3 vezes nas páginas XI, 39 e 48.
- DIXIT, A. et al. Protection strategies for next generation passive optical networks -2. In: *2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 13–18. Citado 6 vezes nas páginas IX, 3, 4, 11, 12 e 15.
- FARIAS, F. de S. *Designing Cost-Efficient Transport Solutions For Fixed And Mobile Broadband Access Network*. Tese (Doutorado) — UFPA, Belém, March 2016. Citado na página 14.
- FARIAS, F. S. et al. Green backhauling for heterogeneous mobile access networks: What are the challenges? In: *2013 9th International Conference on Information, Communications Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas XI e 37.
- FERNANDES, A. L. P. *Análise da viabilidade técnica e econômica da implantação de esquemas de proteção baseados em fibra óptica*. Belém, 2017. Citado na página 14.
- FERNANDEZ, A.; STOL, N. Capex and opex simulation study of cost-efficient protection mechanisms in passive optical networks. *Opt. Switch. Netw.*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 17, n. C, p. 14–24, jul. 2015. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.osn.2015.01.001>>. Citado 12 vezes nas páginas IX, XI, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 37, 39 e 47.

- FERNANDEZ, A.; STOL, N. Economic, dissatisfaction, and reputation risks of hardware and software failures in pons. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 25, n. 2, p. 1119–1132, April 2017. ISSN 1063-6692. Citado na página 5.
- GRAHAM, R. L. *The shortest network problem*. [S.l.], 1988. Disponível em: <<http://www.archive.org/details/RonaldLG1988>>. Acesso em: 06.01.2018. Citado na página 16.
- HECHT, J. *City of Light: The Story of Fiber Optics (Sloan Technology)*. 1st. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1999. ISBN 0195108183. Citado na página 8.
- KAVANAGH, S. *HOW FAST IS 5G?* [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://5g.co.uk/guides/how-fast-is-5g/>>. Acesso em: 06.01.2017. Citado na página 14.
- MACHUCA, C. M.; CHEN, J.; WOSINSKA, L. Pon protection architectures achieving total cost reduction. In: *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 707–708. ISSN 2162-108X. Citado 3 vezes nas páginas IX, 2 e 3.
- MACHUCA, C. M.; CHEN, J.; WOSINSKA, L. Cost-efficient protection in tdm pons. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 8, p. 110–117, August 2012. ISSN 0163-6804. Citado 2 vezes nas páginas XI e 39.
- MACHUCA, C. M. et al. Fiber access networks: Reliability and power consumption analysis. In: *15th International Conference on Optical Network Design and Modeling - ONDM 2011*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6. Citado 5 vezes nas páginas XI, 3, 5, 37 e 39.
- MCKNIGHT, L. W.; LEHR, W. A broadband access market framework: Towards consumer service level agreements. In: *28th Annual Telecommunications Policy Research Conference*. São Pedro: [s.n.], 2000. p. 22. Citado na página 14.
- OASE. *Technical Assesment and Comparison of Next-Generation Optical Access System Concepts*. [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/5-/249025/080/deliverables/001-OASED421WP4UESsex31Oct2011V10.pdf>>. Acesso em: 06.01.2017. Citado 2 vezes nas páginas XI e 39.
- WELDON, M. K.; ZANE, F. The economics of fiber to the home revisited. *Bell Labs Technical Journal*, v. 8, n. 1, p. 181–206, 2003. ISSN 1089-7089. Citado 3 vezes nas páginas XI, 37 e 39.
- WOSINSKA, L. et al. Impact of protection mechanisms on cost in pons. In: *2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4. ISSN 2162-7339. Citado 5 vezes nas páginas IX, 2, 3, 11 e 12.
- YU, Y. et al. Hybrid fiber-wireless network: an optimization framework for survivable deployment. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 9, n. 6, p. 466–478, June 2017. ISSN 1943-0620. Citado na página 6.