

Engenharia Elétrica

Análise Técnico-Econômica de Redes Óticas Passivas no Contexto de Núcleos Urbanos Amazônicos.**Felipe V. S. dos Reis^{1,2}, André P. Fernandes¹, Marcos V. dos P. Oliveira², Fabrício de S. Farias², João C. W. A. Costa¹**¹ Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado – Universidade Federal do Pará (UFPA)
Belém – PA – Brasil² Laboratório de Programação Extrema – Universidade Federal do Pará (UFPA)
Cametá – PA – Brasil

{felipe.vitow, andre.lucaspinho, mar33vi}@gmail.com, {fabriciosf, jweyl}@ufpa.br

Abstract. *Urban centers of low-density regions, such as the Amazon region, lack access to high-quality broadband Internet. Passive optical networks have been pointed out as a cost-effective solution to support the demand for current and future data traffic in fixed broadband networks. This article analyzes in a techno-economic way the implementation of passive optical networks with and without protection in the Amazonian context, focusing in an urban nucleus with municipality of about 100 thousand habitants. The network cost of each state of the network was modeled using the Markov reward concept and the total network cost was obtained using Markov Chain Monte Carlo simulation, allowing feasibility analysis.*

Resumo. *Centros urbanos de regiões menos densas, como a região amazônica, carecem de acesso a Internet banda larga de qualidade. Redes óticas passivas têm sido apontadas como uma solução custo eficiente para suportar a demanda de tráfego de dados atual e futura em redes de banda larga fixa. Este artigo analisa de forma técnica e econômica a implantação de redes óticas passivas com e sem proteção no contexto amazônico, para um núcleo urbano com municipalidade de cerca de 100 mil habitantes. Os custos de cada estado da rede foram modelados por meio do conceito de recompensa de Markov e o custo total da rede foi obtido por meio de simulação do tipo Markov Chain Monte Carlo, permitindo análise de viabilidade.*

1. Introdução

A popularização de serviços baseados na *Internet* tem causado um impacto profundo nas formas agir e pensar da atual sociedade, principalmente para o caso dos grandes centros urbanos, onde a presença cotidiana da rede mundial de computadores tornou-se uma ferramenta essencial aos usuários, principalmente para aqueles que utilizam o crescente potencial econômico da rede, como aqueles voltados a *marketing* e comércio eletrônico. Apesar disso, centros urbanos em regiões menos densas do globo ainda carecem de acesso a Internet banda larga de alta qualidade, inviabilizando o uso da *Internet* como ferramenta pela população. A região amazônica brasileira, por exemplo, apresenta banda larga fixa em apenas 24 % dos seus domicílios, sendo a maior parte dessa quantia localizada nos grandes centros urbanos de Belém e Manaus [ANATEL, 2018]. Dessa forma, existe um grande

mercado potencial para operadoras de telecomunicação em centros urbanos de regiões menos densamente habitadas, como a Amazônia, com o grande desafio das operadoras sendo a pouca ou nenhuma infraestrutura disponível para a implantação para implantação de seus serviços.

Dentre as melhores tecnologias para o atendimento da demanda de tráfego atual e futura há a rede ótica passiva (PON – *passive optical network*), que apresenta alta taxa de transmissão, devido aos enlaces de fibra ótica, e custos reduzidos em comparação a outras arquiteturas baseadas em fibra, devido ao compartilhamento de fibras/equipamentos entre usuários e a utilização de equipamentos não consumidores de energia elétrica. No entanto, como desvantagem PONs podem apresentar graves problemas de confiabilidade, o que pode ser um grande problema tanto para a reputação da operadora quanto para a operação custo-eficiente da rede, uma vez que a presença cotidiana da *Internet* leva a um aumento da exigibilidade dos clientes em relação ao serviço contratado, causando possíveis elevadas multas por indisponibilidade [Wosinska, 2009] [Machuca,2011][Fernandes, 2015].

A baixa confiabilidade de PONs surge de dois fatores. O primeiro está relacionado a incapacidade de continuidade de serviço na falha de equipamentos ou rompimento em fibras. O segundo está ligado ao alto nível de compartilhamento de fibras/equipamentos, o que pode resultar em graves casos de indisponibilidade simultânea na rede. Dessa maneira, o aumento da confiabilidade de PONs é fundamental para uma operação custo-eficiente da rede e uma forma de aumentar de atingir tal meta é a utilização de esquemas de proteção de rede, os quais entram em operação no caso de falha do serviço primário.

Neste trabalho estuda-se o efeito técnico e econômico da instalação de redes PON com e sem proteção em um hipotético núcleo urbano amazônico com municipalidade possuindo população de aproximadamente 100 mil habitantes. Os dados demográficos do hipotético cenário foram baseados em características demográficas de municípios amazônicos reais com mais de 90 mil habitantes. Para a PON considerada comparou-se economicamente a arquitetura básica e diferentes esquemas de proteção em duas configurações de implantação em relação a agregação de distribuição.

O restante deste artigo é organizado da seguinte maneira. Na seção 2, apresenta-se os trabalhos relacionados. Na seção 3, a metodologia usada para estimar dados demográficos de cidades amazônicas e para simular o CAPEX e o OPEX para PONs. Na seção 4, mostra-se o caso de estudo com as informações necessárias para calcular os custos. Por conseguinte, a seção 5 resume as principais contribuições desse artigo em apresentar o CAPEX e OPEX para as arquiteturas PONs simuladas em um ambiente amazônico típico. Por fim, a seção 6 conclui o trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Essa seção apresenta alguns dos trabalhos desenvolvidos nos últimos anos que tratam sobre proteção em redes PON.

O trabalho [Wosinska, 2009] foi um dos primeiros a abordar análise econômica de proteção para PONs no contexto de redes de acesso. O estudo não propôs nenhum novo método de proteção, limitando-se a analisar métodos já existentes na literatura e usando um modelo de custos simples, com distâncias e comprimentos fixos, e que desconsiderava custos de instalação de fibra. Apesar da simplicidade dos modelos, os autores concluíram assertivamente que não se pode negligenciar a contribuição dos custos de operação (OPEX) nas despesas totais.

O trabalho [Wosinska, 2009] analisou os investimentos necessários para a proteção de PONs e outras tecnologias de acesso ótico. O estudo considerou uma distribuição ultradensa de usuários e usou modelo considerado foi mais completo, incluindo despesas com consumo de energia elétrica, apesar disso, o modelo apresentado é estático, não podendo se adaptar ao dinamismo da rede. Os resultados indicam que PONs são a melhor alternativa de tecnologias de acesso ótico para cenários ultradensos e que mesmo que essas possuam equipamentos passivos seria incorreto desconsiderar o consumo de energia na análise de tais redes.

Os trabalhos [Fernandes A., 2015] e [Fernandez S., 2016] buscaram analisar os custos relacionados à instalação e operação de redes PON com diferentes tipos de proteção. Em ambos os trabalhos modelos considerados são resolvidos por simulação e são capazes de capturar a natureza dinâmica da rede. Os resultados dos dois trabalhos indicam que nem todas as arquiteturas de proteção podem trazer redução de custos com o tempo, mas que em algumas proteções específicas o retorno econômico pode ser elevado. Apesar de ambos os trabalhos usarem modelos mais completos e múltiplas análises alguns pontos foram deixados em aberto. No primeiro não há consideração do custo de consumo de energia, que segundo [MACHUCA et al., 2011] pode ser elevados. No segundo não há análise em um cenário com características mais rurais.

3. Metodologia de Avaliação de Custos

Essa seção apresenta a metodologia utilizada para a realização das simulações, sendo necessário obter os valores de OPEX e CAPEX para o cálculo do TCO, como mostra a Figura 1. Por conseguinte, temos a divisão da metodologia em três partes, a obtenção dos valores estimados de parâmetros demográficos de uma cidade amazônica hipotética com 100 mil habitantes; explicação de rede ótica passiva e suas arquiteturas de proteção e os modelos matemáticos utilizados para obtenção dos resultados.

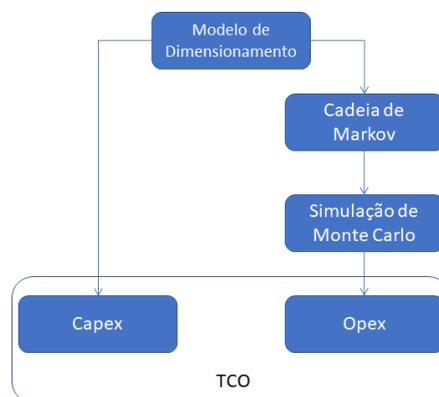


Figura 1. Esquema da Metodologia

3.1. Estimação dos parâmetros de uma cidade amazônica

Essa seção descreve a modelagem de cenário utilizada para as simulações e os parâmetros para a descrição de um cenário amazônico com 100 mil habitantes.

A modelagem do cenário utilizada para as simulações é baseada no consagrado modelo Manhattan [GRAHAM, 1988], seguindo a arquitetura PON e possuindo dois níveis, i. e., alimentação e distribuição. No primeiro, o *central office* (CO) está no centro, N é o número de blocos em uma linha e L é a distância entre blocos vizinhos. No segundo nível

um nó remoto está no centro, n é o número de *Optical Network Units* (ONU) em um fila do bloco e l é a distância entre residências vizinhas.

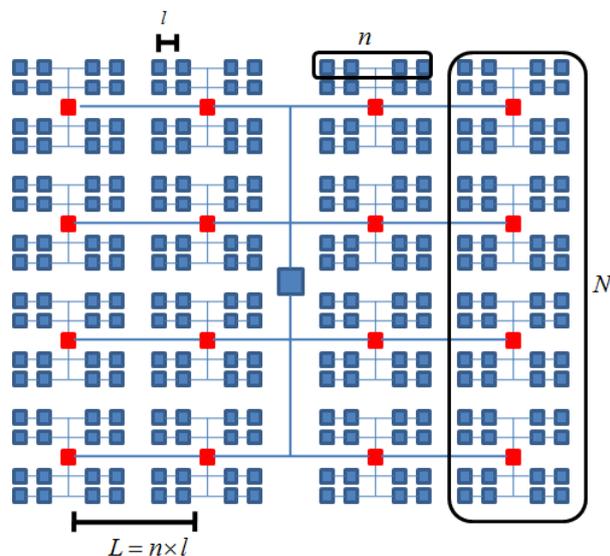


Figura 2. Modelo Geométrico

Para considerar-se um cenário urbano amazônico típico com municipalidade de 100 mil habitantes, foram coletados dados de municípios amazônicos com mais de 90 mil habitantes do estado do Pará, com distâncias maiores que 100 km dos núcleos urbanos de Belém, Santarém e Marabá. Tais métricas garantiram a análise de pelo menos um município em cada mesorregião do estado, com exceção da metropolitana de Belém. Além disso, o município analisado fora das características apresentadas foi o de Óbidos, devido à ausência de municípios de mais de 90 mil habitantes no baixo Amazonas, com exceção de Santarém. Os parâmetros usados de cada município selecionado são mostrados na Tabela 1 e foram retirados do banco de dados do IBGE [IBGE, 2018]. Importante ressaltar que a área do núcleo urbano foi obtida por meio da plataforma Open Street Maps.

Tabela 1. Parâmetros de cidades amazônicas

Cidades	Mesoregião	População	População urbana no núcleo (%)	Habitantes por construção	Residências urbanas	Área do núcleo urbano (Km ²)
Altamira	Sudoeste	99.075	77	3,73	2063592	23,40
Bragança	Nordeste	113.227	58	4,31	1346027	11,81
Breves	Marajó	92.860	49	5,28	928604	6,84
Cametá	Nordeste	120.896	33	5,11	645200	8,50
Itaituba	Sudoeste	97.493	72	4,07	1768078	20,78
Óbidos	Baixo Amazonas	49.333	51	4,35	1172525	7,06
Paragominas	Sudeste	97.819	78	3,91	1994036	21,20

São Félix do Xingu	Sudeste	91.340	37	4,05	913091	11,65
Tucuruí	Sudeste	97.128	95	4,11	2309468	17,60
Média		95.463	61	4,32	1460069	14,31

Os parâmetros para a descrição de um cenário amazônico com aproximadamente 100 mil habitantes foram as médias das características demográficas de todos os municípios selecionados, a qual também é mostrada na Tabela 1. Dessa forma, adaptando-se tais características demográficas para os parâmetros do modelo geométrico apresentado obtém-se l equivalente à 30 m e $n \times N$ igual à 128. Os valores descritos de n , N e l podem ser encontrados através das equações (1) e (2):

$$n \times N = P \left(\sqrt{\frac{Pop_m \times \%Pop_{urb}}{Hab_{const}}} \right) \quad (1)$$

$$l = \frac{\sqrt{Área_{núcleo}}}{n \times N} \quad (2)$$

Onde, as variáveis Pop_m , $\%Pop_{urb}$ e Hab_{const} representam, respectivamente, a população do município, a porcentagem da população no núcleo urbano do município e a média de habitantes por construção, além disso, a função P representa o arredondamento para o inteiro par mais próximo.

3.2. Redes óticas passivas (PONs)

Essa subseção procura descrever redes óticas passivas e suas proteções, a arquitetura básica de uma PON é apresentada na Figura 3.

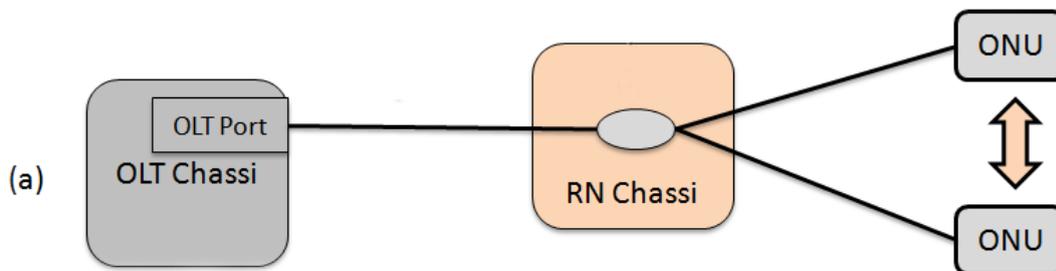


Figura 3. Topologia básica de uma rede ótica passiva

Basicamente uma rede de acesso PON faz a ligação entre um *Optical Line Termination* (OLT) à uma ou mais (ONUs). Na ponta do CO da operadora existem diversos chassis para OLTs, responsáveis pelo gerenciamento da rede e pela conexão do backbone da operadora com a PON. Na ponta da localidade do usuário estão as ONUs, as quais convertem o sinal ótico em elétrico. Entre os usuários e o CO localizam-se nós remotos, que contém um chassis de nó remoto e um ou mais elementos divisores de sinal passivo, como por exemplo, *splitters*. A conexão entre o CO e o nó remoto é feita por um conjunto de fibras óticas, o qual forma o nível de alimentação. A conexão entre os nós remotos e a localidade do usuário é feita por um segundo conjunto de fibras, o qual forma o nível de distribuição.

3.3. Modelo de Custos e Simulador

Essa subseção apresenta didaticamente os modelos que calculam as despesas operacionais da rede (OPEX) e as despesas de capital da rede (CAPEX), os quais somados representam o custo total proprietário da rede (TCO), bem como o simulador utilizado para resolução do modelo. Os modelos aqui apresentados estão detalhados matematicamente em [Fernandes, 2015].

Em relação ao CAPEX, o modelo é apresentado pela Figura 4 de forma que o seu valor será a soma dos custos relacionados a fibra, de instalação e compra de equipamentos.

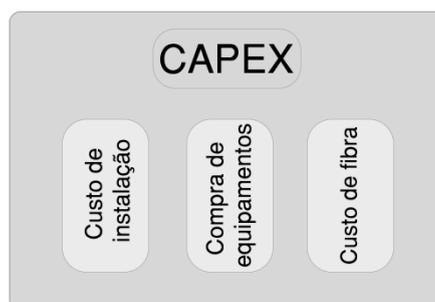


Figura 4. Principais despesas do CAPEX

Em relação ao OPEX, o modelo tem como base o conceito de recompensa de Markov, sendo apresentado pela Figura 5, de forma que o seu valor será a soma dos custos com o consumo de energia elétrica, penalidades e reparos por estado de operação.

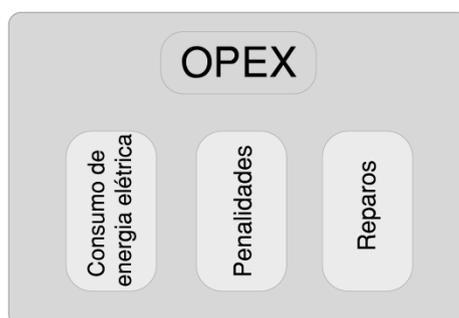


Figura 5. Principais despesas do OPEX

Para o cálculo do OPEX utilizou-se um simulador baseado em *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC), o qual foi adaptado a partir de [Anders e Leite da Silva, 2000] sendo esse implementado da mesma forma que em [Fernandes, 2015]. A cadeia de Markov usada para modelar a rede teve como definição de estados o número e os tipos de equipamentos falhos.

4. Caso de Estudo

Essa seção apresenta o caso de estudo abordado por esse trabalho assim como os parâmetros escolhidos para a realização das simulações.

As arquiteturas escolhidas para o caso de estudo são apresentadas na Figura 6, onde a arquitetura (a) apresenta modelo de rede PON mais básica; a arquitetura (b) apresenta a arquitetura de proteção do nível de alimentação; a arquitetura (c) apresenta a arquitetura de proteção no nível de alimentação e distribuição e a arquitetura (d) mostra a arquitetura de proteção do nível de alimentação e do OLT.

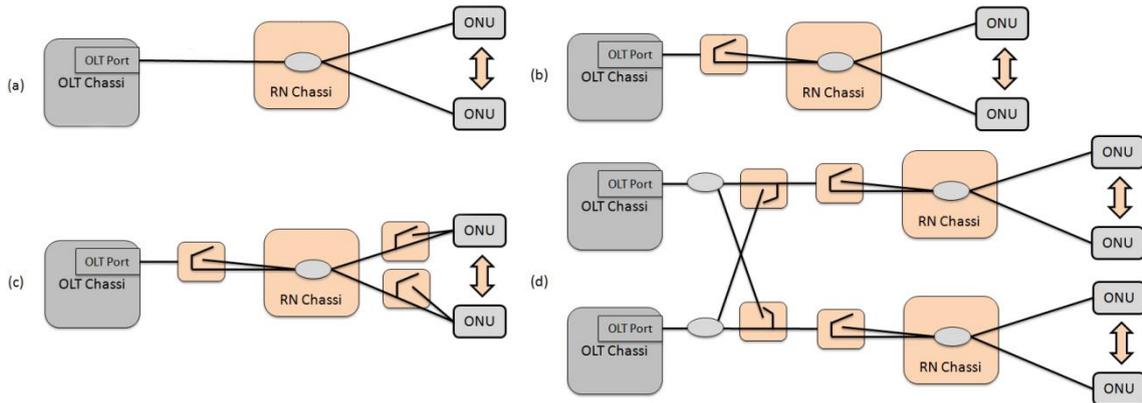


Figura 6. Arquiteturas PON. (a) Sem proteção, (b) Proteção no Nível de alimentação, (c) Proteção nos Níveis de alimentação e distribuição e (d) proteção por interconexão de OLT e no nível de alimentação.

As arquiteturas que protegem nos níveis de alimentação e distribuição apresentam uma duplicação da fibra junto com a instalação de um *switch* ótico, que é usado para conectar ambas as fibras ao OLT ou ONU, na ocorrência de falhas na fibra o *switch* alterna e comunicação é continuada por meio da duplicata da fibra. A arquitetura que protegem o OLT considera a interligação de pares de chassi OLT, onde uma porta OLT do primeiro chassi é ligada aos usuários de uma porta de um segundo chassi, e vice-versa, para que, na ocorrência de falhas em uma das portas OLT, o *switch* ligado à mesma alterne e os usuários sejam suportados por uma porta OLT funcional de um chassi diferente.

O cenário de implantação utilizado para a simulação baseou-se nos valores médios de $n \times N$ e l para um município amazônico de cerca de 100 mil habitantes, os quais foram encontrados na seção 3. Foram consideradas duas topologias para a arquitetura PON, uma definida como concentrada e outra como distribuída, ambas implementadas variando-se n e N de forma a obedecer ao valor do produto $n \times N$. Na primeira o número de nós remotos é menor, levando ao aumento do número de clientes atendidos por nó, diminuição da quantidade de fibras de alimentação e aumento da distância dessas fibras em relação aos usuários. Na segunda o número de nós remotos é maior, levando a diminuição do número de clientes atendidos por nó, aumento da quantidade de fibras de alimentação e diminuição da distância dessas fibras em relação aos usuários. A Tabela 2 resume o cenário de implantação considerado para as simulações, apresentando valores para as duas topologias consideradas.

Os parâmetros de equipamentos e custos são apresentados respectivamente nas Tabelas 3 e 4, os quais foram escolhidos para a verificação da viabilidade econômica das arquiteturas de proteção de forma realista e em condições não favoráveis, com valores extraídos de referências [Machuca, 2012] [OASE, 2011].

Tabela 2. Parâmetros de construção do cenário

Parâmetros	Valores
N	8 (Conc.) ou 16 (Dist.)
n	16 (Conc.) ou 8 (Dist.)
l (km)	0,03

Tabela 3. Parâmetros dos equipamentos

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
Splitter (32 Portas)	4,48	10	120	1	0
Chassi do Nó Remoto	2	10	666	1	0
Porta OLT	21,71	10	1075	1	1197
Chassi OLT (72 Slots)	12,86	30	500	1	200
Switch ótico	0,14	10	200	2	0
Duto de Fibra	371,43/km	-	570	1	0

Tabela 4. Parâmetros de Custo

Parâmetros	Valores
Penalidade Comercial (UC/h)	0,29
Penalidade Residencial (UC/h)	0,03
Salários das Equipes de Trabalho (UC/h)	0,54
Fator de Reparo	0,3
Fator de impacto	1,1
Tempo de Operação (anos)	5
Velocidade média Eq. De trabalho (km/h)	20

Para a realização das simulações utilizou-se de um notebook Dell com processador i7-7700HQ com 16 GB de RAM e implementação em linguagem Java.

5. Resultados

Essa Seção apresenta os resultados obtidos para as arquitetura e topologias propostas no caso de estudo.

A Figura 7 mostra o TCO das arquiteturas consideradas dentro do ambiente amazônico proposto, tanto para a topologia concentrada quanto para a distribuída. Nota-se que a arquitetura (c) é a mais custosa, tanto para a configuração concentrada quanto para a distribuída, e que as arquiteturas (b) e (d) apresentam custos menores quando comparadas à arquitetura (a), a qual é desprotegida. Em relação ao CAPEX, as arquiteturas (b) e (d) apresentam um pequeno aumento de custo em relação à arquitetura (a), enquanto que a arquitetura (c) apresentou um aumento significativo de custo, essas observações valem tanto para a configuração mais densa quanto para a mais distribuída. Em relação ao OPEX, todas as arquiteturas que apresentaram alguma proteção apresentaram uma diminuição

significativa no OPEX. Por fim, é possível verificar que de forma geral as arquiteturas concentradas apresentaram um menor TCO que as arquiteturas desconcentradas.

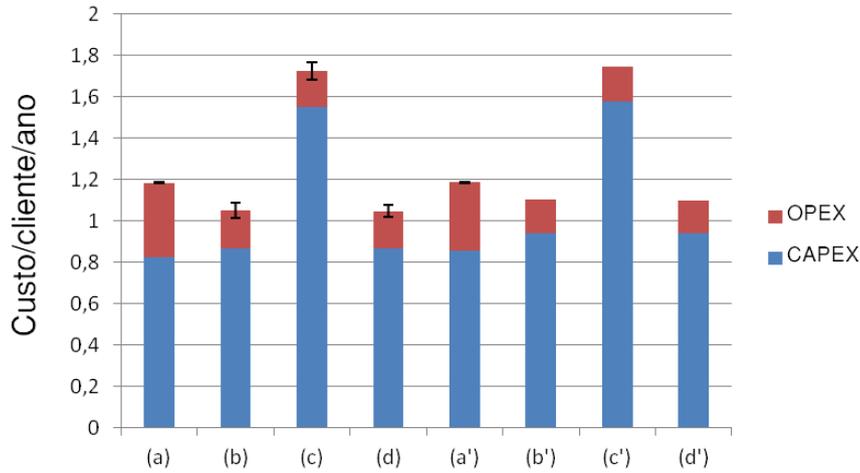


Figura 7. TCO de uma rede PON em termos de CAPEX e OPEX incluindo as arquiteturas mencionadas no caso de estudo, sendo (a), (b), (c) e (d) considerando topologia concentrada e (a'), (b'), (c') e (d') considerando topologia distribuída.

A Figura 8 mostra em termos de porcentagem a composição do CAPEX e do OPEX para todas as arquiteturas e topologias consideradas no caso de estudo.

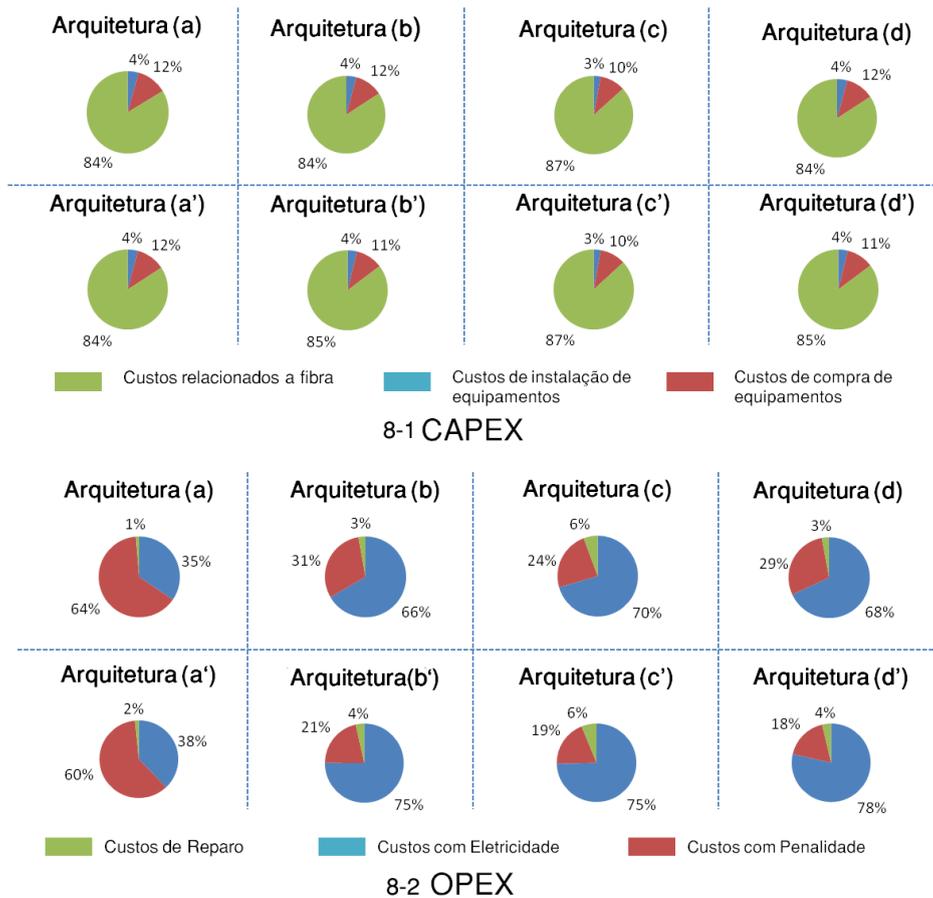


Figura 8. Porcentagem das contribuições das operações de CAPEX ou OPEX considerando as arquiteturas PONs do caso de estudo.

Em relação ao CAPEX, mostrado na Figura 8-1, percebe-se que a maior parte do custo é relacionado a instalação de fibra, o que fica mais evidente em arquiteturas protegidas, e que há um sutil aumento no CAPEX em arquiteturas distribuídas, principalmente para (b) e (d), o qual se deve ao aumento do número de fibras de alimentação. Em relação ao OPEX, mostrado na Figura 8-2, o custo referente a consumo de energia elétrica é o mais importante, menos na arquitetura (a), onde os custos com penalidade ultrapassam os custos com energia elétrica, dessa forma, as arquiteturas que apresentam alguma proteção obtêm uma significativa redução nos custos de penalidade. Além disso, é fácil notar que os custos com penalidades são ainda mais reduzidos em arquiteturas distribuídas, já que o aumento do número de fibras de alimentação aumenta o grau de redundância da rede. Por fim, nota-se que há um leve aumento dos custos de reparo em topologias distribuídas, principalmente para a arquitetura (d), já que a maior redundância de fibras garante maior continuidade, mas aumenta o número de falhas.

6. Conclusão

Essa pesquisa realizou uma análise técnica e econômica de arquiteturas PON com e sem proteção considerando o núcleo urbano de um município amazônico de aproximadamente 100 mil habitantes para duas topologias, uma concentrada, com menos fibras de alimentação, e outra distribuída, com mais fibras de alimentação. O cenário proposto teve os custos modelados por meio do conceito de recompensas de Markov e de um dimensionamento geométrico, sendo simulado utilizando a técnica Marko Chain Monte Carlo (MCMC), o que permitiu a aquisição do TCO da rede (CAPEX e OPEX).

Os resultados apresentados mostram um elevado custo de implantação para a rede dentro de um cenário amazônico, mas deve-se ressaltar que a maior parte de tal custo é relacionado à fibra, de forma que possíveis melhorias, novos serviços ou mudanças de equipamentos podem se utilizar da mesma fibra por um longo período de tempo, o que pode justificar o alto custo de implantação. Além disso, também é indicado que a implantação de proteção para PONs pode aumentar a viabilidade dessas dentro do contexto amazônico, principalmente para proteções no nível de alimentação e do OLT, e que para 20 anos de operação topologias concentradas trazem mais economias que as distribuídas, apesar das últimas apresentarem menor OPEX, o que indica possível ponto de inflexão nos custos totais durante o período analisado, 20 anos.

Para trabalhos futuro, deseja-se realizar a utilização de redes sem fio integradas as arquiteturas PON, e utilização de modelos geométricos para as simulações.

7. Referências

- 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>>.
- Fernandes A.; Farias F.; Santos I.; Costa, J (2015). Economic Analysis on Passive Optical Networks Using Markov Chain and Monte Carlo Simulation. 33º Simpósio brasileiro de telecomunicações (SBrT2015).
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Censo Demográfico 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010** [online]. Disponível na internet via WWW URL: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=15&dados=1>. Arquivo consultado em Outubro de 2018.

- ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. Base de dados de acessos de banda Larga [online]. Disponível na internet via WWW URL: <http://www.anatel.gov.br/dados/acessos-banda-larga-fixa>. Arquivo consultado em Outubro de 2018.
- Wosinska L., Jiajia Chen, Machuca C. e M. Kantor, Impact of protection mechanisms on cost in PONs, *2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks*, Azores, 2009, pp. 1-4.
- Chen J., Wosinska L., Machuca C. e M. Jaeger, Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures, in *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 56-65, Fevereiro 2010.
- Machuca C. M., Chen J., e Wosinska L., Mahloo M. e Grobe K., Fiber access networks: Reliability and power consumption analysis, *15th International Conference on Optical Network Design and Modeling - ONDM 2011*, Bologna, 2011, pp. 1-6.
- Machuca C. M., Chen J., e Wosinska L., Cost-efficient protection in TDM pons, *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, pp. 110–117, Agosto 2012.
- GRAHAM, R. L. *The shortest network problem*. [S.l.], 1988. Disponível em: <<http://www.archive.org/details/RonaldLG1988>>
- OASE, Technical Assesment and Comparison of Next-Generation Optical Access System Concepts, outubro 2011.
- 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.