

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO TÉCNICO ECONÔMICA DE
ALTERNATIVAS BACKHAUL E FRONTHAUL
PARA ARQUITETURAS DE RÁDIO
CENTRALIZADO EM CENÁRIOS 5G
INDOOR.**

ANDRÉ LUCAS PINHO FERNANDES

DM 17/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRÉ LUCAS PINHO FERNANDES

**AVALIAÇÃO TÉCNICO ECONÔMICA DE
ALTERNATIVAS BACKHAUL E FRONTHAUL
PARA ARQUITETURAS DE RÁDIO
CENTRALIZADO EM CENÁRIOS 5G
INDOOR.**

DM 17/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRÉ LUCAS PINHO FERNANDES

**AVALIAÇÃO TÉCNICO ECONÔMICA DE
ALTERNATIVAS BACKHAUL E FRONTHAUL PARA
ARQUITETURAS DE RÁDIO CENTRALIZADO EM
CENÁRIOS 5G INDOOR.**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Coorientador: Fabricio de Souza Farias

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Biblioteca do ITEC/UFPA-Belém-PA**

F363 Fernandes, André Lucas Pinho, 1994-
Avaliação técnico econômica de alternativas
backhaul e fronthaul para arquiteturas de rádio
centralizado em cenários 5G indoor/ André Lucas
Pinho Fernandes. - 2019.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa;
Coorientador: Fabricio de Souza Farias.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2019.

1.Sistema de comunicação móvel- Aspectos
econômicos. 2.Sistema de comunicação sem fio.
3.Telecomunicações-Tráfego-Modelos
matemáticos. I.Título.

CDD 23. ed. – 6 2 1 . 3 8 4 5 6

Elaborado por Kelren Cecília dos Santos Lima da Mota – CRB-2/1461

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

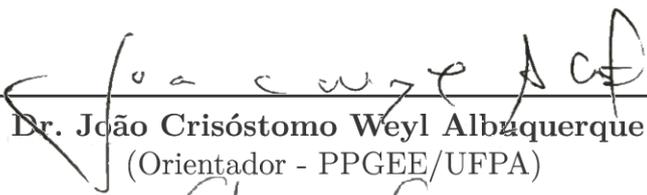
**“AVALIAÇÃO TÉCNICO ECONÔMICA DE
ALTERNATIVAS DE BACKHAUL E FRONTHAUL
PARA ARQUITETURAS DE RÁDIO CENTRALIZADO
EM CÊNARIOS 5G INDOOR”**

AUTOR: ANDRÉ LUCAS PINHO FERNANDES

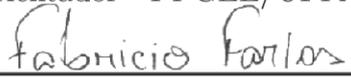
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 28 / 05 / 2019

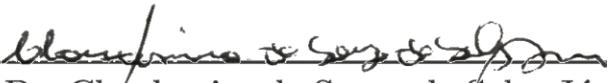
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
(Orientador - PPGEE/UFPA)



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



Prof. Dr. Claudomiro de Souza de Sales Júnior
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Fabricio José Brito Barros
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)

Dr. André Mendes Cavalcante
(Avaliador Externo à Instituição - ERICSSON)

VISTO:

Prof^ª. Dr^ª. Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedico à Deus e aos meus pais.

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 aos professores Fabricio Farias e João Weyl por me guiarem no mundo da pesquisa.

Agradeço a Brenda Penedo, Daynara Dias e Marx Miguel, meus amigos e companheiros de estudo, os quais formaram comigo o “ quarteto fantástico ” do laboratório de eletromagnetismo aplicado da UFPA.

Agradeço aos demais amigos e colegas de trabalho, em especial a Alison Ribeiro, Felipe Reis, Ivens’ Sualehe, Moisés Felipe, Reginaldo Santos, Victor Cardoso, Waldeir Brito e Wederson Medeiros.

Agradeço às instituições CNPq, Fapespa, Ericsson e UFPA pelo suporte financeiro.

*“ Uma boa ideia não resolve apenas um único problema, mas sim vários problemas de
uma só vez.”
(Shigeru Miyamoto)*

Resumo

As redes de transporte possuem um papel fundamental no atendimento das demandas de qualquer sistema de telecomunicações. A quinta geração de sistemas de telecomunicação móvel, o 5G, busca dar suporte a uma sociedade altamente digitalizada, a qual possui altas demandas de operação. CRA (*Centralized Radio Architecture* – Arquitetura de Rádio Centralizado) tem emergido como alternativa de transporte tecnicamente capaz de atender o 5G. Esta solução divide a rede de transporte em duas seções, o *backhaul* e o *fronthaul*, os quais podem se subdividir em vários níveis de enlaces, sejam eles ópticos, metálicos ou baseados em micro-ondas. A viabilidade de qualquer tecnologia para suporte ao 5G não depende apenas do atendimento técnico de requisitos, sejam de tráfego, cobertura, disponibilidade ou outros, mas também dos aspectos econômicos de instalação e operação das tecnologias. Nesse contexto, este trabalho realiza uma análise técnica e econômica para CRAs atendendo o ambiente *indoor* no contexto 5G. Para tal fim, um modelo de previsão de tráfego de referência é utilizado e um conjunto de modelos para dimensionamento, previsão de comportamento de falhas e custos foram propostos e desenvolvidos, os quais são genéricos e podem ser aplicados a diferentes tipos de configuração de redes ou ambientes, seja no *indoor* ou *outdoor*, de forma que os dois últimos modelos se baseiam em uma modelagem Markoviana resolvida por simulação. As análises focaram em CRAs instaladas no ambiente *indoor*, onde os usuários passam a maior parte de seu tempo, considerando um cenário urbano de alta densidade, *fronthaul* com níveis de enlaces ópticos e metálicos ou somente metálicos, assim como *backhaul* baseado em PON (*Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva). As alternativas *fronthaul* consideradas foram híbrida óptico-metálica usando transceptores bidirecionais de 10 e 32 Gbps, assim como, totalmente metálica usando o padrão G.(*mg*)*fast*, fazendo ou não uso do modo de transmissão fantasma, o qual é uma técnica para a criação de canais diferenciais virtuais a partir de pares trançados reais, resultando no aumento de capacidade em cabos metálicos. Os padrões de PONs considerados para *backhaul* são 40 Gigabit PON e *wavelength division multiplexing* PON, já as topologias em termos de proteção contra falhas de equipamentos são básica (desprotegida), protegida no nível de alimentação, protegida no nível de alimentação e terminal de linha óptica, e protegida no terminal de linha óptica e em ambos os níveis (alimentação e distribuição). Os resultados obtidos indicam que a melhor alternativa de *fronthaul* para CRA, atendendo uma edificação mediana de um cenário urbano de alta densidade, é a totalmente metálica usando padrão G.(*mg*)*fast* com modo de transmissão fantasma. Além disso, também indicam que PONs podem ser viáveis como *backhaul* 5G se esquemas proteção forem usados, e que num cenário urbano de alta densidade, o padrão 40 Gigabit PON é o mais viável técnica e economicamente para *backhaul* de CRAs.

Palavras-chave: Análise de redes, Sistemas de comunicação móvel, Análise econômico-financeira, Arquitetura de rádio centralizado, Rede óptica passiva, 5G, *Backhaul*, *Fronthaul*.

Abstract

The transport networks have a key role fifth in the support of demands of any telecommunications system. The fifth generation of mobile communication systems, the 5G, seeks to support a highly digitalized society, which has high operational demands. CRA (Centralized radio architecture) are emerging as a technically capable transport alternative to support 5G. Such solution divides the transport network into two sections, backhaul and fronthaul, which can be subdivided into several levels of links, whether optical, metallic or based on microwave. The viability of any technology to support the 5G does not only depend of technical requirements, whether traffic, coverage, availability or others, but also of the installation and operation economic aspects of the technologies. In this context, this work performs an technical and economic analysis for CRAs attending the indoor environment in the 5G context. To this end, a reference traffic forecast model is utilized and a set of models for dimensioning, predicting fault behavior and costs have been proposed and developed, which are generic and can be applied to different types of networks configurations or environments, whether indoor or outdoor, in a way that the two last mentioned models are based on a Markovian model solved by simulation. The analysis focused on CRAs installed in the indoor environment, where users spend most of their time, considering a high-density urban scenario, fronthaul with optical and metallic link levels or only metallic, as well PON (Passive Optical Network) based backhaul. The considered fronthaul alternatives were optical-metallic hybrid using 10 and 32 Gbps bidirectional transceivers, as well as all-metallic using the standard *G.(mg)fast*, making use or not of the phantom mode transmission, which is a technique to create virtual differential channels from real twisted pairs, resulting in increased capacity for metallic cables. The PON considered standards for the backhaul are 40 Gigabit PON and wavelength division multiplexing PON. The considered protection topologies against equipment failures for the PON backhaul are basic (unprotected), protected at the feeder level, protected at the feeder level and optical line terminal, and protected at the optical line terminal and at both levels feeder and distribution). The obtained results indicates that the best fronthaul alternative for CRA, supporting a average building of a high density urban scenario, is the all metallic using the standard *G.(mg)fast* with phantom mode transmission. In addition, they also indicate that PONs can be viable as backhaul 5G if protection schemes are used, and that in a dense urban setting, the 40 Gigabit PON standard is technically and economically the most viable for CRAs backhaul.

Keywords: Network analysis, mobile communication systems, Economic and financial analysis, Centralized radio architecture, Passive optical network, 5G, Backhaul Fronthaul

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Trabalhos Relacionados	2
1.2	Justificativa	5
1.3	Motivação	5
1.4	Objetivos	5
1.4.1	Objetivo Geral	6
1.4.2	Objetivos Específicos	6
1.5	Metodologia	6
1.6	Contribuições	7
1.7	Organização da Dissertação	7
2	Tecnologias e Meios de Acesso	9
2.1	Estações Base: Definição e Arquiteturas	9
2.2	Sistema de <i>Small Cells</i> Voltado ao Ambiente <i>Indoor</i> com CRA	12
2.3	Outros Sistemas de <i>Small Cells</i> Voltados ao Ambiente <i>Indoor</i>	14
2.4	Tecnologias para Agregação de Capacidade em Redes Móveis	16
2.5	Meios para o Acesso Móvel	19
2.5.1	Cabos Metálicos	19
2.5.1.1	Desenvolvimentos para Cabos Metálicos no <i>Fronthaul</i>	21
2.5.2	Fibra Óptica	23
2.5.2.1	Desenvolvimentos para Fibra Óptica no <i>Fronthaul</i>	25
2.5.3	Micro-ondas	25
2.5.3.1	Desenvolvimentos para Micro-ondas no <i>Fronthaul</i>	26
2.6	Proteção em Redes de Acesso	27
3	Modelos para Dimensionamento de Avaliação de Redes	31
3.1	Visão Geral da Metodologia e Modelos para Avaliação de Viabilidade de Redes	31
3.2	Modelagem de Tráfego	31
3.2.1	Previsão de Tráfego	32
3.2.2	Cálculo da Taxa de Dados Alcançável em CRAs	33
3.3	Modelo de Dimensionamento da Rede	34
3.3.1	Quantidade de Locais para a Instalação de Equipamentos	37
3.3.2	Distribuição de Usuários na Rede	37
3.3.3	Quantidade de Componentes na Rede	38
3.3.4	Distância de Componentes Interligados e Comprimento de Enlaces	39

3.3.5	Considerações para Proteção por Duplicação de Enlaces em Blocos <i>Outdoor</i>	41
3.3.6	A Interconexão dos Equipamentos e os Clientes Atendidos por cada Componente	42
3.4	Modelo de Operação Voltado a Falhas de Componentes	43
3.4.1	Modelo Markoviano para Operação da Rede	45
3.4.2	Simulador de Transição de Estados	46
3.5	Modelo de Custos	47
3.5.1	CAPEX	48
3.5.2	OPEX	50
4	Caso de Estudo: <i>Fronthaul</i> Óptico-Metálico Versus Somente Metálico em CRAs Totalmente <i>Indoor</i>	52
4.1	Alternativas de <i>Fronthaul</i> Consideradas para Análise de CRA Totalmente <i>Indoor</i>	52
4.2	Previsão de Tráfego até 2030	54
4.2.1	Caracterização da Demanda de Tráfego até 2030	54
4.3	Considerações no <i>Fronthaul</i> Analógico entre RRUs e RRHs	56
4.4	Considerações no <i>Fronthaul</i> Digital entre BBU's e RRUs	58
4.5	Considerações do Cenário de Implantação e Seus Componentes	59
4.6	Resultados	62
4.6.1	Comparativo: Taxas de Transmissão Alcançadas	63
4.6.2	Comparativo: Custo Total Proprietário	63
4.6.3	Comparativo: Custo de Instalação da Rede	64
4.6.4	Comparativo: Custo de Operação da Rede	65
4.6.5	Balanco Técnico-Econômico	66
4.7	Análises de Sensibilidade	68
4.7.1	Variação do Número de Andares	68
4.7.2	Variação da Área dos Pisos	70
4.7.3	Variação do Número de RRHs por Andar	71
4.7.4	Cascadeamento de RRUs	72
4.8	Conclusão	73
5	Caso de Estudo: <i>Backhaul</i> PON Protegido para CRAs Totalmente <i>Indoor</i> em Cenários Urbanos Densos	75
5.1	Arquitetura Analisada	76
5.2	Padrões PON Considerados	77
5.3	Topologias de Proteção para PON Consideradas	77
5.4	Considerações do Cenário de Implantação e seus Componentes	79
5.5	Resultados	81

5.5.1	Comparativo: Taxas de Transmissão Alcançadas	82
5.5.2	Comparativo: Disponibilidade Alcançada	84
5.5.3	Comparativo: Custo Total Proprietário	84
5.5.4	Comparativo: Custo de Instalação da Rede	85
5.5.5	Comparativo: Custo de Operação da Rede	87
5.6	Análises de Sensibilidade	88
5.6.1	Variação do Número de Edifícios Comercias	88
5.6.2	Variação da Custo para Construção de Dutos de Fibra	89
5.6.3	Variação da Penetração da Rede	90
5.7	conclusão	90
6	Considerações finais e trabalhos futuros	93
	Referências	95

Lista de ilustrações

Figura 1	Arquitetura de estações base tradicional (<i>all-in-one</i>).	10
Figura 2	Arquitetura de estações base D-RAN.	11
Figura 3	Arquitetura de estações base C-RAN.	11
Figura 4	Esquemático da CRA voltada ao ambiente <i>indoor</i> . Visão das seções de <i>fronthaul</i> digital entre BBU e RRUs e digital entre RRUs e RRHs.	13
Figura 5	Configurações para CRA atendendo ambiente <i>indoor</i>	14
Figura 6	Exemplo de cascadeamento de duas RRUs.	15
Figura 7	Configurações possíveis para um DAS.	16
Figura 8	Exemplo de sistema de acesso <i>indoor</i> baseado em femto células e DSL.	17
Figura 9	Exemplo de transmissão em <i>upstream</i> e <i>downstream</i> em FDD e TDD para CCs (<i>Component Carriers</i> – Portadoras Componentes).	18
Figura 10	Exemplo de CA (<i>Carrier Aggregation</i> – Agregação de Portadora) com quatro CCs (<i>Component Carriers</i> – Portadoras Componentes).	18
Figura 11	Arquitetura FTTdp do DSL e a representação da evolução da tecnologia DSL a cada geração.	20
Figura 12	Arquitetura de redes HFC, (a) tradicional e (b) variação ponto a ponto para garantia de largura de banda.	21
Figura 13	Configuração sob um cabo metálico de quatro pares: modo de transmissão dos canais diferenciais (V_D), fantasma de 1ª camada (V_F) e de 2ª camada (V_{FF}).	22
Figura 14	Topologia de redes de acesso baseadas em fibra.	24
Figura 15	Topologia de redes de acesso baseadas em micro-ondas.	27
Figura 16	Exemplo de duplicação total para PONs.	28
Figura 17	Exemplo de duplicação seletiva para PONs: enlaces de alimentação e distribuição.	29
Figura 18	Exemplo de proteção por sobrecarga temporária: interconexão cruzada de OLTs.	29
Figura 19	Exemplo de proteção por sistema paralelo: PON protegida por rede móvel externa.	30
Figura 20	Visão geral dos modelos usados para avaliar a viabilidade técnica-econômica para redes.	32
Figura 21	Representação do modelo de ruas Manhattan simples.	34
Figura 22	Modelo de ruas Manhattan simples aplicado a múltiplos níveis.	35

Figura 23	Configuração do MDR para um edifício.	36
Figura 24	Metodologia de funcionamento do MDR para a construção de cenário.	36
Figura 25	Exemplo do sistema cartesiano discreto de posições para o bloco com 6 elementos.	40
Figura 26	Exemplificações da Família de posições para ambientes <i>indoor</i> e <i>outdoors</i>	40
Figura 27	Esquema de duplicação de enlaces em um bloco.	41
Figura 28	Árvore de conexões entre os equipamentos considerando as diversas topologias.	43
Figura 29	Representação da metodologia para a determinação de A_i e P_i para equipamentos na rede.	44
Figura 30	Exemplo de cadeia criada para a simulação de uma rede com três equipamentos distintos.	46
Figura 31	Fluxograma do processo de simulação que obtém os diversos t_i	48
Figura 32	Metodologia adotada pelo modelo de custos para determinação do TCO.	49
Figura 33	Alternativas de <i>fronthaul</i> para CRA totalmente <i>indoor</i> comparadas no Capítulo 4.	53
Figura 34	Comparativo entre o volume de tráfego por usuário previsto para 2019 usando o modelo do Capítulo 3 e interpolações com as demandas do METIS2020 ocorrendo em 2024, 2027 e 2030.	55
Figura 35	Previsão de volume de tráfego por usuário (ativo ou inativo) até 2030.	56
Figura 36	Largura de banda útil de um par trançado em um cabo Cat5e considerando: modulação 256QAM, transmissão simultânea nos quatro pares e ruído de vazamento de banda.	57
Figura 37	Taxa agregada de um sistema G.(<i>mg</i>) <i>fast</i> operando sobre um cabo Cat5e com e sem modo fantasma.	59
Figura 38	TCO de primeiro ano para todas as alternativas <i>fronthaul</i> consideradas no Capítulo 4.	64
Figura 39	CAPEX detalhado para todas as alternativas <i>fronthaul</i> consideradas no Capítulo 4:(a) valor do CAPEX, (b) composição do CAPEX.	65
Figura 40	OPEX detalhado para todas as alternativas <i>fronthaul</i> consideradas no Capítulo 4:(a) valor do OPEX, (b) composição do OPEX.	66
Figura 41	Análise de sensibilidade variando-se o número de andares no cenário apresentado na Seção 4.5 entre 1 e 40: (a) taxa de dados atingida no pico de tráfego, (b) razão custo/taxa para um TCO de 5 anos <i>Greenfield</i>	69
Figura 42	Análise de sensibilidade variando-se a área dos pisos no edifício do cenário apresentado na Seção 4.5: (a) taxa de dados atingida no pico de tráfego, com variação entre 1600 m ² e 8100 m ² , (b) razão custo/taxa para um TCO de 5 anos <i>Greenfield</i> , com variação entre 1600 m ² e 2900 m ²	70

Figura 43	Análise de sensibilidade variando-se o número de RRHs por andar no cenário apresentado na seção 4.5 entre 1 e 9: (a) taxa de dados atingida no pico de tráfego, (b) TCO de 5 anos para <i>Greenfield</i>	72
Figura 44	Análise de sensibilidade aplicando-se o cascadeamento de RRUs em um edifício de 40 andares e com o restante dos parâmetros como os adotados na seção 4.5: (a) taxa de dados fornecida distribuído por todos os usuários ativos ou inativos, (b) redução do CAPEX em comparação com o caso sem cascadeamento.	73
Figura 45	Arquitetura de acesso móvel básica analisada no Capítulo 5.	76
Figura 46	Topologias de Proteção consideradas para o <i>backhaul</i> PON:(a) desprotegida, (b) proteção do nível de alimentação, (c) proteção do nível de alimentação e OLT, (d) proteção em ambos os níveis de enlace e no OLT.	78
Figura 47	Disponibilidade para <i>fronthaul</i> totalmente <i>indoor</i> híbrido óptico-metálico e vários padrões de <i>backhaul</i> PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.	84
Figura 48	TCO de cinco anos para <i>fronthaul</i> totalmente <i>indoor</i> híbrido óptico-metálico e vários padrões de <i>backhaul</i> PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.	85
Figura 49	Proporção de CAPEX referente ao ambiente <i>indoor</i> e <i>outdoor</i> para <i>fronthaul</i> totalmente <i>indoor</i> híbrido óptico-metálico e vários padrões de <i>backhaul</i> PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.	86
Figura 50	Composição do CAPEX referente ao ambiente <i>outdoor</i> para vários padrões de <i>backhaul outdoor</i> PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.	86
Figura 51	Proporção do OPEX referente ao ambiente <i>indoor</i> e <i>outdoor</i> para <i>fronthaul</i> totalmente <i>indoor</i> híbrido óptico-metálico e vários padrões de <i>backhaul</i> PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.	87

Figura 52	Composição do OPEX referente ao ambiente <i>outdoor</i> para vários padrões de <i>backhaul outdoor</i> PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.	88
Figura 53	Análise de sensibilidade para as economias alcançadas em relação ao caso desprotegido por topologias de proteção para o <i>backhaul</i> PON envolvendo a porcentagem de usuários comerciais.	89
Figura 54	Análise de sensibilidade para as economias alcançadas pela proteção do nível de alimentação para o <i>backhaul</i> PON envolvendo o custo de instalação de dutos de fibra, de forma que cada curva representa uma diferente porcentagem de usuários comerciais.	90
Figura 55	Análise de sensibilidade para TCO da arquitetura da Seção 5.2 no cenário urbano de alta densidade da Seção 5.4 para varias topologias de proteção de um <i>backhaul</i> PON envolvendo a penetração da rede nos edifícios.	91

Lista de tabelas

Tabela 1	Parâmetros considerados para o cálculo da demanda de tráfego em 2019.	55
Tabela 2	Parâmetros para transmissão analógica de portadoras ente RRUs e RRHs.	58
Tabela 3	Parâmetros considerados para obtenção da taxa da tecnologia G.(<i>mg</i>) <i>fast</i> .	58
Tabela 4	Parâmetros do MDR considerados para um edifício mediano com mais de 10 andares em cenários urbanos densos.	60
Tabela 5	Parâmetros do MDR considerados para a distribuição de equipamentos em um edifício mediano com mais de 10 andares em cenários urbanos densos.	60
Tabela 6	Fontes e formas de determinação das características operacionais básicas de componentes para CRAs óptico-metálicas ou totalmente metálicas com G.(<i>mg</i>) <i>fast</i>	61
Tabela 7	Valores considerados para características operacionais básicas de componentes para CRAs óptico-metálicas ou totalmente metálicas com G.(<i>mg</i>) <i>fast</i>	62
Tabela 8	Considerações adotadas para a modelagem de custos para CRAs <i>indoor</i> óptico-metálicas ou totalmente metálicas com G.(<i>mg</i>) <i>fast</i>	63
Tabela 9	Taxas de transmissão de dados alcançadas para todas as alternativas <i>fronthaul</i> totalmente <i>indoor</i> consideradas: Máxima, Mínima (Atingida no pico) e Distribuída para o número total de usuários (usada para fins de previsão de tráfego).	64
Tabela 10	Balanco técnico-econômico das alternativas <i>fronthaul</i> consideradas no Capítulo 4.	67
Tabela 11	Padrões PON analisados como alternativa <i>backhaul</i>	77
Tabela 12	Parâmetros do MDR considerados para o cenário urbano de alta densidade adotado nas análises do Capítulo 5.	79
Tabela 13	Parâmetro do MDR considerados para a distribuição de equipamentos no <i>fronthaul indoor</i> do cenário urbano de alta densidade do Capítulo 5.	80
Tabela 14	Fórmulas para cálculo dos parâmetro do MDR para a distribuição de equipamentos no <i>backhaul outdoor</i> do cenário urbano de alta densidade do Capítulo 5.	81
Tabela 15	Características básicas dos componentes na CRA totalmente <i>indoor</i>	82
Tabela 16	Considerações do modelo de custos para CRA totalmente <i>indoor</i>	83

Tabela 17	Taxas de transmissão de dados alcançadas para todas as alternativas <i>backhaul</i> consideradas para suporte ao <i>fronthaul</i> totalmente <i>indoor</i> no cenário do no Capítulo 5.	83
-----------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Lista de abreviaturas e siglas

10G-PON	<i>10 Gigabit Passive Optical Network.</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project.</i>
40G-PON	<i>40 Gigabit Passive Optical Network.</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line.</i>
AON	<i>Active Optical Network.</i>
AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating.</i>
BBU	<i>Baseband Unit.</i>
BER	<i>Bit Error Rate.</i>
CA	<i>Carrier Aggregation.</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate.</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditures.</i>
CC	<i>Component Carrier.</i>
CO	<i>Central Office.</i>
CPRI	<i>Common Public Radio Access.</i>
CRA	<i>Centralized Radio Access.</i>
C-RAN	<i>Centralized Radio Access Network or Cloud Radio Access Networks.</i>
CTMC	<i>Continuous Time Markov Chain.</i>
DAS	<i>Distributed Antenna System.</i>
DMT	<i>Discrete Multitone.</i>
DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specification.</i>
D-RAN	<i>Distributed Radio Access Network.</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line.</i>

DSLAM	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer.</i>
EARTH	<i>Energy Aware Radio and Network Technologies.</i>
EBM	Estação Base Macro.
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network.</i>
ETSI-ORI	<i>European Telecommunications Standards Institute - Open Radio equipment Interface.</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex.</i>
FEXT	<i>Far End Crosstalk.</i>
FIT	<i>Failures In Time.</i>
FTTdp	<i>Fiber to the Distribution Point.</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home.</i>
G.(mg)fast+F	<i>DSL com modo de transmissão fantasma de uma camada.</i>
G.(mg)fast+F+FF	<i>DSL com modo de transmissão fantasma de duas camadas.</i>
GFC	<i>Gigabit Fibre Channel.</i>
G-PON	<i>Gigabit Passive Optical Network.</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal.</i>
HetNets	<i>Heterogeneous Networks.</i>
HFC	<i>Hybrid Fiber Coax.</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
IF	<i>Intermediate Frequency.</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector.</i>
LAN	<i>Local Access Networks.</i>
MDR	Modelo de Dimensionamento da Rede.
METIS2020	<i>Mobile Wireless Communications Enablers for the Twenty-Twenty Information Society.</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output.</i>

MOVFC	Modelo de Operação Voltado a falhas de Componentes.
NA	Nível de Alimentação.
ND	Nível de Distribuição.
NEXT	<i>Near End Crosstalk.</i>
OASE	<i>Optical Access Seamless Evolution.</i>
OBSAI	<i>Open Base Station Architecture Initiative.</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access.</i>
ONU	<i>Optical Network Unit.</i>
OPEX	<i>Operational Expenditures.</i>
P2P	Ponto a Ponto.
PMP	Ponto a Multiponto.
PON	<i>Passive Optical Networks.</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation.</i>
QoS	<i>Quality of Service.</i>
RF	<i>Radio Frequency.</i>
RoC	<i>Radio Over Copper.</i>
RoF	<i>Radio Over Fiber.</i>
RRH	<i>Remote Radio Head.</i>
RRU	<i>Remote Radio Unit.</i>
RU	<i>Radio Unit.</i>
SFP+	<i>Enhanced Small Form-Factor Pluggable Transceiver</i>
SLA	<i>Service Level Agreement.</i>
SMS	<i>Short Message Service.</i>
SNR	<i>Signal Noise Rate.</i>
TCO	<i>Total Cost of Ownership.</i>
TDD	<i>Time Division Duplex.</i>

TDM - PON *Time Divison Multiplexing Passive Optical Network.*

TI Tecnologia da Informação.

TWDM *Time and Wavelength Divison Multiplexing.*

TWDM-PON *Time and Wavelength Divison Multiplexing Passive Optical Network.*

UC Unidade de Custo.

VDSL *Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line.*

WDM *Wavelength Divison Multiplexing.*

WDM-PON *Wavelength Divison Multiplexing.*

Lista de símbolos

h	Altura de um andar dos edifícios.
A_{Reg}^{Out}	Área da região abordada pelo cenário <i>outdoor</i> .
A_{Piso}	Área dos pisos em edifícios.
Ar_{Eq}^{InsInd}	Área total ocupada por equipamentos <i>indoor</i> usando espaço alugado.
Ar_{Eq}^{InsOut}	Área total ocupada por equipamentos <i>indoor</i> usando espaço alugado.
B_{Guarda}^{UpDown}	Banda de guarda entre componentes agregadas de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> .
$B_{Guarda}^{Lateral}$	Banda de guarda lateral das componentes portadoras.
Cap_{Enlace}	Capacidade de transmissão de dados agregada do enlace (tanto no <i>upstream</i> quanto no <i>downstream</i>).
L_j^{EnlOut}	Comprimento dos enlaces tipo j no ambiente <i>indoor</i> .
c_k	Comprimento lateral de um bloco no nível k da rede <i>indoor</i> .
C_K	Comprimento lateral de um bloco no nível K da rede <i>outdoor</i> .
L_K^{CanOut}	Comprimento total de canais para enlaces em blocos <i>outdoor</i> de nível K .
$L_K^{CanOutPrt}$	Comprimento total de canais para enlaces voltados a proteção em blocos <i>outdoor</i> de nível K .
L_K^{EnlOut}	Comprimento total de enlaces em blocos <i>outdoor</i> de nível K .
$L_K^{EnlOutPrt}$	Comprimento total de enlaces para proteção em blocos <i>outdoor</i> de nível K .
C_{Eq}^{Compra}	Custo de compra dos equipamentos.
C_{Enl}^{Ind}	Custo de enlaces <i>indoor</i> .
C_{Enl}^{Out}	Custo de enlaces <i>outdoor</i> .
C_{Eq}^{Ins}	Custo de instalação dos equipamentos.
$\alpha(t)$	Demanda de tráfego no tempo t .

ρ	Densidade populacional.
ρ_{Piso}	Densidade populacional no piso de um ambiente <i>indoor</i> .
$D_j^{Eq \rightarrow CO}$	Distância ao CO do equipamento j .
$D_{k,j}^{Comp \rightarrow CBI}$	Distância do componente j ao centro do bloco de nível k onde este se encontra no ambiente <i>indoor</i> .
$D_{K,j}^{Comp \rightarrow CBO}$	Distância do componente j ao centro do bloco de nível K onde este se encontra no ambiente <i>outdoor</i> .
D_i^{EqRep}	Distância do componente c falho a ser reparado no estado j .
r_k	Distância entre as bordas adjacentes de dois elementos vizinhos no nível k da rede <i>indoor</i> .
R_K	Distância entre as bordas adjacentes de dois elementos vizinhos no nível K da rede <i>outdoor</i> .
l_k	Distância entre o centro de dois elementos vizinhos no nível k da rede <i>indoor</i> .
L_K	Distância entre o centro de dois elementos vizinhos no nível K da rede <i>outdoor</i> .
D_{z_1, z_2}^{pisos}	Distância entre o centro de dois pisos z_1 e z_2 .
F_{Imp}	Fator adicionador de impacto para falhas de grande porte.
F_{CRA}^{Casc}	Fator de cascadeamento de RRUs.
F_{Rec}	Fator de custo do recondicionamento de equipamentos.
F_{Exp}^{Dig}	Fator de expansão da largura de banda das portadoras de radio quando digitalizadas.
F_{Sub}	Fator de substituição de equipamentos.
ζ_K	Fator multiplicativo relacionado a presença de múltiplos enlaces ligados a cada elemento do bloco <i>outdoor</i> de nível K .
$\beta_{i,K}$	Fator multiplicativo relacionado à presença de múltiplos equipamentos do tipo e no centro dos blocos de nível K da rede <i>outdoor</i> .
$\beta_{i,k,z}$	Fator multiplicativo relacionado à presença de múltiplos equipamentos do tipo i no centro dos blocos de nível k e andar z da rede <i>indoor</i> .

β_i	Fator multiplicativo relacionado à presença de múltiplos equipamentos do tipo i em uma mesma sala ou edifício.
B	Largura de banda.
B_{Util}	Largura de banda útil no enlace.
B_{Port}	Largura de banda da componente portadora de rádio.
λ	Matriz contendo as taxas de transição de estados para CTMC.
R	Métrica de confiabilidade de componentes.
P_k^{PreFin}	Multa por indisponibilidade dada pela falta de serviço a uma premissa final com contrato falho tipo S .
m	Nível <i>indoor</i> mais superior.
M	Nível <i>outdoor</i> mais superior.
N_{Mod}	Nível de modulação do sistema em bits/Hz.
m	Nível mais superior da rede <i>indoor</i> .
M	Nível mais superior da rede <i>outdoor</i> .
N_{And}	Número de andares dos edifícios.
N_k^{CanInd}	Número de canais para enlaces nos blocos de cada nível k da rede <i>indoor</i> .
N_K^{CanOut}	Número de canais para enlaces nos blocos de cada nível K da rede <i>outdoor</i> .
N_k^{CBI}	Número de centro de blocos no nível k da rede <i>indoor</i> .
N_K^{CBO}	Número de centro de blocos no nível K da rede <i>outdoor</i> .
N_{Ed}	Número de edifícios no cenário.
n_k	Número de elementos em um lado do bloco no nível k da rede <i>indoor</i> .
N_K	Número de elementos em um lado do bloco no nível K da rede <i>outdoor</i> .
N_i^{EqEd}	Número de equipamentos do tipo i na base de edifícios (centro do primeiro piso).
N_i^{EqSala}	Número de equipamentos do tipo i nas salas de edifícios.

$N_{i,K}^{EqCBO}$	Número de equipamentos do tipo i no centro dos blocos em cada nível K da rede <i>outdoor</i> .
$N_{i,k,z}^{EqCBI}$	Número de equipamentos do tipo i no centro dos blocos em cada nível k e andar z da rede <i>indoor</i> .
N_{op}	Número de operadores.
$N_{k,i}^{PreFin}$	Número de premissas finais falhas com contrato k no estado i .
N_{Salas}	Número de salas no cenário.
N_{Us}^{Ed}	Número de usuários por edifício.
N_{Us}^{Sala}	Número de usuários por sala.
N_{Tot}^{CanEnl}	Número total de canais para enlaces.
N_{Tot}^{Comp}	Número total de componentes.
N_{Tot}^{Eq}	Número total de equipamentos.
C_i^{Alu}	O custo de aluguel de espaço no estado i .
C_i^{Ene}	O custo de energia no estado i .
C_i^{Ene}	O custo de gerenciamento de rede no estado i .
C_i^{Pen}	O custo de penalidade no estado i .
C_i^{Rep}	O custo de reparo no estado i .
$Puap$	Porcentagem de usuários ativos no pico.
p	Porcentagem de usuários pesados.
s_k	Porcentagem de usuários usando o terminal k .
$Ph_{k,j}$	Posição horizontal do componente j ao centro do bloco de nível k onde este se encontra no ambiente <i>indoor</i> .
$Ph_{K,j}$	Posição horizontal do componente j ao centro do bloco de nível K onde este se encontra no ambiente <i>outdoor</i> .
$Pv_{k,j}$	Posição vertical do componente j ao centro do bloco de nível k onde este se encontra no ambiente <i>indoor</i> .
$Pv_{K,j}$	Posição vertical do componente j ao centro do bloco de nível K onde este se encontra no ambiente <i>outdoor</i> .

$P_r^{EnlOut}_K$	Preço da compra e de instalação dos enlaces usados no nível K da rede.
$P_r^{EqRep}_i$	Preço de compra do equipamento a ser reparado no estado i .
$P_r^{Eq}_i$	Preço de compra e instalação dos enlaces tipo i instalados no ambiente <i>indoor</i> .
$P_r^{Out}_{Can}$	Preço de instalação dos canais de enlace <i>outdoor</i> .
$P_r^{Ind}_{Alu}$	Preço do aluguel de espaço <i>indoor</i> .
$P_r^{Out}_{Alu}$	Preço do aluguel de espaço <i>outdoor</i> .
P_{kWh}	Preço do quilowatt.
$P_{i,j}$	Probabilidade de transição a partir do estado i para o j .
SNR_{Canal}	Relação sinal ruído de canal ruidoso.
Sal	Salário das equipes de trabalho.
Tot_{Pot}	Soma da potência de todos os equipamentos da rede.
Pot_i^{Desp}	Soma da potência de todos os equipamentos falhos no estado i .
$T_{CRA}^{Analogica}$	Taxa de dados fornecida ao usuário por uma transmissão de rádio analógica para FDD.
$T_{CRA}^{Digital}$	Taxa de dados fornecida ao usuário por uma transmissão de rádio digital para FDD.
T_{CRA}	Taxa de dados máxima fornecida ao usuário em uma CRA para FDD.
T_{Port}	Taxa de dados máxima fornecida por uma componente portadora de rádio.
γ_{Movel}	Taxa de penetração do serviço móvel.
γ_{Indoor}	Taxa de permanência no ambiente <i>indoor</i> .
$\lambda_{i,j}$	Taxa de transição do estado i para o j na matriz λ .
r_k	Taxa média do terminal k .
r_k^{Comum}	Taxa no terminal k para usuário comum.
r_k^{Pesado}	Taxa no terminal k para usuário pesado.
T_j^{Ins}	Tempo de instalação do equipamento j .

T_k^{rep}	Tempo de reparo do componente k .
t_i	Tempo médio de permanência no estado i a cada transição.
T_i	Tempo de permanência no estado i no período de operação da rede.
T_{Max}^{Canal}	Taxa de dados máxima para canal ruidoso.
V_{Med}	Velocidade média da equipe de reparo.

Lista de Publicações

Publicações diretamente relacionadas ao conteúdo da dissertação:

1. ANDRE, A. L. P.; OHASHI A. A.; SOUZA D. D.; SOUSA B. P. T.; FREITAS M. M. M.; FARIAS F. S.; COSTA J. C. W. A. Avaliação Técnica e Econômica de Cenários Fronthaul Indoor Híbridos e Baseados em Cobre Utilizando G.fast e Modo Fantasma. In: Anais do 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 13º CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Santa Rita do Sapucaí-MG, Brasil, 2018. p. 178–182.
2. ANDRE, A. L. P.; FARIAS F. S.; OHASHI A. A.; OLIVEIRA M. V. P. ; COSTA J. C. W. A et al. A Techno-Economic Assessment of 5G Networks with Passive Optical Network-Based Mobile Backhaul and Hybrid Fiber-Copper Fronthaul. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. Gramado-RS, Brasil, 2019.

Publicações indiretamente relacionadas ao conteúdo da dissertação:

1. REIS, F. V. S.; ANDRE, A. L. P.; OLIVEIRA M. V. P. ; COSTA J. C. W. A; FARIAS F. S. Análise Técnico-Econômica de Redes Óticas Passivas no Contexto de Núcleos Urbanos Amazônicos. In: II Congresso de Tecnologia e Desenvolvimento da Amazônia. Tucuruí-PA, Brasil, 2018.

1 Introdução

A quinta geração de sistemas de telecomunicação móvel, o 5G, busca dar suporte a uma sociedade cada vez mais digital e conectada, sendo meio de acesso a Internet para usuários e máquinas (FIORANI et al., 2014). As demandas previstas para o 5G, segundo o projeto METIS2020 (*Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society* – Ativadores de comunicações móveis e sem fio para a sociedade informacional de dois mil e vinte), incluem latência máxima inferior a um milissegundo, assim como, em relação a uma rede móvel de meados da década de 2010, mil vezes o volume de tráfego, dez a cem vezes a taxa de dados por usuário e dez a cem vezes o número de dispositivos conectados (METIS2020, 2013). Neste contexto, é evidente que as demandas das redes 5G podem exercer um grande impacto nas arquiteturas de redes móveis e seus sistemas de transporte.

As redes de transporte suportando o 5G podem ser subdivididas em dois níveis de arquitetura, o *fronthaul* e o *backhaul*. O primeiro agrega a capacidade de um conjunto de rádios distribuídos com pequena área de cobertura conhecidos como *small cells*, os quais são geralmente instalados no ambiente *indoor*, uma vez que é onde os usuários passam a maior parte de seu tempo (ERICSSON, 2015). O segundo agrega o tráfego advindo do primeiro e transporta em direção ao CO (*Central Office* – Escritório Central) da operadora. Ambos os níveis deverão possuir alta capacidade, excelente gerenciamento de recursos e elevada confiabilidade (FIORANI et al., 2014). Nesse contexto, CRA (*Centralized Radio Architecture* – Arquitetura de Rádio Centralizado) e PON (*Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva) tem sido propostas como soluções para, respectivamente, *fronthaul* e *backhaul* (TONINI et al., 2017)(ACATAUASSU et al., 2018)(FIORANI et al., 2016)(YAGHOUBI et al., 2018).

A CRA é uma solução de infraestrutura de transporte dedicada para *small cells* em ambientes *indoor* originalmente proposta em (LU et al., 2014). A qual centraliza o processamento banda base do sinal de rádio e utiliza transmissão *multicast*, facilitando o gerenciamento de recursos da rede e eliminando problemas de *handover* (transferência de usuários entre diferentes células de acesso sem fio com a movimentação destes), que são problemáticos em sistemas de transporte para *small cells* (AL-FALAHY; ALANI, 2017). O *fronthaul* formado por essas arquiteturas pode conter múltiplos níveis de enlaces, sejam eles ópticos, metálicos ou baseados em micro-ondas (MAVRAKIS, 2015)(TONINI et al., 2017)(ACATAUASSU et al., 2018). O caso de implantação mais comum é o óptico-metálico composto por dois níveis, usando cabos metálicos Cat5e/Cat6 em um deles, que

trazem vantagens como alta aceitabilidade no mercado de TI (Tecnologia da Informação) e menores custos de instalação e manutenção (LU et al., 2014). Apesar disso, tecnologias como G.(mg)fast e modo de transmissão fantasma podem possibilitar taxas de dezenas de Gbps em cabos Cat5e/Cat6 em comprimentos menores que 100 metros (SOUZA et al., 2018). Tal desenvolvimento pode possibilitar um *fronthaul* totalmente metálico em CRAs, eliminando qualquer nível óptico e fazendo uso total das vantagens dos cabos Cat5e/Cat6 (LU et al., 2014).

PONs utilizam uma arquitetura ponto a multiponto com compartilhamento de enlaces e equipamentos, podendo fornecer altas taxas de transmissão a custos de instalação reduzidos em comparação a arquiteturas de fibra ponto a ponto. No entanto, o compartilhamento pode gerar problemas de confiabilidade, uma vez que muitos usuários ou premissas finais estão conectados aos mesmos equipamentos e enlaces. Esta menor confiabilidade não é desejável na sociedade ultraconectada atendida pelo 5G, a qual será extremamente dependente da comunicação entre usuários, máquinas e serviços, de forma que falhas na infraestrutura de rede podem causar sérios e irreversíveis danos, incorrendo em pesadas perdas financeiras para os operadores ou até mesmo a perda de vidas, uma vez que o não funcionamento aplicações de monitoramento de saúde pode resultar no negligenciamento de emergências (FERNANDEZ; STOL, 2015)(AL-FUQAHA et al., 2015). 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.

O atendimento de demandas e requisitos de atuais e futuras redes móveis, como as 5G, têm levado a busca incansante por meios de transmissão e tecnologias de transporte tecnicamente capazes, como por exemplo PONs e CRAs. No entanto, a viabilidade de qualquer tecnologia depende não somente de aspectos técnicos desejáveis, mas também daqueles econômicos, sejam de CAPEX (*Capital Expenditures* – Despesas de Capital) ou OPEX (*Operational Expenditures* – Despesas de Operação). Dessa forma, a avaliação técnico-econômica se torna fundamental na determinação de viabilidade das tecnologias propostas para suportar o 5G, independentemente do fato desta tecnologia ser uma CRA híbrida óptico-metálica ou totalmente metálica, assim como uma PON protegida ou desprotegida. Nesse contexto, diversas metodologias e modelos de natureza analítica para avaliação técnico-econômica de redes móveis foram propostos [novo](FIORANI et al., 2016)(FARIAS et al., 2016)(YAGHOUBI et al., 2018).

1.1 Trabalhos Relacionados

A avaliação de viabilidade de sistemas de transporte para redes fixas e móveis é um assunto largamente abordado na literatura, seja em termos técnicos ou econômicos, onde tecnologias de transporte como CRAs híbridas óptico-metálicas ou PONs já foram

analisadas no contexto de 5G, respectivamente, como solução de *fronthaul* e *backhaul*.

Em (BOURAS et al., 2015) é apresentado uma análise econômica da implantação de dois sistemas de transporte para *small cells indoors* no contexto de 5G, DAS (*Distributed Antenna System* – Sistema de Antenas Distribuídas) e femto células usando rede banda larga fixa. São apresentados modelos para o cálculo do CAPEX e OPEX para os dois sistemas analisados. Os resultados mostram que o uso de femto células leva a menores custos totais que DAS, de forma que o trabalho conclui que a primeira é mais viável que a segunda. No entanto, o trabalho não considerou algumas desvantagens que um sistema baseado em femto células pode trazer, como a dificuldade de gerenciamento de *handover* apontada em (AL-FALAHY; ALANI, 2017), o que pode acabar por fornecer maior grau de viabilidade ao DAS. Além disso, o trabalho não considerou CRAs, que podem ser uma alternativa para um sistema de suporte a *small cells* mais em conta que DAS, mas sem os problemas operacionais advindos do uso de femto células suportadas por banda larga fixa, como apontado em (VIEIRA, 2014).

Em (TONINI et al., 2017) uma avaliação técnico-econômica entre dois esquemas de distribuição para CRAs é realizada. A primeiro é chamada de *joint-design*, sendo proposta do trabalho, já a segundo é referido com *traditional-design*, vindo de referência. Os resultados mostram que, considerando os níveis médios de tráfego esperados para os anos de 2020 e além, assim como, áreas urbanas densas, a *joint-design* possui um custo de implantação entre 50% e 70%, dependendo da reutilização de infraestrutura no cenário. Esse trabalho é um dos poucos a abordar a questão econômica de CRAs no contexto de 5G, mas apenas em termos CAPEX, ignorando o OPEX.

Em (FIORANI et al., 2016) é apresentado uma metodologia para dimensionar os segmentos de rádio e transporte de redes móveis para diferentes soluções de transporte em nível de *backhaul* e *fronthaul*, assim como uma avaliação técnica e de eficiência energética para arquiteturas de implantação de rede móvel em áreas urbanas, com macro células e sistemas *indoor* dedicados de *small cells*. Os resultados mostram que o uso de *small cells indoor* é mais adequado para níveis mais elevados de tráfego, como os esperados para o 5G, levando a menos da metade do consumo energético do que um caso com apenas macro células. Além disso, em termos técnicos é concluído que o uso de uma PON híbrida com TDM e WDM (*Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda), formando um sistema TWDM, é a melhor alternativa para o *backhaul* de infraestrutura dedicada ao suporte de *small cells indoor*. Tais resultados estão em concordância com o apresentado em (JABER et al., 2016), onde WDM-PONs e TWDM-PONs são indicadas como boas alternativas para fornecimento de um acesso óptico com dinamismo de recursos e baixa latência, sendo importante ressaltar que a próxima geração de sistemas G-PON utilizará a tecnologia TWDM (ITU-T, 2013). No entanto, apesar de custos serem considerados nas análises do trabalho, isso ocorreu de

forma subjetiva, sem cálculo de CAPEX ou OPEX.

Em (FERNANDEZ; STOL, 2015) é realizada uma análise técnico econômica de várias topologias de proteção para PONs por meio de simulações, de forma que a rede tem sua operação modelada de forma dinâmica, permitindo melhores análises no caso de falhas simultâneas em elementos da rede, o que é uma grande vantagem em relação às análises anteriores para proteções em PONs, como (MACHUCA; CHEN; WOSINSKA, 2012) e (DIXIT et al., 2014). Os resultados do trabalho indicam que as topologias de proteção podem causar forte redução na indisponibilidade dos usuários e reduzir o gasto das operadoras com multas, de forma que as proteções do OLT e fibras ópticas de alimentação podem trazer retorno financeiro em médio e longo prazo, principalmente em cenários urbanos densos com muitos usuários comerciais. No entanto, é importante considerar que apesar do trabalho realizar uma análise econômica para proteções em PONs, o modelo econômico é incompleto, não levando em consideração custos como consumo de energia elétrica, aluguel de espaço e recondicionamento ou substituição de equipamentos em reparos. Além disso, a análise considera apenas TDM-PONs suportando o acesso de redes fixas.

Em (FARIAS et al., 2016) é apresentado uma metodologia compreensiva para a análise de TCO (*Total Cost of Ownership* – Custo Total Proprietário) de diferentes alternativas *backhaul* para redes móveis, incluindo micro-ondas, DSL junto a micro-ondas, FTTH junto a micro-ondas e totalmente de fibras ópticas. As avaliações consideram cenários com e sem existência de infraestrutura legada, *Greenfield* e *Brownfield*, respectivamente. No primeiro caso as alternativas *backhaul* consideradas são avaliadas isoladamente e no segundo caso em caminhos de migração em direção a alternativas de fibra óptica, que podem atender maior demanda de dados. Para *Greenfield*, os resultados indicam que o uso de micro-ondas resulta no menor TCO se a instalação de fibras, no caso de aluguel destas FTTH junto a micro-ondas se torna a alternativa com menor TCO. Para *Brownfield*, os resultados assumem uma infraestrutura inicial de cobre usando DSL junto a micro-ondas e indicam que migrar gradativamente até uma alternativa totalmente baseada em fibras resulta em menor TCO do que migrar diretamente. No entanto, é importante considerar que apesar do trabalho buscar realizar uma análise econômica geral para redes móveis, não há considerações explícitas em termos de *fronthaul*, apenas de *backhaul*. Além disso, o modelo econômico considera os custos relacionados à indisponibilidade apenas de forma analítica e em relação aos reparos, não podendo modelar a dinamismo de operação da rede e deixando de abordar um importante custo na composição do OPEX.

Em (YAGHOUBI et al., 2018), uma expansão da metodologia usada em (FARIAS et al., 2016) é apresentada para avaliar redes móveis com macro e *small cells*, adotando alternativas *backhaul* baseadas em micro-ondas ou TWDM-PON, a qual possui tecnologia similar a adotada a próxima geração do padrão G-PON (ITU-T, 2013). Os resultados

indicam que o uso das PON TWDM compensa no longo prazo e se torna a alternativa de *backhaul* de maior viabilidade técnica e econômica para redes com *small cells indoor*, principalmente para o caso do aluguel de infraestrutura de fibra existente. No entanto, é importante considerar que o trabalho focou apenas na seção de *backhaul* e embora melhorias em relação ao modelo de (FARIAS et al., 2016) tenham ocorrido, como a inclusão de multas por indisponibilidade, as falhas na rede ainda são modeladas de forma analítica, impedindo a modelagem do dinamismo da rede em relação a suas falhas.

1.2 Justificativa

Atualmente, os modelos de análise técnico-econômica para redes de acesso são em geral incompletos, às vezes pela ausência de elementos relevantes dentro do contexto de custos, outras por se limitarem a analisar configurações ou tecnologias específicas, ou até mesmo pela incapacidade de modelar a rede de forma dinâmica em termos de suas falhas, o que pode ser um problema na estimativa de custos das multas por indisponibilidade. Além disso, algumas tecnologias apontadas como solução de transporte para o 5G carecem de uma avaliação técnico-econômica. Por exemplo, análises de custos para PONs como *backhaul* móvel considerando o dinamismo operacional da rede, assim como, análises para CRAs em termos de CAPEX e OPEX são inexistentes na literatura, no melhor do conhecimento do autor.

1.3 Motivação

A avaliação técnica e econômica das diversas alternativas de transporte propostas como soluções para o 5G, tanto no *fronthaul* quanto no *backhaul*, é de fundamental importância para a determinação da viabilidade destas. Os modelos para a realização de tal avaliação devem ser preferencialmente genéricos, capazes de avaliar soluções das mais distintas configurações, como por exemplo, CRAs com diferentes tipos de enlaces ou PONs com diversas topologias de proteção. Nesse contexto, este trabalho é motivado pela necessidade de um modelo técnico-econômico genérico para o acesso, o qual consiga capturar o dinamismo de operação da rede, podendo ser aplicado a diferentes tipos de arquiteturas, configurações e topologias de redes, seja no ambiente *indoor*, *outdoor* ou em ambos simultaneamente.

1.4 Objetivos

Esta seção descreve os objetivos desta dissertação, apresentando tanto o geral quanto os específicos.

1.4.1 Objetivo Geral

- Realizar Avaliação técnica econômica de CRAs atendendo o ambiente *indoor* com *backhaul* PON protegido ou desprotegido no contexto de 5G.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo para o cálculo da taxa de dados atingida por usuários em CRAs e prever a demanda de tráfego de dados até 2030;
- Desenvolver modelos de custos e dimensionamento que possam ser aplicado de forma genérica aos mais diferentes tipos de rede e configurações de enlaces no ambiente *outdoor* ou *indoor*;
- Comparar técnica e economicamente alternativas de *fronthaul* híbridas ópticas e totalmente metálicas para CRAs instaladas no ambiente *indoor*;
- Encontrar a alternativa *fronthaul* com melhor viabilidade técnica e econômica para o edifício de múltiplos andares mediano de cenários urbanos densos;
- Comparar técnica e economicamente os padrões e topologias de proteção para PONs como *backhaul outdoor* de um conjunto de CRAs *indoor*;
- Encontrar a alternativa *backhaul* PON com melhor viabilidade técnica e econômica para um cenário urbano de alta densidade.

1.5 Metodologia

A metodologia do trabalho utilizou um conjunto de modelos matemáticos para caracterizar as demandas de tráfego, capacidade de taxa de transmissão, dimensionamento, indisponibilidade e custos totais das diversas alternativas *fronthaul* e *backhaul* consideradas.

As demandas de tráfego são previstas a partir das estimativas de projetos voltados ao suporte dos requerimentos de operadores e usuários móveis em redes atuais e futuras. Já as capacidades de taxas de transmissão são estimadas a partir de referências e variação da lei da capacidade de Shannon em alguns casos.

O modelo de dimensionamento é baseado no modelo de ruas Manhattan simples e constrói a rede que será analisada e distribui os usuários no cenário considerado, de forma que os resultados do dimensionamento servem de entrada para o modelo de indisponibilidade e custos de instalação.

O modelo de indisponibilidade usa CTMC (*Continuous Time Markov Chain* – Cadeias de Markov Contínuas no Tempo) para caracterizar os estados de falha na rede, podendo capturar sua natureza dinâmica para modelar de forma precisa múltiplas falhas simultâneas. Uma simulação de Monte Carlo fazendo uma análise cumulativa da CTMC no tempo de operação estabelecido resulta no tempo passado em cada estado de falha possível na rede analisada. O modelo de custos de operação é um modelo de recompensas de Markov.

Os resultados e análises focaram nas taxas de transmissão fornecidas, suporte a demanda de dados, custos totais e indisponibilidade para alternativas de *backhaul* PON e/ou *fronthaul* CRA. Analisando especificamente o caso urbano de alta densidade.

1.6 Contribuições

As contribuições deste trabalho incluem:

1. Desenvolvimento de um conjunto de modelos para análise técnica e econômica de redes de transporte, com capacidade de cobrir uma ampla gama de alternativas de arquiteturas em diversas configurações de enlaces, seja no ambiente *indoor*, *outdoor* ou ambos;
2. Análise de previsão do comportamento de falhas em redes de transporte suportando acesso móvel, modelando a indisponibilidade de serviço para usuários, considerando-se o dinamismo da rede em termos de suas falhas;
3. Análise técnico econômica de duas estruturas de *fronthaul* para CRA: híbrida óptico-metálica e composta apenas por enlaces metálicos;
4. Análise de esquemas de proteção para *backhaul* móvel no contexto de 5G.

1.7 Organização da Dissertação

O trabalho está organizado em cinco capítulos que discorrem na seguinte maneira listada abaixo:

- O Capítulo 1 busca apresentar brevemente a conjuntura da problemática em questão juntamente aos trabalhos relacionados e correlatos, justificativas, objetivos e metodologia do presente trabalho;
- O Capítulo 2 apresenta algumas tecnologias, arquiteturas e meios de transmissão utilizados em redes de acesso, focando naquelas suportando sistemas celulares ou móveis;

- O Capítulo 3 descreve os modelos matemáticos e métodos considerados para avaliação econômica de redes de acesso móveis em termos de sua disponibilidade;
- O Capítulo 4 Apresenta um caso de estudo comparando CRA híbrida óptico-metálica e somente metálica (usando padrão DSL G.*(mg)fast* e modo de transmissão fantasma) implantadas totalmente no ambiente *indoor* considerando o edifício mediano de mais de 10 andares num cenário denso urbano;
- O Capítulo 5 Apresenta um caso de estudo comparando várias alternativas de padrões PON e topologias de proteção como *backhaul* de CRAs totalmente no ambiente *indoor* num cenário urbano de alta densidade;
- O Capítulo 6 discute as considerações finais e os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir do presente trabalho, bem como as contribuições e os trabalhos publicados.

2 Tecnologias e Meios de Acesso

Este capítulo apresenta algumas tecnologias, arquiteturas e meios de transmissão utilizados em redes de acesso, as quais no contexto deste trabalho representam o conjunto de equipamentos e enlaces entre o CO (*Central Office* – Escritório Central) de uma operadora e os terminais dos usuários. Uma vez que redes de acesso é um assunto muito abrangente o foco deste capítulo é direcionado a sistemas celulares ou móveis, especialmente no provisionamento de serviço ao ambiente *indoor*, detalhando em específico CRAs (*Centralized Radio Architecture* – Arquiteturas de Rádio Centralizado) voltadas a esse ambiente. O capítulo está dividido em seis subseções. A primeira apresenta as diferentes arquiteturas para estações base em redes móveis. A segunda detalha CRAs voltadas ao ambiente *indoor*. A terceira mostra outras alternativas de suporte a rádio acesso *indoor*. A quarta apresenta algumas tecnologias agregadoras de capacidade de dados em redes móveis. A quinta descreve os principais meios de transmissão utilizados na rede de transporte do acesso móvel. Por fim, na última subseção são comentados os possíveis esquemas de proteção contra indisponibilidade numa rede de acesso.

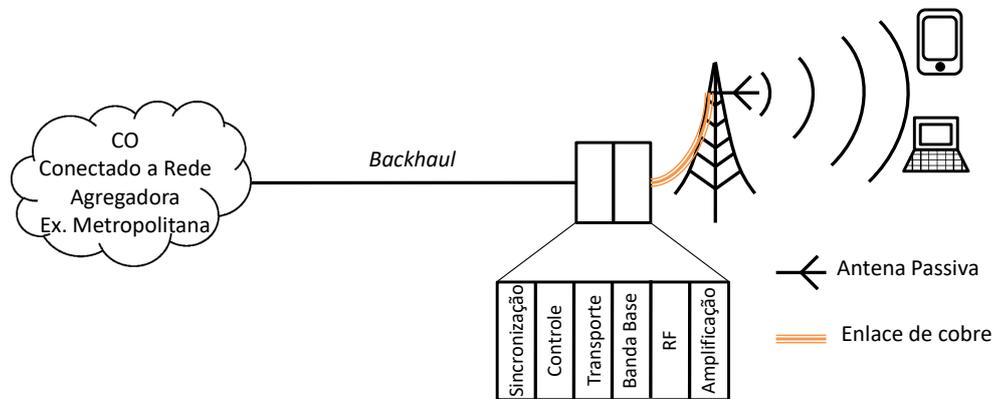
2.1 Estações Base: Definição e Arquiteturas

Uma estação base é uma estação terrestre responsável em prover serviços de dados móveis em determinada área de cobertura, podendo ser representada por uma célula capaz de garantir a comunicação sem fio até o usuário de dispositivos móveis (ONU, 1992). As estações base vêm evoluindo para acompanhar o progresso tecnológico advindo das tecnologias de acesso do 1G ao 5G, de tal modo que é possível distinguir três diferentes arquiteturas de acesso a rádio para estação base: tradicional, D-RAN (*Distributed Radio Access Network* – Rede de Rádio Acesso Distribuído) e C-RAN (*Centralized Radio Access Network* – Rede de Rádio Acesso Centralizado) (CHECKO, 2015)(CHEKOL, 2017).

Na arquitetura tradicional, uma abordagem *all-in-one* é adotada, como apresentado pela Figura 1. Os equipamentos que realizam as funções de sincronização, controle, transporte, banda base, RF (Rádio Frequência) e amplificação localizam-se sob um mesmo gabinete, que por sua vez, é ligado a cabos de cobre, responsáveis em transportar o sinal de RF até uma antena passiva que garante o serviço aos usuários distribuídos em uma grande área de cobertura. Nesta arquitetura a rede de acesso é composta por: *backhaul*, estação base e a conexão sem fio até os terminais dos usuários(CHEKOL, 2017)(CHECKO, 2015). O *backhaul* é o conjunto de enlaces e equipamentos que interligam o CO de uma

operadora aos equipamentos responsáveis pelo processamento de sinal (FARIAS et al., 2013).

Figura 1 – Arquitetura de estações base tradicional (*all-in-one*).



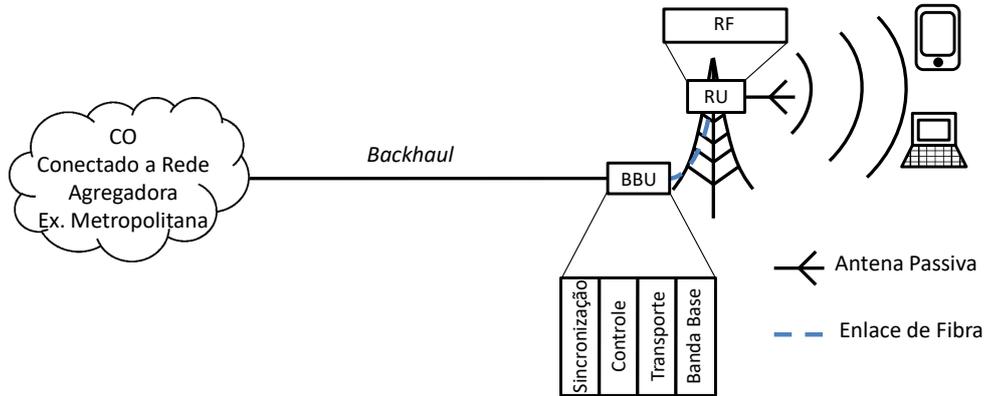
Fonte: elaborado pelo autor.

Embora a arquitetura tradicional tenha a vantagem de utilizar poucos equipamentos, devido concentrar o processamento e possibilitar a cobertura de grandes áreas, esta apresenta problemas referentes ao alto custo de instalação e operação, pois exige para sua implantação a utilização de grandes locais com infraestrutura de suporte que para sua operação consomem elevados níveis de energia elétrica, necessitam de um sistema de refrigeração eficiente e monitoramento constante.

A arquitetura D-RAN é apresentada pela Figura 2, na qual as funções de RF e as antenas estão localizadas em um equipamento conhecido como RU (*Radio Unity* – Unidade de Rádio) e as funções de sincronização, controle, transporte, e banda base, em um equipamento conhecido como BBU (*Base Band Unit* – Unidade de Banda Base). Uma melhor eficiência energética e de refrigeração é obtida em arquiteturas D-RAN quando comparada às tradicionais devido a dois fatores. Primeiro, a utilização de ligação baseada em fibra óptica entre as BBUs e RUs elimina a necessidade de amplificação de potência, a qual era necessária para transporte de sinal RF em cabos de cobre na arquitetura tradicional. Segundo, a concentração de serviços na BBU, isto é, funções que tradicionalmente são processadas em diferentes equipamentos são feitas pela BBU, resultando na redução de volume e infraestrutura de suporte do sistema (CHEKOL, 2017). Em geral, os sinais banda base são transmitidos à RU de forma digital usando padrões como: OBSAI (*Open Base Station Architecture Initiative* – Iniciativa de Arquitetura de Estação Base Aberta), CPRI (*Common Public Radio Interface* – Interface de Rádio Pública Comum) e ETSI-ORI (*European Telecommunications Standards Institute - Open Radio Interface* – Instituto de Padronização de Telecomunicações Europeia - Interface de Equipamento de Rádio Aberto) (CHECKO, 2015)(OLIVA et al., 2016)(PERRIN, 2017).

A arquitetura C-RAN é apresentada pela Figura 3 e é nada mais do que uma evo-

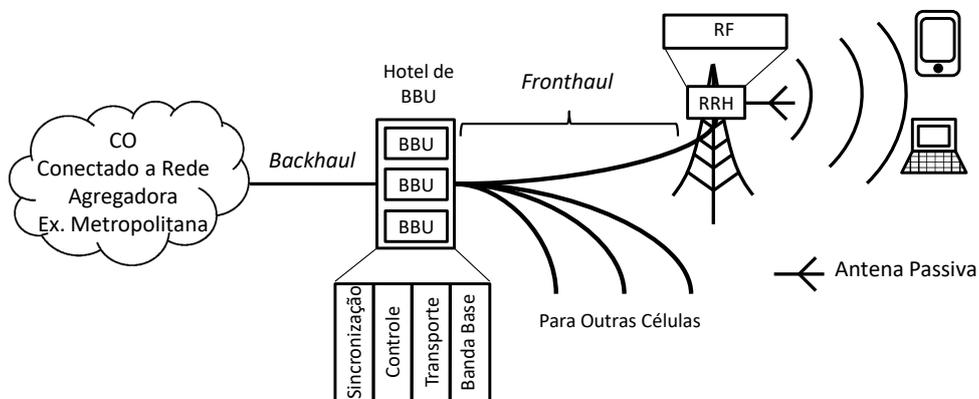
Figura 2 – Arquitetura de estações base D-RAN.



Fonte: elaborado pelo autor.

lução das tecnologias introduzidas na D-RAN. O grande diferencial entre as arquiteturas é que na D-RAN o processamento digital da rede, feito pelas BBUs, está no local da célula e na C-RAN está servindo múltiplas células e centralizado em uma única localidade denominada de Hotel de BBUs. Tal configuração forma uma nova seção dentro da rede de acesso móvel, o *fronthaul*, que representa os enlaces de comunicação entre a central de processamento e as unidades de rádio (CHECKO, 2015). A grande vantagem da C-RAN é que a centralização das BBUs facilita a coordenação de recursos de rádio entre as células, assim otimizando a experiência do usuário e a eficiência espectral. O conceito de centralização de rede pode ser elevado ainda mais com a virtualização das funções da BBU em um conjunto de servidores atendendo um grande número de células, sendo tal tecnologia conhecida como rede de acesso de rádio em nuvem (*Cloud RAN*) (CHEKOL, 2017)(OLIVA et al., 2016)(PERRIN, 2017).

Figura 3 – Arquitetura de estações base C-RAN.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.2 Sistema de *Small Cells* Voltado ao Ambiente *Indoor* com CRA

HetNets (*Heterogeneous Network* – Redes móveis heterogêneas) atendem aos usuários através de uma estrutura composta por diferentes tipos de células que se sobrepõem cobrindo a mesma área variando suas propriedades de cobertura, frequência de operação e potência de saída. As HetNets são apontadas como uma boa alternativa para garantir melhor eficiência energética, menor custo e qualidade de serviço em sistemas móveis futuros, como o 5G (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016)(FARIAS et al., 2016).

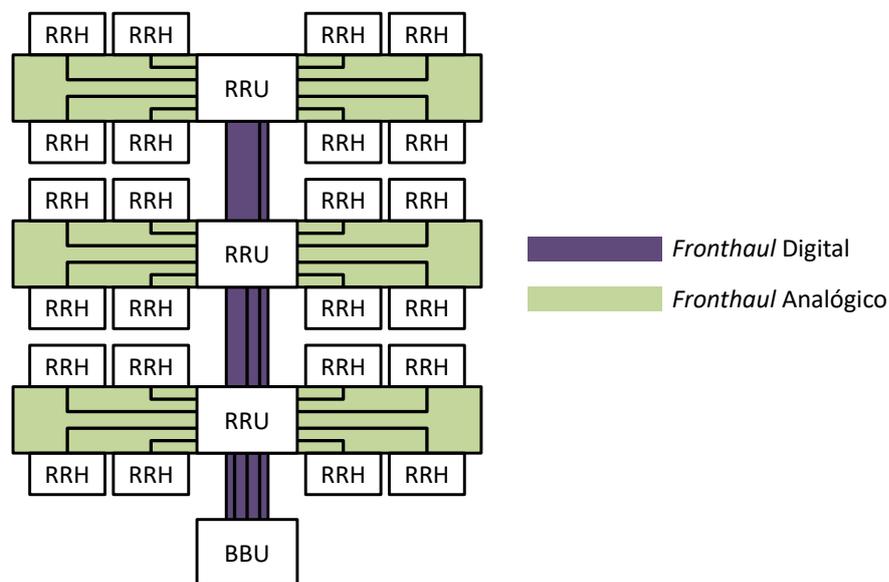
HetNets são geralmente compostas por dois tipos de células: *macro cell* e *small cell*. A primeira é instalada no ambiente *outdoor*, cobrindo uma grande área de cobertura e fornecendo serviços de dados e voz para um grande número de usuários. A segunda pode ser instalada tanto no ambiente *outdoor* quanto no *indoor*, cobrindo uma menor área de cobertura e servindo como ponto de transporte do tráfego de dados gerados em localidades com elevado nível de demanda (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016).

De acordo com a Ericsson AB a maior parte das requisições de tráfego advém de usuários localizados em ambientes *indoor* (ERICSSON, 2015). Esse número de requisições tem sofrido uma expansão exponencial, o que gera novos desafios relacionados a implementação de redes futuras como o 5G. Dessa forma, espera-se que a utilização massiva de *small cells* possa atender tal demanda (FIORANI et al., 2014). Apesar disso, nos últimos anos a indústria tem tido dificuldades para definir o que é exatamente uma *small cell*, principalmente no suporte ao ambiente *indoor*. Tradicionalmente, elas são células sem fio individuais de pequeno porte do tipo *all-in-one*. No entanto, grande parte da indústria, assim como este trabalho, considera os sistemas voltados ao ambiente *indoor* baseados em DAS (*Distributed Antenna System* – Sistemas de Antenas Distribuídas) e CRAs como sendo tecnologias do tipo *small cells* (ERICSSON, 2017)(HUAWEI, 2015)(ZUBAIR, 2011)(TONINI et al., 2017).

As CRAs se aproveitam das vantagens da arquitetura de estação base C-RAN para prover acesso a várias antenas distribuídas com elevado grau de escalabilidade, podendo melhorar significativamente a capacidade do tráfego de dados e a qualidade de serviço em ambientes *indoor* (TONINI et al., 2017)(VIEIRA, 2014). A Figura 4 apresenta o *fronthaul* de uma CRA configurada ao suporte do ambiente *indoor*, onde nota-se que as BBUs fornecem sinal de banda base para uma RRU (*Radio Remote Unit* – Unidade de Rádio Remota) usando uma tecnologia para transmissão digital de CC (*Component Carrier* – Portadora Componente), como OBSAI, CPRI, ETSI-ORI ou outras. As RRU's fazem conversão digital/analógica do sinal de banda base e interfaceamento dos tipos de enlaces conectando-as as várias RRHs (*Radio Remote Heads* – Cabeças de Rádio Remotas) usando preferencialmente um interface legada (preferencialmente cabos metálicos Cat5e, Cat6 ou Cat7), responsável pela transmissão de sinais em IF (*Intermediate Frequencies* - Frequências Intermediárias). As RRHs são responsáveis por todas as funcionalidades

RF, fazendo a conversão *up-down* entre IF e RF e amplificação de sinal para transmissão nas antenas (LU et al., 2014)(TONINI et al., 2017). A arquitetura apresentada obtém um elevado grau de coordenação de recursos, uma vez que todas as RRHs são ligadas ao mesmo hotel BBU (TONINI et al., 2017). Além disso, a configuração das conexões resultantes acaba sendo do tipo *multicast*, onde cada RRU pode ser entendida como um setor da macro célula tradicional, eliminando a necessidade de um planejamento complexo para zonas de *handover* e gerenciamento de interferências (ERICSSON, 2017).

Figura 4 – Esquemático da CRA voltada ao ambiente *indoor*. Visão das seções de *fronthaul* digital entre BBU e RRUs e digital entre RRUs e RRHs.



Fonte: elaborado pelo autor.

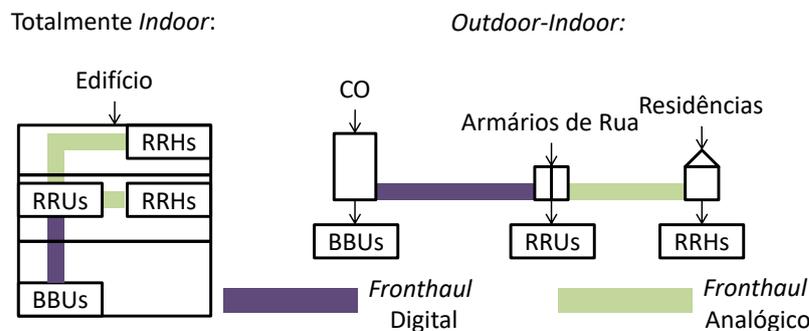
O uso da transmissão digital de CC no *fronthaul* de CRAs voltadas ao ambiente *indoor* entre as BBUs e RRUs ocorre devido as perspectivas de compatibilidade e custo, atualmente a maioria das células sem fio utiliza comunicação digital entre suas BBUs e RUs, de forma que se torna mais simples e barato seguir o mesmo padrão. Além disso, a transmissão digital traz vantagens como uma melhor eliminação das não linearidades no cabo e a capacidade de encapsulamento para transporte sobre diferentes configurações de rede, o qual não é possível no caso de transmissão analógica (WANG et al., 2017). No entanto, a transmissão digital também tem seus problemas no que se refere a largura de banda do sinal, onde o mesmo sofre expansão necessária para o transporte das CC, e em relação as exigências de latência e a BER (*Bit Error Rate* – Taxa de Erro de Bits), os quais podem por ser muito demandantes em relação as capacidades dos tipos de enlaces usados para transporte, exigindo muitas vezes o uso de fibras ópticas (LU et al., 2014).

O uso da transmissão analógica de CC em IF no *fronthaul* de CRAs voltadas ao ambiente *indoor* entre as RRUs e RRHs também ocorre devido a perspectivas econômicas, uma vez que a gigantesca infraestrutura de enlaces metálicos legados fornecendo acesso ao

ambiente *indoor* deve ser preferencialmente reaproveitada (LU et al., 2014) tais enlaces são mais limitados em termos de largura de banda do que fibras ópticas, mas são capazes de transportar múltiplas CC usando sinais IF em forma analógica, uma vez que isto evita a expansão de largura de banda necessária na transmissão digital (Naqvi et al., 2017)(ACATAUASSU et al., 2018).

As CRAs suportando o ambiente *indoor* podem ter duas configurações quanto a sua rede de transporte: instalação totalmente *indoor* e *outdoor-indoor*, as quais são apresentadas pela Figura 5. A instalação *indoor* possui todos os seus equipamentos no ambiente *indoor*, exigindo um enlace de *backhaul* por edifício atendido. Enquanto na instalação *outdoor-indoor*, parte de seus equipamentos estão no ambiente *outdoor* em localidades como armários de rua.

Figura 5 – Configurações para CRA atendendo ambiente *indoor*.



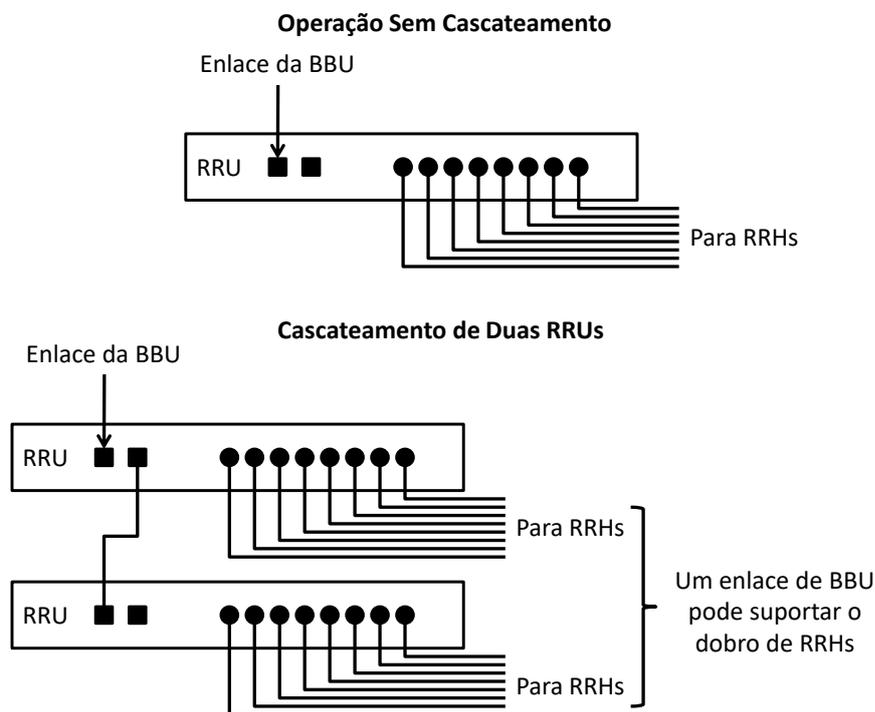
Fonte: elaborado pelo autor.

O número de RRHs suportadas por uma RRU é limitado, no entanto, de duas a quatro RRUs podem ser agrupadas para agir como uma única RRU, necessitando de apenas um enlace vindo da BBU. Tal abordagem garante elevado grau de escalabilidade para CRAs, uma vez que uma instalação pode inicialmente utilizar cascadeamento de múltiplas RRUs e ir separando-as conforme a demanda de tráfego aumenta, sem qualquer modificação nos enlaces metálicos e RRH existentes (VIEIRA, 2014). A Figura 6 apresenta um exemplo de cascadeamento de RRUs.

2.3 Outros Sistemas de *Small Cells* Voltados ao Ambiente *Indoor*

Historicamente DAS foi a primeira alternativa para fornecer acesso a rádio em ambientes *indoor*. DAS pode fornecer múltiplos serviços de comunicação móvel, melhorando a qualidade da chamada de voz e aumentando a taxa de transmissão de dados em ambientes *indoor*. Uma das maiores vantagens do DAS é o funcionamento dos múltiplos nós como uma única grande célula, o que facilita a coordenação e flexibilização de recursos, requerendo apenas um enlace *backhaul* para o sistema. Os grandes problemas do DAS

Figura 6 – Exemplo de cascadeamento de duas RRUs.



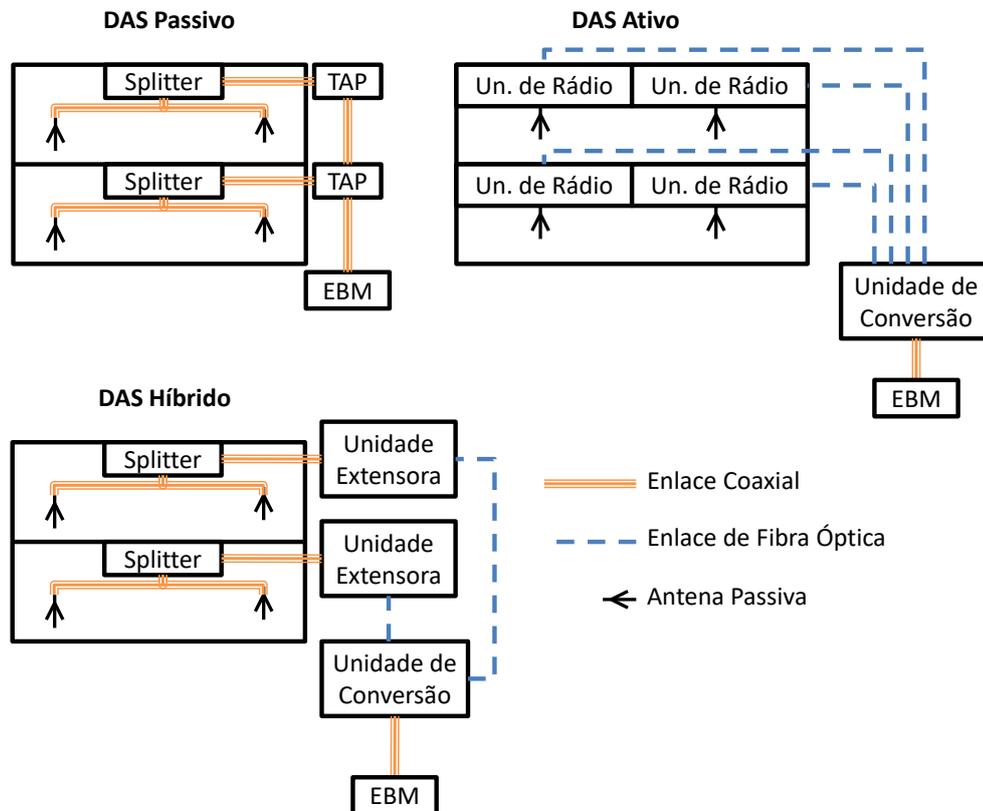
Fonte: elaborado pelo autor.

são o alto investimento de capital para criação da infraestrutura dedicada do sistema e o elevado grau de complexidade, uma vez que o sistema é na realidade uma macro célula (ZUBAIR, 2011).

A Figura 7 mostra as três configurações possíveis para um DAS: passiva, ativa ou híbrida. Na primeira, uma EBM (Estação Base Macro) instalada no edifício fornece os sinais RF a um conjunto de antenas por meio de uma rede coaxial usando componentes passivos. Na segunda, os sinais de RF que saem da estação EBM são convertidos para formato óptico por uma unidade de conversão, sendo distribuídos ativamente através de fibra óptica até unidades de rádio, que convertem o sinal em elétrico novamente para uso nas antenas. Na terceira, há um nível ativo formado por conexões de fibra óptica entre as unidades de conversão e as unidades extensoras, assim como um nível passivo após as últimas, o qual é formado por uma rede coaxial usando componentes passivos até as antenas (ZUBAIR, 2011).

A Figura 8 apresenta um sistema de acesso à rádio *indoor* baseado em *small cells* do tipo femto células, nesse sistema cada femto célula é um sistema *all-in-one* de pequeno porte, requerendo conexão *backhaul* própria. Dessa forma, geralmente o *backhaul* dessas células não é feito através de uma infraestrutura dedicada e sim por uma rede de acesso banda larga fixa, representada na ilustração por um acesso fixo de DLS (*Digital Line Subscriber* – Linha de Assinante Digital). A operação das células é familiar a realizada por

Figura 7 – Configurações possíveis para um DAS.

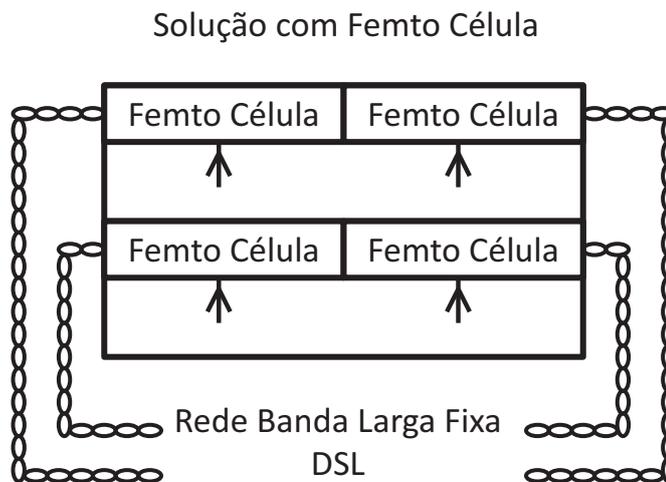


Fonte: elaborado pelo autor.

pontos de acesso WI-FI, sendo as principais diferenças a utilização de espectro licenciado para a transmissão de dados, o que garante melhores níveis de QoS (*Quality of Service* – Qualidade de Serviço), mas cria obrigação de vínculo entre o ponto de acesso sem fio e uma operadora; ausência do controle de acesso via *login* e senha; permissão do recebimento e realização de ligações telefônicas via rede celular; realização de *handover* quando necessário; e envio e recebimento de SMS (*Short Message Service* – Serviço de Mensagem de Texto). Entre as dificuldades para implantação de sistemas baseados em femto células pode-se citar a dificuldade de coordenação e flexibilização entre os pontos de acesso, o grande número de enlaces *backhaul* e a variabilidade dos níveis de QoS devido as incertezas no *backhaul*, o qual depende da capacidade da rede de acesso fixa de ambientes *indoor* que atendem outros serviços além do acesso móvel (VIEIRA, 2014).

2.4 Tecnologias para Agregação de Capacidade em Redes Móveis

No serviço de telecomunicação de dados móvel, o sinal de rádio é fornecido ao usuário por CCs (*Component Carriers* – Portadoras Componentes), as quais consistem em blocos de frequências no espectro, de forma que múltiplos usuários podem se conectar a uma mesma CC usando tecnologias como OFDMA (*Orthogonal Frequency Division*

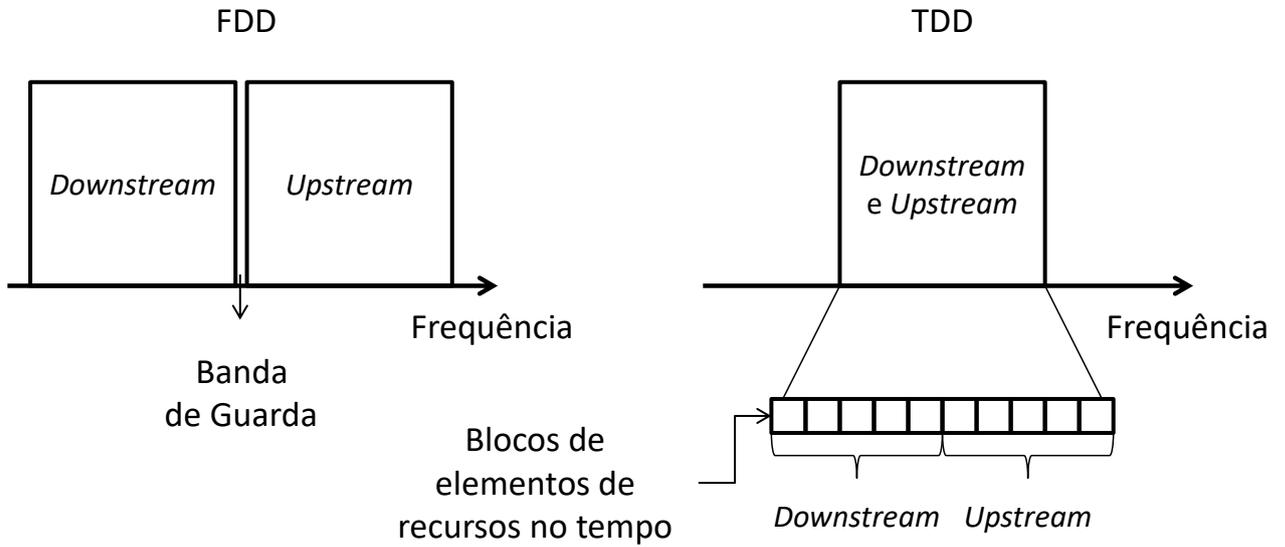
Figura 8 – Exemplo de sistema de acesso *indoor* baseado em femto células e DSL.

Fonte: elaborado pelo autor.

Multiple Access – Acesso Múltiplo por Divisão de Frequências Ortogonais), a qual modula a CC em múltiplas portadoras ortogonais, chamadas subportadoras, carregando elementos de recursos que podem ser distribuídos aos usuários no tempo e na frequência. Além disso, para que o sistema de telecomunicação suporte simultaneamente tanto o envio quanto recebimento de dados, respectivamente, *downstream* e *upstream*, pode-se utilizar FDD (*Frequency Division Duplexing* – Duplexação por Divisão na Frequência) ou TDD (*Time Division Duplexing* – Duplexação por Divisão no Tempo), como ilustrado na Figura 9. Onde nota-se que no caso de FDD duas CCs e uma banda de guarda são necessárias para transmissão simultânea, já no caso de TDD apenas uma CC é necessária para *downstream* e *upstream*, mas a divisão de recursos entre esses é feita no tempo (S.RATHI et al., 2014).

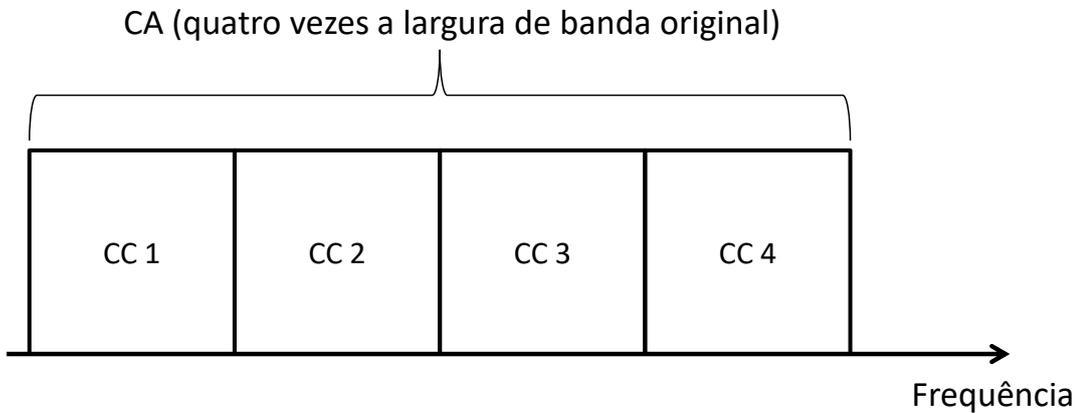
A forma mais simples de expandir a capacidade de tráfego é aumentar a largura de banda das CCs, uma vez que está é diretamente proporcional a máxima taxa de transmissão de dados segundo a lei da capacidade de Shannon. No entanto, ao mesmo tempo que aumentar a largura de banda é importante, também é necessário manter a compatibilidade com sistemas anteriores. Nesse contexto, a CA (*Carrier Aggregation* – Agregação de Portadora) é uma solução eficaz para o aumento efetivo da largura de banda. Nela várias CCs são transmitidas como uma única componente agregada, de forma que os usuários têm a possibilidade acessar várias componentes simultaneamente, dado que tentem se conectar com dispositivos capazes de acessar as múltiplas CCs na banda da CA. Além do aumento de capacidade, outra vantagem da CA é que caso o usuário utilize um dispositivo capaz de acessar apenas uma CC tente acessar a rede, ele conseguirá, mas apenas acessando uma das CC dentro da CA. A Figura 10 apresenta um exemplo de CA (3GPPP,).

Figura 9 – Exemplo de transmissão em *upstream* e *downstream* em FDD e TDD para CCs (*Component Carriers* – Portadoras Componentes).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 10 – Exemplo de CA (*Carrier Aggregation* – Agregação de Portadora) com quatro CCs (*Component Carriers* – Portadoras Componentes).



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma outra tecnologia que pode aumentar a taxa alcançada pelos usuários na rede é a utilização de MIMO (*Multiple Input Multiple Output* – Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas), o que pode ser feito empregando-se múltiplas antenas de transmissão e recepção, permitindo aos usuários variabilidade de fontes no acesso a dados e aumentando efetivamente a taxa de dados por um fator multiplicativo igual ao número de antenas empregado (FIORANI et al., 2014)(S.RATHI et al., 2014).

2.5 Meios para o Acesso Móvel

Essa subseção apresentará os três principais meios físicos para as redes de acesso móvel (cobre, fibra e micro-ondas) e as suas tecnologias e padrões.

2.5.1 Cabos Metálicos

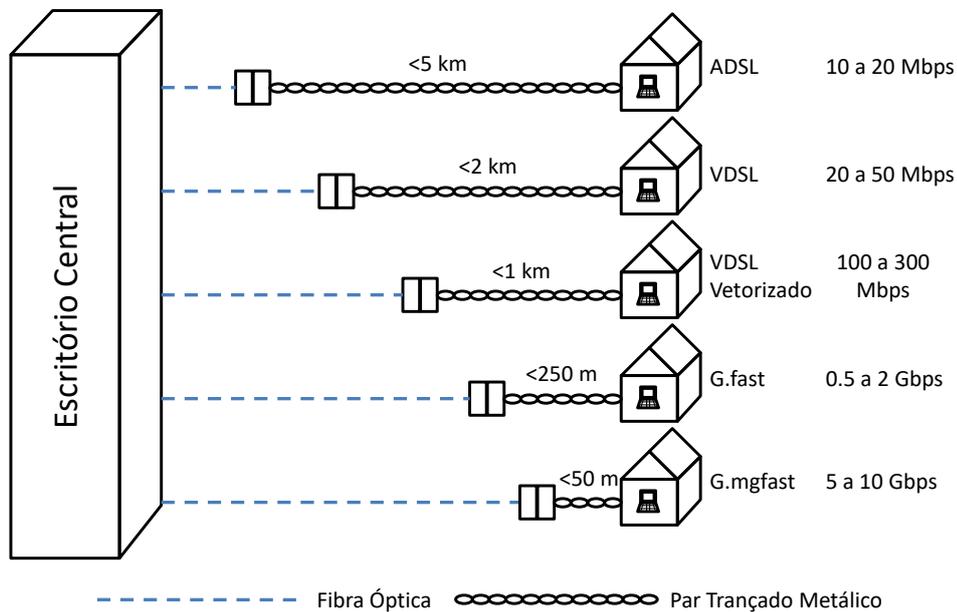
Nos últimos anos, se tornou claro que sistemas de transmissão baseados em cabos metálicos podem apresentar dificuldades no suprimento das demandas de tráfego futuras, devido à incapacidade de provisionamento de largura de banda para comprimentos maiores (na faixa de km), tanto em redes de acesso fixas quanto para o *backhaul* de redes de acesso móvel (YAGHOUBI et al., 2018). No entanto, a gigantesca infraestrutura já instalada pesa como fator para a continuação do uso de tal meio de transmissão, principalmente para comprimentos curtos (menores que 300 m), onde cabos de cobre podem atingir capacidades de transmissão na faixa de gigabits por segundo (CIOFFI, 2011)(MAES; NUZMAN, 2015).

As principais malhas de acesso à banda larga baseadas em cabos metálicos são aquelas utilizando cabos par trançado sobre DSL e cabo coaxial sobre DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification* – Especificação de Interface de Serviço de Dados por Cabo) (ODLING et al., 2009). De forma que ambas podem ser consideradas redes híbridas de fibra e cobre, onde os cabos de cobre estão localizados na ponta da rede, próximos aos usuários.

O DSL é uma tecnologia para transmissão eletrônica de dados, a qual é tipicamente usada em linhas telefônicas compostas por cabos com pares de fios metálicos trançados. A tecnologia conta com forte presença de mercado desde 1980, sendo uma das principais responsáveis pela democratização do acesso a serviços de dados banda larga nas últimas décadas (CIOFFI, 2011). O DSL baseia-se em um cenário híbrido óptico e metálico usando uma arquitetura com FTTdp (*Fiber to the Distribution Point* – Fibra até o Ponto de Distribuição), como mostrada na Figura 11, a qual também apresenta a evolução da arquitetura a cada geração DSL. Desde sua concepção a tecnologia já passou por quatro gerações e atualmente, a quinta está em processo de padronização, de forma que a cada nova geração o comprimento dos enlaces metálicos vem reduzindo com objetivo de garantir maior largura de banda e conseqüentemente maiores taxas de transmissão (BORGES, 2016)(MAES; NUZMAN, 2015)(CLOONAN et al.,).

A quarta geração DSL é representada pelo padrão G.fast, esse usa TDD para transmitir simultaneamente no *upstream* e *downstream*, podendo atender comprimentos metálicos de até 250 metros em perfis de largura de banda com faixas entre 2,2MHz e 212MHz, alcançando taxas superiores a 2 Gbps (ITU-T, 2014). Devido às elevadas frequências de transmissão, a mitigação de interferência eletromagnética entre os canais

Figura 11 – Arquitetura FTTdp do DSL e a representação da evolução da tecnologia DSL a cada geração.



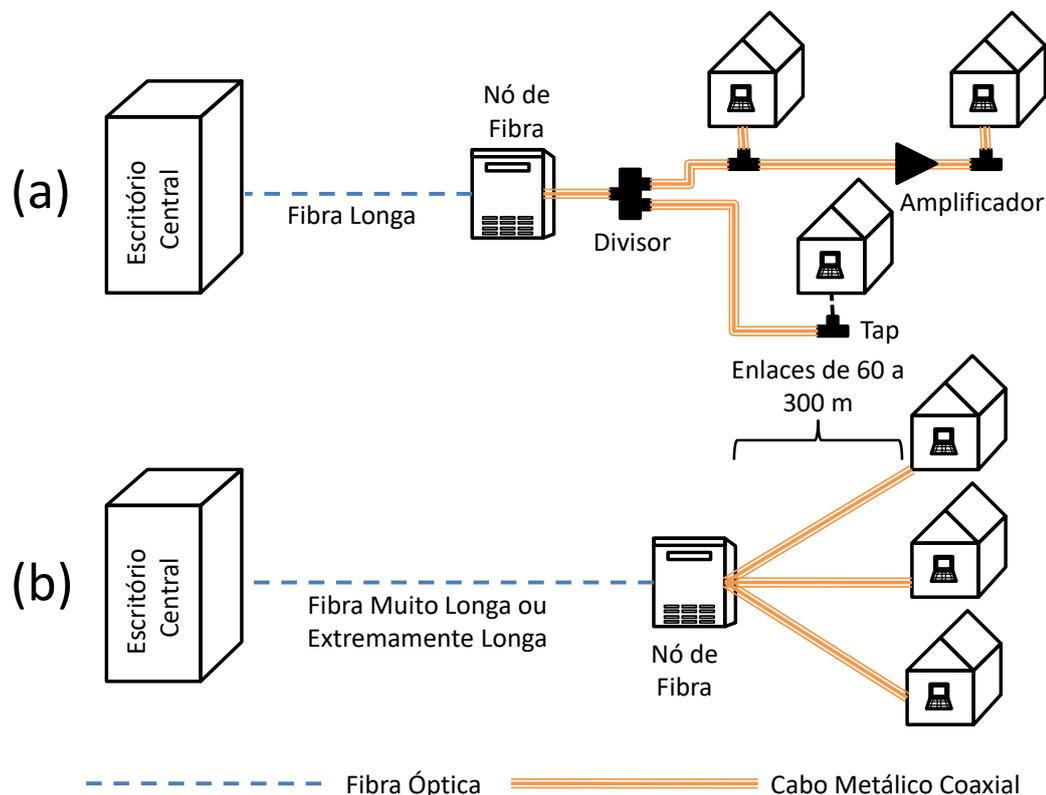
Fonte: elaborado pelo autor.

diferenciais se tornam fundamentais. O uso de TDD elimina efeitos de NEXT (*Near-end Crosstalk* – Diafonia de Fim Próximo), interferência entre dois canais na mesma ponta de um cabo. Para o caso de FEXT (*Far-end Crosstalk* – Diafonia de Fim Distante), interferência entre dois canais considerando as pontas opostas de um cabo, técnicas de mitigação de ruído como *vectoring* se fazem necessárias, sendo recomendado a equipamentos G.fast suporte nativo a tais técnicas (ZAFARUDDIN; BERGEL I. AND. LESHEM, 2017). A futura quinta geração DSL tem sido referenciada como G.(mg)fast e deve ser uma evolução que complementa a tecnologia G.fast, a partir da exploração de bandas entre 424 MHz e 848 MHz, assim possibilitando o alcance de taxas de até 10 Gbps (GFAST... , 2017).

O DOCSIS é um padrão de transmissão tipicamente usado em redes HFC (*Hybrid Fiber Coaxial* – Híbridas de Fibra e Coaxial). A arquitetura tradicional de redes HFC é apresentada na Figura 12 (a), onde nota-se que a rede metálica possui configuração em árvore, fazendo o uso de amplificadores para recuperação de perdas no cabo e *taps* para a derivação ao usuário. O DOCSIS 3.0 foi a última versão do padrão desenvolvido com o intuito de atender a arquitetura descrita na Figura 12 (a), sendo capaz de atingir taxas de 1,2 Gbps no *downstream* e 100 Mbps no *upstream* (MEHMOOD; RAHMAN; CIOFFI, 2015). Com o aumento das demandas de transmissão, a busca pelo atendimento com cada vez mais taxas de dados acarretou na migração para maiores constelações de transmissão (mais bits por símbolo transmitido), e na busca de suporte a tais demandas, para

isso, foi introduzido a utilização de amplificadores e derivações, resultando na arquitetura mostrada pela Figura 12 (b), a qual tem cabos metálicos mais próximos aos usuários em enlaces ponto a ponto, sendo suportada pelo padrão DOCSIS 3.1 e capaz de transmitir 10 Gbps tanto no *downstream* quanto no *upstream* (HAMZEH et al., 2015)(CLOONAN et al.,)(CABLELABS, 2017).

Figura 12 – Arquitetura de redes HFC, (a) tradicional e (b) variação ponto a ponto para garantia de largura de banda.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.5.1.1 Desenvolvimentos para Cabos Metálicos no *Fronthaul*

Cabos coaxiais e aqueles voltados para redes de acesso local (Cat5e, Cat6, Cat7) podem suportar, respectivamente, larguras de banda de até 10 GHz e 1 GHz para curtos comprimentos (CABLELABS, 2017)(Naqvi et al., 2017). Dessa forma, cabos metálicos podem suportar um considerável número de portadoras componentes transmitidas de forma analógica em frequências intermediárias, principalmente em cenários *fronthaul indoor*. Tal tecnologia é conhecida como RoC (Radio over Copper – Rádio sobre Cobre) e tem sido estudada como alternativa custo-eficiente para a melhoria do serviço de rádio em ambientes *indoors*(ACATAUASSU et al., 2018)(TONINI et al., 2017)

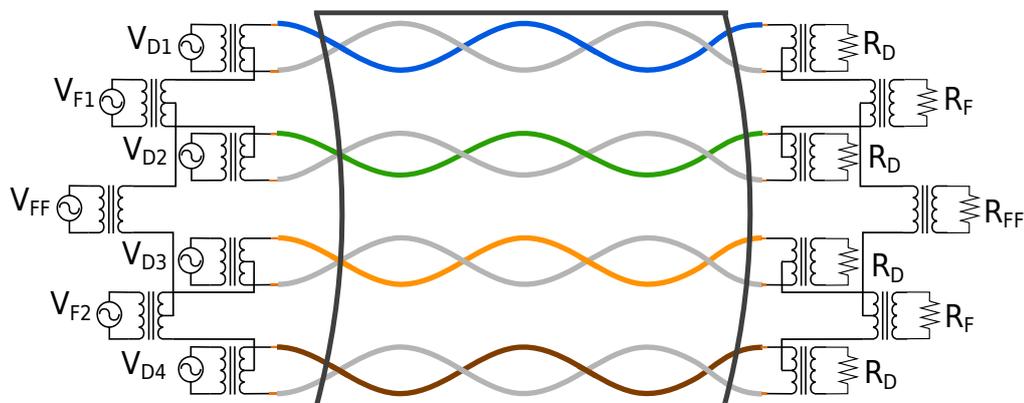
Um *fronthaul indoor* baseado em cabos Cat5e, Cat6 ou Cat7 tende a ser particularmente uma solução técnica-econômica atraente. As principais razões para tal fato

são o amplo suporte da comunidade de TI (Tecnologia da Informação) e a gigantesca quantidade de cabos instalados em muitos escritórios, empresas e residências. Além disso, é importante ressaltar que a instalação de tais cabos é simples e não requer treinamento ou ferramentas avançadas. Por fim, a última vantagem é a utilização de toda a arcação existente para tais cabos em redes de acesso local, incluindo técnicas de manutenção, como tecnologias para localização e diagnóstico de falhas (LU et al., 2014).

A atratividade de um *fronthaul* baseado em cabos Cat5e, Cat6 ou Cat7 e a ascensão de padrões DSL com nativo suporte a mitigação de ruído podem possibilitar a utilização de uma solução baseada no modo de transmissão fantasma, o qual é uma técnica que adiciona canais diferenciais virtuais através de sinalização em modo comum, aumentando o número de canais disponíveis em um cabo sem a necessidade adicional de outros pares trançados. Quando aliado a mitigação de ruído, o modo fantasma pode aumentar consideravelmente a taxa agregada de transmissão de um sistema (VIEIRA, 2014).

Por exemplo, os canais fantasmas gerados a partir de dois pares são denominados de fantasmas de 1ª camada. Quando apenas a 1ª camada é transmitida simultaneamente com os canais diferenciais em cabos de quatro pares (como Cat5e, Cat6 ou Cat7) são obtidos um total de 6 canais, quatro diferenciais e dois fantasmas. Uma forma de implementar o modo fantasma explorando todo o seu potencial para cabos de quatro pares pode ser vista na Figura 13, onde a partir de um sistema que possui dois canais fantasmas de 1ª camada, um canal fantasma adicional de 2ª camada é obtido. Esse novo canal se propaga nos *taps* centrais dos transformadores dos canais fantasmas de 1ª camada. Nesse caso, o sistema gera um total de sete canais, no qual quatro são diferenciais, dois são fantasmas de 1ª camada e um é fantasma de 2ª camada (SOUZA et al., 2018).

Figura 13 – Configuração sob um cabo metálico de quatro pares: modo de transmissão dos canais diferenciais (V_D), fantasma de 1ª camada (V_F) e de 2ª camada (V_{FF}).



Fonte: (SOUZA et al., 2018)

2.5.2 Fibra Óptica

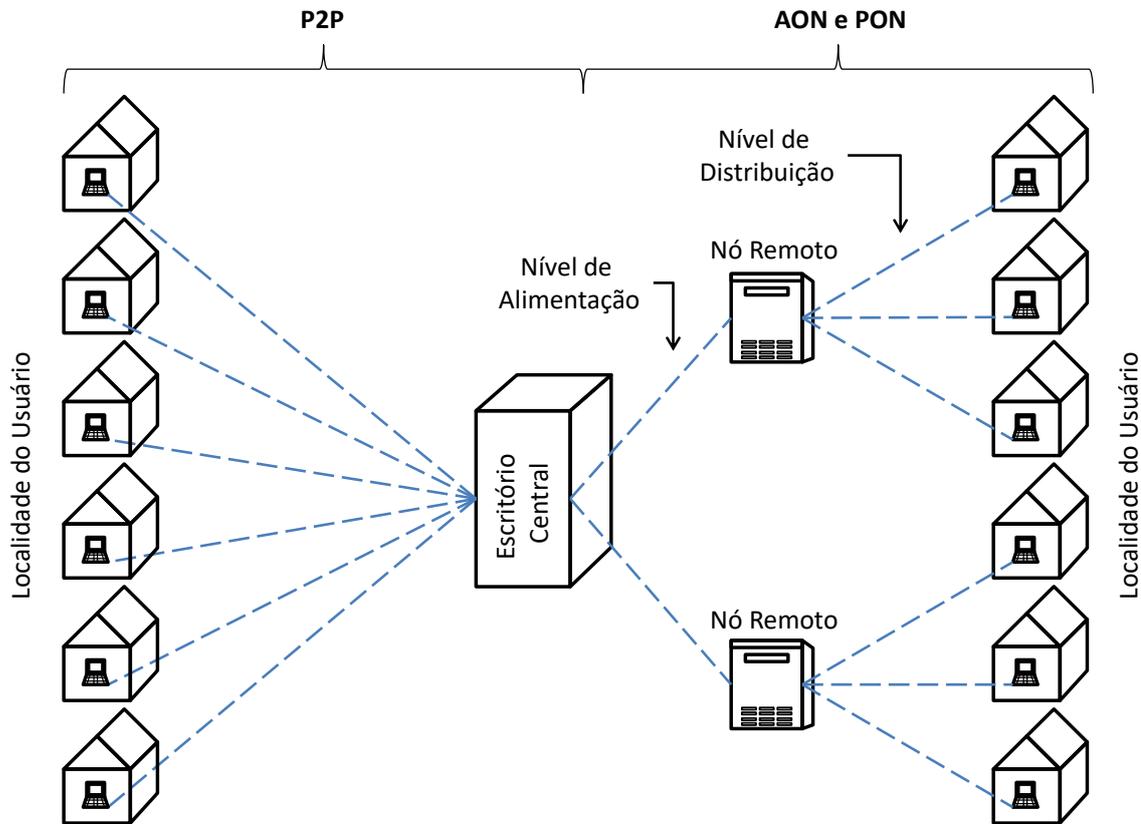
Cerca de 80% do tráfego de dados do mundo passa por fibras ópticas, estando elas presentes nos mais diversos tipos de rede, seja *backbone*, metropolitanas, longo alcance ou de acesso (HECHT, 1999). Fibras ópticas possuem capacidade virtualmente ilimitada, a qual depende praticamente apenas dos equipamentos de transmissão e recepção, oferecendo melhor suporte de longo prazo em relação à crescente demanda por capacidade de tráfego. No entanto, a instalação de sistemas baseados em tal meio pode ser custosa em termos de instalação, principalmente para o uso redes de acesso (KUROSE; ROSS, 2012)(AGRAWAL, 2012)(MACHUCA et al., 2011).

Uma rede de acesso óptico pode conter três tipos básicos de equipamentos. O primeiro é o OLT (*Optical Line Terminal* – Terminal de Linha Óptica), responsável pela conexão do *backbone* da operadora (seja elétrica ou óptica) e pelo fornecimento de sinal óptico para a rede de acesso. O segundo é a ONU (*Optical Network Unit* – Unidade de Rede Óptica), responsável pela conversão do sinal óptico vindo da rede de acesso em elétrico para utilização dos usuários e vice-versa. O terceiro é o divisor de sinal, o qual pode replicar um sinal de entrada para um conjunto de saídas ou agir como multiplexador e demultiplexador no tempo ou frequência, podendo consumir energia elétrica para esse fim (divisor ativo) ou não (divisor passivo) (FARIAS, 2016)(MACHUCA et al., 2011).

As principais soluções para redes de acesso baseadas em fibras ópticas são rede P2P (*Point-to-Point* – Ponto a Ponto), AON (*Active Optical Network* – Rede Óptica Ativa) e PON (*Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva) (MACHUCA et al., 2011). A Figura 14 apresenta a topologia das três soluções. Na solução P2P, pares de OLTs (no CO) e ONUs (na localidade do usuário) estão conectados por enlaces dedicados. Nas soluções AON e PON um divisor de sinal (localizado em um nó remoto) é adicionado (divisor ativo para AON e passivo para PON), dividindo a rede em dois níveis de conexão. O primeiro é o nível de alimentação, formado pelas conexões entre os OLTs e os divisores, de forma que as fibras são compartilhadas por vários usuários. O segundo é o nível de distribuição, formado pelas conexões dedicadas de fibra entre os divisores de sinal e as ONUs. Dessa forma, o nó remoto e as fibras do nível de alimentação são compartilhados por diversos usuários, resultando em um menor número de equipamentos e menor comprimento de fibra em relação a rede P2P (KUROSE; ROSS, 2012)(AGRAWAL, 2012).

PON é de longe a solução óptica para rede de acesso mais amplamente implantada, devido aos menores custos de instalação e operação em relação à AON, ambos advindos do uso de componentes passivos na rede, resultando em menor consumo energético e dispensando um sistema de alimentação reserva baseado em baterias em nós remotos. Nesse contexto, padrões voltados a PONs têm surgido e evoluído, como por exemplo: GPON (*Gigabit Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva Gigabit), EPON (*Ethernet Passive Optical Network* – Rede Óptica Passiva Ethernet) e WDM-PON (*Wavelength*

Figura 14 – Topologia de redes de acesso baseadas em fibra.



Fonte: elaborado pelo autor.

Division Multiplexing Passive Optical Network – Rede Óptica Passiva de Multiplexação por Divisão na Frequência) (KUROSE; ROSS, 2012)(Effenberger et al., 2007).

A GPON é padronizada pelo ITU-T e usa dois comprimentos de onda para transmitir simultaneamente no *upstream* e *downstream*, adotando método próprio para encapsular variados protocolos de transporte, como *Ethernet* ou TDM (ITU-T, 2008)(ITU-T, 2016)(ITU-T, 2013). A EPON é especificada pelo IEEE, também usando dois comprimentos de onda para transmitir simultaneamente no *upstream* e *downstream*, mas utilizando exclusivamente o protocolo *Ethernet* para tráfego dados (IEEE, 2004)(IEEE, 2009). A WDM-PON usa vários comprimentos de onda para *upstream* e *downstream*, como resultado cada ONU opera em um comprimento de onda dedicado, não ocorrendo compartilhamento da capacidade, implementações mais avançadas podem até separar serviços direcionados a uma mesma ONU em mais comprimentos de onda para o melhor uso de largura de banda em cada serviço (Effenberger et al., 2007).

O maior problema do uso de redes de acesso óptico é o possível alto custo de instalação, principalmente em regiões urbanas, fator esse que contribui para a continuação do uso de cabos metálicos no acesso (MAES; NUZMAN, 2015). No entanto é notável que a cada nova geração de sistemas DSL ou DOCSIS a penetração de fibra torna-se cada

vez maior, de forma que a evolução desses sistemas está na verdade pavimentando a futura implantação de acesso totalmente óptica por meio do uso de infraestrutura legada (CLOONAN et al.,).

2.5.2.1 Desenvolvimentos para Fibra Óptica no *Fronthaul*

Uma tecnologia bem estabelecida nos últimos anos é a integração de fibras ópticas a sistemas de transporte de portadoras componentes para acesso sem fio, conhecida como RoF, de forma que os sinais de RF são transmitidos através da fibra óptica por duas alternativas de modulação: analógica ou digital (MAIER, 2008). A primeira transportando diretamente as portadoras componentes, seja na frequência do sistema ou sob uma intermediária (APOSTOLOPOULOS et al., 2018). O problema dessa abordagem é a susceptibilidade à ruído e distorções não lineares, principalmente em longas distâncias. A segunda alternativa, amostra e quantifica as formas de onda contínuas das portadoras componentes, apresentando alta tolerância a ruído e distorções não lineares ao custo de uma baixa eficiência espectral (OLIVA et al., 2016)(WANG et al., 2017).

Sistemas D-RAN comercialmente disponíveis utilizam em sua maioria RoF com modulação digital para conectar as BBUs as RUs, usando protocolos como CPRI (o mais popular), OBSAI e ETSI-ORI para tal fim (CHECKO, 2015)(OLIVA et al., 2016). A baixa eficiência espectral de tais sistemas não é geralmente um problema para as demandas de tráfego do 3G ou 4G devido a existência de transceptores ópticos com capacidades de dezenas de gigabits. No entanto, as demandas previstas para o 5G podem apenas ser atendidas com viabilidade econômica custo eficientes por meio do aumento da eficiência espectral (ALTERA, 2016). Uma das soluções para o problema é a compressão digital, onde um algoritmo comprime o sinal na transmissão e o recupera na recepção, buscando obter uma baixíssima relação de erro entre o que foi transmitido e recebido. Outra solução é a utilização de outras modulações digitais, como a delta-sigma apresentada em (WANG et al., 2017), que garante transmissão de portadoras componentes em modulações superiores com melhor eficiência espectral sem os extremos requisitos da taxa de erros de bit de protocolos como CPRI.

Para C-RAN, o uso de fibras ópticas e conseqüentemente de RoF no *fronthaul* é definitivamente a solução que pode prover melhor capacidade de transporte, principalmente a longas distâncias, mesmo que a eliminação de efeitos não lineares e melhora da eficiência espectral sejam necessárias, respectivamente, para os casos analógico e digital (CHECKO, 2015).

2.5.3 Micro-ondas

A transmissão em micro-ondas possibilita taxas de dados na faixa de gigabits por segundo em longas distâncias (dezenas de km) com um baixo custo de instalação,

uma vez que a onda portadora eletromagnética é transmitida diretamente pelo ar, sendo necessários apenas transmissores, repetidores e receptores. As principais desvantagens da transmissão de dados por micro-ondas incluem: elevadas perdas na transmissão em altas frequências (necessárias para maiores taxas de transmissão), a necessidade de linha de visada para as conexões, a susceptibilidade do sistema a interferência climática e a necessidade de aluguel ou aquisição de espectro para a operação do sistema, o que pode ser um problema devido ao grande número de tecnologias e operadoras que já fazem uso do espectro (RAPPAPORT, 2002)(CERAGON, 2009).

A transmissão micro-ondas é o tipo de *backhaul* mais difundido em regiões urbanas e rurais, o que se deve a instalação simples, rápida e barata. No entanto, a operação pode ser cara devido aos custos com energia elétrica e espectro, nem sempre alcançando a melhor relação custo-eficiência (CERAGON, 2009).

Redes de acesso baseadas em micro-ondas podem ser divididas em duas categorias, ambas apresentadas na Figura 15. A primeira é a P2P, onde um ponto de agregação (nó de *Hub*) concentra vários transceptores estando ligado ao *backbone* da operadora, os pontos de acesso final possuem um transceptor, o qual está conectado a um transceptor no nó *Hub* de forma dedicada (na faixa de frequência entre 2 e 30 GHz). A segunda é a PMP (*Point Multipoint* – Ponto a Multiponto), onde os transceptores no nó *Hub* podem se conectar a mais de um ponto de acesso final, necessitando menos equipamentos de rádio e ligações de micro-ondas dedicadas. Por fim, para ambas as categorias, se a transmissão for muito distante, repetidores podem ser usados.

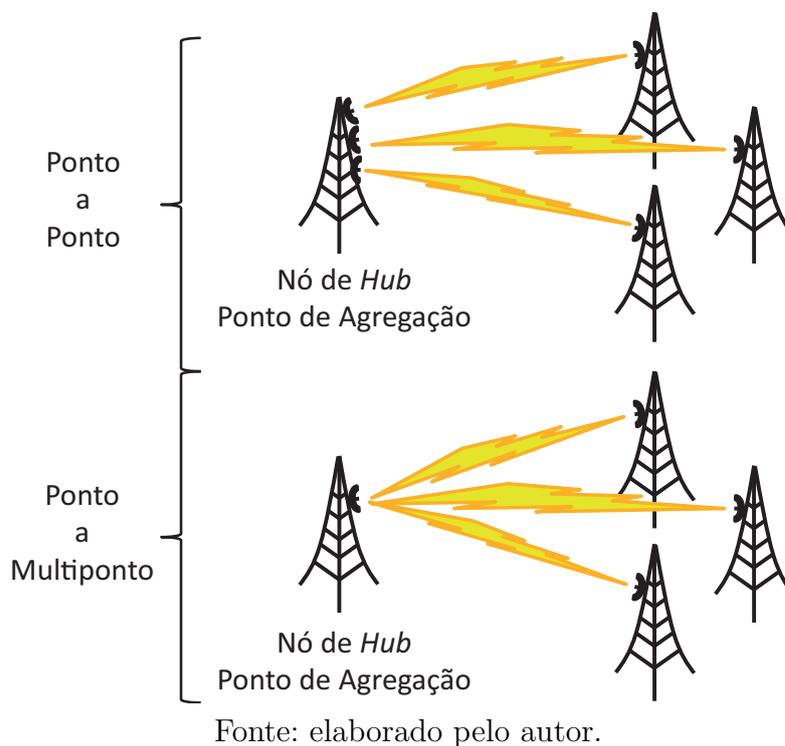
2.5.3.1 Desenvolvimentos para Micro-ondas no *Fronthaul*

Fronthaul sem fio é um desenvolvimento recente na tecnologia de transmissão por micro-ondas. Em geral a transmissão de protocolos como CPRI é muito exigente em termos de requisitos de capacidade, sendo difícil a transferência de dados por ligações micro-ondas, as quais são restringidas em termos de espectro e/ou distância. Nesse contexto, apenas recentemente alguns fornecedores têm provado a possibilidade de *fronthaul* baseado em micro-ondas (MAVRAKIS, 2015).

Apesar de ser um desenvolvimento recente no *fronthaul*, micro-ondas têm grande representatividade em redes *backhaul*, de forma que 56% dos operadores têm expectativas de que a aplicação da tecnologia junto a fibras ópticas seja a melhor alternativa para o *fronthaul* móvel (MAVRAKIS, 2015).

Atualmente, já existem soluções proprietárias capazes de fornecer *fronthaul* baseado em micro-ondas, de forma que produtos comerciais operando na faixa de ondas milimétricas mostraram ser capazes de transmitir 2,5 Gbps sobre protocolo CPRI usando uma largura de banda de 500 MHz. Além disso, novas tecnologias como o sistema *fronthlink* da empresa Eblink podem transmitir 7,5 Gbps sobre protocolo CPRI usando uma

Figura 15 – Topologia de redes de acesso baseadas em micro-ondas.



largura de banda de apenas 70 MHz, podendo operar sobre espectro licenciado ou ondas milimétricas. Dessa forma, micro-ondas pode se aproximar das capacidades da fibra óptica (dezenas de Gbps sobre protocolo CPRI) para *fronthaul* digital (MAVRAKIS, 2015).

2.6 Proteção em Redes de Acesso

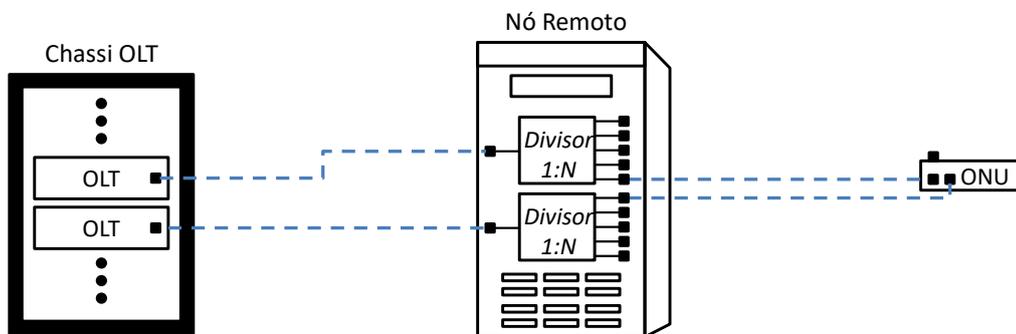
Os usuários ligados às redes de acesso possuem diferentes perfis, podendo possuir diferentes demandas em termos de capacidade e disponibilidade, as quais são expressas no SLA (*Service Level Agreement* – Acordo do Nível de Serviço), que é um contrato entre as operadoras e os usuários (MACHUCA; CHEN; WOSINSKA, 2012). Tal fato incentiva a implantação de sistemas de proteção que garantam continuidade de serviço no caso de falhas de componentes na rede, especialmente para clientes mais demandantes e consequentemente com SLAs mais exigentes. Outra vantagem do uso de esquemas de proteção é o aumento do nível de satisfação do cliente, mesmo aqueles sem um SLA exigente, o que pode ser um diferencial no concorrido mercado de telecomunicações (DIXIT et al., 2014)(FERNANDEZ; STOL, 2015).

De forma geral a maioria dos esquemas de proteção recai sobre quatro categorias: duplicação total, duplicação seletiva, sobrecarga temporária e sistema paralelo. Este trabalho apresentará as quatro categorias usando como exemplo uma rede de acesso baseada na tecnologia PON, no entanto, os conceitos gerais podem ser aplicados a diferentes

tecnologias e meios de transmissão.

A duplicação total atende os usuários com duas malhas de rede, uma primária e outra de reserva. No caso de falhas na malha primária o serviço é continuado pelo sistema reserva. A vantagem de tal abordagem é que o provisionamento de recursos no sistema de reserva é idêntico ao do primário. A desvantagem da duplicação total são os altos custos referentes a duplicação da rede, o que talvez possibilite tal categoria de proteção apenas para clientes selecionados (WOSINSKA et al., 2009). A Figura 16 apresenta uma duplicação total aplicada a PONs, onde a ONU possui duas entradas, uma para o sistema primário e outra para o de reserva.

Figura 16 – Exemplo de duplicação total para PONs.

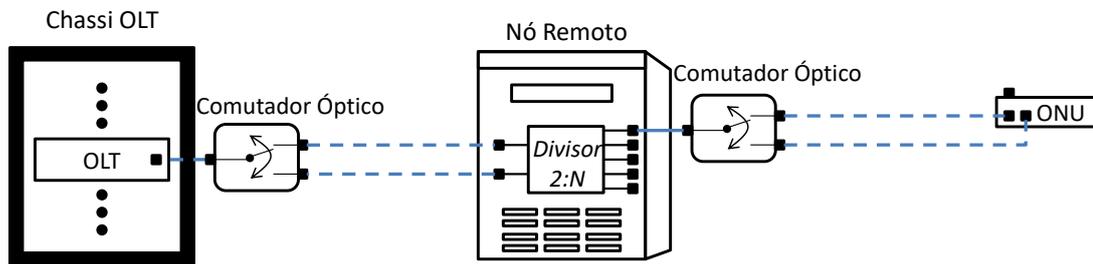


Fonte: elaborado pelo autor.

A duplicação seletiva não duplica a malha de rede totalmente, apenas alguns componentes dela, buscando geralmente focar naqueles mais problemáticos em termos de indisponibilidade. Tal abordagem garante menores custos que a duplicação total e garante provisionamento de recursos idênticos para o caso de acionamento do sistema de proteção. No entanto, os custos da duplicação seletiva ainda podem ser proibitivos dependendo do número e dos tipos de equipamentos duplicados (FERNANDEZ; STOL, 2015). A Figura 17 apresenta dois tipos de duplicação seletiva aplicada a PONs. Na primeira, apenas a duplicação da fibra de alimentação (que suporta múltiplos usuários) ocorre. Na segunda a duplicação ocorre nas fibras de alimentação e distribuição (que suportam apenas um usuário). Em ambos os casos a duplicação é possibilitada por meio do uso de comutadores ópticos.

A sobrecarga temporária tem origem no fato de que algumas vezes equipamentos em redes de acesso tem margem para suportar mais usuários ao preço de um possível menor nível de serviço. Nesse caso, pares de equipamentos são ligados de forma cruzada, não ocorrendo duplicação, no caso de uma falha num dos componentes do par o componente remanescente assume a carga total de usuários do par. A vantagem de tal abordagem é ausência de duplicação, assim barateando a instalação da proteção. A desvantagem da sobrecarga temporária é que o equipamento selecionado para proteção deve ter margem para

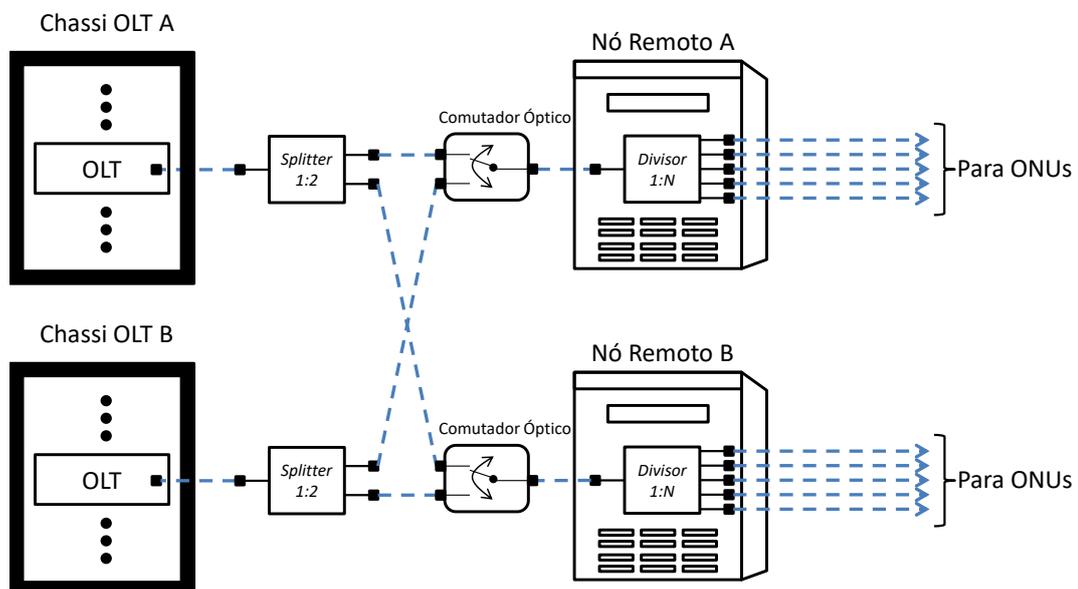
Figura 17 – Exemplo de duplicação seletiva para PONs: enlaces de alimentação e distribuição.



Fonte: elaborado pelo autor.

fornecer nível de serviço minimamente aceitável (atendendo o SLA acordado) (FERNANDEZ; STOL, 2015). A Figura 18 apresenta um exemplo de sobrecarga temporária para PONs, onde OLTs são ligadas de forma cruzada usando comutadores ópticos e divisores de sinal passivos.

Figura 18 – Exemplo de proteção por sobrecarga temporária: interconexão cruzada de OLTs.

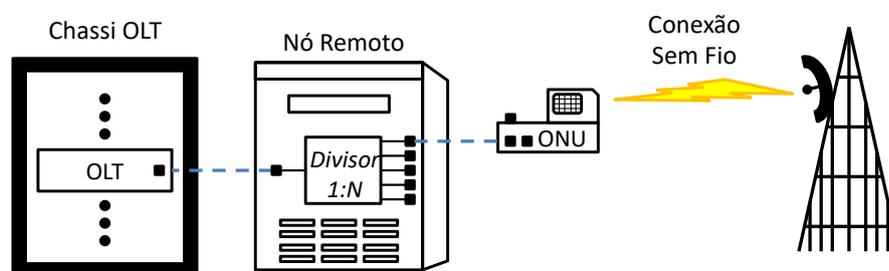


Fonte: elaborado pelo autor.

A proteção com sistema paralelo é similar à duplicação total em termos de que há duas malhas de rede suportando os usuários, no entanto, as duas malhas podem ser sistemas totalmente distintos com diferentes finalidades. A vantagem de tal abordagem é aproveitar a infraestrutura já existente para proteção e possivelmente permitir contratos de aluguel de capacidade para proteção entre operadores. A desvantagem do uso de um sistema paralelo é o fato de que as capacidades do sistema podem ser distintas por vários níveis (FARIAS, 2016)(FERNANDES, 2018). A Figura 19 apresenta um exemplo de uma

PON protegida por uma rede móvel, nesse sistema a ONU pode ser conectar tanto a rede móvel quanto a rede óptica de acesso.

Figura 19 – Exemplo de proteção por sistema paralelo: PON protegida por rede móvel externa.



Fonte: elaborado pelo autor.

3 Modelos para Dimensionamento de Avaliação de Redes

Esse capítulo apresenta em quatro seções os modelos matemáticos e os métodos utilizados e desenvolvidos para avaliação econômica de redes de acesso móveis em termos de sua disponibilidade. A primeira apresenta as considerações de modelagem de tráfego adotadas para previsão da demanda de dados e para a máxima fornecida (*throughput*) pelas CRAs abordadas neste trabalho. A segunda descreve o modelo de dimensionamento, o qual constrói o cenário a ser adotado com todas as suas distâncias e equipamentos, definindo também a inter-dependência de equipamentos. A terceira descreve o processo de simulação para a determinação das métricas de disponibilidade da rede, detalha o modelo Markoviano considerado e o simulador utilizado. A última apresenta os modelos para o cálculo do TCO (*Total Cost of Ownership* – Custo Total de Propriedade da Rede), considerando tanto CAPEX (*Capital Expenditure* – Custos de Instalação) quanto OPEX (*Operational Expenditure* – Custos de Operação).

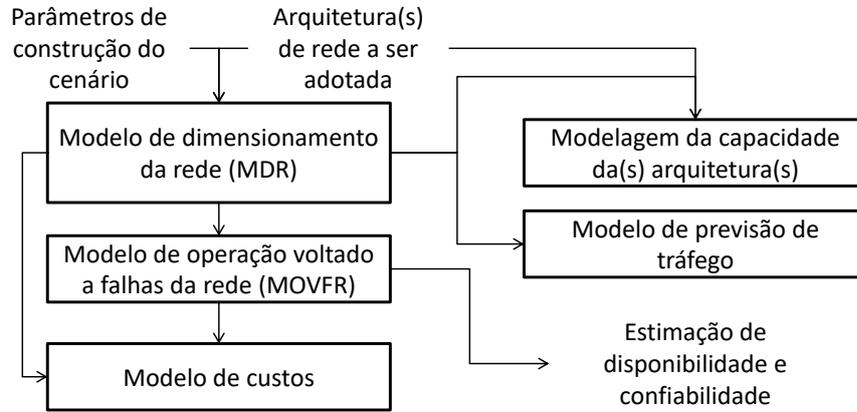
3.1 Visão Geral da Metodologia e Modelos para Avaliação de Viabilidade de Redes

Este trabalho busca realizar uma avaliação de viabilidade técnica-econômica para redes, a Figura 20 apresenta a visão geral do funcionamento do conjunto de modelos utilizados para esse fim. As entradas são as arquiteturas a serem analisadas e os parâmetros construção do cenário, como densidade populacional, área de análise e penetração de dispositivos móveis. Estas entradas são usadas para alimentar um modelo de dimensionamento, que cria o cenário e alimenta os modelos de previsão de tráfego, operação voltado a falha, custos, e capacidade das arquiteturas analisadas, de forma que esses quatro são usados para determinar a viabilidade das arquiteturas de rede analisadas.

3.2 Modelagem de Tráfego

A demanda de tráfego e o *throughput* de uma rede são importantes parâmetros na determinação da viabilidade técnica da implementação desta. No caso de CRAs o cálculo do *throughput* depende de fatores como banda da portadora de rádio, modulação e das capacidades dos enlaces existentes, seja entre as BBU e RRU ou entre as RRH e RRU.

Figura 20 – Visão geral dos modelos usados para avaliar a viabilidade técnica-econômica para redes.



Fonte: elaborado pelo autor.

Nesse contexto, este trabalho utilizou um modelo de referência para realizar previsão de tráfego e o desenvolveu um modelo para cálculo da taxa de dados máxima fornecida por CRAs.

3.2.1 Previsão de Tráfego

Nos últimos anos a previsão do comportamento diário da demanda de tráfego em redes móveis foi objeto de estudo no projeto EARTH (*Energy Aware Radio and Network Technologies - Tecnologias de Rádio e Rede com Consciência Energética*), o qual foi financiado pela união europeia e teve como objetivo identificar e propor tecnologias e metodologias para a melhora da eficiência energética de sistemas banda larga móveis (EARTH, 2010). A partir do modelo proposto pelo EARTH a demanda de tráfego por área na hora t ($R(t)$) pode ser obtida por meio das Equações 3.1 e 3.2.

$$R(t) = \frac{\rho}{N_{op}} \times \alpha(t) \times \sum_k (r_k \times s_k) \quad (3.1)$$

$$r_k = p \times r_k^{Pesado} + (1 - p) \times r_k^{Comum} \quad (3.2)$$

onde ρ , $\alpha(t)$ e N_{op} representam, respectivamente, a densidade populacional, a porcentagens de usuários ativos na hora t e o número de operadoras na área. O índice k indica o tipo de terminal (*laptop*, *tablet*, *smartphone* ou outros), de forma que r_k e s_k representam, respectivamente, a taxa média de dados e a porcentagem dos usuários usando cada k . Por fim, r_k^{Pesado} , r_k^{Comum} e p representam, respectivamente, a demanda de dados dos usuários pesados usando o terminal k , a demanda de dados dos usuários comuns usando o terminal k e a porcentagem de usuários pesados.

Estimativas para datas futuras de cada parâmetro das Equações 3.1 e 3.2 podem fornecer uma previsão de tráfego no pico de uso da rede com o passar dos anos.

3.2.2 Cálculo da Taxa de Dados Alcançável em CRAs

A máxima taxa de dados teórico de um canal ruidoso em bits por segundo (T_{Max}^{Canal}) é representado pela lei da capacidade de Shannon, mostrada na Equação 3.3.

$$T_{Max}^{Canal} = B \times \log_2(1 + \text{SNR}_{Canal}) \quad (3.3)$$

onde B é a largura de banda em unidade de frequência e SNR_{Canal} é a relação sinal ruído do canal. O logaritmo na Equação 3.3 é indicativo da máxima modulação possível em bits/Hz, a qual é mais elevada para canais menos ruidosos, a qual é geralmente limitada a um valor em sistemas reais independentemente do ruído no canal.

A taxa máxima fornecida por uma componente portadora de rádio (T_{Port}) é dada pela Equação 3.4:

$$T_{port} = (B_{Port} - 2 \times B_{Guarda}^{Lateral}) \times N_{Mod} \quad (3.4)$$

onde B_{Port} , $B_{Guarda}^{Lateral}$ e N_{Mod} representam, respectivamente, a largura de banda da componente da portadora, a banda de guarda lateral das componentes portadoras e o nível de modulação do sistema em bits/Hz, o qual está relacionado ao termo logarítmico da Equação 3.3. A taxa fornecida aos usuários de uma CRA pela sua rede de transporte é dada pelo número de componentes portadoras transmitidas nos enlaces, o qual será diferente para transporte digital e analógico.

A taxa fornecida ao usuário pela transmissão de portadoras digital na CRA para uma configuração FDD ($T_{CRA}^{Digital}$) é dada pela Equação 3.6.

$$T_{CRA}^{Digital} = T_{Port} \times \left[\frac{Cap_{Enlace}}{2 \times T_{Port} \times F_{Exp}^{Dig}} \right] \quad (3.5)$$

onde Cap_{Enlace} e F_{Exp}^{Dig} representam, respectivamente, a capacidade agregada do enlace (tanto no *upstream* quanto no *downstream*) e o fator de expansão da largura de banda das portadoras de rádio quando digitalizadas, o qual pode variar entre 1,86 a 13, sendo esses valores equivalentes aos F_{Exp}^{Dig} de, respectivamente, o melhor caso de modulação delta-sigma e protocolo CPRI (WANG et al., 2017)(OLIVA et al., 2016)

A taxa fornecida ao usuário por uma transmissão de rádio analógica para uma configuração FDD ($T_{CRA}^{Analogica}$) é dada pela Equação 3.6.

$$T_{CRA}^{Analogica} = T_{Port} \times \left[\frac{B_{Util}}{2 \times B_{Port} + B_{Guarda}^{UpDown}} \right] \quad (3.6)$$

onde B_{Guarda}^{UpDown} e B_{Util} representam, respectivamente, a banda de guarda entre componentes agregadas (*downlink* e *uplink*) e a banda útil do enlace em MHz para uma modulação alvo,

a qual diminui com o aumento do comprimento dele, uma vez que a atenuação do sinal diminuirá a SNR e impossibilitará que a modulação alvo seja atingida (ACATAUASSU et al., 2018).

A taxa máxima fornecida ao usuário em uma CRA para configuração FDD (T_{CRA}) é dada pela equação 3.7.

$$T_{CRA} = \min \left(\frac{T_{CRA}^{Digital}}{F_{CRA}^{Casc}}, T_{CRA}^{Analogica} \right) \quad (3.7)$$

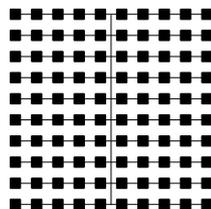
onde F_{CRA}^{Casc} é o fator de cascadeamento de RRUs (podendo assumir valores de um a quatro), já a função de mínimo representa o fato de que a transmissão mais limitada em termos de taxa será aquela que fornecerá a taxa final (HUAWEI, 2015) (ERICSSON, 2017).

3.3 Modelo de Dimensionamento da Rede

O MDR (Modelo de Dimensionamento da Rede) foi desenvolvido por este trabalho para construir o cenário considerado a partir de métricas como a área, distância entre edificações, largura das edificações e densidade populacional, possibilitando a determinação de parâmetros-chave relacionados à demanda de tráfego e ao CAPEX e OPEX do cenário, como por exemplo, o número de usuários por edificação e características de cada tipo de equipamento na rede, incluindo quantidade, posições, distâncias em relação ao CO, clientes atendidos e relações de interconexão.

A base do MDR é o modelo de ruas Manhattan simples, exibido pela Figura 21, o qual considera elementos quadrados (em geral edifícios) distribuídos de forma uniforme num bloco quadrado, onde um conjunto de canais de transporte horizontais, ligando os edifícios entre as pontas leste e oeste do bloco, são interligados por um canal de transporte vertical no centro do bloco. Tal abordagem garante um dimensionamento genérico que pode ser adaptado com facilidade a diferentes casos de densidade e distribuição.

Figura 21 – Representação do modelo de ruas Manhattan simples.

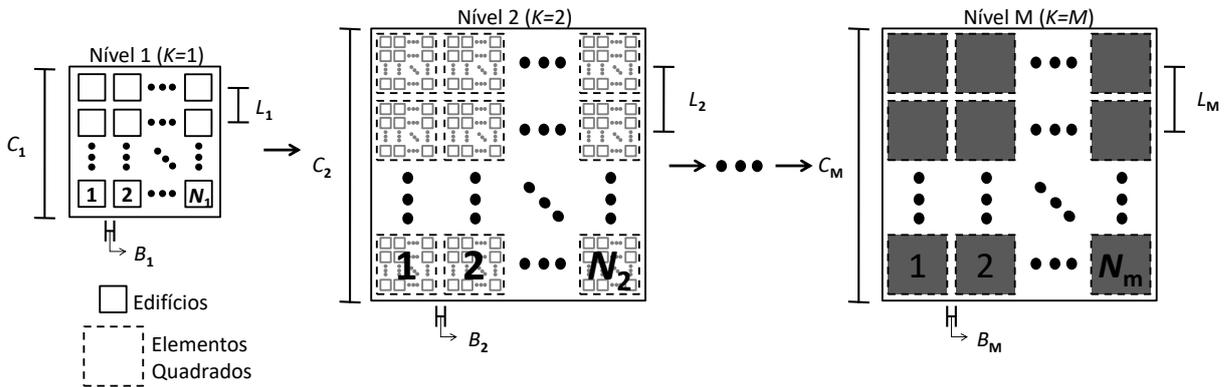


Fonte: elaborado pelo autor.

Redes de acesso podem conter múltiplos níveis de conexão de enlaces. Nesse contexto, o MDR é na verdade composto por um conjunto de modelos de ruas Manhattan simples com hierarquia bem estabelecida, distribuindo elementos quadrados em blocos e

considerando os blocos de um nível inferior como os elementos básicos de um nível superior. A configuração resultante de tal abordagem para o ambiente *outdoor* é apresentada pela Figura 22, onde os elementos do primeiro nível são edificações, com K , N_K , L_K , B_K e C_K representando, respectivamente, o índice indicativo do nível, o número de elementos em um lado do bloco em K , a distância entre o centro de dois elementos vizinhos em K , a distância entre as bordas adjacentes de dois elementos vizinhos em K e o comprimento lateral de um bloco em K .

Figura 22 – Modelo de ruas Manhattan simples aplicado a múltiplos níveis.

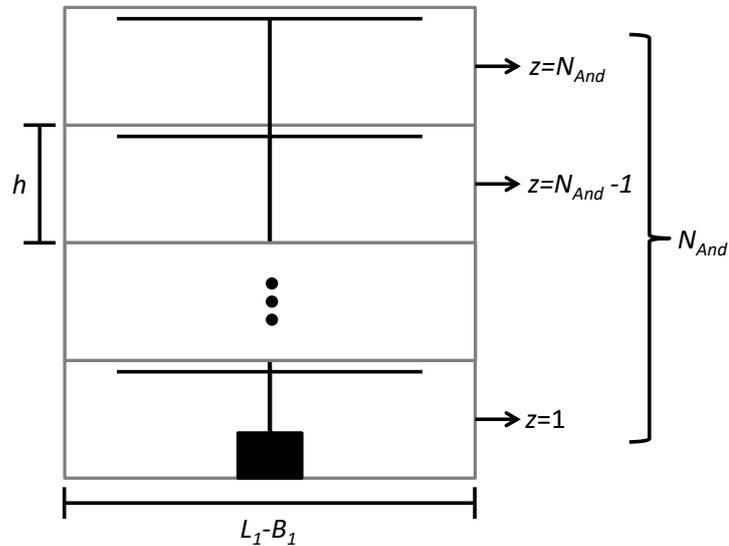


Fonte: elaborado pelo autor.

Para o ambiente *indoor*, a distribuição dos elementos e canais de enlaces nos pisos das edificações seguem a mesma configuração apresentada na Figura 22. No entanto, os elementos de primeiro nível passam a ser salas e as variáveis k , n_k , l_k , b_k e c_k assumem o lugar de K , N_K , L_K , B_K e C_K , respectivamente. Além disso, em edificações verticais (com múltiplos andares) uma nova dimensão é adicionada ao MDR, de forma que cada piso do edifício é uma representação do nível mais superior, com seus centros ligados por um canal de enlaces, onde apenas o primeiro piso possui o ponto de acesso a rede *outdoor* em seu centro. A Figura 23 apresenta as considerações do MDR para um edifício vertical com N_{And} andares, onde h é a altura de um andar e z é o índice de piso, sendo definido entre 1 e N_{And} .

É considerado que os equipamentos são instalados no centro dos elementos (edificações e salas) ou no centro dos blocos de cada nível da rede. No caso *outdoor*, o nível mais baixo ($K = 1$) tem como elementos as edificações, no centro do bloco de nível mais superior ($K = M$) localiza-se o CO e no centro dos outros blocos existe um nó remoto com os equipamentos de distribuição. No caso *indoor*, o nível mais baixo ($k = 1$) tem como elementos as salas, no centro do bloco de nível mais superior ($k = m$) localizam-se os equipamentos provendo acesso a rede *outdoor* e no centro dos outros blocos existe um armário de distribuição, que pode conter equipamentos ou apenas representar a junção de enlaces entre níveis.

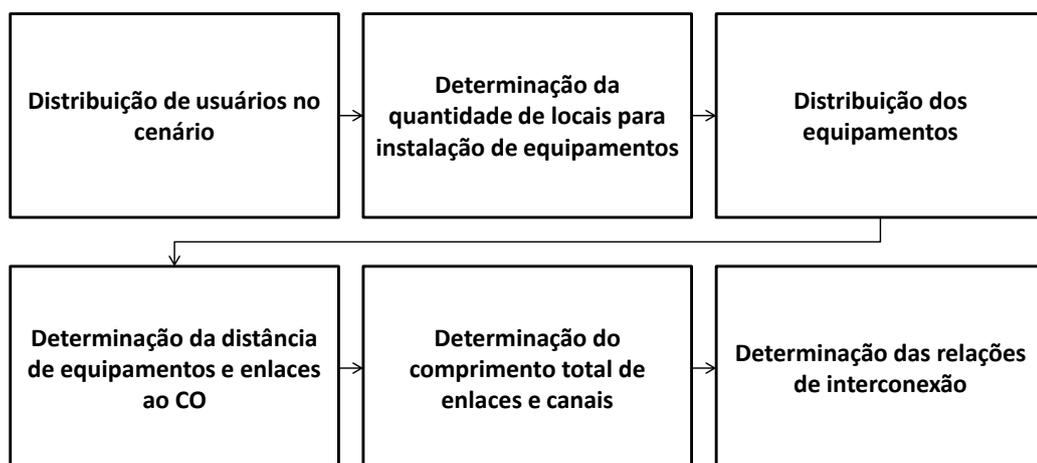
Figura 23 – Configuração do MDR para um edifício.



Fonte: elaborado pelo autor.

O MDR constrói o cenário seguindo a metodologia apresentada na Figura 24. Inicialmente o cenário base com seus edifícios e blocos são construídos, de forma que a quantidade de locais para a instalação de equipamentos é determinada, em seguida os usuários e equipamentos são distribuídos pelo cenário. Após isso, ocorre a determinação da distancia entre equipamentos e enlaces, assim como, do comprimento total de enlaces e canais para esses. Por fim as relações de interconexão entre equipamentos são investigadas e os usuários ligados a cada equipamento na rede determinados.

Figura 24 – Metodologia de funcionamento do MDR para a construção de cenário.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.1 Quantidade de Locais para a Instalação de Equipamentos

Equipamentos são instalados nos centros dos elementos básicos ou blocos de qualquer ambiente ou nível. Nesse contexto, o número de edificações (N_{Ed}), salas (N_{Salas}) e centros de bloco em cada nível K da rede *outdoor* (N_K^{CBO}) e k da *indoor* (N_k^{CBI}) são de fundamental importância para a determinação do número de equipamentos na rede. As Equações 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 calculam, respectivamente, N_{Ed} , N_{Salas} , N_K^{CBO} e N_k^{CBI} :

$$N_{Ed} = \prod_{K=1}^M (N_K)^2 \quad (3.8)$$

$$N_{Salas} = N_{And} \times N_{Ed} \times \prod_{k=1}^m (n_k)^2 \quad (3.9)$$

$$N_K^{CBO} = \frac{\prod_{i=1}^M (N_i)^2}{\prod_{i=1}^K (N_i)^2} \quad (3.10)$$

$$N_k^{CBI} = N_{Ed} \times \frac{\prod_{i=1}^m (n_i)^2}{\prod_{i=1}^k (n_i)^2} \quad (3.11)$$

onde para análises totalmente *indoor* $N_{Ed} = 1$ e as Equações 3.8 e 3.10 são desconsideradas, já para análises totalmente *outdoor* as Equações 3.9 e 3.11 são desconsideradas.

3.3.2 Distribuição de Usuários na Rede

Com o cenário construído no ambiente *outdoor* e/ou *indoor* o MDR distribui os usuários uniformemente entre cada edifício e/ou sala, considerando a densidade populacional do cenário. Tal distribuição é importante porque grupos de usuários podem se conectar aos mesmos equipamentos de acesso que estão na rede, os quais terão a sua capacidade de tráfego diluída entre os usuários conectados. Dessa forma, tendo a informação da demanda de tráfego por usuário é possível verificar se o sistema de acesso adotado atende aos requisitos de tráfego do cenário, o qual pode ser *outdoor*, *indoor* ou ambos, sendo necessário equações modelando o número de usuários por edifício para todos os casos e por sala para os dois últimos. A partir disso, o número médio de usuários por edifício (N_{Us}^{Ed}) para análise *outdoor* é calculado pela Equação 3.12.

$$N_{Us}^{Ed} = \frac{A_{Reg}^{Out} \times \rho \times \gamma_{Movel} \times \gamma_{Indoor}}{N_{Ed}} \quad (3.12)$$

onde A_{Reg}^{Out} , γ_{Movel} e γ_{Indoor} representam, respectivamente, a área da região abordada pelo cenário *outdoor*, a taxa de penetração do serviço móvel e a taxa de permanência no ambiente *indoor*, de forma que as duas últimas variam de zero a um. Alternativamente, para uma análise exclusivamente *indoor* N_{Us}^{Ed} pode ser calculado pela Equação 3.13:

$$N_{Us}^{Ed} = A_{Piso} \times \rho_{Piso} \times N_{And} \times \gamma_{Movel} \quad (3.13)$$

onde A_{Piso} e ρ_{Piso} apresentam respectivamente a área e densidade populacional no piso de um ambiente *indoor*. Por fim, com o quantidade de usuários em um edifício estabelecida, o número médio de usuários por sala num edifício (N_{Us}^{Sala}) é calculado pela Equação 3.14:

$$N_{Us}^{Sala} = \frac{N_{Us}^{Ed}}{N_{Salas}/N_{Ed}} \quad (3.14)$$

3.3.3 Quantidade de Componentes na Rede

O MDR considera como componentes os equipamentos de rede e as seções de canais, as quais interligam os elementos nos blocos de cada nível da rede. O número total de componentes na rede (N_{Tot}^{Comp}) é calculado pela Equação 3.15:

$$N_{Tot}^{Comp} = N_{Tot}^{Eq} + N_{Tot}^{CanEnl} \quad (3.15)$$

onde N_{Tot}^{Eq} e N_{Tot}^{CanEnl} representam, respectivamente, o número total de equipamento e número de canais para enlases.

O número de equipamentos do tipo i localizados na no centro do primeiro piso e salas dos edifícios (N_i^{EqEd} e N_i^{EqSala} , respectivamente) é calculado pelas Equações 3.16 e 3.17:

$$N_i^{EqEd} = \beta_i \times N_{Ed} \quad (3.16)$$

$$N_i^{EqSala} = \beta_i \times N_{Salas} \quad (3.17)$$

onde β_i representa o fator multiplicativo relacionado à presença de múltiplos equipamentos do tipo i em uma mesma sala ou edifício. É importante ressaltar que em análises totalmente *outdoor* a Equação 3.17 é desconsiderada. O número de equipamentos do tipo i no centro dos blocos em cada nível K da rede *outdoor* ($N_{i,K}^{EqCBO}$) é calculado pela equação 3.18.

$$N_{i,K}^{EqCBO} = \beta_{i,K} \times N_K^{CBO} \quad (3.18)$$

onde $\beta_{i,K}$ representa o fator multiplicativo relacionado à presença de múltiplos equipamentos do tipo i no centro dos bloco de nível K da rede. O número de equipamentos do tipo i no centro dos blocos em cada nível k e andar z da rede *indoor* ($N_{i,k,z}^{EqCBI}$) é calculado pela equação 3.19.

$$N_{i,k,z}^{EqCBI} = \beta_{i,k,z} \times N_k^{CBI} \quad (3.19)$$

onde $\beta_{i,k,z}$ representa o fator multiplicativo associado a presença de múltiplos equipamentos do tipo i no centro dos blocos de nível k e andar z da rede. É importante ressaltar que em análises totalmente *outdoor* a Equação 3.19 é desconsiderada. O número total de equipamentos é calculado pela Equação 3.20:

$$N_{Tot}^{Eq} = \sum_i N_i^{EqEd} + \sum_i N_i^{EqSala} + \sum_K \sum_i N_{i,K}^{EqCBO} + \sum_i \sum_k \sum_z N_{i,k,z}^{EqCBI} \quad (3.20)$$

onde os índices i , K , k e z representam, respectivamente, os vários tipos de equipamento, níveis de bloco outdoor, níveis de bloco indoor e anadares de edificações. Além disso, a Equação 3.20 pode representar um cenário totalmente *indoor* ou *outdoor* por meio da eliminação dos termos referentes ao ambiente que não está sendo analisado.

O número de canais para enlaces nos blocos de cada nível K da rede *outdoor* (N_K^{CanOut}) e k da rede *indoor* (N_k^{CanInd}) é calculado pelas Equações 3.21 e 3.22:

$$N_K^{CanOut} = [(N_k)^2 + N_k] \times N_K^{CBO} \quad (3.21)$$

$$N_k^{CanInd} = [(n_k)^2 + n_k] \times N_k^{CBI} \quad (3.22)$$

onde o número de centro dos blocos *indoor* e *outdoor* são reaproveitados como o próprio número de blocos. A quantia total de canais na rede (N_{Tot}^{CanEnl}) é representada pela Equação 3.23:

$$N_{Tot}^{CanEnl} = \sum_K N_K^{CanOut} + N_{And} \times \sum_k N_k^{CanInd} \quad (3.23)$$

onde K e k representam, respectivamente, os vários níveis de enlaces *outdoor* e *indoor*, de forma que no caso de análises totalmente *indoor* $\sum_K N_K^{CanOut}$ é desconsiderado, da mesma forma que para análises totalmente *outdoor* $\sum_k N_k^{CanInd}$ é desconsiderado.

3.3.4 Distância de Componentes Interligados e Comprimento de Enlaces

No MDR a posição de cada componente da rede é modelada por um sistema cartesiano discreto de posições, o qual fornece aos elementos e seções de canal as coordenadas referentes ao centro de seu bloco (Ph, Pv), como apresentado pela Figura 25.

A distância de um componente j , seja canal de enlace ou equipamento, ao centro do bloco onde j se encontra é calculada, respectivamente, para ambiente *outdoor* ($D_{K,j}^{Comp \rightarrow CBO}$) e *indoor* ($D_{k,j}^{Comp \rightarrow CBI}$) pelas Equações 3.24 e 3.25:

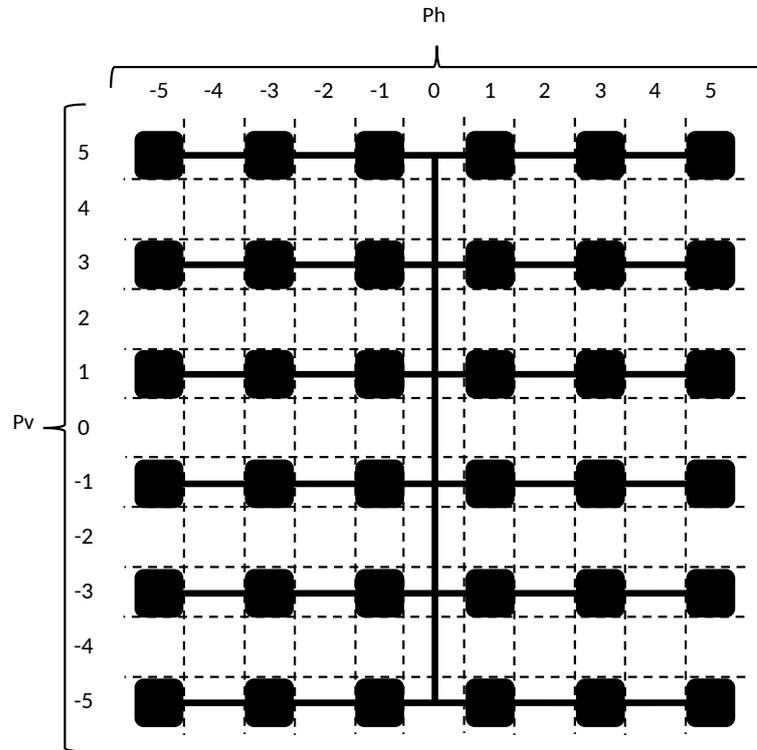
$$D_{K,j}^{Comp \rightarrow CBO} = \frac{L_K}{2} \times (|Pv_{K,j}| + |Ph_{K,j}|) \quad (3.24)$$

$$D_{k,j}^{Comp \rightarrow CBI} = \frac{l_k}{2} \times (|Pv_{k,j}| + |Ph_{k,j}|) \quad (3.25)$$

onde $Pv_{K,j}$ e $Ph_{K,j}$ representam as coordenadas referentes ao centro do bloco de nível k no ambiente *outdoor*, enquanto $Pv_{k,j}$ e $Ph_{k,j}$ representam as coordenadas referentes ao centro do bloco de nível k no ambiente *indoor*.

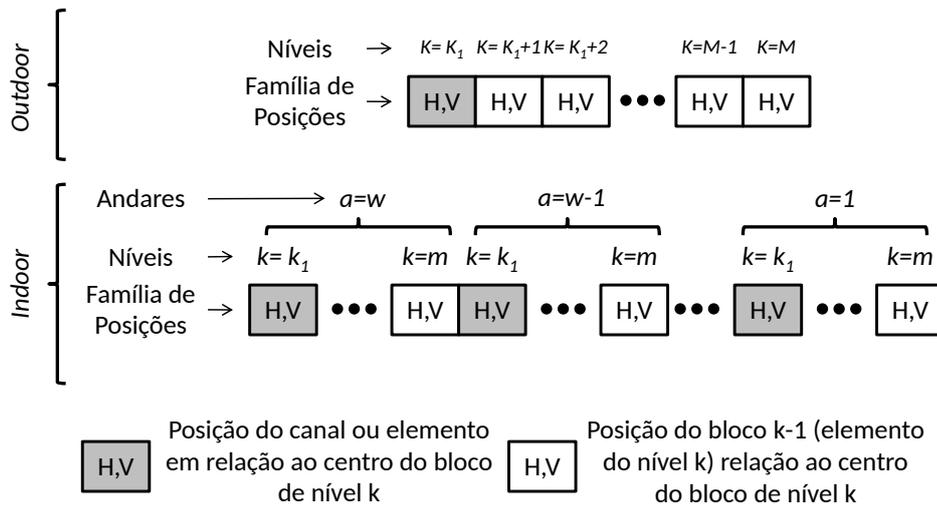
Em um sistema com múltiplos níveis cada elemento ou canal tem uma família de posições. A Figura 26 apresenta a família de posições de um elemento ou canal para análises *outdoor* e *indoor*, considerando componentes no nível $K = K_1$ para o primeiro caso e $k = k_1$ para o último.

Figura 25 – Exemplo do sistema cartesiano discreto de posições para o bloco com 6 elementos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 26 – Exemplificações da Família de posições para ambientes *indoor* e *outdoors*.



Fonte: elaborado pelo autor.

A família de posições permite o cálculo da distância entre componentes interconectados, fornecendo o comprimento de cada enlace na rede (por meio da distância entre os equipamentos interligados), o qual pode resultar em diferentes capacidades para transporte de dados entre os equipamentos, especialmente no caso do uso de cabos metá-

licos. Além disso, no ambiente *outdoor*, a distância dos componentes ao CO da operadora pode ser obtida, permitindo o cálculo do tempo de viagem para instalar ou reparar componentes.

Para edifícios verticais a distância entre o centro de dois pisos diferentes num edifício (D_{z_1, z_2}^{pisos}) é representada pela Equação 3.26:

$$D_{pisos} = |(z_2 - z_1)|h \quad (3.26)$$

onde z_1 e z_2 são representações do índice a para dois andares diferentes. Com o uso das Equações 3.26 e 3.24 pode-se modelar o comprimento de cada enlace no ambiente *indoor* para um edifício vertical.

O comprimento total de enlaces em blocos *outdoor* de nível K (L_K^{EnlOut}) é calculado pela Equação 3.27.

$$L_K^{EnlOut} = L_K \times \zeta_K \times \frac{(N_K)^3}{2} \quad (3.27)$$

onde ζ_K representa o fator multiplicativo relacionado a presença de múltiplos enlaces ligados a cada elemento do bloco *outdoor* de nível K .

O comprimento total de canais para enlaces em blocos *outdoor* de nível K (L_K^{CanOut}) é calculado pela Equação 3.28,

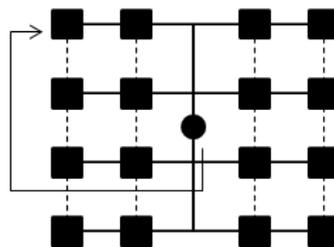
$$L_K^{CanOut} = [(N_K)^2 - 1]L_K \quad (3.28)$$

a qual é independente do número de enlaces passando por dentro do canal.

3.3.5 Considerações para Proteção por Duplicação de Enlaces em Blocos *Outdoor*

Se a proteção por duplicação de enlaces for adotada em determinado nível da rede do ambiente *outdoor*, canais de enlace verticais ligando os elementos entre as pontas norte e sul do bloco são instalados, como apresentado pelas linhas tracejadas na Figura 27. A seta na referida figura indica o caminho seguido pelos enlaces de proteção.

Figura 27 – Esquema de duplicação de enlaces em um bloco.



Fonte: elaborado pelo autor.

A distância dos elementos adicionais em relação ao centro de seu bloco ainda pode ser calculada pela Equação 3.24, uma vez que o sistema de posições possui margem para a adição de canais de proteção.

O comprimento de enlaces adicionais no caso de proteção com duplicação em um bloco no nível K do ambiente *outdoor* ($L_K^{EnlOutPrt}$) é calculado pela Equação 3.29:

$$L_K^{EnlOutPrt} = L_K \times \zeta_K \frac{(N_K)^3 + 2(N_K)^2}{2} \quad (3.29)$$

onde ζ_K representa o fator multiplicativo relacionado a presença de múltiplos enlaces ligados a cada elemento do bloco *outdoor* de nível K .

O comprimento de canais para enlaces adicionais no caso de proteção com duplicação em um bloco no nível K do ambiente *outdoor* ($L_K^{CanOutPrt}$) é calculado pela Equação 3.30:

$$L_K^{CanOutPrt} = [(N_K)^2 - N_K]L_K \quad (3.30)$$

a qual é independente do número de enlaces passando por dentro do canal.

3.3.6 A Interconexão dos Equipamentos e os Clientes Atendidos por cada Componente

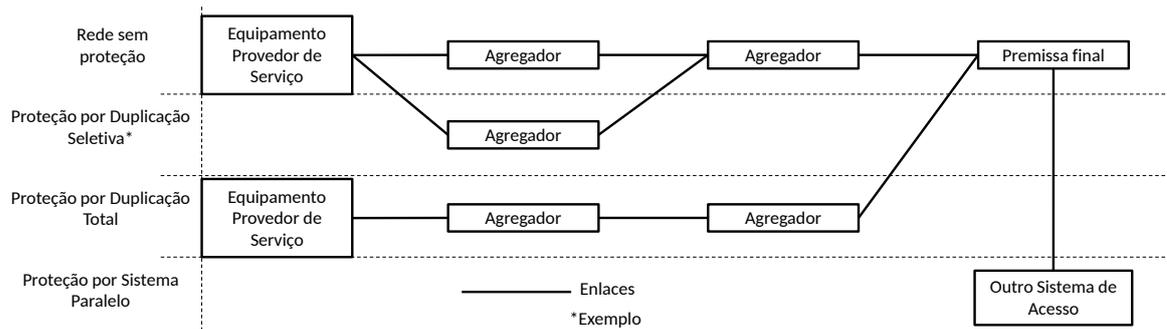
A interconexão entre equipamentos é fundamental na análise do comportamento de falhas num sistema, pois cada componente possui dependências em relação aos outros. Nesse contexto, a falha de um componente pode resultar em inoperância para uma árvore composta por outros componentes. Dessa forma, falhas de múltiplos componentes podem atingir um conjunto de usuários que compartilham uma árvore de conexão entre si.

No caso da adoção de sistemas de proteção, um desvio na árvore de conexões é criado, de forma que componentes padrões e de proteção que possam estar ligados ao mesmo usuário falhem sem causar inoperância entre si. No entanto, é importante ressaltar que sistemas de proteção apenas causarão continuidade do serviço no caso de falha dos componentes que são alvo de sua proteção.

A Figura 28 apresenta um exemplo de árvore de conexões para um sistema com quatro tipos de componentes operando de forma desprotegida e na presença de três esquemas de proteção. Em relação aos equipamentos, são apresentados provedores de serviço (fornecem serviços de dados e gerenciam a rede de acesso), agregadores (agregam o tráfego de um conjunto de equipamento num nível inferior), premissas finais (equipamentos da rede de acesso mais próximos dos usuários) e enlaces. Em relação a proteção são apresentados: duplicação seletiva, duplicação total e uso de sistema paralelo. A árvore apresentada pode ser expandida para o sistema de equipamentos em elementos básicos e centro de blocos adotado pelo MDR, uma vez que os equipamentos entre o provedor de

serviço (localizado no CO ou ponto de acesso a rede *outdoor* de um edifício) e as premissas finais (localizadas nas edificações ou em suas salas), os quais se encontram em nós remotos no ambiente *outdoor* e armários no ambiente *indoor*, agem como agregadores. Além disso, para uma análise tanto no *indoor* quanto no *outdoor* as árvores resultantes de cada ambiente são interligadas.

Figura 28 – Árvore de conexões entre os equipamentos considerando as diversas topologias.



Fonte: elaborado pelo autor.

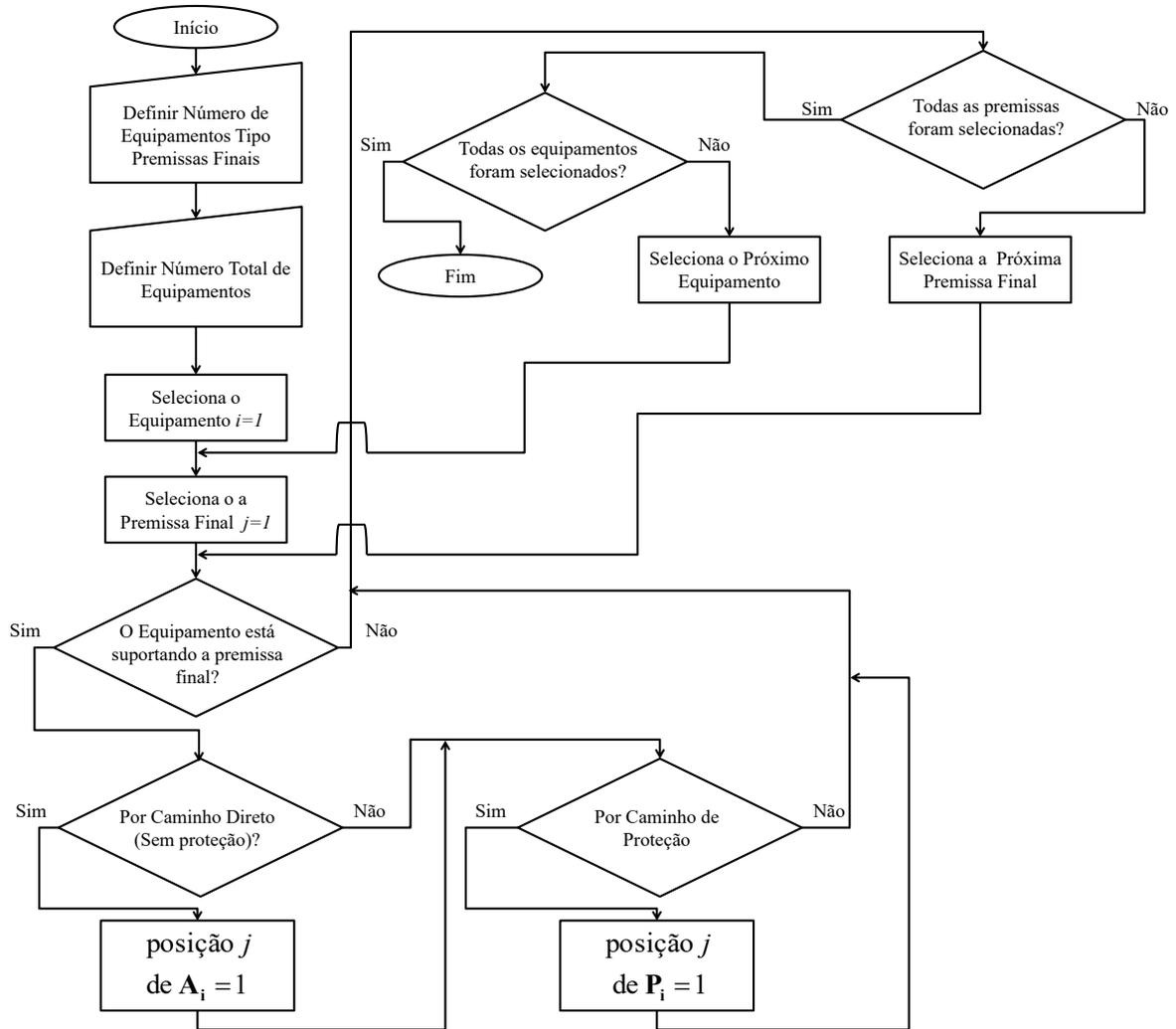
A árvore de conexões permite determinar as premissas finais atendidas e protegidas por um componente. Nesse contexto, os vetores binários A_i e P_i , de tamanho igual ao número de premissas finais (calculado pela Equação 3.16 em análise *outdoor* e 3.17 para outros casos), onde i representa cada componentes, têm como objetivo determinar os clientes atendidos e protegidos por cada componente da rede, respectivamente. Cada posição j de A_i e P_i , representa uma premissa final na rede e conseqüentemente um grupo de usuários. Os clientes atendidos e protegidos por cada componente podem ser obtidos pelo fluxograma apresentado na Figura 29.

O uso desta abordagem para determinar as premissas finais atendidas e protegidas por cada tipo de componente simplifica o processo que determina se um equipamento ou enlace com proteção levou a ausência de serviço para uma premissa final, assim como se dois componentes falhos atingem o mesma premissa final.

3.4 Modelo de Operação Voltado a Falhas de Componentes

O MOVFC (Modelo de Operação Voltado a Falhas de Componentes) aborda a análise de uma rede em termos das falhas de seus componentes num período de tempo T por meio de uma CTMC (Continuous Time Markov Chain – Cadeia de Markov Contínua no Tempo) com definição de estados dada por número, tipo e posição de componentes falhos. O MOVFC foi desenvolvido por este trabalho, mas modelos equivalentes já foram abordados na literatura (FERNANDEZ; STOL, 2017)(FERNANDEZ; STOL, 2015). Análises cumulativas para CTMC possibilitam determinar o tempo médio de permanência em

Figura 29 – Representação da metodologia para a determinação de A_i e P_i para equipamentos na rede.



Fonte: elaborado pelo autor.

cada estado i (T_i) em um período T , podendo ser feitas analiticamente ou por simulações computacionais. A simulação de Monte Carlo é uma ferramenta computacional bastante usada na análise de sistemas Markovianos, podendo ser usada para cadeias simples e complexas (com grande número de estados). Nesse contexto, o MOVFC se utiliza de simulador para transição de estados baseado na técnica de simulação de Monte Carlo para realizar a análise cumulativa da CTMC referente a operação da rede (ANDERS; SILVA, 2000).

A grande vantagem da utilização de uma modelagem Markoviana resolvida por simulação de Monte Carlo é o provisionamento de uma análise dinâmica para a rede, a qual possui relativo nível de simplicidade em sua implementação e consegue abordar a interdependência entre componentes. Por exemplo, uma abordagem com uso de modelos analíticos não markovianos para cálculo de tempo de indisponibilidade usados com frequência na literatura (MACHUCA; CHEN; WOSINSKA, 2012)(DIXIT et al., 2014)

não conseguem modelar a falha simultânea de dois equipamentos afetando o mesmo usuário, situação que é facilmente abordada por um estado da cadeia de Markov. Além disso, o modelo utilizando por este trabalho também possibilita o reparo sequencial de falhas, calculando melhor o tempo de trabalho das equipes de reparo.

3.4.1 Modelo Markoviano para Operação da Rede

Uma CTMC possui tempo contínuo e espaço de estados discreto, de forma que as transições de estado ocorrerão de acordo com taxas de transições $(\lambda_{i,j})$, as quais 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 de uma matriz (λ) , como apresentado em (PAPOULIS; PILLAI, 2002) e (ANDERS; SILVA, 2000), com elementos definidos pela equação 3.31:

$$\lambda_{i,j} = \begin{cases} \text{taxa de transição do estado } i \text{ para o estado } j, \text{ caso } i \neq j \\ \sum_{j \forall (j \neq i)} \lambda_{i,j}, \text{ caso } i = j \end{cases} \quad (3.31)$$

onde os máximos valores para i e j são definidos pelo tamanho do espaço de estados, o qual é definido no MOVFC por meio das possíveis configurações para falhas de componentes na rede, determinando estados por número, tipo e posição de componentes falhos.

As taxas de transição da cadeia $(\lambda_{i,j})$ possuem duas definições conceituais: taxas de falhas se o estado j possuir mais componentes falhos que o estado i ou taxas de reparo no caso contrário. As taxas de falhas entre estados são as resultantes das obtidas de um sistema paralelo contendo os componentes falhos do estado j que estão funcionando no estado i , a qual não pode ser obtida diretamente a partir das taxas de falha dos componentes individuais falhos no estado i , a não ser para casos de falha de apenas um componente. A obtenção das taxas resultantes é feita a partir das equações 3.32 e 3.33:

$$\text{Taxa de Falha} = \lambda_{i,j} = \frac{-\ln(R)}{t} \quad (3.32)$$

$$(1 - R) = (1 - R_1)(1 - R_2) \cdots (1 - R_n) \quad (3.33)$$

onde t é o tempo, R é uma métrica de confiabilidade e os termos de R_1 até R_n são representações da confiabilidade dos componentes falhos em j e funcionando em i . Por meio da Equação 3.32 a confiabilidade individual dos componentes pode ser obtida, de forma que a confiabilidade de múltiplos componentes pode ser associada pela Equação 3.33. A aplicação do resultado da associação das confiabilidades dos múltiplos equipamentos falhos como entrada na Equação 3.32 fornece a taxa de falha do sistema paralelo para migração do estado i ao j . As taxas de reparo a partir de um estado são limitadas ao número de equipes de reparo existentes, de forma que se mais de um componente estiver falho aquele

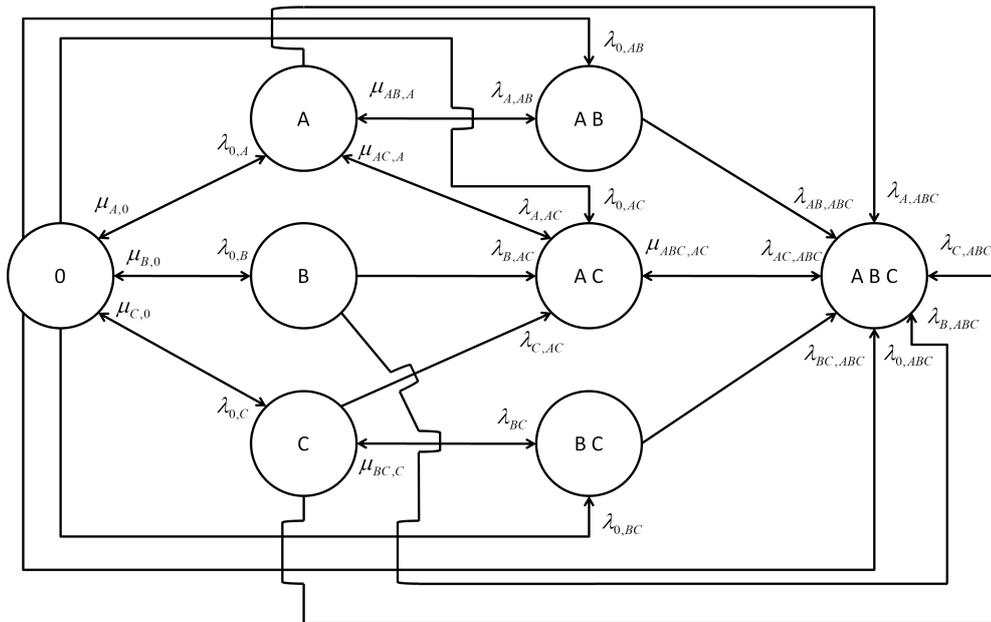
que levar a maior reativação de premissas finais no menor tempo será reparado primeiro. O calculo da taxa de reparo num estado é apresentado pela Equação 3.34:

$$\text{Taxa de Reparo} = \lambda_{j,i} = \frac{1}{\frac{D_j^{EqRep}}{V_{Med}} + T_k^{rep}} \quad (3.34)$$

onde V_{Med} , D_j^{EqRep} e T_k^{rep} são, respectivamente, a velocidade média da equipe de reparo, a distância e tempo de reparo equipamento a ser reparado no estado j com falhas.

A Figura 30 exemplifica um CTMC para uma rede de três componentes distintos (A, B e C) e com apenas uma equipe de reparo. Observa-se na figura a existência de todas as possíveis configurações de falha e de apenas uma taxa de reparo por estado quando esse contém falhas.

Figura 30 – Exemplo de cadeia criada para a simulação de uma rede com três equipamentos distintos.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.2 Simulador de Transição de Estados

O tempo médio de permanência em cada estado i durante uma transição de uma CTMC (t_i) pode ser calculado por meio dos elementos diagonais da matriz λ como apresentado em (PAPOULIS; PILLAI, 2002) e expressado pela equação 3.35:

$$t_i = \frac{1}{|\lambda_{ii}|} \quad (3.35)$$

onde λ_{ii} são os elementos diagonais de λ .

Uma simulação de Monte Carlo, como mostrado em (ANDERS; SILVA, 2000), pode facilmente modelar o comportamento das transições entre estados num período de tempo T a partir de uma estado inicial, fazendo uso de uma variável pseudo aleatória (variando de 0 a 1) e da probabilidade de migração a partir de um estado i para um j (P_{ij}), a qual pode ser calculada por meio da equação 3.36.

$$P_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{|\lambda_{ii}|} \quad (3.36)$$

onde em λ_{ij} j é sempre diferente de i .

A Figura 31 ilustra o fluxograma do algoritmo de simulação que foi implementado para realizar a análise cumulativa da CTMC associada a operação da rede. Durante sua operação o algoritmo faz a aquisição do tempo de permanência no estado i durante um período T (T_i). A partir da Figura 31 nota-se que cada tentativa da simulação de Monte Carlo encerra quando o tempo total acumulado nos estados passados atinge T , gerando um perfil para tempo de permanência para cada estado i acessado no período T (ta_i), o qual é armazenado num vetor \mathbf{ta} . Na conclusão de cada tentativa \mathbf{ta} é somado ao vetor \mathbf{Ta} . Quando todas as tentativas se encerram \mathbf{Ta} é dividido pelo número de tentativas para a obtenção do vetor T , no qual cada posição representa um T_i .

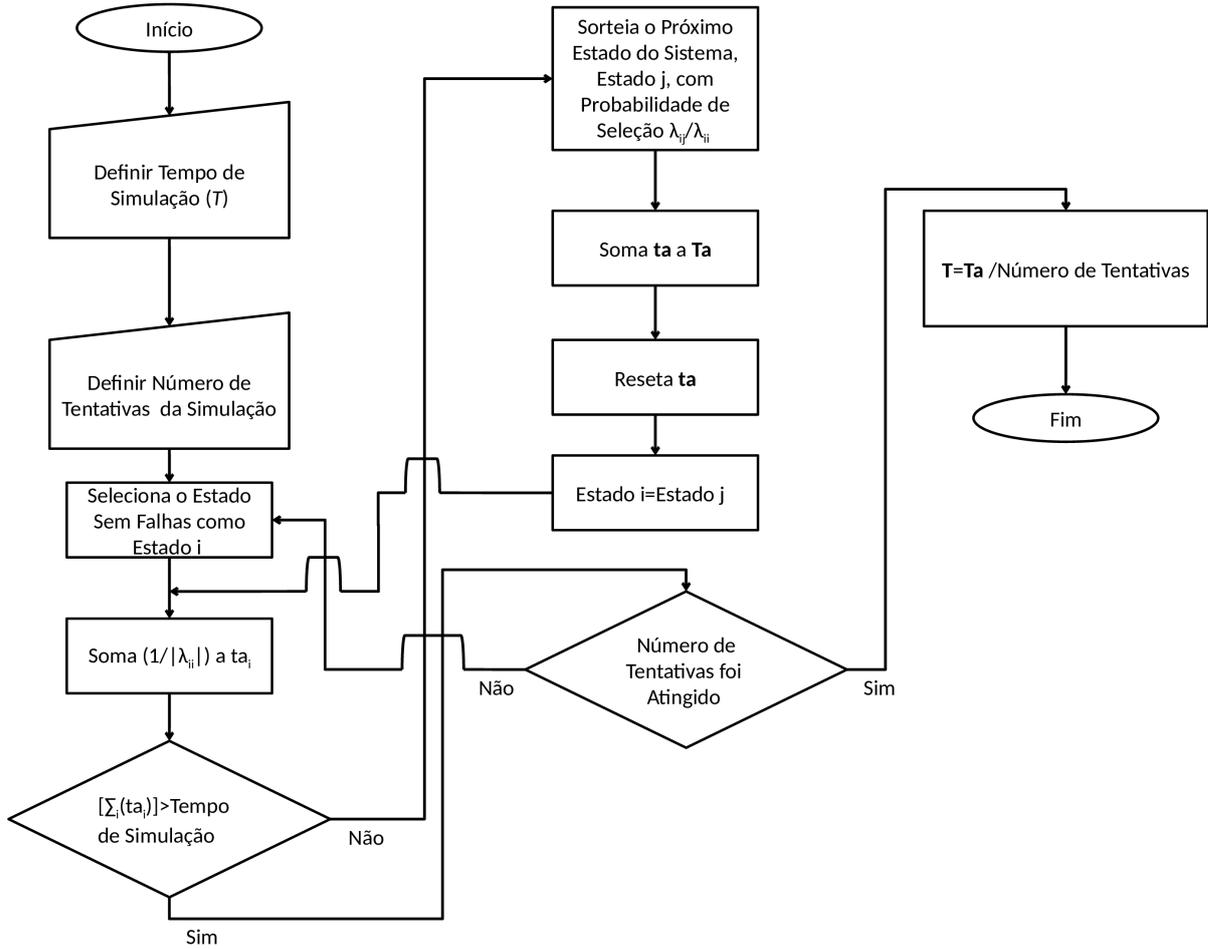
Teoricamente a CTMC simulada deveria representar todas as configurações de falhas possíveis. No entanto, para tornar a análise computacionalmente viável em sistemas com muitos componentes, configurações a partir um certo número de componentes falhos podem ser desconsideradas, desde que verificado que tal número de falhas simultâneas praticamente não ocorre.

3.5 Modelo de Custos

O modelo de custos foi desenvolvido por este trabalho para obter o TCO da rede, soma do CAPEX e OPEX, usando os resultados dos outros modelos contidos neste capítulo. O CAPEX é obtido por meio de um conjunto de equações com variáveis vindas do MDR. O OPEX é obtido por meio de equações representando as recompensas de Markov para um estado i , as quais se multiplicadas pelo T_i obtido no MOVFC e somadas para todos os i resultarão no custo total de operação da rede.

A Figura 32 apresenta o metodologia adotada pelo modelo para determinação do TCO. Os parâmetros de construção do cenário (distancia entre edifícios, densidade populacional, tipo de ambiente analisado e outros) são usados como entrada para o MDR, que fornece dados ao modelo de CAPEX e ao MOVFC. No CAPEX todos os custos de cabeamento, assim como de compra e instalação de equipamentos, são considerados. O MOVFC recebe a saída do MDR e parâmetros de simulação (Número de tentativas da simulação, tempo de análise, taxa de falha para equipamentos e outros), fornecendo dados

Figura 31 – Fluxograma do processo de simulação que obtém os diversos t_i .



Fonte: elaborado pelo autor.

ao modelo de OPEX, que aborda os custos de multa por indisponibilidade, reparos, energia e aluguel de espaço.

3.5.1 CAPEX

A equação (3.37) apresenta o CAPEX da rede:

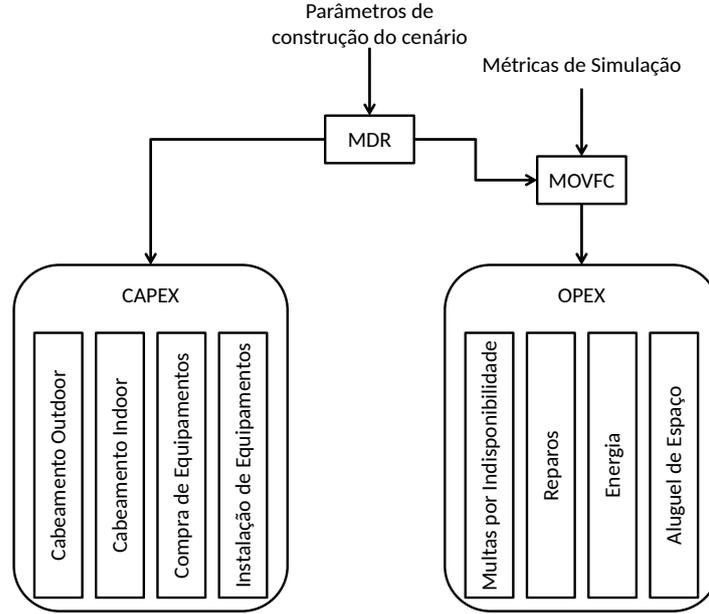
$$CAPEX = C_{Enl}^{Out} + C_{Enl}^{Ind} + C_{Eq}^{Ins} + C_{Eq}^{Compra}. \quad (3.37)$$

onde C_{Enl}^{Out} é o custo de enlaces *outdoor*, C_{Enl}^{Ind} é o custo de enlaces *indoor*, C_{Eq}^{Compra} é o custo de compra dos equipamentos e C_{Eq}^{Ins} é o custo de instalação dos equipamentos.

O custo de enlaces *outdoor* (C_{Enl}^{Out}) aborda a instalação e compra de enlaces, assim como a instalação de canais de enlaces (dutos subterrâneos, sistema aéreo com postes ou outros), sendo calculado pela Equação 3.38:

$$C_{Enl}^{Out} = Pr_{Can}^{Out} \times \sum_K (L_K^{CanOut} + L_K^{CanOutPrt}) + Pr_K^{EnlOut} \times \sum_K (L_K^{EnlOut} + L_K^{EnlOutPrt}) \quad (3.38)$$

Figura 32 – Metodologia adotada pelo modelo de custos para determinação do TCO.



Fonte: elaborado pelo autor.

onde K , Pr_{Can}^{Out} e Pr_K^{EnlOut} , L_K^{CanOut} , $L_K^{CanOutPrt}$, L_K^{EnlOut} , $L_K^{EnlOutPrt}$ são, respectivamente, o índice representativo dos vários nível de enlaces na rede, o preço de instalação dos canais de enlace *outdoor*, o preço da compra e de instalação dos enlaces usados no nível K da rede, comprimento total de canais para enlaces em blocos *outdoor* de nível K , comprimento total de canais para enlaces para proteção por duplicação em blocos *outdoor* de nível K , comprimento total de enlaces em blocos *outdoor* de nível K e comprimento total de enlaces para proteção por duplicação em blocos *outdoor* de nível K .

O custo de enlaces *indoor* (C_{Enl}^{Ind}) é relacionado apenas a instalação de enlaces nas edificações, uma vez que os canais já estão disponíveis nos edifícios, sendo calculado pela Equação 3.39:

$$C_{Enl}^{Ind} = \sum_j L_j^{EnlInd} \times Pr_j^{EnlInd}. \quad (3.39)$$

onde j , Pr_j^{EnlInd} e L_j^{EnlInd} são, respectivamente, o índice para tipos de enlace no ambiente *indoor*, o preço de compra e instalação dos enlaces tipo j e o comprimento dos enlaces tipo j no ambiente *indoor* (obtido pelo uso iterativo das Equações 3.26 e 3.24).

O custo de compra dos equipamentos (C_{Eq}^{Compra}) é relacionado ao número de cada tipo de equipamento na rede, seja *indoor* ou *outdoor*, sendo determinado pela Equação 3.40:

$$C_{Eq}^{Compra} = \sum_i N_i^{EqEd} \times Pr_i^{Eq} + \sum_i N_i^{EqSala} \times Pr_i^{Eq} + \sum_K \sum_i N_{i,K}^{EqCBO} \times Pr_i^{Eq} + \sum_k \sum_z \sum_i N_{i,k,z}^{EqCBI} \times Pr_i^{Eq} \quad (3.40)$$

onde i , K , k , z , Pr_i^{Eq} , N_i^{EqEd} , N_i^{EqSala} , $N_{i,K}^{EqCBO}$ e $N_{i,k,z}^{EqCBI}$ são, respectivamente, índice para tipos de equipamento, índice para níveis de enlace na rede *outdoor*, índice para níveis de enlace na rede *indoor*, índice para os andares de edificações, preço de compra do equipamentos do tipo i , número de equipamentos do tipo i na base de edifícios, número de equipamentos do tipo i nas salas de edifícios, número de equipamentos do tipo i no centro dos blocos em cada nível K da rede *outdoor* e número de equipamentos do tipo i no centro dos blocos em cada nível k e andar z da rede *indoor*.

O custo de instalação dos equipamentos (C_{Eq}^{Ins}) é relacionado ao valor de mão de obra pago pela instalação de equipamentos, sendo calculado pela Equação 3.41:

$$C_{Eq}^{Ins} = \sum_j \left[T_j^{Ins} + \frac{D_j^{Eq \rightarrow CO}}{V_{Med}} \right] \times Sal \quad (3.41)$$

onde o índice j representa os diferentes equipamentos variando de 1 a ao número total de equipamentos, T_j^{Ins} , $D_j^{Eq \rightarrow CO}$, V_{Med} , Sal são, respectivamente, o tempo de instalação do equipamento j , a distância ao CO do equipamento j (obtida pelas Equações 3.24 e 3.25), a velocidade média e o salário das equipes de trabalho.

3.5.2 OPEX

A equação (3.42) apresenta o OPEX da rede:

$$OPEX = \sum_i [(C_i^{Rep} + C_i^{Pen} + C_i^{Ene} + C_i^{Alu} + C_i^{Ger}) \times T_i] \quad (3.42)$$

onde i é o índice representado os vários estados, T_i , C_i^{Rep} , C_i^{Pen} e C_i^{Ene} são, respectivamente, em relação ao estado i , custo de tempo permanência no período de operação da rede, custo de reparo, custo multas por indisponibilidade, custo com energia elétrica, aluguel de espaço e custo do gerenciamento da rede.

O custo de reparo no estado i (C_i^{Rep}) é relacionado ao tempo total de reparo de equipamentos, assim como de substituições ou recondiçionamentos destes, sendo determinado pela Equação (3.43):

$$C_i^{Rep} = \min(1, i) \times \{Sal + Pr_i^{EqRep} \times [F_{Sub} + (1 - F_{Sub}) \times F_{Rec}]\} \quad (3.43)$$

onde Pr_i^{EqRep} , F_{Sub} , F_{Rec} e Sal são, respectivamente, o preço de compra do equipamento a ser reparado no estado i , o fator de substituição de equipamentos (definido entre 0 a 1), o fator de custo do recondiçionamento de equipamentos (definido entre de 0 a 1) e o salário das equipes de reparo. O termo $\min(1, i)$ na Equação 3.43 reflete a inexistência de custo de reparo para o caso de rede totalmente funcional, representada pelo estado 0.

O custo de penalidade no estado i é relacionado as multas por indisponibilidade de serviço das premissas finais, as quais são definidas no SLA, sendo calculado pela Equação

(3.44):

$$C_i^{Pen} = \sum_k (N_{k,i}^{PreFin} \times P_k^{PreFin})^{F_{imp}} \quad (3.44)$$

onde k , $N_{k,i}^{PreFin}$, P_k^{PreFin} e F_{Imp} são, respectivamente, o índice que representa o do tipo de contrato para indisponibilidade das premissas finais, o número de premissas finais falhas com contrato tipo k no estado i , a multa por indisponibilidade dada pela falta de serviço a uma premissa final com contrato falho tipo S e o fator adicionador de impacto para falhas de grande porte (DIXIT et al., 2014), o qual deve ser maior ou igual a um.

O custo de energia elétrica no estado i (C_i^{Ene}) é relacionado aos equipamentos consumidores de energia elétrica funcionando no estado, sendo determinado pela (3.45):

$$C_i^{Ene} = Pr_{kWh} \times (Tot_{Pot} - Pot_i^{Desp}) \quad (3.45)$$

onde Pr_{kWh} , Tot_{Pot} e Pot_i^{Desp} representam, respectivamente, o preço do quilowatt-hora, a soma da potência de todos os equipamentos da rede e a soma da potência de todos os equipamentos falhos no estado i .

O custo de aluguel de espaço (C_{Alu}) é relacionado ao espaço ocupado pelos equipamentos nas mais diversas localidades de instalação (CO, nó remotos, armários em edifícios e outos), sendo determinado pela Equação (3.46):

$$C_i^{Alu} = Ar_{Eq}^{InsInd} \times Pr_{Alu}^{Ind} + Ar_{Eq}^{InsOut} \times Pr_{Alu}^{Out} \quad (3.46)$$

onde Pr_{Alu}^{Ind} , Pr_{Alu}^{Out} , Ar_{Eq}^{InsInd} e Ar_{Eq}^{InsOut} são, respectivamente, é o preço do aluguel de espaço *indoor*, preço de aluguel do espaço *outdoor*, a área total ocupada por equipamentos *indoor* usando espaço alugado e área total ocupada por equipamentos *outdoor* usando espaço alugado. Os dois últimos parâmetros são dependentes da distribuição de equipamentos e da área ocupada por esses no cenário, variando de acordo com o caso de estudo considerado.

4 Caso de Estudo: *Fronthaul* Óptico-Metálico Versus Somente Metálico em CRAs Totalmente *Indoor*

Atualmente ambientes *indoor* estão repletos de LANs (*Local Area Networks* – Redes de Acesso Locais) baseadas em cabos metálicos do tipo Cat5e ou Cat6 de quatro pares. Dessa forma, a utilização de tais cabos como alternativa de transporte para os sinais de rádio em uma CRA no ambiente *indoor* traz como vantagens: ampla base instalada, suporte da comunidade de TI e a utilização de todo o ecossistema existente para cabos em LANs (incluindo técnicas, ferramentas e mão-de-obra especializada em reparo e instalação) (LU et al., 2014). Nesse contexto, soluções comerciais para CRA com *fronthaul* híbrido de enlaces ópticos e metálicos têm emergido como possível solução (ERICSSON, 2017)(HUAWEL, 2015). Uma alternativa para melhor aproveitar as vantagens operacionais de cabos Cat5e ou Cat6 em CRAs *indoors* é a adoção de um *fronthaul* totalmente metálico, o qual pode ser viabilizado pela tecnologia G.*(mg)fast* (evolução do padrão DSL G.*fast*) e o modo de transmissão fantasma, mesmo para altas demandas de largura de banda.

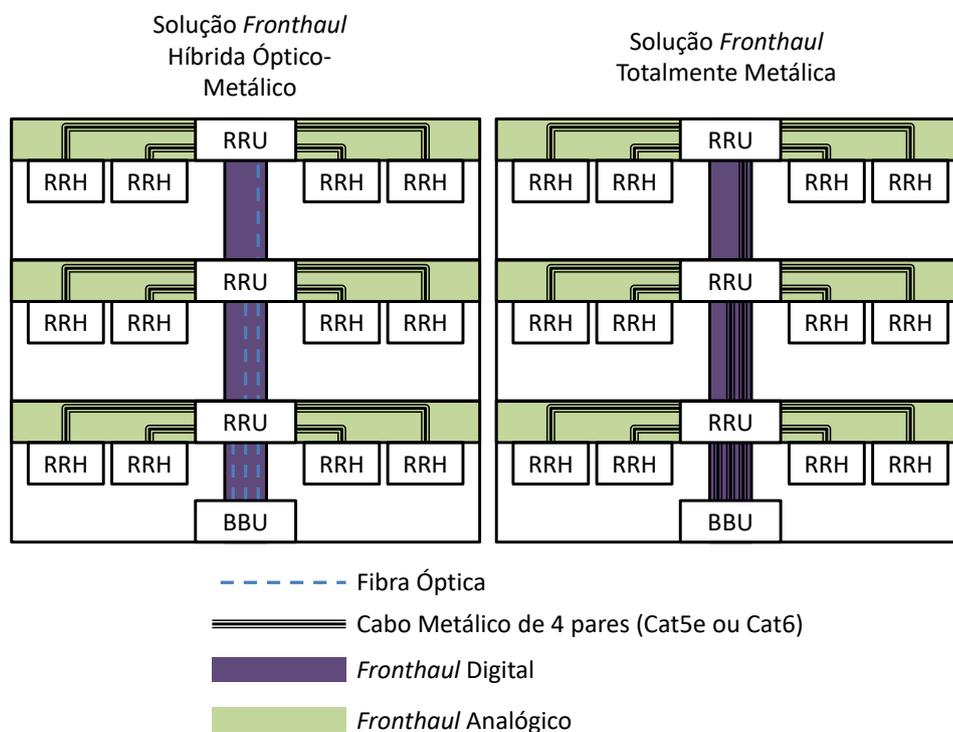
Este capítulo apresenta um estudo técnico-econômico o qual faz a comparação entre duas alternativas de *fronthaul* para CRAs instaladas totalmente no ambiente *indoor*, uma híbrida óptico-metálica e uma totalmente metálica composta apenas por cabos Cat5e.

4.1 Alternativas de *Fronthaul* Consideradas para Análise de CRA Totalmente *Indoor*

A Figura 33 apresenta as duas alternativas de *fronthaul* CRA consideradas. A solução híbrida óptico-metálica faz a ligação entre BBUs e RRUs utilizando transporte digital de portadoras sobre fibra óptica, e a ligação entre RRUs e RRHs utilizando transporte analógico de portadoras sobre cabos Cat5e ou Cat6. A solução totalmente metálica possui como única diferença em relação à híbrida, a substituição das fibras ópticas por cabos Cat5e ou Cat6 na ligação entre BBUs e RRUs, os quais operam usando G.*(mg)fast* e modo de transmissão fantasma. É importante ressaltar que a implantação das soluções exibidas na ilustração está em seu formato mais simples, com uma RRU suportando apenas um andar, na prática configurações onde o *fronthaul* analógico se distribui por vários

andares são possíveis.

Figura 33 – Alternativas de *fronthaul* para CRA totalmente *indoor* comparadas no Capítulo 4.



Fonte: elaborado pelo autor.

Como indicado no Capítulo 2, o uso da transmissão digital de CC (*Component Carrier* – Portadora de Componente) em cabos metálicos pode ser problemática devido a expansão da largura de banda necessária e os elevados requisitos de BER e latência. No entanto, o padrão G.*(mg)fast* possibilita taxas de transmissão na ordem de vários gigabits por segundo usando pares trançados, cuja taxa pode ser convenientemente expandida utilizando o modo de transmissão fantasma em cabos de múltiplos pares (SOUZA et al., 2018). Nesse contexto, o G.*(mg)fast* pode possibilitar que cabos par trançado lidem com a expansão de largura de banda exigida pela transmissão digital de portadoras. Além disso, a cada evolução, os padrões DSL têm atingido latências menores, por exemplo em G.*fast* a mesma já é menor que 1 ms e a do G.*(mg)fast* deve ser ainda menor (OTA, 2017), ademais os requisitos de latência e BER têm sido reduzidos graças aos novos métodos de transmissão digital de portadoras, como por exemplo, modulação delta-sigma que pode operar com folga na BER de 10^{-7} usada em análises para G.*fast* (WANG et al., 2017)(Neckebroek et al., 2015).

4.2 Previsão de Tráfego até 2030

Uma das métricas para caracterizar a viabilidade de uma tecnologia para um certo cenário é determinar se ela pode suportar o volume de tráfego gerado pelo cenário. Esta seção apresenta uma previsão do volume de tráfego no pico de uso da rede por usuário (ativo ou inativo) até o ano de 2030, baseando-se para tal objetivo em dados de dois projetos, o EARTH e o METIS2020, ambos financiados pela União Europeia (EARTH, 2010)(METIS2020, 2013).

4.2.1 Caracterização da Demanda de Tráfego até 2030

Estimar o tráfego até 2030 com o modelo apresentado no Capítulo 3 pode ser uma tarefa difícil, uma vez que novos tipos de terminais para acesso podem emergir a qualquer momento e novas tecnologias podem causar grandes variações na taxa média dos usuários que utilizam cada tipo de terminal, um exemplo disso são as tecnologias de realidade virtual e/ou aumentada, que poderão causar impactos na demanda de redes futuras, mas hoje ainda é difícil prever adequadamente qual seria o nível de impacto global nas redes previstas. No entanto, estimativas do projeto METIS2020 podem ajudar nesta tarefa.

O projeto METIS2020 tinha como objetivo propor novas tecnologias que pudessem suportar os cenários e demandas para a sociedade digitalizada da década de 2020 e além, definindo as bases para o 5G. Em 2013, o projeto estabeleceu que a sociedade digitalizada da década de 2020 teria um volume de tráfego de dados mil vezes maior (METIS2020, 2013). No entanto, o projeto não esclareceu exatamente em qual ano da década de 2020 tal demanda será atingida.

Para definir o ano exato onde as demandas previstas pelo METIS2020 ocorrerão, uma interpolação considerando taxa de crescimento anual composta foi feita entre o volume de 2013, cerca de 0,01 Mbps por usuário segundo (EARTH, 2010), e os vários anos na década de 2020 onde a demanda prevista poderia ocorrer. Essas interpolações foram comparadas no ano de 2019 com os valores de previsão de tráfego calculados para tal ano pelo modelo no Capítulo 3. A Tabela 1 apresenta as considerações adotadas para a previsão feita pelo modelo em 2019, foram considerados como usuários pesados aqueles que praticam download ou *streaming* de vídeos diariamente, de forma que tal métrica foi obtida de (Digital Future Project, 2018), assim como a taxa de penetração de *tablets* e *smarthphones*. Além disso, a taxa de usuários pesados por terminal foram baseadas nos requisitos do serviço de *streaming* Netflix, considerando-se vídeo em 720p para *smarthphones* e 1080p para *tablets* e computadores pessoais. Ademais, a porcentagem de usuários ativos no pico e a penetração de computadores pessoais com acesso a rede móvel advém dos valores originais usados nas análises do projeto EARTH, apresentados em (EARTH, 2010), o que é válido devido a relativa estabilidade na quantia de tempo online dos usuários desde 2014

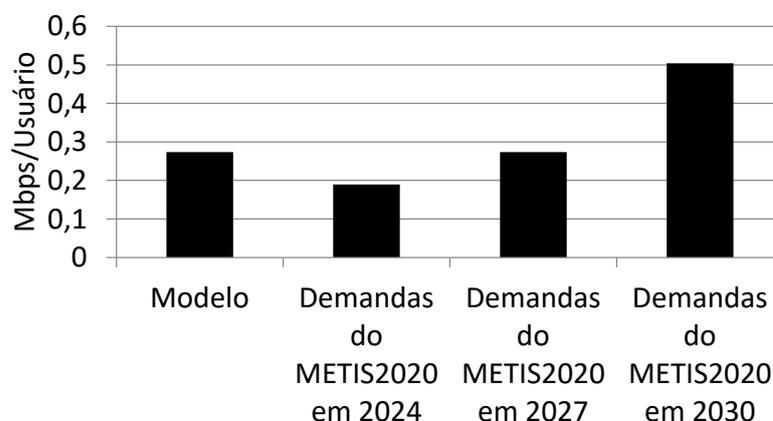
apontada em (Digital Future Project, 2018), assim como o baixo crescimento no número de usuários acessando redes móveis usando computadores pessoais, como apontado em [cisco].

Tabela 1 – Parâmetros considerados para o cálculo da demanda de tráfego em 2019.

Porcentagem de Usuários Ativos no Pico de Tráfego	16%
Porcentagem de Usuários Pesados	45,4%
Penetração de <i>Smartphones</i> (Taxa de Usuário Pesado)	86,5% (2 Mbps)
Penetração de <i>Tablets</i> (Taxa de Usuário Pesado)	27% de penetração (3,3 Mbps)
Penetração de Computador Pessoal (Taxa de Usuário Pesado)	20% de penetração (3,3 Mbps)
Taxa de Usuários Comuns	1/8 da Taxa do Pesado

A Figura 34 apresenta o tráfego por usuário previsto para 2019 usando o modelo do Capítulo 3 e três das interpolações consideradas para o ano onde as demandas do METIS2020 ocorrem: 2024, 2027 e 2030. Os resultados indicam que a interpolação considerando as demandas do METIS ocorrendo em 2027 é aquela que parece ser a mais realista, apresentando um erro de apenas 0,005% em relação a taxa prevista pelo modelo em 2019.

Figura 34 – Comparativo entre o volume de tráfego por usuário previsto para 2019 usando o modelo do Capítulo 3 e interpolações com as demandas do METIS2020 ocorrendo em 2024, 2027 e 2030.



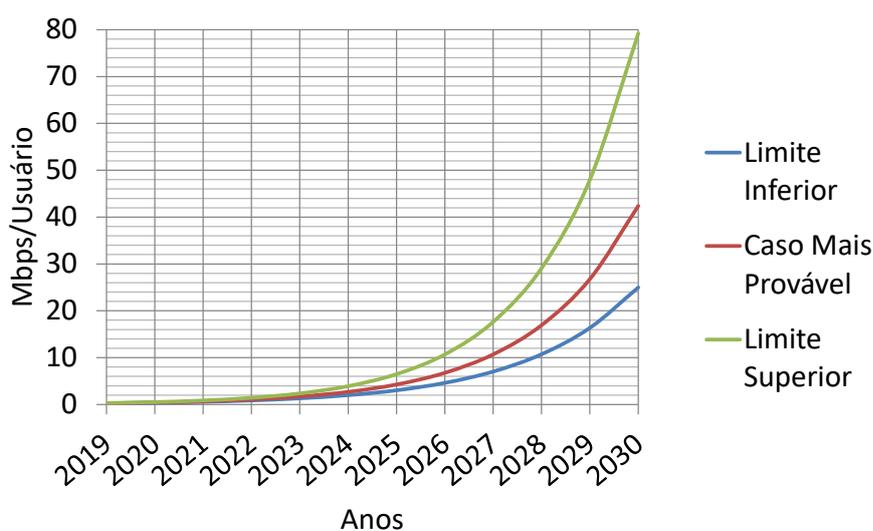
Fonte: elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que as previsões de tráfego podem não representar o cenário futuro, devido a possíveis imprevisibilidades da operação de tecnologias e aplicações de

acesso móvel, de forma que trabalhos com previsões de tráfego, como (OASE, 2013), geralmente adotam uma margem de limite inferior e superior para as gradezas previstas. Dessa forma, é importante considerar que as demandas do METIS 2020 podem acabar não se apresentando em 2027. As análises deste capítulo consideraram casos de limite superior e inferior com as demandas do METIS2020 em, respectivamente, 2026 e 2028, casos os quais representam um erro de menos de 20% em relação ao tráfego previsto pelo modelo do capítulo 3 para 2019.

A Figura 35 apresenta os três casos considerados para o volume de tráfego no pico de uso por usuário até 2030. O caso de limite superior, com as demandas dos METIS2020 se apresentando em 2026, resulta em cerca do dobro da demanda de tráfego em 2030 considerando-se o caso mais provável de ocorrência das demandas do METIS2020. Em contraste a tal resultado o caso de limite inferior, com as demandas dos METIS2020 se apresentando em 2028, resulta em cerca de metade da demanda de tráfego em 2030 considerando-se o caso mais provável de ocorrência das demandas do METIS2020.

Figura 35 – Previsão de volume de tráfego por usuário (ativo ou inativo) até 2030.



Fonte: elaborado pelo autor.

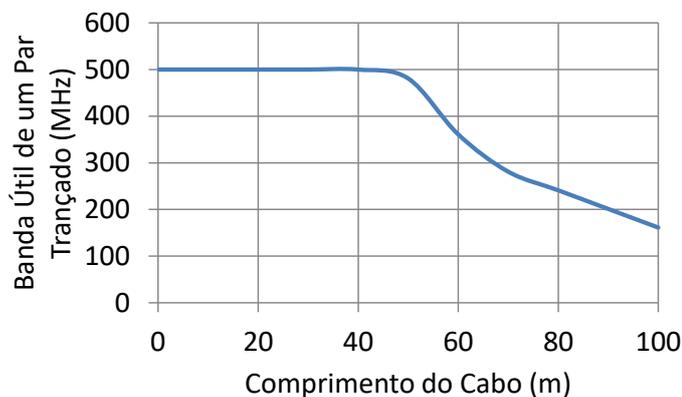
4.3 Considerações no Fronthaul Analógico entre RRUs e RRHs

O sistema adotado considera implantação usando MIMO 4X4 e agregação de portadoras, de forma que a banda útil de cada par diferencial do cabo Cat5e entre RRUs e RRHs é aproveitada transmitindo para cada antena as portadoras agregadas de forma bidirecional em FDD. Para a transmissão foi considerada a máxima banda útil de 500 MHz por canal diferencial (Naqvi et al., 2017).

A modulação alvo adotada foi a de 256 QAM, a qual equivale a 8 bits/Hz, utilizando a lei da capacidade de Shannon (Equação 3.3), tal modulação corresponde a uma SNR maior ou igual a 24 dB. No sistema voltado ao ambiente *indoor* espera-se que haja proximidade entre os usuários e as antenas, possibilitando maior SNR. Dessa forma, modulações alvo com constelações superiores, como 256 QAM, podem ser melhor suportadas. Além disso, outra vantagem do uso de modulações superiores é o auxílio na eliminação de interferências com o sistema *outdoor*, uma vez que os sinais de rádio vindos do ambiente *outdoor* para o *indoor* dificilmente podem atingir altos níveis de SNR, devido as perdas relativas a travessia de paredes e obstáculos, estando limitados a modulações inferiores (LU et al., 2014).

A SNR em função da frequência é obtida a partir da metodologia apresentada em (ACATAUASSU et al., 2018), considerando ruído de fundo igual a -140 dBm, ruído de vazamento de banda igual a -122 dBm, assim como, perfil da função de transferência e os FEXTs obtidos do processo de simulação de canal apresentado em (SOUZA, 2018). Além disso, assim como em (ACATAUASSU et al., 2018) uma potência de entrada de -60 dBm é considerada. A Figura 36 apresenta a largura de banda útil de um par trançado de um cabo Cat5e nas configurações consideradas quando todos os pares são usados simultaneamente.

Figura 36 – Largura de banda útil de um par trançado em um cabo Cat5e considerando: modulação 256QAM, transmissão simultânea nos quatro pares e ruído de vazamento de banda.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta o restante das considerações adotadas para a determinação da taxa fornecida aos usuários pela transmissão analógica das portadoras agregadas. A banda da CC básica e de sua guarda lateral foram escolhidas de forma a representar uma configuração de sinal de rádio ao estilo da estabelecida pelo 3GPP (ETSI, 2018).

Tabela 2 – Parâmetros para transmissão analógica de portadoras ente RRUs e RRHs.

Parâmetro	Valor
B_{Port}	20 MHz
$B_{Guarda}^{Lateral}$	1 MHz
B_{Guarda}^{UpDown}	1 MHz

4.4 Considerações no *Fronthaul* Digital entre BBUs e RRUs

Este capítulo considera cinco alternativas de *fronthaul* digital: canal de fibra bidirecional de 10 Gbps (10 GFC), canal de fibra bidirecional de 32 Gbps (32 GFC), G.(*mg*)*fast* sobre cabo Cat5e, G.(*mg*)*fast* com modo de transmissão fantasma em uma camada (G.(*mg*)*fast*+F) sobre cabo Cat5e, e G.(*mg*)*fast* com modo de transmissão fantasma em duas camadas (G.(*mg*)*fast*+F+FF) sobre cabo Cat5e. Dessa forma, as duas primeiras são usadas na solução híbrida óptico-metálica e as três últimas na solução totalmente metálica.

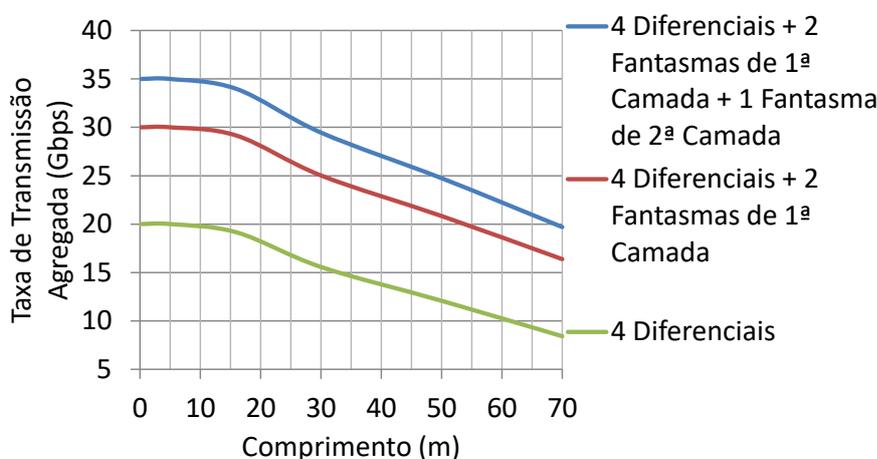
A taxa alcançada por enlaces ópticos é considerada como igual às da capacidade dos transceptores adotados, por exemplo, se um transceptor de 10 Gbps for usado, essa será a taxa de dados do enlace. Tal consideração torna a taxa da fibra independente do comprimento do enlace, o que não é um problema já que as distâncias entre os componentes instalados em ambiente *indoor* não são longas e consideram-se transceptores monomodo com alcance de 10 km.

As taxas alcançadas pelo G.(*mg*)*fast* são obtidas seguindo-se a metodologia de simulação de canal apresentada em (SOUZA, 2018) usando as recomendações do ITU-T para sistemas G.fast (ITU-T, 2014). A Tabela 3 apresenta os parâmetros considerados para o cálculo da taxa, das quais a largura de banda e a potência transmitida são extrapolações em relação ao G.*fast* para melhor representar o G.(*mg*)*fast*. A Figura 37 apresenta a taxa agregada de um sistema G.(*mg*)*fast* operando sobre um cabo Cat5e de quatro pares com os parâmetros da Tabela 3, para os três casos de uso considerados neste capítulo.

Tabela 3 – Parâmetros considerados para obtenção da taxa da tecnologia G.(*mg*)*fast*.

Parâmetro	Valor ou descrição
Modulação	Múltiplos Tons Discretos (DMT)
Largura de Banda	422 MHz
Espaçamento de tons	51,75 kHz
Gap de SNR	9,75 dB
Potência máxima	8 dBm
Densidade espectral de potência do Ruído gaussiano brando aditivo	-140 dBm/Hz

Figura 37 – Taxa agregada de um sistema G.(mg)fast operando sobre um cabo Cat5e com e sem modo fantasma.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para o transporte digital de CC (F_e) é considerado um fator de aumento da largura de banda igual a 2,5, estando dentro da faixa de 1,86 e 13, estabelecida no Capítulo 2, representando um sistema de transporte digital para portadoras com boa eficiência espectral, o qual tem sido o objetivo de novas tecnologias de transporte digital como modulação delta sigma ou eCPRI (WANG et al., 2017)(KLEIN, 2017).

4.5 Considerações do Cenário de Implantação e Seus Componentes

O cenário de implantação considerado é um edifício de 18 andares com 1936 m² por andar, tal configuração reproduz a média das características de edifícios com dez andares ou mais da cidade de Nova Iorque segundo a base de dados apresentada em (SKYSCRAPERPAGE,). A distância entre as RRHs foi considerada como 22 m, estando dentro das especificações estabelecidas em (VIEIRA, 2014). Dessa forma, considerando que uma sala pode ser atendida por uma RRH, havendo 4 RRHs por andar. Por fim, uma altura de 3 m por andar é considerada.

O sistema pode ser modelado pelo MDR considerando instalação totalmente *indoor* com a apenas um nível de distribuição de enlace por andar usando os parâmetros apresentados na Tabela 4, onde a densidade populacional é igual a 0,1 usuários/m² (VIEIRA, 2014).

Buscando extrair a maior largura de banda possível do *fronthaul* analógico um comprimento máximo de 48 m é considerado para os enlaces entre as RRUs e as RRHs. Além disso, é considerado que cada RRU pode se conectar a oito RRHs e cada BBU pode se conectar a seis RRUs, o que está dentro das especificações de sistemas CRA comerciais (ERICSSON, 2017)(HUAWEI, 2015).

Tabela 4 – Parâmetros do MDR considerados para um edifício mediano com mais de 10 andares em cenários urbanos densos.

Parâmetro do MDR	Valor
N_{Ed}	1
n_1	4
l_1	22 m
c_1	44 m
h	3 m
N_{And}	18
ρ_{Piso}	0,1 usuários/m ²

Seguindo os dados da Tabela 4, uma RRU pode atender dois andares simultaneamente, podendo estar localizada até oito andares de sua RRH mais distante. Dessa forma até quatro RRUs podem estar localizadas no mesmo andar atendendo até 8 andares. A Tabela 5 apresenta os parâmetros adotados no MDR para representar a distribuição de equipamentos descrita.

Tabela 5 – Parâmetros do MDR considerados para a distribuição de equipamentos em um edifício mediano com mais de 10 andares em cenários urbanos densos.

Parâmetro do MDR	Valor
$\beta_i, \forall i \equiv RRH$	1
$\beta_{i,k,z}, \forall i \equiv RRU$ e ($z = 1$ ou $z = 9$)	4
$\beta_{i,k,z}, \forall i \equiv RRU$ e $z = 17$	1
$\beta_{i,k,z}, \forall i \equiv BBU$ e $z = 1$	2

Para o *fronthaul* híbrido, cada BBU contém sete transceptores ópticos (seis para as RRUs e um para o CO) e cada RRU contém dois transceptores ópticos (um para BBU e outro para cascadeamento). Já para o *fronthaul* totalmente metálico todos os transceptores ópticos existentes no híbrido, com exceção do conectando ao CO, são substituídos por interfaces com portas RJ-45, com capacidade de operação sobre padrão G.(mg)fast. Tais considerações são importantes porque permitem uma fácil estimativa do preço e consumo de energia das BBUs e RRUs, a partir daqueles de transceptores ópticos, interfaces RJ-45 G.(mg)fast e dos equipamentos base. É importante ressaltar que no caso totalmente metálico, as interfaces RJ-45 G.(mg)fast nas RRUs são diferentes das portas RJ-45 destinadas à ligação de RRH, uma vez que as últimas estão presentes até mesmo no caso híbrido e transportam analogicamente as portadoras de rádio, sem utilizar mitigação de ruído e consequentemente o modo fantasma.

A Tabela 6 apresenta as fontes e formas de determinação das características básicas dos componentes na CRA analisada, incluindo preço, consumo de potência, taxas de falha, tempos de reparo e instalação. Os valores retirados das referências são estimativas a

partir de características de componentes semelhantes aos das soluções CRA consideradas neste capítulo. O preço dos transceptores ópticos é baseado no valor de mercado para os bidirecionais de operação monomodo (no comprimento de onda de 1310 nm) e alcance de 10 km. O preço dos cabos e fibras é baseado nos valores de mercado de um fornecedor de cabos de baixa tensão. As taxas de falhas de RRU, BBU e RRH são as de componentes equivalentes de um sistema de *small cells indoor* disponível comercialmente. O preço das interfaces RJ-45 transportando G.(mg)fast foi obtido a partir dos equipamentos do tipo DSLAM VDSL2 disponíveis no mercado, considerando-se um aumento de preço referente à introdução da tecnologia G.(mg)fast (igual ao aumento entre ADSL e VDSL) e que 50% do valor de um DSLAM está relacionado às interfaces de transmissão. A confiabilidade dos cabos e fibras é diretamente proporcional ao seu comprimento, em ambientes *indoor* as distâncias entre os equipamentos são muito menores que no *outdoor*, reduzindo o comprimento dos enlaces e tornando-os elementos de extrema confiabilidade e taxa de falha insignificante.

Tabela 6 – Fontes e formas de determinação das características operacionais básicas de componentes para CRAs óptico-metálicas ou totalmente metálicas com G.(mg)fast.

Equipamento	Preço	Consumo de potência	Taxa de falha	Tempo de reparo e instalação
Transceptor óptico de 10 Gb (SFP+)	a	d	-	-
Transceptor óptico de 32 Gb				
Interface RJ-45 suportando G.(mg).fast	b			
RRH	c	e	a	g
RRU				
BBU				
Cabo cat5e	a	-	f	
Fibra Óptica Duplex				

^aMercado ^bEstimativa ^c(TONINI et al., 2017) ^d(FARIAS, 2016)

^e(ERICSSON, 2017) ^fInsignificante ^g(Chen et al., 2010)

A Tabela 7 apresenta os valores considerados para os diversos parâmetros de equipamentos, incluindo preço, consumo de potência, taxas de falha, tempos de reparo e instalação. Todos os custos são representados em termos de uma UC (Unidade de Custo) baseada no valor de um transceptor óptico do tipo SFP+, assim como em (TONINI et al., 2017). A taxa de falha é definida em FIT (Failure In Time – Falha no Tempo), representado o número de falhas em um bilhão de horas. Destaca-se que a taxa de falha de 0,2/m FIT para os canais de enlace reflete a extrema confiabilidade desses, de forma que com tal valor um canal de enlace de 100 m terá um tempo médio entre falhas de 50

milhões de horas. Por fim, é importante ressaltar que o modelo do Capítulo 2 considera as possíveis falhas de enlaces como falhas de canais de enlaces.

Tabela 7 – Valores considerados para características operacionais básicas de componentes para CRAs óptico-metálicas ou totalmente metálicas com G.(mg)fast.

Equipamento	Preço (UC)	Consumo de Potência (W)	Tempo de Instalação (h)	Tempo de reparo (h)	Taxa de falha (FIT)
Transceptor óptico de 10 Gb (SFP+)	1	1,5	-	-	-
Transceptor óptico de 32 Gb	10,7	1,5	-	-	-
Interface RJ-45 suportando G.(mg)fast	0,73/canal	1,6 /canal	-	-	-
RRH	1,2	12	0,17	1	769,2
RRU	2,75	47,5	0,5	1	2857,1
BBU	8	101,5	0,5	1	3333,3
Fibra Óptica Duplex	9,2/km	-	-	7	0,2/m
Cabo Cat5e	2,9/km	-	-	1	0,2/m

O restante das considerações necessárias para o modelo de custos são dados na Tabela 8, tanto para instalação quanto para operação da rede. O custo da instalação de cabos metálicos é considerado como sendo igual ao preço de uma RRH, uma vez que esse é similar ao valor de mercado para a instalação de um ponto RJ-45 em uma edificação, já o de fibras é o dobro do de uma RRH, o que é feito para representar as maiores dificuldades na instalação desse tipo de enlace (necessidades de mão-de-obra especializada e ferramentas avançadas) como apontado em (LU et al., 2014). Os valores de multa por indisponibilidade de RRH com SLA rígido, o salário de equipes de reparo e o preço da energia elétrica têm como base os valores apresentados em (Chen et al., 2010). O aluguel de espaço adotado vem de (FARIAS, 2016).

4.6 Resultados

Esta seção apresenta os resultados do comparativo entre as soluções *fronthaul* para CRA com instalação totalmente *indoor* apresentadas na seção 4.1, levando em conta as considerações apresentadas nas seções 4.3 e 4.4, assim como o cenário de implantação estabelecido em 4.5.

Tabela 8 – Considerações adotadas para a modelagem de custos para CRAs *indoors* óptico-metálicas ou totalmente metálicas com $G.(mg)fast$.

Parâmetro	Valor
Instalação de cabo metálico <i>indoor</i>	1,2 UC
Instalação de fibra <i>indoor</i>	2,4 UC
Sal	2,3 UC/h
Número de tipos de SLA	1 (100% rígido)
P_{Rigido}^{PreFin}	1,2 UC/h
F_{Imp}	1
F_{Sub}	0,5
F_{Rec}	0,3
P_{kWh}	0,1x10 ⁻³ UC
P_{Atu}^{Ind}	3,4 UC/m ² /ano

4.6.1 Comparativo: Taxas de Transmissão Alcançadas

A Tabela 9 apresenta as taxas de transmissão de dados alcançadas para todas as alternativas *fronthaul* consideradas, mostrando a máxima taxa possível, a taxa atingida durante o pico de tráfego da rede, ou seja, a mínima taxa possível, e a distribuída entre todos os usuários da rede, considerando até mesmo aqueles inativos, a qual é usada para fins de previsão de demanda de tráfego. Observa-se que todas as alternativas possuem taxa máxima elevada, sendo as maiores $G.(mg)fast+F+FF$ e 32 GFC. Além disso, nota-se que mesmo no pico de tráfego da rede tanto $G.(mg)fast+F+FF$ quanto 32 GFC podem fornecer mais de 100 Mbps a cada usuário na rede, a qual espera-se ser a mínima taxa exigida por redes 5G a qualquer momento (ITU-T, 2015). Além disso, ao comparar a taxa de transmissão distribuída entre os usuários com a demanda de tráfego esperada para a próxima década, percebe-se que apenas a alternativa totalmente metálica com somente $G.(mg)fast$ não atende as demandas indicadas no METIS2020, uma vez que ela não consegue suportar a faixa de anos entre 2026 e 2028. Por fim, nenhuma das alternativas *fronthaul* consideradas podem suportar a demanda de tráfego em 2030, mas é importante considerar que a $G.(mg)fast+F+FF$ conseguiu até 2029, de forma que o perfil de banda de 424 MHz foi considerado para $G.(mg)fast$, se o perfil de banda de 848 MHz for adotado existem possibilidades reais de suporte a demanda de tráfego em 2030.

4.6.2 Comparativo: Custo Total Proprietário

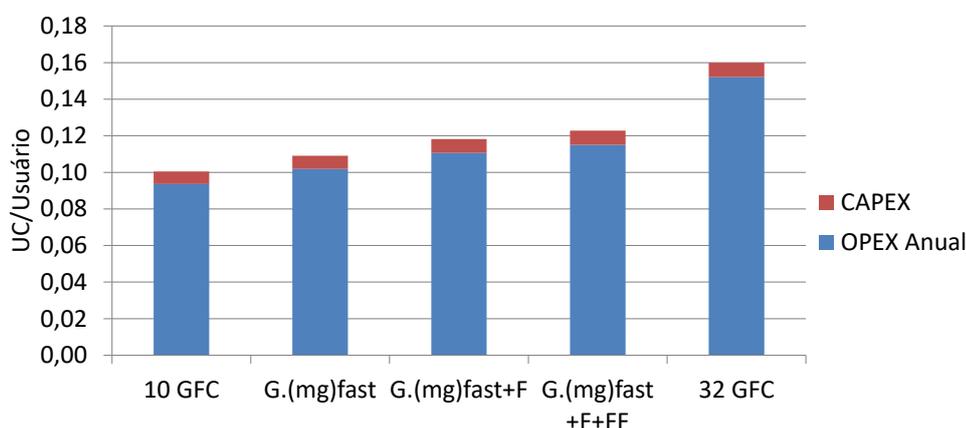
A Figura 38 apresenta o TCO do primeiro ano para todas as alternativas *fronthaul* consideradas, de foram que o CAPEX exibido é o total da rede e o OPEX é o referente a um ano de operação. É evidente que o *fronthaul* híbrido óptico metálico com 32 GFC é o mais custoso, considerando o valor de 0,16 UC/usuário, o que se deve principalmente ao maior CAPEX da 32GFC. Já a alternativa *fronthaul* mais barata é a utilização de híbrida com 10 GFC, considerando o valor de 0,1 UC/usuário. Em relação as alternativas de *fronthaul*

Tabela 9 – Taxas de transmissão de dados alcançadas para todas as alternativas *fronthaul* totalmente *indoor* consideradas: Máxima, Mínima (Atingida no pico) e Distribuída para o número total de usuários (usada para fins de previsão de tráfego).

Parâmetro	10 GFC	32 GFC	G.(mg)fast	G.(mg)fast +F	G.(mg)fast +F+FF
Taxa Máxima (Gbps)	4,176	6,912	3,888	5,904	6,912
Taxa no Pico de Tráfego (Gbps)	0,067	0,112	0,056	0,088	0,103
Taxa Distribuída entre Todos os Usuários (Gbps)	0,011	0,018	0,09	0,014	0,017
Suporte a Demanda de Dados	2026 a 2028	2027 a 2029	2025 a 2027	2026 a 2028	2027 a 2029

totalmente metálico baseadas em G.(mg)fast, foram encontrados custos intermediários entre os dois casos de solução híbrida. O G.(mg)fast com duas camadas do modo fantasma é particularmente interessante porque pode permitir taxas de transmissão similares a 32 GFC, custando quase 0,04 UC/usuário a menos.

Figura 38 – TCO de primeiro ano para todas as alternativas *fronthaul* consideradas no Capítulo 4.



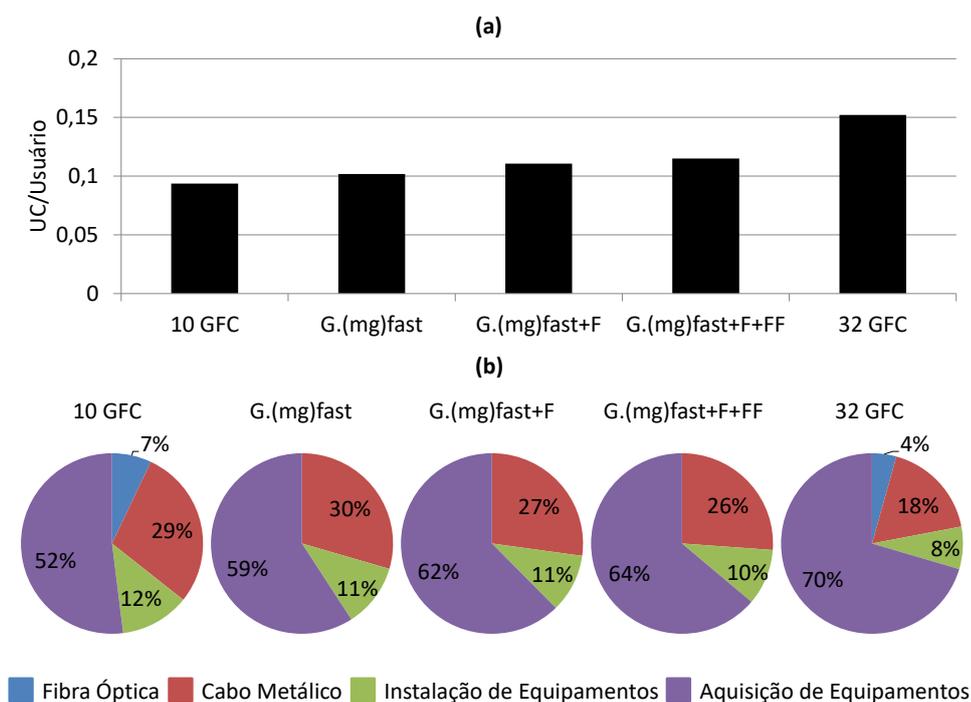
Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.3 Comparativo: Custo de Instalação da Rede

A Figura 39 apresenta uma análise detalhada do CAPEX para todas as alternativas *fronthaul* consideradas, mostrando tanto (a) valores totais quanto (b) a composição de cada custo formador do CAPEX. As alternativas com maior e menor CAPEX foram, respectivamente, as híbridas com 32 GFC e 10 GFC, o que ocorre devido aos preços

dos transceptores ópticos nos equipamentos destas alternativas, que são bem maiores no caso de 32 GFC. De fato, o custo com aquisição de equipamentos cresce de 52% para 70% de participação no CAPEX entre 10 GFC e 32 GFC. No caso das alternativas com *G.(mg)fast* o CAPEX é ligeiramente superior ao caso híbrido com 10 GFC e maior para o uso do modo fantasma, novamente devido ao custo de equipamentos, uma vez que não há interface de transmissão padronizada para esse caso e que custo de equipamentos de transmissão DSL escala com o número de canais transmitidos. De fato, dependendo do uso do modo fantasma, a participação custo com aquisição de equipamentos no CAPEX possui um crescimento de 7% a 12% em relação ao caso híbrido com 10 GFC. Outro resultado interessante é a participação do custo de cabos metálicos no CAPEX, que indica que alternativas totalmente metálicas podem ter mais de um quarto do seu custo descontado se a infraestrutura de cabos legada do edifício for reutilizada (cenário *Brownfield*).

Figura 39 – CAPEX detalhado para todas as alternativas *fronthaul* consideradas no Capítulo 4:(a) valor do CAPEX, (b) composição do CAPEX.



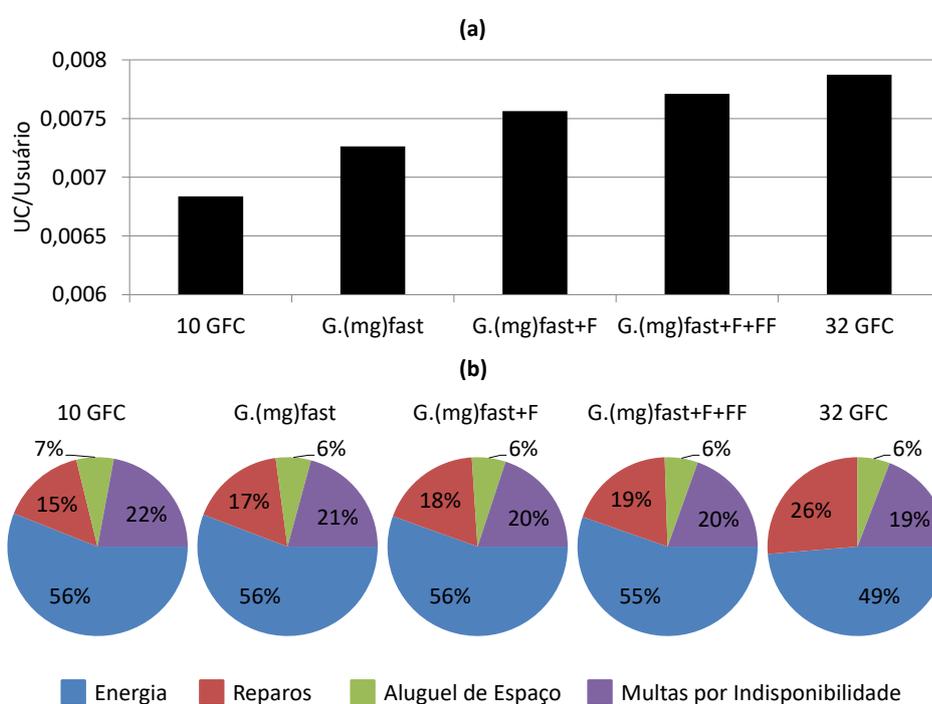
Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.4 Comparativo: Custo de Operação da Rede

A Figura 40 apresenta uma análise detalhada do OPEX anual para todas as alternativas *fronthaul* consideradas, mostrando tanto (a) valores totais quanto (b) a composição de cada custo formador do OPEX. Assim como no CAPEX, o valor do OPEX cresce consecutivamente entre 10 GFC, *G.(mg)fast*, *G.(mg)fast+F*, *G.(mg)fast+F+FF* e 32 GFC. Tal característica tem origem nos custos de reparo, uma vez que os equipamentos

com modo fantasma e transceptores ópticos de 32 Gbps são mais caros, resultando em maiores custos no caso de um reparo necessário. Observa-se que entre 10 GFC e 32 GFC o custo de reparo cresceu de 15% para 26% de participação no OPEX. Além disso, a análise de composição revela que os custos com energia elétrica são os maiores contribuintes do OPEX, sendo responsável por cerca da metade valor total, outro resultado interessante é que cerca de um quinto do OPEX é relacionado a multas por indisponibilidade, o que é um valor baixo considerando-se que o cenário analisado é rígido em termos de disponibilidade, com multas para a indisponibilidade de serviço de qualquer usuário.

Figura 40 – OPEX detalhado para todas as alternativas *fronthaul* consideradas no Capítulo 4:(a) valor do OPEX, (b) composição do OPEX.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.5 Balanço Técnico-Econômico

A melhor solução dentre as alternativas *fronthaul* consideradas é aquela que garanta o atendimento das demandas dos usuários com o menor custo possível. Nesse contexto, se o suporte as demandas for representado pela taxa alcançável, a simples razão entre custo total e taxa no pico de tráfego pode ser um bom indicador de comparação para a análise. No entanto, também é preciso considerar as taxas e custos individualmente, uma vez que a razão pode esconder deficiências da solução analisada, por exemplo, uma alternativa com custo muito elevado e uma taxa extremamente alta pode acabar tendo uma razão de valor baixo e ser identificada como viável.

A Tabela 10 apresenta um balanço técnico-econômico fazendo a comparação das alternativas *fronthaul* consideradas em termos de custos, taxa alcançável, razão custo/taxa e disponibilidade. Para cada valor na tabela uma classificação qualitativa é indicada por meio de uma cor, isto é, azul se o valor for bom, laranja se for mediano e vermelho se for ruim. Os custos são representados pelo TCO para uma operação de 5 anos tanto no caso de instalação totalmente nova (*Greenfield*) quanto no caso *Brownfield*, o custo do caso híbrido com 10 GFC em implantação *Brownfield* é usado para classificar o restante dos custos, se maiores em 25% são bons, se entre 25% e 50% são medianos, se maiores em mais que 50% são ruins. A taxa representada é alcançável no pico de tráfego, sendo considerada boa se igual ou maior a 100 Mbps e ruim para outros casos. A disponibilidade do sistema é elevada para todas as alternativas analisadas e é sempre considerada boa. A razão custo/taxa foi classificada de forma que as três menores são boas, as 4 intermediárias são medianas e as três maiores são ruins.

Tabela 10 – Balanço técnico-econômico das alternativas *fronthaul* consideradas no Capítulo 4.

Parâmetro	10 GFC	32 GFC	G. (mg)fast	G. (mg)fast +F	G. (mg)fast +F+FF
TCO 5 anos <i>Greenfield</i> (UC/Us.)	0,128	0,191	0,138	0,148	0,154
TCO 5 anos <i>Brownfield</i> (UC/Us.)	0,101	0,165	0,108	0,118	0,124
Taxa no pico de tráfego (Gbps)	0,067	0,112	0,056	0,088	0,103
Razão entre custo e taxa <i>Greenfield</i> 5 anos (UC/Us./Gbps)	1,908	1,709	2,467	1,687	1,491
Razão entre custo e taxa <i>Greenfield</i> 5 anos (UC/Us./Gbps)	1,507	1,470	1,930	1,345	1,199
Disponibilidade	Maior que 0,99999	Maior que 0,99999	Maior que 0,99999	Maior que 0,99999	Maior que 0,99999

Os resultados da classificação na Tabela 10 indicam que a alternativa *fronthaul* mais viável é a totalmente metálica com G. (mg)fast+F+FF, sendo a única que não possui métricas classificadas como ruins, em seguida a totalmente metálica com G. (mg)fast+F

parece mais viável, no entanto é importante considerar que apesar de conseguir suportar o volume de tráfego esperado pelos METIS2020, esta alternativa pode não atender o mínimo de 100 Mbps a qualquer momento esperado para o 5G, o que é atendido pela CRA híbrida com 32 GFC, a qual no geral é a terceira alternativa mais viável. O *fronthaul* CRA menos viável é o totalmente metálico com G.(mg)fast sem modo fantasma, que possui taxas bem inferiores as outras alternativas. Além disso, ressalta-se que de forma geral a razão custo taxa seguiu a ordem de viabilidade descrita anteriormente, mesmo sendo apenas uma métrica simplificada. Por fim, a tabela indica que cenários do tipo *Brownfield* possuem menores custos e maior viabilidade, especialmente nos casos totalmente metálicos com modo fantasma, onde a redução de custos em 5 anos chega a cerca de 20%.

4.7 Análises de Sensibilidade

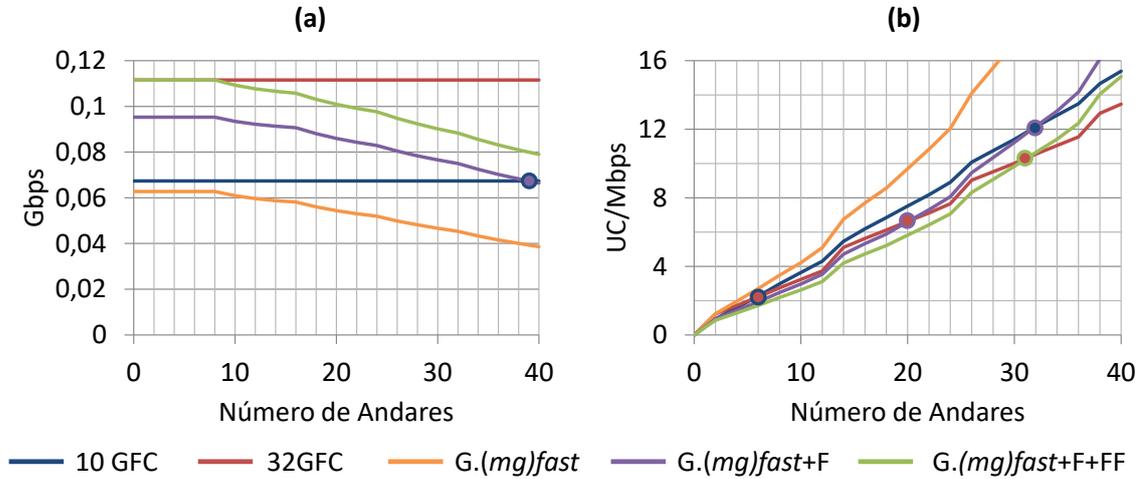
Os resultados até então focaram num cenário fixo com 18 andares e 1936 m², o qual representa a média de edifícios de 10 andares ou mais numa região urbana densa, mostrando que o uso de *fronthaul* totalmente metálico pode ser uma boa alternativa para uma CRA totalmente *indoor*. No entanto, é importante avaliar as soluções em outros cenários, uma vez que o próprio ambiente urbano é variável e contém edifícios das mais diversas dimensões. Nesse contexto, esta seção apresenta quatro análises de sensibilidade variando o cenário apresentado na seção 4.5. Seja nas características construtivas do cenário, como número de andares e área por piso, ou na configuração de operação da CRA, como número de RRHs por piso e cascadeamento de RRUs.

4.7.1 Variação do Número de Andares

A Figura 41 apresenta uma análise de sensibilidade variando-se o número de andares no cenário apresentado na Seção 4.5 entre 1 e 40. São apresentados (a) a taxa de dados atingida no pico de tráfego e (b) a razão custo/taxa para um TCO de 5 anos *Greenfield*. Os pontos de inflexão são representados por círculos, de forma que a cor da borda é a curva que ficará acima com o aumento da variável do eixo horizontal, já a cor do centro do círculo é a curva que ficará abaixo.

Na Figura 41 (a) nota-se que as taxas atingidas no pico de tráfego das alternativas *fronthaul* híbridas óptico-metálicas são independentes do número de andares, o que ocorre devido ao alcance dos transceptores ópticos ser de 10 km, já as taxas das alternativas totalmente metálicas decaem de acordo com as perdas dos cabos. Apenas as alternativas com 32 GFC e G.(mg)fast+F+FF atingem 100 Mbps no pico de tráfego, de forma que a última atende tal requisito apenas para edifícios até 21 andares. Na Tabela 9 é mostrado que a alternativa híbrida com 10 GFC consegue suportar volume tráfego previsto entre 2026 e 2028, sendo esses os anos onde a Seção 4.2 assume a ocorrência das demandas

Figura 41 – Análise de sensibilidade variando-se o número de andares no cenário apresentado na Seção 4.5 entre 1 e 40: (a) taxa de dados atingida no pico de tráfego, (b) razão custo/taxa para um TCO de 5 anos *Greenfield*.



Fonte: elaborado pelo autor.

previstas para o 5G pelo METIS2020. Dessa forma a taxa da alternativa híbrida com 10 GFC acaba sendo uma boa métrica para a determinação da quantidade de andares na qual as alternativas totalmente metálicas podem suportar as demandas previstas para o 5G. Nesse contexto, a demanda de tráfego prevista para o 5G pelo METIS2020 pode ser suportada pelas alternativas híbridas totalmente metálicas com modo fantasma até 39 andares para G.(mg)fast+F e 52 andares para G.(mg)fast+F+FF, se o comportamento da curva for mantido no último caso. Tais resultados implicam que para edifícios com maior número de andares, fibras ópticas se tornam a melhor alternativa em termos de taxa, mesmo para o caso de 10 GFC, mas que o caso totalmente metálico pode atender a maioria absoluta de edifícios num ambiente urbano denso como o da ilha de Manhattan na cidade de Nova Iorque. Por fim, se 100 Mbps no pico de tráfego for um requisito estritamente necessário e o edifício tenha mais de 21 andares, apenas a alternativa híbrida com 32 GFC pode ser considerada.

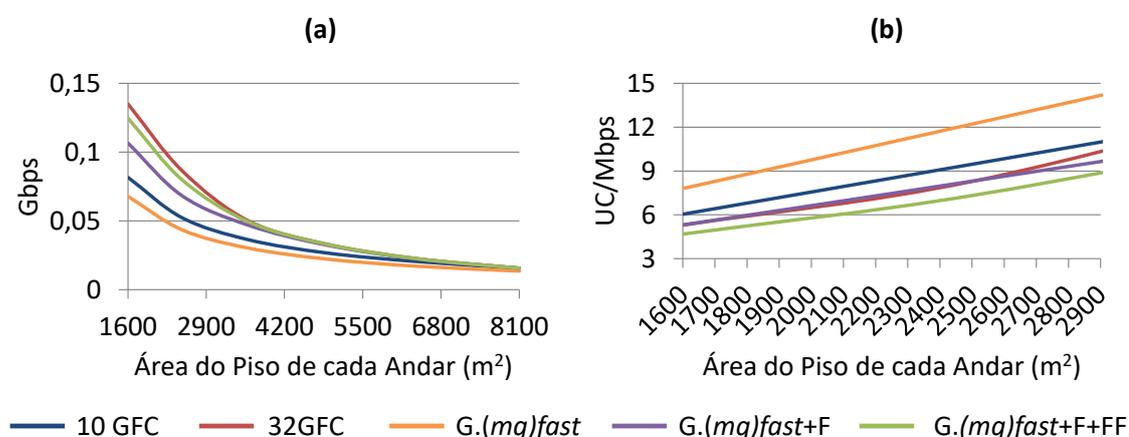
Na Figura 41 (b) nota-se a presença de vários pontos de inflexão, os quais representam o número de andares onde as arquiteturas híbridas se tornam mais viáveis que as totalmente metálicas, considerando o custo por taxa como única métrica de viabilidade. Observa-se que em cenários até 6 andares, todas as alternativas possuem grau de viabilidade semelhante, com exceção da totalmente metálica sem modo fantasma. Já no caso de edificações de tamanho intermediário, entre 7 e 31 andares, a viabilidade entre as tecnologias se torna mais distinguível, com a alternativa totalmente metálica G.(mg)fast+F+FF sendo a mais viável. Para edifícios maiores que 31 andares a alternativa híbrida com 32 GFC se torna a mais viável, mas se uma abordagem com menores custos que ainda consiga suportar as demandas do METIS2020 para 5G for desejada é importante ressaltar que

a alternativa híbrida com 10 GFC se torna mais viável que a totalmente metálica com $G.(mg)fast+F+FF$ a partir de 41 andares (com a tendência das curvas mantidas). Por fim é importante ressaltar que para mais de 40 andares, mesmo que outras métricas além do custo por taxa sejam consideradas (como as apresentadas na Tabela 10), as alternativas com 32 GFC ou 10 GFC são as mais viáveis.

4.7.2 Variação da Área dos Pisos

A Figura 42 apresenta uma análise de sensibilidade variando-se a área dos pisos no edifício do cenário apresentado na seção 4.5 entre 1600 m^2 e 8100 m^2 , onde o primeiro caso representa um edifício comercial modesto e segundo caso representa edificações mais largas, capazes de cobrir blocos urbanos inteiros, como, por exemplo, o edifício 111 *Eighth Avenue* na cidade de Nova Iorque. São apresentados (a) a taxa de dados atingida no pico de tráfego e (b) a razão custo/taxa para um TCO de 5 anos *Greenfield*.

Figura 42 – Análise de sensibilidade variando-se a área dos pisos no edifício do cenário apresentado na Seção 4.5: (a) taxa de dados atingida no pico de tráfego, com variação entre 1600 m^2 e 8100 m^2 , (b) razão custo/taxa para um TCO de 5 anos *Greenfield*, com variação entre 1600 m^2 e 2900 m^2 .



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 42 (a) nota-se que o aumento da área do piso diminui a taxa alcançável no pico de tráfego por um comportamento exponencial decrescente, o que ocorre devido ao perfil de redução da largura de banda útil do *fronthaul* analógico com o crescimento de enlaces advindo na cobertura de maiores áreas. A partir disso é possível observar que em áreas a partir de 5500 m^2 o *fronthaul* analógico se torna o fator limitante da taxa, que passa a ser independente da tecnologia usada no *fronthaul* digital. Uma forma de contornar tal problema é adotar mais de um nível de distribuição de enlaces por andar, diminuindo efetivamente o comprimento dos enlaces no *fronthaul* analógico. Dessa forma, sabendo que em 1936 m^2 de área por piso a alternativa híbrida com 10 GFC, com taxa mínima de 67 Mbps, consegue atender demanda esperada pelo METIS2020 para o 5G,

que devem se concretizar entre 2026 e 2028, pode-se estimar que as alternativas metálicas com G.(mg)fast+F, metálica com G.(mg)fast+F+FF e híbrida com 32GFC atendem sem pontos de distribuição adicionais áreas de até, respectivamente, 2400 m², 2750 m² e 2900 m². Por fim se o requisito de 100 Mbps a qualquer momento for estritamente necessário, a alternativa híbrida com 10 GFC não é mais uma opção e as alternativas metálica com G.(mg)fast+F, metálica com G.(mg)fast+F+FF e híbrida com 32GFC podem atender sem pontos de distribuição adicionais áreas de até, respectivamente, 1700 m², 2100 m² e 2200 m².

Na Figura 42 (b) as análises limitaram-se até máxima área onde ao menos uma das tecnologias *fronthaul* consideradas suporte, com apenas um ponto de distribuição, as demandas esperadas para o 5G pelo METIS2020, indo até 2900 m². O menor custo por taxa é sempre atingido pela alternativa totalmente metálicas G.(mg)fast+F+FF, indicando que esta alternativa seria a mais viável para todos as áreas consideradas. No entanto, isto é uma realidade apenas até 2750 m² de área por piso, uma vez que G.(mg)fast+F+FF consegue suportar o volume de tráfego apontado pelo METIS2020 para o 5G apenas até esta área. A partir de 2750 m² de área por piso a provável alternativa mais viável é a híbrida com 32GFC, a qual possui razão custo taxa similar a metálica com G.(mg)fast+F até 2500 m², se tornando mais cara após essa marca, o que ocorre devido as limitações do *fronthaul* analógico cobrindo grandes áreas que diminuem a razão custo taxa de alternativas de *fronthaul* digital mais em conta.

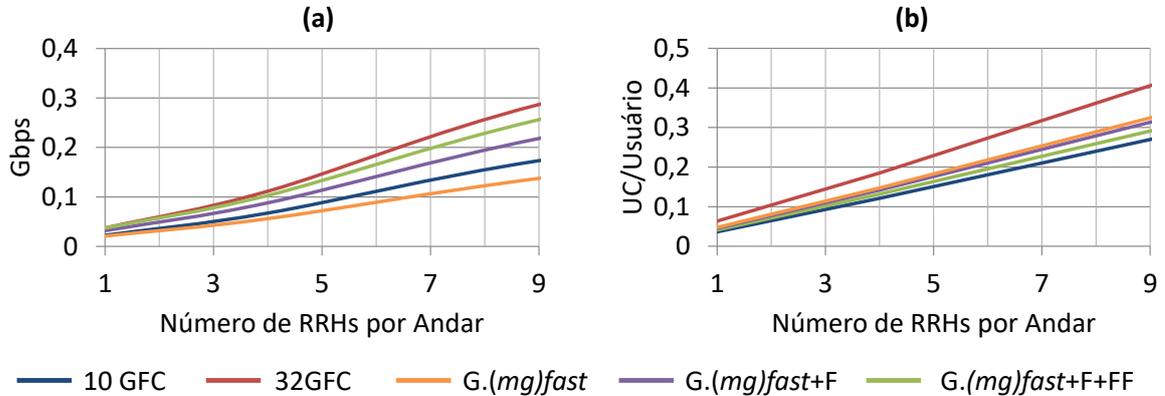
4.7.3 Variação do Número de RRHs por Andar

A Figura 43 apresenta uma análise de sensibilidade variando-se o número de RRHs por andar no cenário apresentado na seção 4.5 entre 1 e 9. São apresentados (a) a taxa atingida pelos usuários no pico de tráfego e (b) o TCO de 5 anos para *Greenfield*.

Na Figura 43 (a) observa-se que as taxas no pico de tráfego aumentam com RRHs por andar, devido ao menor número de usuários por RRH. Assim, uma forma interessante de interpretar os resultados é verificar quantas RRHs por andar são necessárias para atender os requisitos do 5G para os diferentes tipos de *fronthaul* considerados, sabendo que a alternativa híbrida com 10 GFC com 4 RRHs por andar pode atender minimamente o volume de tráfego esperado pelo METIS2020 para o 5G, que deve se concretizar entre 2026 e 2028, é possível estimar que as alternativas totalmente metálicas com G.(mg)fast+F e G.(mg)fast+F+FF, assim como híbrida com 32 GFC, necessitam de apenas 3 RRHs por andar para suportar as demandas, já a totalmente metálica sem modo fantasma necessita de 5 RRHs por andar para suportar as demandas.

Os resultados da Figura 43 (a) implicam em maior viabilidade para as alternativas com fornecimento de maior taxa, uma vez que o custo das alternativas cresce de forma linear com o aumento do número de RRHs por andar, como exibido pela Figura 43

Figura 43 – Análise de sensibilidade variando-se o número de RRHs por andar no cenário apresentado na seção 4.5 entre 1 e 9: (a) taxa de dados atingida no pico de tráfego, (b) TCO de 5 anos para *Greenfield*.



Fonte: elaborado pelo autor.

(b). Por exemplo, numa análise rápida da ilustração, a alternativa híbrida com 10 GFC parece ser sempre aquela que fornece menor custo, mas é importante considerar que ela necessita de 4 RRHs por andar para suportar as demandas de volume de tráfego do 5G, de forma que as metálicas com G.(mg)fast+F e G.(mg)fast+F+FF necessitam de apenas 3 RRHs por andar, no final, se o objetivo for apenas atender as demandas, G.(mg)fast+F e G.(mg)fast+F+FF gastam 0,03 UC/Usuário a menos que 10 GFC, se tornando mais viáveis. Se o requisito de 100 Mbps a qualquer momento for estritamente necessário o número de RRHs por andar será 4, 4, 5, 6 e 7 para, respectivamente, 32 GFC, G.(mg)fast+F+FF, G.(mg)fast+F, 10 GFC e G.(mg)fast, de forma que as consequências serão as mesmas do caso de somente suportar o volume de tráfego.

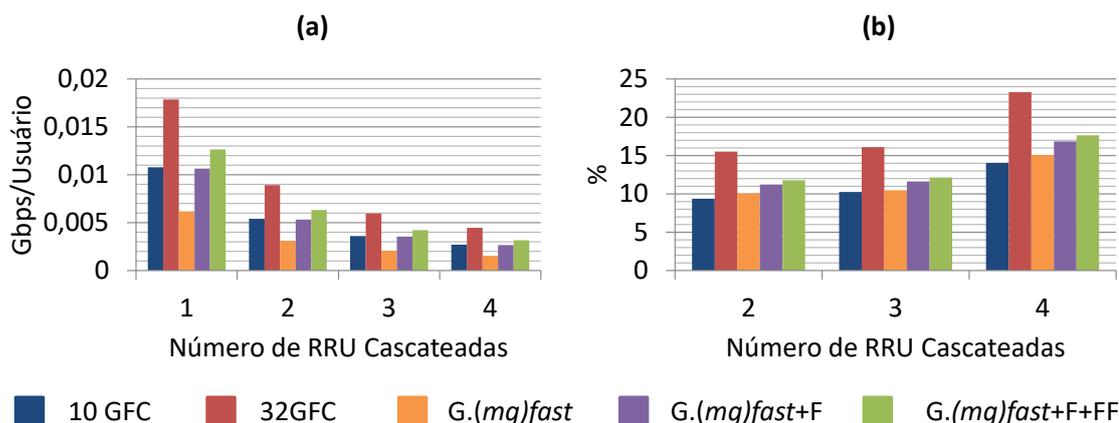
4.7.4 Cascadeamento de RRUs

O cascadeamento de RRUs pode permitir a instalação de CRA de maneira escalável com a capacidade. Uma instalação inicial pode considerar quatro RRUs cascadeadas, possuindo menor capacidade e custos reduzidos em comparação ao caso sem cascadeamento, mas com o passar dos anos e com o aumento da demanda de tráfego, o cascadeamento vai sendo desfeito para prover mais capacidade ao custo da instalação de novas BBUs e enlaces de *fronthaul* digital, mas sem necessitar de novas RRUs ou enlaces de *fronthaul* analógico.

Os efeitos do cascadeamento são mais evidentes em cenários com maior número de RRUs, uma vez que esse será o equipamento que terá seu número variado com os níveis de cascadeamento. Nesse contexto, a Figura 44 apresenta uma análise de sensibilidade aplicando-se o cascadeamento de RRUs em um edifício de 40 andares e com o restante

dos parâmetros como os adotados na seção 4.5, resultando numa configuração com 20 RRUs. São apresentados (a) a taxa de dados fornecida distribuída por todos os usuários e (b) a porcentagem representando a redução do CAPEX em comparação com o caso sem cascadeamento.

Figura 44 – Análise de sensibilidade aplicando-se o cascadeamento de RRUs em um edifício de 40 andares e com o restante dos parâmetros como os adotados na seção 4.5: (a) taxa de dados fornecida distribuído por todos os usuários ativos ou inativos, (b) redução do CAPEX em comparação com o caso sem cascadeamento.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados na Figura 44 (a) associados a expectativa de tráfego para a próxima década, indicam que o cascadeamento de quatro RRUs poderia suportar a demanda de tráfego entre 2023 e 2025 dependendo da tecnologia de *fronthaul* considerada, o que segundo os resultados da Figura 44 (b) poderia ocorrer com um CAPEX de 14% a 23% menor. Dessa forma, prova-se que o cascadeamento de RRUs pode reduzir significativamente os custos de instalação inicial e possibilitar o atendimento da demanda de tráfego de curto a médio prazo. Além disso, quando for necessário (demanda de tráfego superar a capacidade da rede) gastos adicionais para a separação das RRU podem expandir a vida útil da rede, quando o nível sem cascadeamento for atingido, o CAPEX de um instalação sem cascadeamento também terá sido atingido, mas distribuído ao longo dos anos. Nesse contexto, a atratividade da implantação inicial de CRAs é aumentada pelo cascadeamento, principalmente para a alternativa *fronthaul* híbrida com 32 GFC.

4.8 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado um comparativo entre diferentes tecnologias para *fronthaul* de CRAs implantadas totalmente no ambiente *indoor*. As alternativas comparadas incluíram *fronthaul* híbrido óptico-metálico, com fibras ópticas, cabos Cat5e e transceptores ópticos bidirecionais de 10 ou 32 Gbps, assim como *fronthaul* totalmente

metálico com a tecnologia DSL G.(mg)fast, apenas com cabos Cat5e, com e sem modo de transmissão fantasma, seja com uma ou duas camadas. Todas as comparações tiveram como base a taxa de transmissão alcançada e o TCO de cada tecnologia, os quais foram obtidos por meio dos modelos apresentados no Capítulo 2.

No que diz respeito as taxas atingidas por cada tecnologia conclui-se que para o edifício mediano de múltiplos andares em cenários urbanos densos, *fronthaul* híbrido óptico-metálico com transceptores de 32 Gbps e totalmente metálico com padrão G.(mg)fast com duas camadas do modo fantasma atendem melhor os requisitos para futuras redes 5G, atingindo taxa de dados máxima de quase 7 Gbps e garantindo ao menos 100 Mbps a qualquer momento. No entanto, análises de sensibilidade mostraram que a alternativa totalmente metálica deixa de atingir tais requisitos para edifícios grandes, com mais de 21 andares. Além disso, outras análises indicam que se área coberta pelo conjunto de enlaces entre as RRUs e RRHs for muito grande todas as tecnologias passam a possuir taxas similares a alcançada pela híbrida com transceptores de 10 Gbps. Por fim conclui-se que as taxas atingidas em cenários usando cascadeamento de quatro RRUs podem suportar a demanda de dados até 4,4 Mbps por usuário ou 7,92 Mbps/m² no cenário considerado, o que equivale ao ano de 2025 na previsão de tráfego apresentada. Tais resultados favorecem a ideia de uma implantação inicial cascadeada migrando para uma sem cascadeamento com o crescimento da demanda de dados.

Em termos de custo, conclui-se que os maiores CAPEX e OPEX foram atingidos pelo *fronthaul* híbrido óptico-metálico com transceptores de 32 Gbps e os menores com o uso de transceptores de 10 Gbps, o que ocorre principalmente devido ao impacto dos preços dos equipamentos no custos de aquisição e reparo da rede. Ademais, as alternativas totalmente metálicas atingiram valores de custos entre as duas tecnologias híbridas consideradas, com aquelas usando o modo fantasma sendo ligeiramente mais caras.

Em termos de comparação da viabilidade das tecnologias *fronthaul* consideradas, conclui-se que a utilização do padrão G.(mg)fast associado ao modo fantasma pode ser a alternativa mais viável de CRAs para o edifício mediano de múltiplos andares em cenários urbanos densos, principalmente para o caso com duas camadas da transmissão fantasma. No entanto, análises de sensibilidade mostraram que nos casos de edifícios com grande área de piso (mais de 5600 m²) ou elevado número de andares (mais de 29) as alternativas híbridas podem ser mais viáveis que as metálicas.

5 Caso de Estudo: *Backhaul* PON Protegido para CRAs Totalmente *Indoor* em Cenários Urbanos Densos

O uso de CRAs pode ajudar a garantir o atendimento das demandas dessa sociedade que está a cada dia se tornando mais digitalizada. Atualmente, soluções CRAs comerciais de implantação totalmente *indoor* já estão disponíveis e são apontadas como boas alternativas no fornecimento de acesso móvel de qualidade e alta capacidade de transmissão em cenários compostos por edifícios de médio a grande porte. Embora as CRAs tenham a capacidade de atender as elevadas taxas esperadas para os ambientes totalmente *indoor*, estas podem sofrer limitações causadas pela infraestrutura *backhaul*, a qual pode agir como gargalo para o sistema, de forma que é de fundamental importância adotar um *backhaul* que consiga atender as demandas de tráfego previstas para as edificação que contenham CRAs implantadas. Neste contexto, redes de acesso baseadas em fibra óptica são conhecidas por fornecer elevada capacidade de tráfego e dentre elas as PONs são consideradas excelentes soluções para o acesso, já que possuem custos reduzidos em comparação a outras arquiteturas de fibra, devido ao compartilhamento de enlaces e equipamentos entre os usuários, assim como pelo uso de componentes não consumidores de energia elétrica. As vantagens do uso de PONs ficam ainda mais evidentes em cenários urbanos densos, onde a construção de infraestrutura é custosa e o compartilhamento de enlaces pode possibilitar grandes economias. No entanto, tal compartilhamento torna a rede menos confiável, uma vez que muitos usuários são ligados aos mesmos componentes, o que pode gerar elevadas multas por indisponibilidade, pois no contexto do 5G a falta de serviço pode gerar danos irreversíveis, como elevado prejuízo financeiro ou até mesmo a perda de vidas. Dessa forma, para suportar as demandas de disponibilidade e confiabilidade esperadas para o 5G pode ser necessária à implantação de esquemas de proteção responsáveis em garantir continuidade de serviço em caso de falhas de componentes na rede.

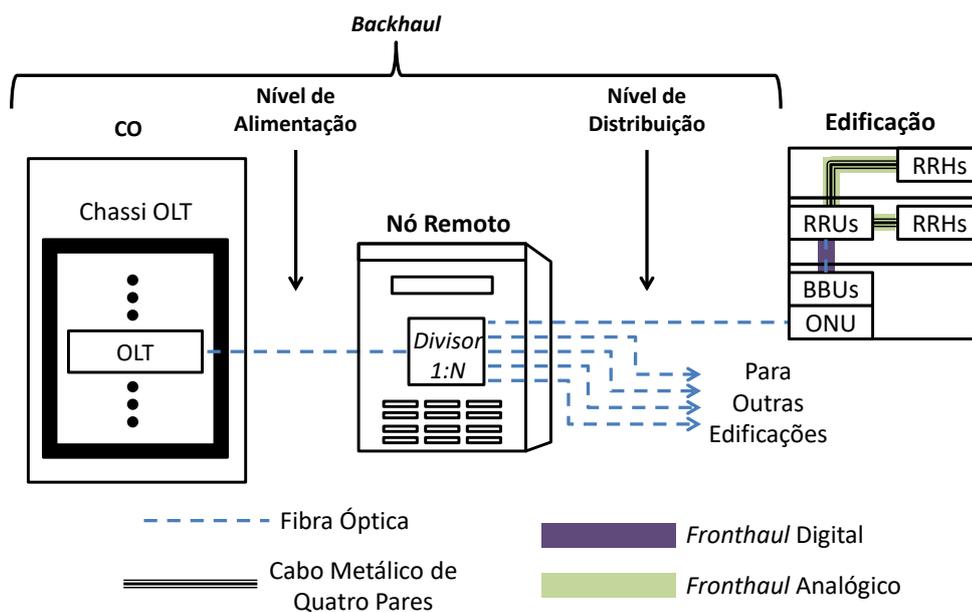
Este capítulo apresenta um estudo técnico-econômico comparativo de PONs agindo como *backhaul* de CRAs implantadas totalmente no ambiente *indoor* em um cenário urbano de altíssima densidade, considerando três padrões e quatro alternativas de topologias para proteção. Os padrões incluem: 40G-PON, WDM-PON de 1 Gbps e WDM-PON de 10 Gbps. As topologias em termos de proteção incluem básica (desprotegida), protegida no NA (Nível de Alimentação), protegida no NA e no OLT (*Optical Line Terminal* – Terminal

de Linha Óptica), protegida no OLT e em ambos os níveis (alimentação e distribuição).

5.1 Arquitetura Analisada

A Figura 45 apresenta a arquitetura básica analisada, cada edifício contém uma CRA totalmente *indoor* híbrida óptico-metálica, que age como *fronthaul* móvel, com cabos metálicos de quatro pares fazendo a ligação analógica ente as RRHs e RRUs, assim como fibras ópticas fazendo a conexão digital entre BBUs e RRUs, de forma que o conjunto resultante de BBUs está ligado a uma ONU, a qual faz parte de uma PON, que age como *backhaul* móvel. A PON é composta por dois níveis de enlaces ópticos, alimentação e distribuição. O primeiro faz a ligação entre as OLTs e os divisores de sinal, que podem ser *power splitter* ou AWG dependendo-se do padrão PON considerado. O segundo faz a ligação entre os divisores e as ONUs. As OLTs são localizadas no CO e os divisores de sinais em nós remotos nos armários de rua.

Figura 45 – Arquitetura de acesso móvel básica analisada no Capítulo 5.



Fonte: elaborado pelo autor.

As considerações relacionadas a capacidade dos enlaces da CRA totalmente *indoor* são as mesmas adotadas no Capítulo 4 para a alternativa *fronthaul* híbrida óptico-metálica com 10 GFC, vide Seções 4.3 e 4.4. As considerações para as capacidades dos enlaces das PON são dependentes dos padrões considerados, os quais são apresentados na Seção 5.2.

5.2 Padrões PON Considerados

A Tabela 11 apresenta os padrões PON comparados nas análises, assim como as suas características de operação. A 40G-PON é proposta pelo ITU-T como a solução PON de próxima geração, sendo um sistema de acesso múltiplo híbrido com WDM e TDM, que se aproveita da expansão de capacidade fornecida por WDM e da maturidade tecnológica do TDM, a G-PON tradicional usa TDM para acesso múltiplo e dois comprimentos de onda para fazer transmissão bidirecional, na 40G-PON a capacidade foi expandida agregando-se quatro 10G-PON e usando WDM (ITU-T, 2013). A WDM-PON é geralmente abordada como uma outra solução PON de próxima geração (MAHLOO et al., 2013), sua grande vantagem é a garantia da largura de banda aos usuários, uma vez que cada um deles recebe comprimento de onda único e exclusivo, este capítulo aborda dois casos de WDM-PON, de forma que cada comprimento de onda fornece 1 Gbps ou 10 Gbps em cada caso. Uma vez que não há padronização para WDM-PON os dados na Tabela 11 são de uma comparação técnica entre conceitos para sistemas de acesso óptico de próxima geração do projeto OASE (*Optical Access Seamless Evolution – Evolução Sem Limites de Acesso Óptico*) (OASE, 2011).

Tabela 11 – Padrões PON analisados como alternativa *backhaul*.

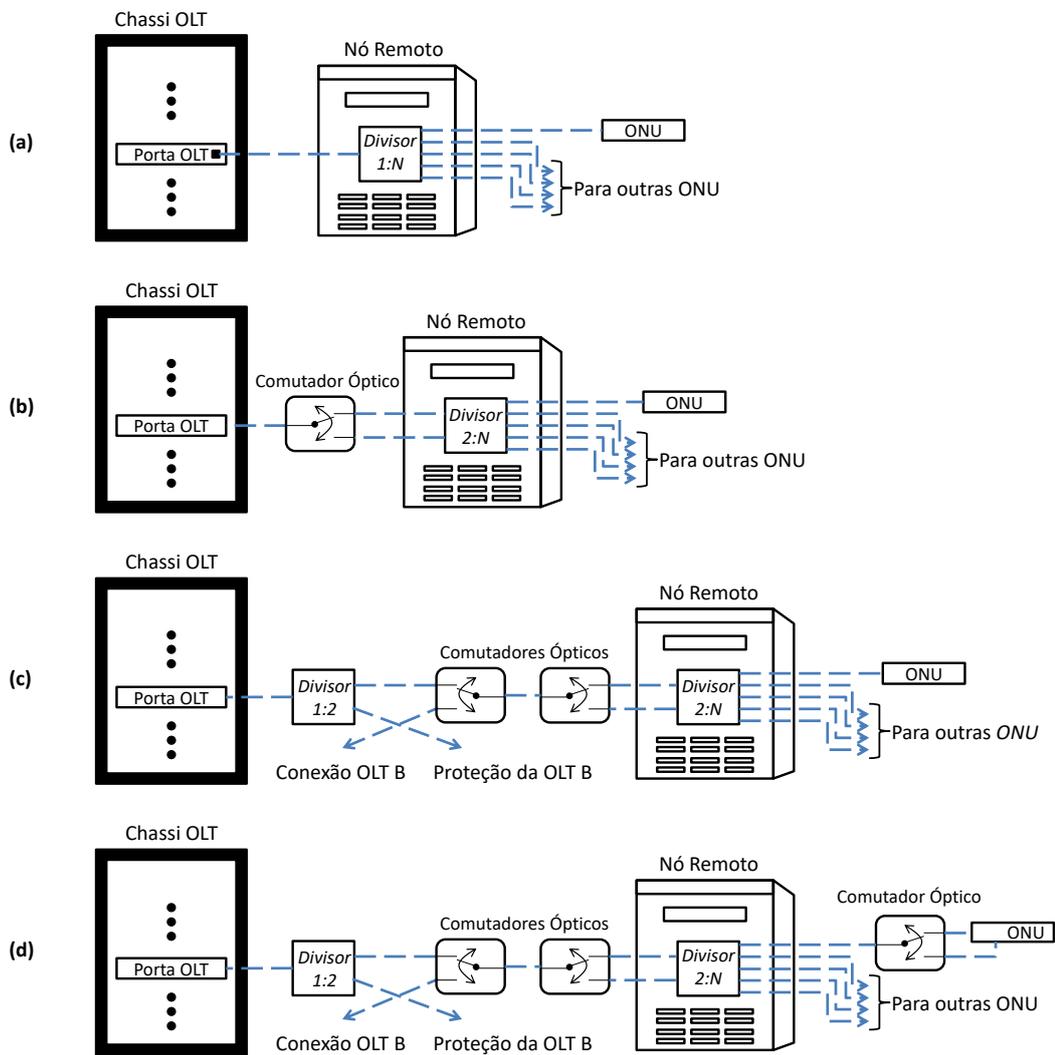
Padrão	40G-PON	WDM-PON (1 Gbps)	WDM-PON (10 Gbps)
Taxa Máxima Agregada (<i>Downstream + Upstream</i>)	80 Gbps	1 Gbps	10Gbps
Taxa de Divisão Limite	1:64	1:80	1:80
Tipo de Divisor	<i>Power Splitter</i>	AWG	AWG
Alcance	20 km	31 km	31 km
Padronização	ITU-T G.989	-	-
Acesso Múltiplo	WDM e TDM	WDM	WDM
Transmissão óptica	Fibra Monomodo 4 λ de 10 Gbps + 4 λ de 10 Gbps	Fibra Monomodo Até 80 λ de 1 Gbps	Fibra Monomodo Até 80 λ de 10 Gbps
Taxa Simétrica Média Garantida	1,25 Gbps (1:32) 0,625 Gbps (1:64)	0,5 Gbps	5 Gbps

5.3 Topologias de Proteção para PON Consideradas

São adotadas quatro topologias de proteção para o *backhaul* PON, as quais são ilustradas na Figura 46 por (a), (b), (c) e (d). A primeira é a PON básica, sem qualquer

tipo de proteção. A segunda é uma proteção do tipo duplicação seletiva sobre os enlaces do NA, a qual ocorre por meio de um comutador óptico. A terceira mantém a proteção do NA e faz uma ligação cruzada entre OLTs usando divisores com taxa de divisão 1:2 e comutadores ópticos, configurando uma proteção das OLTs por sobrecarga temporária. A última mantém as proteções do nível de alimentação e OLTs e faz proteção do tipo duplicação seletiva nos enlaces do ND (Nível de Distribuição), o que ocorre por meio de um comutador óptico .

Figura 46 – Topologias de Proteção consideradas para o *backhaul* PON:(a) desprotegida, (b) proteção do nível de alimentação, (c) proteção do nível de alimentação e OLT, (d) proteção em ambos os níveis de enlace e no OLT.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.4 Considerações do Cenário de Implantação e seus Componentes

O cenário de implantação considerado é uma região urbana de alta densidade populacional com 10 mil edificações, o que é uma boa aproximação do número de premissas atendidas por um CO (ANALYSYS MASON, 2010). A distância entre edificações é considerada como 42 m, estando dentro das médias de áreas urbanas e suburbanas nos Estados Unidos (WELDON; ZANE, 2003). Cada edificação é considerada possuir oito andares e ocupa uma área de 900 m² no cenário, representando médias dentro da região de Manhattan na cidade de Nova Iorque segundo dados da plataforma OSM (*Open Street Maps* – Mapas de Ruas Abertas) e (KIRTNER; ANDERSSON, 1998), a qual representa um bom cenário de alta densidade. O ambiente *outdoor* é representado por dois níveis de enlaces para modelar corretamente as PONs, já o *indoor* contém apenas um nível de enlace por andar, suportando quatro salas. Nesse contexto, o cenário pode ser modelado pelo MDR considerando os parâmetros apresentados na Tabela 12, onde a densidade populacional é a da região de Manhattan na cidade de Nova Iorque durante o horário comercial (MOSS; QING, 2012).

Tabela 12 – Parâmetros do MDR considerados para o cenário urbano de alta densidade adotado nas análises do Capítulo 5.

Parâmetro do MDR	Valor
N_1	10
L_1	0,042 km
B_1	0,012 km
C_1	0,408 km
N_2	10
L_2	0,042 km
B_2	0,012 km
C_2	4,188 km
n_1	4
l_1	0,015 km
c_1	0,03 km
h	3 m
N_{And}	8
ρ	67682 pessoas/km ²

Para o *fronthaul*, é considerado uma RRH por sala, oito RRHs por RRU e até seis RRUs por BBU, de forma que uma RRU atende dois andares simultaneamente e o comprimento máximo do enlace entre RRHs e RRUs é 48 m. A Tabela 13 apresenta os parâmetros adotados no MDR para descrever tal distribuição equipamentos.

Para o *backhaul*, é considerado uma ONU por edifício, 20 portas por Chassi OLT, 10 divisores por nó remoto, taxa de divisão de 1:32 para 40G-PON e 1:40 para WDM-PON, cabos com 4 fibras ópticas no nível de alimentação e com uma fibra óptica no nível

Tabela 13 – Parâmetro do MDR considerados para a distribuição de equipamentos no *fronthaul indoor* do cenário urbano de alta densidade do Capítulo 5.

Parâmetro do MDR	Valor
$\beta_i, \forall i \equiv RRH$	1
$\beta_{i,k,z}, \forall i \equiv RRU$ e $z = 1$	4
$\beta_{i,k,z}, \forall i \equiv BBU$ e $z = 1$	1

de distribuição. A determinação dos parâmetros do MDR para modelar o *backhaul* é mais complexa que a do *fronthaul*, o que ocorre devido a presença de mais tipos de equipamentos e sistemas para proteção, a Tabela 14 apresenta as formulas para cálculo dos parâmetros. É importante ressaltar que alguns equipamentos na Tabela 14 são específicos de proteção, isto é, não sendo modelados em casos desprotegidos.

Os parâmetros relacionados a operação e instalação de cada tipo de equipamentos são apresentados na Tabela 15. Os valores adotados para RRHs, RRU, BBUs e o restante dos componentes do *fronthaul indoor* para uma implantação híbrida óptico-metálica com 10 GFC são apresentados na Tabela 7 no Capítulo 4. O custo dos equipamentos no *backhaul outdoor* para as portas OLTs ou ONUs em 40 G-PON e WDM-PON de 1 Gbps advém de (MAHLOO et al., 2013), para ONUs e OLTs em WDM-PON de 10 Gbps são estimados por meios daqueles de 1 Gbps usando o modelo apresentado em (CZEKUS et al., 2014) e para o restante dos equipamentos advém de (Chen et al., 2010). Os outros parâmetros dos equipamentos do *backhaul* vem de (Chen et al., 2010) e (OASE, 2011). Por fim, o custo com cabos metálicos de quatro pares usados no ambiente *indoor* é nulo, uma vez que a reutilização de infraestrutura legada é considerada.

O restante das considerações necessárias para o modelo de custos são dados na Tabela 16, tanto para instalação quanto para operação da rede. O custo de construção dos dutos subterrâneos no ambiente *outdoor* e o da instalação dos cabos nesses vem de (AFONSO, 2013). Os SLAs são classificados como residenciais ou comerciais, com o último sendo 10 vezes mais exigente em termos de multas. O número de edifícios comerciais é considerado como 63%, o que se baseia na proporção entre a população de trabalho e residente na região de Manhattan na cidade do Nova Iorque (MOSS; QING, 2012). A multa por indisponibilidade em edifícios com SLA comercial, o salário de equipes de reparo e o preço da energia elétrica têm como base os valores apresentados em (Chen et al., 2010). O aluguel de espaço adotado e a taxa de permanência no ambiente *indoor* vêm de, respectivamente, (FARIAS, 2016) e (ERICSSON, 2015).

Tabela 14 – Fórmulas para cálculo dos parâmetro do MDR para a distribuição de equipamentos no *backhaul outdoor* do cenário urbano de alta densidade do Capítulo 5.

Parâmetro do MDR	Valor
$\beta_i, \forall i \equiv ONU$	1
$\zeta_K, \forall K = 1$	1
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (Power Splitter \text{ ou } AWG)$ e $K = 1$	$\lceil (N_1)^2 \times (\text{Taxa de Divisão}) \rceil$
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (Chassi de Nó Remoto)$ e $K = 1$	$\left\lceil \frac{\lceil (N_1)^2 \times (\text{Taxa de Divisão}) \rceil}{10} \right\rceil$
$\zeta_K, \forall K = 2$	$\left\lceil \frac{\lceil (N_1)^2 \times (\text{Taxa de Divisão}) \rceil}{4} \right\rceil$
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (\text{Porta OLT})$ e $K = 2$	$\lceil (N_1)^2 \times (\text{Taxa de Divisão}) \rceil \times (N_2)^2$
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (\text{Chassi OLT})$ e $K = 2$	$\left\lceil \frac{\lceil (N_1)^2 \times (\text{Taxa de Divisão}) \rceil \times (N_2)^2}{20} \right\rceil$
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (\text{Comutador de Proteção da Alimentação})$ e $K = 2$	$\lceil (N_1)^2 \times (\text{Taxa de Divisão}) \rceil \times (N_2)^2$
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (\text{Porta OLT Extra})$ e $K = 2$	$\frac{\beta_{(\text{Chassi OLT}),2}}{2} \times 20 - \beta_{(\text{Porta OLT}),2}$
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (\text{Comutador de Proteção da OLT})$ e $K = 2$	$\lceil (N_1)^2 \times (\text{Taxa de Divisão}) \rceil \times (N_2)^2$
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (\text{Divisor de Proteção da OLT})$ e $K = 2$	$\beta_{(\text{Porta OLT}),2}$ $- \beta_{(\text{Porta OLT Extra}),2}$
$\beta_{i,K},$ $\forall i \equiv (\text{Comutador de Proteção da Distribuição})$ e $K = 1$	$(N_1)^2 \times (N_2)^2$

5.5 Resultados

Esta seção apresenta os resultados do comparativo entre as alternativas *backhaul* PON aplicadas a arquitetura da Seção 5.1, considerando os padrões e topologias de proteção apresentados, respectivamente, nas Seções 5.2 e 5.3, suportando vários edifícios com CRAs híbridas óptico-metálicas totalmente *indoor* agindo como *fronthaul*, levando em consideração o cenário de implantação e parâmetros estabelecidos em 5.4. O texto e todas as ilustrações apresentadas consideram a topologia desprotegida como (a) e as de protegidas como (b), (c) e (d), da mesma forma que na representação da Figura 46.

Tabela 15 – Características básicas dos componentes na CRA totalmente *indoor*.

Equipamento	Preço (UC)	Consumo de potência (W)	Tempo de instalação (h)	Tempo de Reparo (h)	Taxa de Falha (FIT)
RRH	1,2	12	1	1	769,2
RRU	3,75	49	1,5	1	2857,1
BBU	24,7	112	1,5	1	3333,3
Fibra Óptica Duplex (<i>Indoor</i>)	9,2/km	-	-	7	0,2/m
Cabo Cat5e Duplex (<i>Indoor</i>)	-	-	-	1	0,2/m
Porta OLT (40G-PON)	82,4	186,6	0,17	1	1075
Porta OLT (WDM-PON) (1 Gbps)	99,8	192	0,17	1	1075
Porta OLT (WDM-PON) (10 Gbps)	315,5	312	0,17	1	1075
Comutador Óptico AWG	0,6	-	0,17	2	200
	0,9/Porta	-	0,17	1	200
<i>Power Splitter</i>	0,6/Porta	-	0,17	1	120
ONU (40G-PON)	2	5,5	1	1	256
ONU (WDM-PON) (1 Gbps)	1,6	5,6	1	1	256
ONU (WDM-PON) (10 Gbps)	5,2	7,1	1	1	256
Fibra Óptica Simplex (<i>Outdoor</i>)	4,6/km	-	-	7	2380/km
Cabo com Quatro Fibras Ópticas (<i>Outdoor</i>)	10,9/km	-	-	7	2380/km

5.5.1 Comparativo: Taxas de Transmissão Alcançadas

A Tabela 17 apresenta as taxas de transmissão de dados alcançadas pelos usuários no ambiente *indoor* para as três alternativas de padrão para o *backhaul* PON consideradas, considerando *fronthaul* CRA híbrido óptico-metálico totalmente *indoor*. São apresentados: a máxima taxa possível, a taxa atingida durante o pico de tráfego da rede e a distribuída entre todos os usuários da rede (ativos ou inativos). Observa-se que 40G-PON e WDM-PON de 10 Gbps podem fornecer uma taxa máxima elevada, a qual é limitada pelas capacidades no *fronthaul*. Além disso, nota-se que mesmo no pico de tráfego da rede tanto 40G-PON quanto WDM-PON de 10 Gbps podem fornecer mais de 100 Mbps a cada usuário na rede, a qual espera-se ser a mínima taxa alcançada por redes 5G a qualquer

Tabela 16 – Considerações do modelo de custos para CRA totalmente *indoor*.

Parâmetro	Valor
Instalação de Fibra <i>Indoor</i>	2,4 UC
Instalação de Duto Subterrâneo <i>Outdoor</i>	1529 UC/km
Instalação de Cabo <i>Outdoor</i>	13 UC/km
Número de tipos de SLA	2 (63% Comercial)
$P_{Residencial}^{PreFin}$	1,41 UC/h
$P_{Comercial}^{PreFin}$	14,1 UC/h
Sal	2 UC/h
Pr_{kWh}	0,1x10 ⁻³ UC
Pr_{Alu}^{Ind}	3,4 UC/m ² /ano
Pr_{Alu}^{Out}	2,9 UC/m ² /ano
γ_{Indoor}	0,7
F_{Imp}	1
F_{Sub}	0,5
F_{Rec}	0,3

momento (ITU-T, 2015). É interessante destacar que embora a 40G-PON possa atingir a mesma taxa máxima que a WDM-PON de 10 Gbps, ela não atinge a mesma taxa no pico de tráfego, uma vez que WDM-PON fornece um comprimento de onda dedicado a cada edifício. Em relação a WDM-PON de 1 Gbps, as taxas atingidas são baixas, indicando que o atendimento do cenário de alta densidade necessita que cada comprimento de onda transporte mais que 1 Gbps para atendimento eficaz da demanda de tráfego. Por fim, ao comparar a taxa de transmissão distribuída entre os usuários com a demanda de tráfego esperada para a próxima década, a qual é apresentada na Figura 35 no Capítulo 4, percebe-se que as alternativas *backhaul* consideradas podem provavelmente suportar a demanda de tráfego até a faixa de anos indicada na Tabela 17.

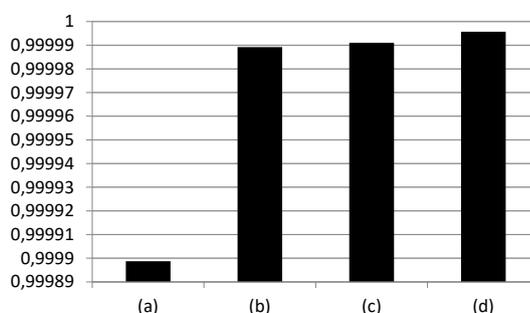
Tabela 17 – Taxas de transmissão de dados alcançadas para todas as alternativas *backhaul* consideradas para suporte ao *fronthaul* totalmente *indoor* no cenário do no Capítulo 5.

Parâmetro	40-GPON	WDM-PON (1 Gbps)	WDM-PON (10 Gbps)
Taxa Máxima (Gbps)	4,176	0,5	4,176
Taxa no Pico de Tráfego (Gbps)	0,102	0,041	0,409
Taxa Diluída entre Todos os Usuários no Ambiente <i>Indoor</i> (Gbps)	0,016	0,007	0,065
Suporte a Demanda de Dados	2026 a 2029	2024 a 2026	2029 a 2030+

5.5.2 Comparativo: Disponibilidade Alcançada

A Figura 47 apresenta a disponibilidade atingida na arquitetura de acesso móvel considerada para todas as topologias de proteção aplicadas ao *backhaul* PON abordadas neste capítulo. Nota-se que o caso sem proteção, (a), sequer consegue atingir disponibilidade faixa de 99,99 %, não sendo confiável. Já para as topologias com proteção, (b), (c) e (d), uma disponibilidade ao redor de 99,999 % é atingida, melhor atendendo os requisitos do 5G (METIS2020, 2013), especialmente para o caso das topologias (c) e (d).

Figura 47 – Disponibilidade para *fronthaul* totalmente *indoor* híbrido óptico-metálico e vários padrões de *backhaul* PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.

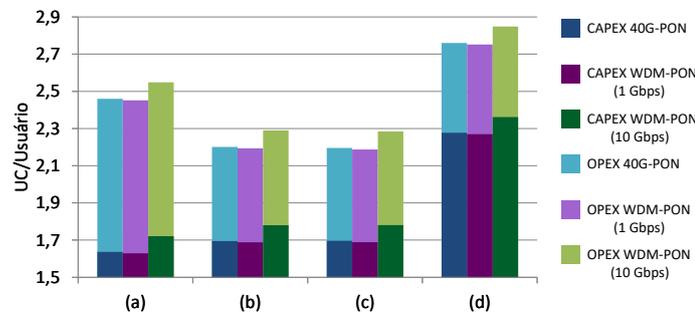


Fonte: elaborado pelo autor.

5.5.3 Comparativo: Custo Total Proprietário

A Figura 48 apresenta o TCO da arquitetura de acesso móvel considerada para cinco anos de operação, mostrando todos os casos de padrões e topologias de proteção aplicados ao *backhaul* PON abordados neste capítulo. É evidente que a topologia (d) é mais custosa, possuindo despesas totais acima de 2,7 UC/Usuário, as quais são superiores as do caso desprotegido. No entanto, as outras topologias de proteção abordadas resultaram em gastos reduzidos em comparação ao caso desprotegido, com a (c) atingindo a menor despesa total por pequena margem em relação a (b). Tais resultados provam que arquiteturas de proteção podem aumentar a viabilidade econômica de redes PON como *backhaul* de redes móveis voltadas ao ambiente *indoor* em cenários de alta densidade, com exceção daquelas que realizam duplicação do ND. Além disso, nota-se que dentre padrões PONs considerados WDM-PON 10 Gbps atinge a maior despesa total, sempre acima das outras por cerca de 0,1 UC/Usuário. Em relação aos custos individuais de CAPEX e OPEX, observa-se que o primeiro domina sobre o último na composição do TCO, sendo tal domínio maior nas topologias protegidas, especialmente no caso da (d).

Figura 48 – TCO de cinco anos para *fronthaul* totalmente *indoor* híbrido óptico-metálico e vários padrões de *backhaul* PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.



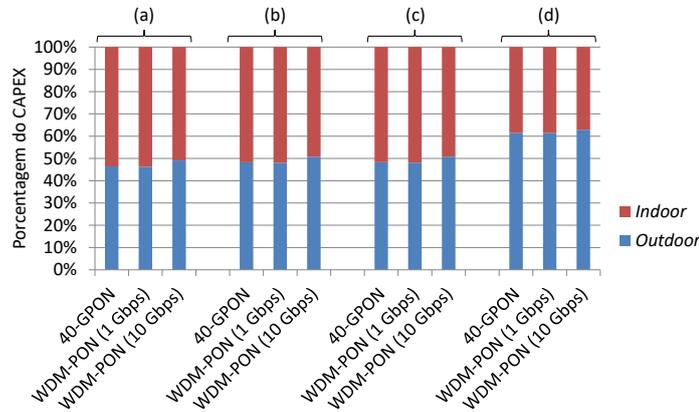
Fonte: elaborado pelo autor.

5.5.4 Comparativo: Custo de Instalação da Rede

A Figura 49 apresenta o quanto do CAPEX em termos de porcentagem ocorre nos ambientes *indoor* e *outdoor*, e conseqüente no *fronthaul* e *backhaul* da arquitetura analisada, para todos os padrões e topologias considerados. A proporção do que é gasto *indoor* e *outdoor* em termos de CAPEX é relativamente igual no caso da topologia desprotegida (a), com a porcentagem *indoor* sendo ligeiramente maior. No caso das topologias contendo proteção, (b) e (c) também possuem mais gastos no ambiente *outdoor* que (a), mas mantém a proporção de gastos *indoor-outdoor* equilibrada, já (d) claramente possui seu CAPEX mais relacionado ao ambiente *outdoor*. Tais resultados apontam que a instalação de proteção no *backhaul* do cenário considerado não causa grandes aumentos no CAPEX relacionado ao ambiente *outdoor*, desde que o nível de distribuição não seja duplicado. Além disso, fica claro que a proporção dos gastos no *backhaul* ainda é relevante em relação aos do *fronthaul*, mesmo com o grande conjunto de equipamentos (BBUs, RRUs e RRHs) e enlaces (fibras ópticas) que devem ser instalados no ambiente *indoor* para o último.

A Figura 50 detalha a participação, em porcentagem, dos diversos custos que compõem o CAPEX relacionado ao ambiente *outdoor*, incluindo custo de fibras ópticas (representando custos de construção dos dutos, de compra e instalação das fibras), assim como compra e instalação de equipamentos, para todos os padrões e topologias considerados. Observa-se que o custo com fibras é o de maior importância no CAPEX *outdoor* e que esse tem sua participação aumentada em cenários com duplicação de fibra, o que pode explicar o aumento de CAPEX para as análises de custo total, especialmente no caso com duplicação no nível de distribuição. Outro resultado interessante é a participação de aquisição de equipamentos, a qual é maior no padrão WDM-PON de 10 Gbps e menor WDM-PON de 1 Gbps, a primeira vista o último resultado pode parecer anormal, uma

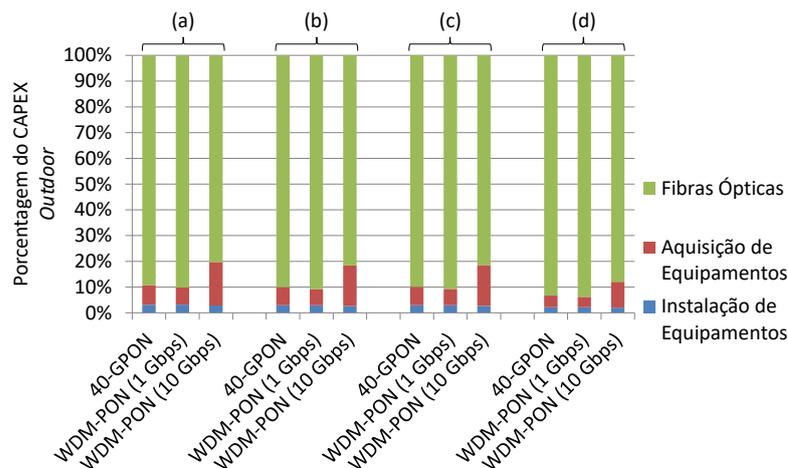
Figura 49 – Proporção de CAPEX referente ao ambiente *indoor* e *outdoor* para *fronthaul* totalmente *indoor* híbrido óptico-metálico e vários padrões de *backhaul* PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.



Fonte: elaborado pelo autor.

vez que o preço de OLTs para 40G-PON é considerado como menor em comparação aos para WDM-PON de 1 Gbps, mas o fato da última possuir uma maior taxa de divisão que a primeira modifica o número de OLTs e compensa os preços, dando a WDM-PON de 1 Gbps o menor custo de aquisição.

Figura 50 – Composição do CAPEX referente ao ambiente *outdoor* para vários padrões de *backhaul outdoor* PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.

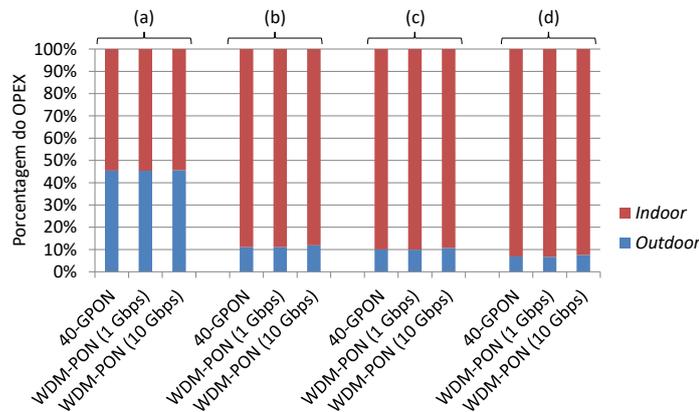


Fonte: elaborado pelo autor.

5.5.5 Comparativo: Custo de Operação da Rede

A Figura 51 apresenta o quanto do OPEX em termos de porcentagem ocorre nos ambientes *indoor* e *outdoor*, e consequente no *fronthaul* e *backhaul* da arquitetura analisada, para todos os padrões e topologias considerados. Nota-se que para a topologia (a) os gastos no ambiente *indoor* são dominantes por pequena margem, de forma que conforme a rede vai sendo protegida de forma incremental, pelas topologias (b), (c) e (d), o OPEX passa a ser quase totalmente dependente do ambiente *indoor*. Tais resultados apontam que a instalação de proteção no *backhaul* do cenário considerado podem causar grandes reduções no OPEX relacionado ao ambiente *outdoor*, como no caso da proteção do NA. No entanto é importante ressaltar que a redução causada por proteger o ND ou as OLTs é baixa, de forma que a viabilidade econômica de tais alternativas só pode ser garantida para baixos custos de instalação, o que é o caso para OLT, mas não para o ND.

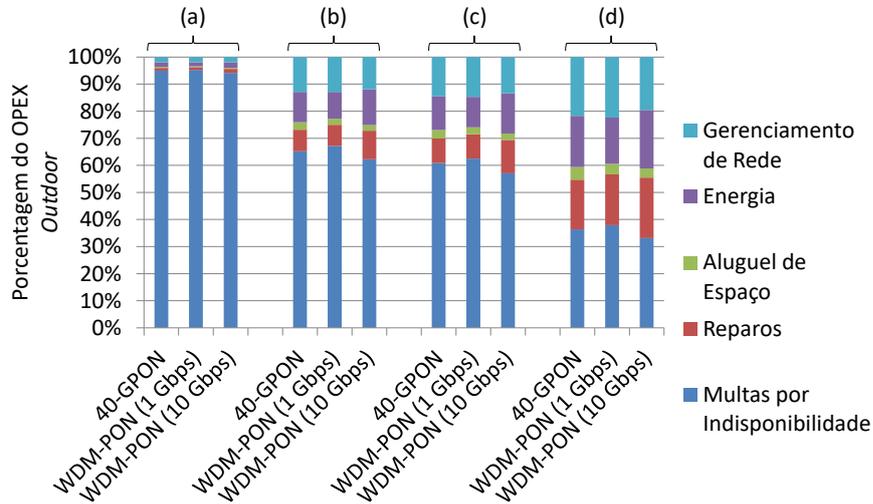
Figura 51 – Proporção do OPEX referente ao ambiente *indoor* e *outdoor* para *fronthaul* totalmente *indoor* híbrido óptico-metálico e vários padrões de *backhaul* PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 52 detalha a participação, em porcentagem, das diversas despesas que compõem o OPEX relacionado ao ambiente *outdoor* para todos os padrões e topologias considerados, incluindo multas por penalidades, reparos, aluguel de espaço, energia elétrica e gerenciamento da rede. Observa-se que as multas por indisponibilidade são o fator de maior importância no OPEX *outdoor*, compondo praticamente o OPEX total do caso desprotegido, o que ocorre devido ao grande número de clientes comerciais e suas pesadas multas por indisponibilidade. Conforme a rede é protegida de forma incremental, pelas topologias (b), (c) e (d), a porcentagem relativa às multas reduz, o que explica as menores participações do OPEX *outdoor* na Figura 51 e a redução das despesas de operação totais. Em relação aos padrões PON é possível notar que os gastos de reparo e energia são ligeiramente maiores na WDM com 10 Gbps, o que ocorre devido aos maiores

Figura 52 – Composição do OPEX referente ao ambiente *outdoor* para vários padrões de *backhaul outdoor* PON em cenário urbano de alta densidade, considerando quatro topologias em termos de proteção: (a) desprotegida, (b) com NA duplicado, (c) com NA duplicado e OLT cruzado, (d) com os dois níveis duplicados (NA e ND) e OLT cruzado.



Fonte: elaborado pelo autor.

preços (impactando num possível reparo por substituição) e consumo de potência dos equipamentos.

5.6 Análises de Sensibilidade

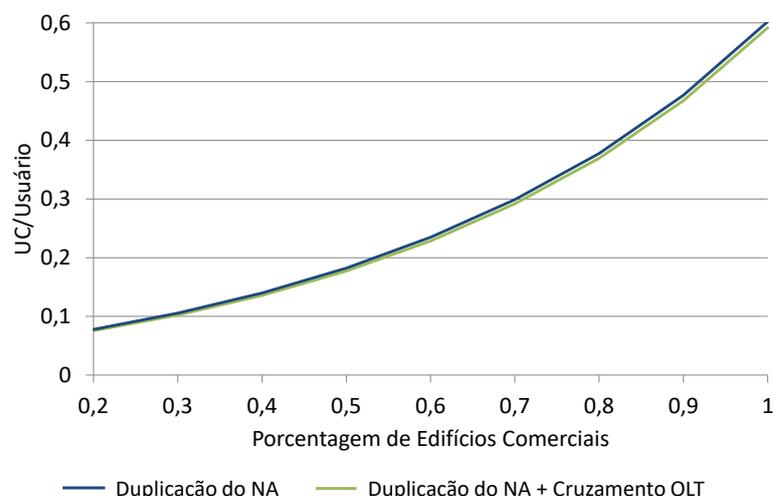
Essa seção apresenta os efeitos causados pela variação de alguns dos parâmetros utilizados na modelagem de custos das topologias de proteção abordadas neste capítulo sobre TCO da rede, focando especificamente em parâmetros que tem grande influência sobre o CAPEX e OPEX. As variações realizadas por ordem de apresentação são: porcentagem de edifícios comerciais, custo de instalação dos dutos de fibra, e taxa de penetração da rede.

5.6.1 Variação do Número de Edifícios Comercias

A Figura 53 apresenta uma análise de sensibilidade verificando economias geradas pelas topologias com proteção no NA e/ou OLT, em relação ao caso desprotegido, variando entre 20% até 80% a porcentagem de edifícios comerciais no cenário apresentado na Seção 5.4, o que por conseguinte varia o valor total das multas por indisponibilidade, devido o SLA comercial ser dez vezes mais danoso que o residencial em termos de multas. Como resultado é mostrado as economias alcançadas em cinco anos de operação em relação ao caso desprotegido. As topologias de proteção consideradas foram as com duplicação do NA, seja protegida no OLT ou não, que foram aquelas com os melhores resultados

na Seção 5.4. Nota-se até mesmo para um cenário altamente residencial, com 20% de usuários comerciais, o uso das citadas proteções traz economias, demonstrando que elas podem ser economicamente viáveis até no atendimento de um cenário menos exigente que o apresentado na Seção 5.5. Além disso, conforme o cenário vai se tornando mais comercial as economias geradas pelas proteções consideradas na ilustração crescem de forma exponencial, garantindo ainda maior nível de viabilidade econômica.

Figura 53 – Análise de sensibilidade para as economias alcançadas em relação ao caso desprotegido por topologias de proteção para o *backhaul* PON envolvendo a porcentagem de usuários comerciais.



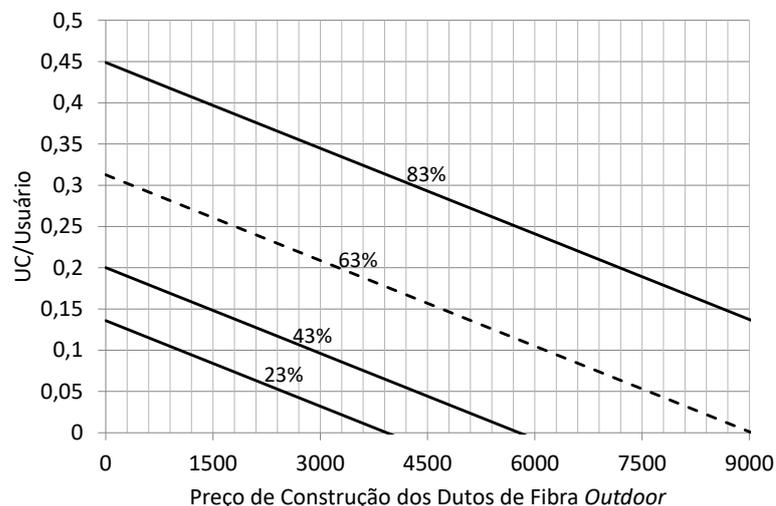
Fonte: elaborado pelo autor.

5.6.2 Variação da Custo para Construção de Dutos de Fibra

A Figura 54 apresenta uma análise de sensibilidade variando-se o custo de construção dos dutos de fibra, que são os maiores contribuintes no CAPEX da rede *outdoor*, na economia gerada pela proteção do NA em comparação ao caso desprotegido. A curva pontilhada representa a configuração em termos de porcentagem de edifícios comerciais adotados na Seção 5.4, já as curvas preenchidas são variações da porcentagem de edifícios comerciais na Seção 5.4, com valor indicado no gráfico. Os resultados encontrados apontam que cenários com mais de 40 % de usuários comerciais podem trazer economias para custo de construção de dutos de até quase 6000 UC/km, ficando dentro das especificações dos custos em ambientes urbanos, entre 82 e 4705 UC/km (CHEN; WOSINSKA, 2007) (CERAGON, 2009). No entanto, se um cenário mais residencial for considerado, como o caso com 23% de usuários comerciais, apenas preços de construção até 3900 UC são economicamente viáveis para a proteção do NA, o que ainda está dentro das especificações do cenário denso na Seção 5.4 com 1529 UC/km , mas também indicando que preços

dentro da faixa normal entre 82 e 4705 UC/km para a construção dos dutos em ambientes urbanos, podem inviabilizar tal proteção.

Figura 54 – Análise de sensibilidade para as economias alcançadas pela proteção do nível de alimentação para o *backhaul* PON envolvendo o custo de instalação de dutos de fibra, de forma que cada curva representa uma diferente porcentagem de usuários comerciais.



Fonte: elaborado pelo autor.

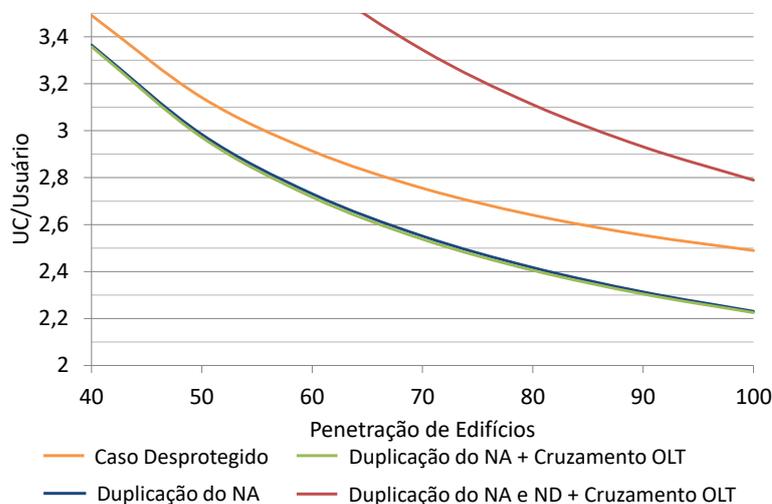
5.6.3 Variação da Penetração da Rede

Os resultados na Seção 5.5 consideraram que 100% das edificações eram atendidas pela rede, para fins de comparação e análise em casos extremos isto é uma prerrogativa válida, mas no caso pratico pode não ser uma realidade. Nesse contexto, a Figura 55 apresenta uma análise de sensibilidade variando a penetração da rede (número de edifícios atendidos no cenário) entre 40% e 100%. Os resultados encontrados mostram que as arquiteturas com duplicação NA, protegendo ou não o OLT, conseguem menor TCO em cinco anos de operação que o caso desprotegido até mesmo em caso de penetração abaixo de 50%. No entanto, é importante ressaltar que a viabilidade econômica em termos de TCO de tais proteções aumenta fortemente com o crescimento da taxa de penetração, de forma que a diferença de gastos com o caso desprotegido cresce de 0,1 UC/Usuário para 0,3 UC/Usuário entre as penetrações de 40% e 100%.

5.7 conclusão

Neste capítulo foi apresentado um comparativo técnico econômico de padrões e topologias de proteção para um *backhaul* PON *outdoor* suportando uma CRA representando um *fronthaul* totalmente *indoor* num cenário urbano de alta densidade. As comparações abordaram 40G-PON e WDM-PON, considerando duas capacidades por comprimento de

Figura 55 – Análise de sensibilidade para TCO da arquitetura da Seção 5.2 no cenário urbano de alta densidade da Seção 5.4 para varias topologias de proteção de um *backhaul* PON envolvendo a penetração da rede nos edifícios.



Fonte: elaborado pelo autor.

onda para o último (1 Gbps e 10 Gbps), assim como quatro topologias em termos de proteção: desprotegida, com duplicação do nível de alimentação, com cruzamento de OLTs e duplicação do nível de alimentação e, por fim, com cruzamento de OLTs e duplicação dos níveis de alimentação e distribuição. Todas as alternativas *backhaul* PON resultantes foram avaliadas por meio taxa de seu TCO e taxa transmissão alcançada pelos usuários, os quais foram obtidos usando os modelos apresentados no Capítulo 2.

No que diz respeito as taxas atingidas pelos usuários por cada padrão PON considerado no *backhaul*, conclui-se que num cenário urbano de alta densidade tanto 40G-PON quanto WDM-PON resultam em taxas máximas de vários Gbps e na garantia de ao menos 100 Mbps a qualquer momento, atendendo os requisitos de capacidade para futuras redes 5G. No entanto, para WDM-PON a taxa disponibilizada por comprimento de onda deve ser bem maior que 1 Gbps para tais requisitos serem atendidos. Por fim conclui-se que WDM-PON com 10 Gbps por comprimento de onda pode suportar demandas até 65 Mbps por usuário ou 49 Mbps/m² no cenário considerado, o que equivale ao ano de 2030 na previsão de tráfego apresentada.

Em termos de custos totais, os padrões WDM-PON de 10 Gbps e 1 Gbps por comprimento de onda são, respectivamente, os mais custosos e baratos. No entanto, a diferença de TCO entre a utilização de diferentes padrões é menor do que a causada pelas varias topologias de proteção adotadas no cenário urbano de alta densidade considerado. Nesse contexto, no que diz respeito as alternativas de proteção, conclui-se que a duplicação do nível de alimentação é aquela que leva a maior redução de custos totais, resultando em grandes economias em relação ao caso desprotegido, mesmo para penetração de rede menor

que 50%, elevados custos de instalação das fibras e cenários majoritariamente residências. Além disso, a proteção por cruzamento das OLT reduz TCO de forma ligeira, de forma que a topologia de proteção para o *backhaul* PON que leva ao menor TCO é a que faz tanto duplicação do nível de alimentação quanto cruzamento das OLTs. Por fim, proteger o nível de distribuição resulta em gastos totais superiores ao do caso desprotegido.

Em relação ao CAPEX, conclui-se que a rede *outdoor*, e consequente o *backhaul* da arquitetura considerada, é responsável por cerca de metade dos custos, sendo tal participação maior que 60% nos casos com duplicação do nível de distribuição. Tal comportamento ocorre devido ao fato dos custos com fibra óptica comporem a parte majoritária do CAPEX da rede *outdoor*, uma vez que muitas fibras devem ser instaladas na proteção do nível de distribuição. No entanto o investimento em fibras adicionais para proteção do nível de alimentação possui custo bem mais razoável. Por fim, o uso de padrões PON com maior capacidade, como WDM-PON de 10 Gbps, possuem mais que o dobro de custos de aquisição devido as suas OLT e ONUs mais complexas.

Em relação ao OPEX, conclui-se que não há grandes variações de custo em relação aos diferentes padrões PON considerados, indicando que as diferenças no TCO estão mais relacionadas ao CAPEX. Além disso, a maior parte do OPEX *outdoor* é composta por multas por indisponibilidade, o qual é reduzido fortemente em arquiteturas protegidas e torna o OPEX praticamente relacionado ao conjunto de CRAs atendendo o ambiente *indoor*.

Em termos da viabilidade das alternativas consideradas, conclui-se que os padrões 40G-PON e WDM-PON de 10Gbps, assim como a topologia de proteção com duplicação do nível de alimentação e cruzamento de OLTs, são os que melhores atendem os requisitos de capacidade e disponibilidade do 5G, de forma que 40G-PON é ligeiramente mais barata e devido a isto é a alternativa mais viável técnica e economicamente.

6 Considerações finais e trabalhos futuros

Neste trabalho, foi apresentado um conjunto de modelos para avaliar técnica e economicamente CRAs atendendo o ambiente *indoor* no contexto de 5G. Assumindo diferentes alternativas de *fronthaul*, assim como *backhaul* PON protegido ou desprotegido em ambientes urbanos densos. Os modelos considerados incluem o de tráfego, MDR (Modelo de Dimensionamento da Rede), MOVFR (Modelo de Operação Voltado a Falhas na Rede) e o de custos.

O modelo de tráfego apresentado é capaz de estimar a máxima taxa de transmissão alcançável em CRAs de forma simples, abstraindo especificidades de parâmetros de enlaces e protocolos de transmissão. Além disso, incorporou-se um modelo de previsão de tráfego de referência, de forma que estimativas do projeto METIS2020 foram usadas para realização de uma previsão da demanda de tráfego por usuário na rede até 2030. A qual foi usada em comparação às taxas alcançadas pelas CRAs, como parâmetro de viabilidade das alternativas *fronthaul*. Ademais, as previsões indicam que em 2030 a demanda de tráfego será de aproximadamente 155 vezes a atual.

O MDR e o MOVFR, assim como o modelo de custos, são genéricos e podem ser aplicados aos mais diferentes tipos de redes, independentemente da configuração de enlaces, conjunto de equipamentos usados ou se a implantação é *indoor*, *outdoor* ou ambas. Nas análises do trabalho esses modelos foram usados com poucas adaptações para descrever diferentes implantações e arquiteturas de rede.

As alternativas *fronthaul* comparadas para CRAs incluíram híbrida óptico-metálica e totalmente metálica, considerando cabos metálicos do tipo Cat5e em ambos os casos e o uso do padrão DSL G.(mg)fast com modo de transmissão fantasma no segundo caso. As comparações abordaram um edifício baseado nas médias daqueles com mais de 10 andares na região de Manhattan na cidade de Nova Iorque, assim como variações desse edifício apresentadas em análises de sensibilidade. Conclui-se que a alternativa totalmente metálica com uso de G.(mgfast) e modo fantasma foi aquela que obteve o melhor balanço técnico econômico para o edifício mediano em regiões urbanas densas, sendo a mais viável nessa situação. No entanto, para maiores números de andares (mais que 31) ou a área por piso do edifício (mais que 5400 m²), as perdas nos cabos metálicos diminuem a capacidade alcançável pelas alternativas totalmente metálicas, de forma que as alternativas híbridas óptico-metálicas se tornam as mais viáveis. Por fim, também é concluído que o uso de cascadeamento de RRUs pode diminuir os custos iniciais da implantação de CRAs, de maneira que a medida que o crescimento de tráfego vai ocorrendo o cascadeamento

vai sendo desfeito e a arquitetura continua viável tecnicamente, de forma que o custo vai sendo diluído ao longo do tempo.

As padrões PON comparados foram 40G-PON e WDM-PON, considerando quatro topologias em termos de proteção: desprotegida, duplicada no nível de alimentação (NA), duplicada no NA e com OLT cruzado e, por fim, duplicada tanto no NA quanto no nível de distribuição e com OLT cruzado. As comparações abordaram um cenário urbano denso baseado na região de Manhattan na cidade de Nova Iorque. Conclui-se que para o caso urbano de alta densidade, o padrão com melhor perspectiva de viabilidade técnica-econômica é o 40 G-PON, de forma que WDM-PON com comprimentos de onda transportando 10 Gbps pode ser uma alternativa para provisionamento de maior capacidade. Além disso, a melhor topologia de proteção no balanço entre custos e requerimento de disponibilidade é a com duplicação no NA e cruzamento dos OLTs.

Como trabalho futuros planeja-se:

- Aproveitar-se a generalidade dos modelos de dimensionamento e custos para analisar diferentes alternativas de *fronthaul* e *backhaul*, como por exemplo, uma CRA implantada no ambiente *outdoor* suportando o ambiente *indoor* usando cabos coaxiais numa arquitetura HFC (Híbrida Fibra-Coax).
- Fazer avaliação técnica e econômica de alternativas *backhaul* e *fronthaul* para casos suburbanos e rurais usando o modelo desenvolvido.
- Adicionar considerações relacionadas a falhas de *software* ao MOVFR.
- Adaptar o modelo de dimensionamento a áreas geográficas usando técnicas de inteligência computacional e a plataforma OSM (*Open Street Maps* – Mapas de Ruas Abertos).

Referências

- 3GPPP. *Carrier Aggregation explained*. [S.l.]. Acessado em 10/12/2018. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>>. Citado na página 17.
- ACATAUASSU, D. et al. Coaxial networks for 5G fronthaul. In: *IEEE International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks, IEEE CAMAD*. Barcelona, Espanha: [s.n.], 2018. Citado 5 vezes nas páginas 1, 14, 21, 34 e 57.
- AFONSO, T. M. B. *Techno-Economic Analysis of Access Network: Decision Tools*. Portugal: [s.n.], 2013. Citado na página 80.
- AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 18, n. 3, p. 1617–1655, thirdquarter 2016. ISSN 1553-877X. Citado na página 12.
- AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4ª. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2012. ISBN 9780470505113. Citado na página 23.
- AL-FALAHY, N.; ALANI, O. Y. Technologies for 5g networks: Challenges and opportunities. *IT Professional*, v. 19, n. 1, p. 12–20, Jan 2017. ISSN 1520-9202. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 3.
- AL-FUQAHA, A. et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, Nov 2015. ISSN 1553-877X. Citado na página 2.
- ALTERA. *The Emerging Need for Fronthaul Compression*. Califórnia, Estados Unidos, 2016. Disponível em: <<https://docplayer.net/41844998-Cloud-ran-fronthaul-options-benefits-and-challenges.html>>. Citado na página 25.
- ANALYSYS MASON. *Fibre capacity limitations in access networks*. [S.l.], 2010. Disponível em: <https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0023/27527/fibre.pdf>. Citado na página 79.
- 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 3 vezes nas páginas 44, 45 e 47.
- APOSTOLOPOULOS, D. et al. Analog radio-over-fiber solutions in support of 5g. In: *2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 266–271. Citado na página 25.
- BORGES, G. S. *MODELAGEM DE PAR-TRANÇADO PARA COMUNICAÇÕES EM BANDA LARGA*. Tese (Doutorado) — Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Mar 2016. Disponível em:

<http://www.ppgee.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/Gilvan_Borges.pdf>. Citado na página 19.

BOURAS, C. et al. Techno-economic analysis of ultra-dense and das deployments in mobile 5g. In: *2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 241–245. ISSN 2154-0225. Citado na página 3.

CABLELABS. *The evolution of DOCSIS*. Louisville, Estados Unidos, 2017. Disponível em: <<https://www.cablelabs.com/full-duplex-docsis/>>. Acesso em: 10.12.2018. Citado na página 21.

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 26.

CHECKO, A. *Cloud RAN fronthaul: Options, benefits and challenges*. Bremen, Alemanha, 2015. Disponível em: <<https://docplayer.net/41844998-Cloud-ran-fronthaul-options-benefits-and-challenges.html>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 11 e 25.

CHEKOL, A. T. *Performance Analysis of Cloud Radio Access Network*. Noruega: [s.n.], 2017. Disponível em: <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2461339-17111_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10 e 11.

Chen, J. et al. Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 2, p. 56–65, Fev 2010. ISSN 0163-6804. Citado 3 vezes nas páginas 61, 62 e 80.

CIOFFI, J. Lighting up copper [history of communications]. v. 49, p. 30–43, Mai 2011. Citado na página 19.

CLOONAN, T. et al. [S.l.]. Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 25.

CZEKUS, J. et al. Hardware cost and capacity analysis of future tdm- and wdm-pon access networks. In: *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. ISSN 2161-2064. Citado na página 80.

Digital Future Project. *The 16th annual study on the impact of digital technology on Americans*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://www.digitalcenter.org/wp-content/uploads/2018/12/2018-Digital-Future-Report.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

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 4 vezes nas páginas 4, 27, 44 e 51.

EARTH. *Deliverable D2.3: Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown*. [S.l.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 54.

Effenberger, F. et al. An introduction to pon technologies [topics in optical communications]. *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 3, p. S17–S25, Mar 2007. ISSN 0163-6804. Citado na página 24.

- ERICSSON. *Small cell services: Network performance where and when it matters*. [S.l.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 1, 12 e 80.
- ERICSSON. *Ericsson radio dot system redefining in-building small cells*. Estolcomo, Suécia, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 12, 13, 34, 52, 59 e 61.
- ETSI. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 15.3.0 Release 15)*. [S.l.], 2018. Citado na página 57.
- FARIAS, F. et al. Cost- and energy-efficient backhaul options for heterogeneous mobile network deployments. *Photonic Network Communications*, v. 32, n. 3, p. 422–437, Dez 2016. ISSN 1572-8188. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11107-016-0676-6>>. Citado 4 vezes nas páginas 2, 4, 5 e 12.
- FARIAS, F. et al. Green backhauling for heterogeneous mobile access networks: What are the challenges? In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. ISBN 978-1-4799-0434-1. Citado na página 10.
- FARIAS, F. de S. *Designing Cost-Efficient Transport Solutions For Fixed And Mobile Broadband Access Network*. Tese (Doutorado) — UFPA, Belém-PA, Brasil, Mar 2016. Citado 5 vezes nas páginas 23, 29, 61, 62 e 80.
- FERNANDES, A. L. P. *Avaliação Técnica e Econômica de Esquemas de Proteção para Redes Óticas Passivas*. 2018. Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, UFPA (Universidade Federal do Pará), Belém, Brazil. Citado na página 29.
- 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, Países Baixos, 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 6 vezes nas páginas 2, 4, 27, 28, 29 e 43.
- 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, Abr 2017. ISSN 1063-6692. Citado na página 43.
- FIORANI, M. et al. Challenges for 5G transport networks. In: *2014 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. ISSN 2153-1676. Citado 3 vezes nas páginas 1, 12 e 18.
- FIORANI, M. et al. Joint design of radio and transport for green residential access networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 34, n. 4, p. 812–822, Abr 2016. ISSN 0733-8716. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 3.
- GFAST track, Broadband Fórum, access summit event. Berlin, 2017. Disponível em: <<https://www.broadband-forum.org/downloads/base-lv/gfast-lv-oct.pdf>>. Acesso em: 05.11.2018. Citado na página 20.
- HAMZEH, B. et al. Docsis 3.1: scaling broadband cable to gigabit speeds. v. 53, p. 108–113, Mar 2015. Citado na página 21.
- HECHT, J. *City of Light: The Story of Fiber Optics (Sloan Technology)*. 1ª. [S.l.]: Oxford University Press, 1999. ISBN 0195108183. Citado na página 23.

- HUAWEI. *AtomCell9.0 LampSite Solution*. China, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 12, 34, 52 e 59.
- IEEE. *IEEE Std 802.3ah-2004*. Nova Iorque, Estados Unidos, 2004. Citado na página 24.
- IEEE. *IEEE 802.3av-2009*. [S.l.], 2009. Citado na página 24.
- ITU-T. *G.984.1 Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): General Characteristics*. [S.l.], 2008. Citado na página 24.
- ITU-T. *G.989.1 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*. [S.l.], 2013. Citado 4 vezes nas páginas 3, 4, 24 e 77.
- ITU-T. *Recommendation G.9701: Fast Access to Subscriber Terminals (FAST) Physical layer specification*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9701-201412-I/en>>. Acesso em: 10.04.2018. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 58.
- ITU-T. *RRecommendation ITU-R M.2083-0:IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. [S.l.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 83.
- ITU-T. *G.987.1 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*. [S.l.], 2016. Citado na página 24.
- JABER, M. et al. 5g backhaul challenges and emerging research directions: A survey. *IEEE Access*, v. 4, p. 1743–1766, 2016. ISSN 2169-3536. Citado na página 3.
- KIRTNER, J.; ANDERSSON, H. *The Application of Land Use/Land Cover Data to Wireless Communication System Design*. Estados Unidos, 1998. Disponível em: <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc98/PROCEED/TO550/PAP525-/P525.HTMf>>. Citado na página 79.
- KLEIN, T. *eCPRI Overview*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2017/cm-mustala-eCPRI-Overview-0917.pdf>>. Citado na página 59.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 6^a. [S.l.]: Pearson, 2012. ISBN 0132856204, 9780132856201. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- LU, C. et al. Connecting the dots: small cells shape up for high-performance indoor radio. *Ericsson Review*, v. 91, p. 2–9, Dez 2014. ISSN 0014-0171. Citado 8 vezes nas páginas 1, 2, 13, 14, 22, 52, 57 e 62.
- MACHUCA, C. M.; CHEN, J.; WOSINSKA, L. Cost-efficient protection in tdm pons. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 8, p. 110–117, Ago 2012. ISSN 0163-6804. Citado 3 vezes nas páginas 4, 27 e 44.
- 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 na página 23.

- MAES, J.; NUZMAN, C. J. The past, present, and future of copper access. v. 20, p. 1–10, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- MAHLOO, M. et al. Protection cost evaluation of wdm-based next generation optical access networks. *Optical Switching and Networking*, v. 10, n. 1, p. 89 – 99, 2013. ISSN 1573-4277. Advances in Optical Networks Control and Management. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 80.
- MAIER, M. *Optical switching networks*. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2008. ISBN 9780521868006. Citado na página 25.
- MAVRAKIS, D. *Why Fronthaul Matters - A key foundation for Centralized and Cloud RAN*. [S.l.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 1, 26 e 27.
- MEHMOOD, H.; RAHMAN, S.; CIOFFI, J. Bit loading profiles for high-speed data in docsis 3.1. v. 53, p. 114–120, Mar 2015. Citado na página 20.
- METIS2020. *Deliverable D1.1: Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system*. [S.l.], 2013. Disponível em: <https://metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D1.1_v1.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 1, 54 e 84.
- MOSS, M. L.; QING, C. *The Dynamic Population of Manhattan*. [S.l.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 80.
- Naqvi, S. H. R. et al. On the transport capability of LAN cables in all-analog MIMO-roc fronthaul. In: *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. ISSN 1558-2612. Citado 3 vezes nas páginas 14, 21 e 56.
- Neckebroek, J. et al. Novel bitloading algorithms for coded g.fast dsl transmission with linear and nonlinear precoding. In: *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 945–951. ISSN 1550-3607. Citado na página 53.
- OASE. *Deliverable D4.2.1: Technical Assesment and Comparison of Next-Generation Optical Access System Concepts*. [S.l.], 2011. Disponível em: <<https://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/5/249025/080/deliverables/001-OASED421WP4UEssex31Oct2011V10.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 80.
- OASE. *Deliverable D3.4: Migration Paths*. [S.l.], 2013. Citado na página 56.
- ODLING, P. et al. The fourth generation broadband concept. v. 47, p. 62–69, Jan 2009. Citado na página 19.
- OLIVA, A. de la et al. An overview of the CPRI specification and its application to C-RAN-based LTE scenarios. *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 2, p. 152–159, Fev 2016. ISSN 0163-6804. Citado 4 vezes nas páginas 10, 11, 25 e 33.
- ONU. *ITU Radio Regulations*. [S.l.], 1992. Citado na página 9.
- OTA, H. *Standardization of XDSL and MGfast in ITU-T SG15*. [S.l.], 2017. Citado na página 53.

- PAPOULIS, A.; PILLAI, U. S. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. Fourth. Boston: McGraw Hill, 2002. ISBN 0071122567 9780071122566 0073660116 9780073660110 0071226613 9780071226615. Disponível em: <http://www.worldcat.org/search?qt=worldcat_org_all&q=0071226613>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- PERRIN, S. *Evolving to a Open C-RAN architecture for 5G*. Japão, 2017. Disponível em: <<https://www.fujitsu.com/us/Images/FNC-Fujitsu-Evolving-to-an-Open-C-RAN-Architecture-for-5G-White-Paper.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications - Principles And Practice*. Nova Jersey: Prentice Hall PTR, 2002. ISBN 0130422320. Citado na página 26.
- SKYSCRAPERPAGE. *New York City Building Database*. [S.l.]. Acessado em 10/12/2018. Disponível em: <<http://skyscraperpage.com/cities/?cityID=8>>. Citado na página 59.
- SOUZA, D. D. *Análise do modo de transmissão fantasma de segunda camada aplicado a sistemas G.fast, 2018*. 2018. Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, UFPA (Universidade Federal do Pará), Belém, Brazil. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.
- SOUZA, D. D. et al. Explorando a segunda camada do modo fantasma de transmissão em sistemas g.fast. In: *Anais do 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 13º CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 897–901. Citado 3 vezes nas páginas 2, 22 e 53.
- S.RATHI et al. Throughput for tdd and fdd 4 g lte systems. v. 2, n. 12, Mai 2014. ISSN 2278-3075. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- TONINI, F. et al. Radio and transport planning of centralized radio architectures in 5G indoor scenarios. v. 25, Ago 2017. Citado 6 vezes nas páginas 1, 3, 12, 13, 21 e 61.
- VIEIRA, J. *Scalability Performance of Ericsson Radio Dot System*. Dissertação (Mestrado) — Royal Institute of Technology (KTH), Suécia, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 3, 12, 14, 16, 22 e 59.
- WANG, J. et al. Digital mobile fronthaul based on delta-sigma modulation for 32 LTE carrier aggregation and FBMC signals. *Journal of Optical Communications Networks*, v. 9, n. 2, p. 233–244, Fev 2017. ISSN 0163-6804. Citado 5 vezes nas páginas 13, 25, 33, 53 e 59.
- 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 na página 79.
- 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 na página 28.
- YAGHOUBI, F. et al. A techno-economic framework for 5g transport networks. *IEEE Wireless Communications*, v. 25, n. 5, p. 56–63, Out 2018. ISSN 1536-1284. Citado 4 vezes nas páginas 1, 2, 4 e 19.

ZAFARUDDIN, S. M.; BERGEL I. AND. LESHEM, A. Signal processing for gigabit-rate wireline communications: An overview of the state of the art and research challenges. v. 34, n. 5, p. 141–164, Set 2017. ISSN 1053-5888. Citado na página 20.

ZUBAIR, Z. *Techno-Economic Analysis of Wireless Indoor Solutions*. Estolcomo, Suécia: [s.n.], 2011. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:432577-/FULLTEXT01.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.