

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

Uma Análise Técnico-Econômica para Implantação  
de Arquiteturas Centralizadas de Redes de Telefonia  
Móveis

Daniel da Silva Souza

DM: 12/2018

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2018



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

Daniel da Silva Souza

Uma Análise Técnico-Econômica para Implantação  
de Arquiteturas Centralizadas de Redes de Telefonia  
Móveis

DM: 12/2018

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2018

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

Daniel da Silva Souza

Uma Análise Técnico-Econômica para Implantação  
de Arquiteturas Centralizadas de Redes de Telefonia  
Móveis

Dissertação de Mestrado submetida à  
Banca Examinadora do Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Elétrica  
da UFPA como requisito para a ob-  
tenção do título de Mestre em Enge-  
nharia Elétrica na área de Computação  
Aplicada.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2018

**“UMA ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE  
ARQUITETURAS CENTRALIZADAS DE REDES DE TELEFONIA MÓVEIS”**

**AUTOR: DANIEL DA SILVA SOUZA**

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 COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 06/03/2018

**BANCA EXAMINADORA:**



---

**Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)



---

**Prof.ª Dr.ª Jasmine Priscyla Leite de Araújo**  
(Avaliadora Interna – PPGEE/UFPA)



---

**Prof. Dr. José Jailton Henrique Ferreira Júnior**  
(Avaliador Externo ao Programa – UFPA/Castanhal)



---

**Prof. Dr. Marcos César da Rocha Seruffo**  
(Avaliador Externo ao Programa – FCT/UFPA)

**VISTO:**

---

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

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

---

S719a Souza, Daniel da Silva  
Uma Análise Técnico-Econômica para Implantação de Arquiteturas Centralizadas de Redes de Telefonia Móveis / Daniel da Silva Souza. — 2018  
73 f. : il. color

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso

1. C-RAN. 2. Fronthaul. 3. TCO. I. Cardoso, Diego Lisboa, *orient.* II. Título

---

CDD 621.3

*“I let the bullets fly, oh let them rain  
My luck, my love, my God, they came from  
Pain!”*

(Imagine Dragons)

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo da minha vida, e não somente nestes anos como mestrando, mas que em todos os momentos é o maior suporte para minha família.

Aos meus pais, Nilson e Marly, por todo o apoio incondicional e pelos sacrifícios feitos, para que eu pudesse alcançar mais essa conquista e sonho. A minha irmã Danielle pelo seu tempo que me ajudou em diversos momentos e ao meu irmão Diogo pelo apoio e pelos momentos de descontração no vídeo game. À minha Tia Diana e meu Tio Junior por todo suporte dado e incentivo ao estudo em diversos momentos. A todos da família Ferreira e da família Silva.

A Universidade Federal do Pará pela oportunidade de fazer essa Pós Graduação, em especial ao PPGEE, e a todos os seus profissionais.

Agradeço a todos os professores do Programa que tive a oportunidade de conhecer e que me proporcionaram o conhecimento e contribuíram para a minha formação profissional.

Ao professor Diego Cardoso pela orientação, apoio e confiança ao longo do tempo. A meu coorientador professor Marcos Seruffo pelo suporte ao longo de todos esses anos e incentivo à continuação do caminho acadêmico.

A todos os meus amigos e amigas do LPO, e de outros laboratórios onde pude encontrar amigos, pelos momentos de aprendizado e diversão, Ermínio, Ladislav, Rafael, Welton, Paulo, Mariane, Áurea, Rita, Leto, Brabo, Hugo, Danileno e Iago, e em especial a Carlos André que teve contribuição fundamental para a conclusão deste trabalho.

Ao amigo Joahannes que ao mesmo momento iniciou essa caminhada acadêmica, dividido a experiência de morar em uma nova cidade, assim como ao amigo Arthur, lhes desejo sucesso. À Larissa por todo incentivo e carinho durante esse período. Agradeço aos amigos de LADES, Igor, Kennedy, Carlos, Higor, Arnaldo, Heitor, Cláudia e a todos os profissionais do Campus de Castanhal.

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro ao longo do programa.

# Resumo

Diante dos desafios propostos pela quinta geração de redes móveis, a arquitetura C-RAN (*Centralized Radio Access Network*) vem ganhando espaço por oferecer suporte à redes ultra-densas de alta capacidade de próxima geração e oferecer economias. Esta dissertação propõe uma metodologia de modelagem de TCO (*Total Cost of Ownership*) para C-RAN, CAPEX (*Capital Expenditure*), OPEX (*Operational Expenditure*), sendo estes, os critérios fundamentais no ramo de avaliação e projeção de investimentos. Logo é apresentado com um maior nível de detalhamento quanto aos aspectos de investimento, que são de grande relevância para o cenário de arquitetura de redes móveis de comunicação. Dessa forma, este trabalho é conduzido no sentido de avaliar o contexto econômico de implantação de uma arquitetura centralizada, baseando-se ,principalmente, nos aspectos financeiros que operadoras de serviços necessitam planejar antes de implantar uma nova rede de acesso móvel. O modelo proposto é utilizado em um estudo de caso em que o custo total de implementação e operação das arquiteturas distribuídas e centralizadas são comparados levando em consideração diversos cenários específicos. Os resultados apontam uma economia nos cenários centralizados e destacam os aspectos econômicos mais relevantes no planejamento da C-RAN.

**PALAVRAS-CHAVES:** C-RAN; *Fronthaul*; TCO.

# Abstract

Upon the the challenges proposed by the fifth generation of mobile networks, the architecture of C-RAN (*Centralized Radio Access Network*) has gained space by supporting high-capacity ultra-densas networks of next generation and offering economies. This dissertation proposes a TCO (*Total Cost of Ownership*) for C-RAN, CAPEX (*Capital Expenditure*), OPEX (*Operational Expenditure*) and these are the fundamental criteria in the field of investment assessment and projection. It is soon presented with a higher level of detailing as to the investment aspects, which are of great relevance to the architectural landscape of mobile communication networks. In this way, this work is conducted in order to evaluate the economic context of the implementation of a centralized architecture, based mainly on the financial aspects that service operators need to plan before deploying a new Mobile Access Network. The proposed model is used in a case study where the total cost of implementation and operation of the distributed and centralized architectures is compared taking into account several specific scenarios. The results point to an economy in the centralized scenarios and highlight the most relevant economic aspects in the planning of C-RAN.

**KEYWORDS:** C-RAN; Fronthaul; TCO.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iv</b>
<b>Glossário</b>	<b>v</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.2 Estrutura do Trabalho . . . . .	4
<b>2 Tecnologias Referenciadas</b>	<b>5</b>
2.1 Quinta Geração de Redes Móveis . . . . .	5
2.2 Centralized Radio Access Networks . . . . .	6
2.3 HetNets . . . . .	10
2.4 Custo Total de Propriedade . . . . .	10
2.4.1 Despesas de Capital . . . . .	11
2.4.2 Despesas Operacionais . . . . .	11
2.5 Depreciação . . . . .	12
2.6 Modelagem . . . . .	12
2.7 Conclusão do Capítulo . . . . .	13
<b>3 Modelagem de Custos</b>	<b>14</b>
3.1 Metodologia de Pesquisa . . . . .	14
3.2 Modelagem de Custo . . . . .	16
3.2.1 Despesas de Capital . . . . .	17
3.2.1.1 Equipamentos . . . . .	18
3.2.1.2 Infraestrutura . . . . .	18
3.2.2 Despesas de Operação . . . . .	19
3.2.2.1 Custo de Consumo de Energia . . . . .	19
3.2.2.2 Locação de Fibra Ótica . . . . .	20
3.2.2.3 Custo de Manutenção . . . . .	21
3.2.2.4 Gerenciamento de Risco . . . . .	22

3.2.2.5	Aluguel de Espaço Físico . . . . .	22
3.3	Conclusão do Capítulo . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Trabalhos Correlatos</b>	<b>24</b>
4.1	Análise de Custos de Redes Distribuídas . . . . .	24
4.2	Análise de Custos de Redes Heterogêneas . . . . .	25
4.3	Análise de Custos de C-RAN . . . . .	26
4.4	Conclusão do Capítulo . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>29</b>
5.1	Cenário Homogêneo . . . . .	29
5.2	Cenários Heterogêneos . . . . .	30
5.2.1	Arquitetura 01 : Rede de Acesso a Rádio utilizando <i>Microwave</i> . . . . .	31
5.2.2	Arquitetura 02 : Rede de Acesso a Rádio utilizando <i>Fiber-to-the-Home e Microwave</i> . . . . .	32
5.2.3	Arquitetura 03 : Rede de Acesso a rádio utilizando <i>Fiber-to-the-Home</i> . . . . .	33
5.2.4	Arquitetura 04 : Rede de Acesso a Rádio Centralizada . . . . .	34
5.3	Componentes de Infraestrutura . . . . .	35
5.4	Conclusão do Capítulo . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>37</b>
6.1	Resultados das Redes Homogêneas . . . . .	37
6.2	Resultado das Redes Heterogêneas . . . . .	41
6.3	Conclusão do Capítulo . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>47</b>
7.1	Contribuições deste trabalho . . . . .	48
7.2	Contribuições Adicionais . . . . .	49
7.3	Dificuldades Encontradas . . . . .	50
7.4	Limitações . . . . .	51
7.5	Trabalhos Futuros . . . . .	51
	<b>Bibliografia</b>	<b>57</b>

# Lista de Figuras

2.1	<i>Fronthaul</i> e <i>Backhaul</i> da C-RAN . . . . .	7
2.2	Estação Base Tradicional e Estação Base com RRH [1] . . . . .	8
2.3	<i>Fronthaul</i> com as Estações Base com RRH e a <i>BBU Pool</i> [1] [2] . . . . .	9
3.1	Metodologia de pesquisa . . . . .	15
3.2	Custo Total de Propriedade . . . . .	16
5.1	Arquitetura de Acesso Móvel Distribuída de Microwave . . . . .	31
5.2	Arquitetura de Acesso Móvel Distribuída de Fiber-to-the-Home + Microwave . . . . .	32
5.3	Arquitetura de Acesso Móvel Distribuída de <i>Fiber-to-the-Home</i> . . . . .	33
5.4	Arquitetura de Rede de Acesso de Rádio Centralizada . . . . .	34
6.1	Cenário de Entrada e Saida para Alocação RRH-BBU pool . . . . .	38
6.2	Comparação dos Custos entre a Arquitetura D-RAN e C-RAN . . . . .	38
6.3	Resultados dos custos de TCO de C-RAN com Arquitetura Homogênea . . . . .	39
6.4	Custo Total de Propriedade com uso de Infraestrutura Legada . . . . .	40
6.5	CAPEX das Arquiteturas Heterogêneas . . . . .	41
6.6	OPEX das Arquiteturas Heterogêneas . . . . .	41
6.7	TCO das Arquiteturas Heterogêneas . . . . .	42
6.8	Resultados dos custos de TCO da Arquitetura Distribuída 01 - Microwave . . . . .	42
6.9	Resultados dos custos de TCO da Arquitetura Distribuída 02 - FTTH e <i>Microwave</i> . . . . .	43
6.10	Resultados dos custos de TCO da Arquitetura Distribuída 03 - FTTH . . . . .	43
6.11	Resultados dos custos de TCO da Arquitetura Centralizada - C-RAN . . . . .	44
6.12	Resultados dos custos de CAPEX das Arquiteturas Heterogêneas em 20 anos . . . . .	44
6.13	Resultados dos custos de OPEX das Arquiteturas Heterogêneas em 20 anos . . . . .	45
6.14	Resultados dos custos de TCO das Arquiteturas Heterogêneas em 20 anos . . . . .	46

# Lista de Tabelas

5.1	Parâmetros utilizados . . . . .	35
6.1	Valores de TCO para 20 anos - Aluguel de fibra óptica . . . . .	40

# Glossário

**C-RAN** *Centralized Radio Access Network*, Redes de Acesso à Radio Centralizadas

**TCO** *Total Cost of Ownership*, Custo Total de Propriedade

**CAPEX** *Capital Expenditure*, Despesas de Capital

**OPEX** *Operational Expenditure*, Despesas de Capital

**5G** *5th generation wireless systems*, 5th Geração de Internet Móvel

**QoS** *Quality of Service*, Qualidade de Serviço

**Gbps** *Gigabits per second*, Gigabits por segundo

**CO** *Central Office*, Escritório Central

**RRH** *Remote Radio Head*, Unidade de rádio

**BBU** *Baseband unit*, unidade de banda base

**CPRI** *Common Public Radio Interface*

**OBSAI** *Open Base Station Architecture Initiative*

**ORI** *Open Radio Interface*

**I/Q** Sinais em fase e em Quadratura

**HARQ** *Hybrid automatic repeat request*

**ACK** *Acknowledgement*

**NACK** *Negative-Acknowledgement*

**CDN** *Content Delivery Network*, Rede de Distribuição de Conteúdo

**DSN** *Distributed Service Network*, Serviço Distribuído de Rede

**HetNets** *Heterogeneous Network*, Redes Heterogêneas

**OLT** *Optical Line Termination*, Terminal de Linhas Ópticas

**C-RAN** *Distributed Radio Access Network*, Redes de Acesso à Rádio Distribuídas

**LTE** *Long Term Evolution*

**ILP** *Integer Linear Programming*

**ILP** *Mixed-Integer Linear Programming*

**LTE-A** *Long Term Evolution Advanced*

**D-RoF** *Digital Radio over Fiber*, Sinal de Rádio Digital sobre Fibra

**ONU** *Optical Network Unit*, Unidade de Rede Óptica

**PON** *Passive Optical Network*, Rede Óptica Passiva

**FTTH** *Fiber to-the-Home*

# Capítulo 1

## Introdução

Em 2021, o tráfego global em redes móveis alcançará a marca de 49 exabytes mensais, cerca de meio zettabyte anual, representando um crescimento de 700% em relação ao ano de 2016 [3]. Este aumento no volume de tráfego e dispositivos móveis tem levado as operadoras de rede móvel a lidar com níveis sem precedentes no consumo de energia elétrica, instalação de mais equipamentos, expansão de infraestrutura e etc., especialmente quando se consideram os processos de densificação da rede móvel por meio da instalação conjunta e massiva de macro e *smallcells* (micro, pico, femto, etc).

A prospecção da quantidade de tráfego se torna uma questão de planejamento prévio importante para as operadoras de redes celulares do mercado [4]. Em outras palavras, a obtenção de altas taxas de dados e QoS (*Quality of Service*) aliados a um menor custo são as principais questões de preocupação para os operadores das redes móveis.

Levando em consideração todo esse contexto do volume de tráfego de dados, há inúmeras propostas e vários projetos que irão integrar a próxima geração de redes móveis, a quinta geração (5G). As redes celulares de quinta geração, previstas para o ano de 2020, pretendem suprir essa crescente demanda por tráfego, oferecendo não apenas maiores velocidades, mas uma arquitetura de rede mais heterogênea e uma maior integração entre a vasta gama de dispositivos conectados simultaneamente. A 5G apresenta desafios em sua concepção, quesitos como eficiência energética e econômica devem ser otimizados para que as premissas de heterogeneidade e altas velocidades possam ser alcançadas de forma viável.

Tendo em vista os requisitos da próxima geração de redes de acesso, a arquitetura *Centralized Radio Access Network* (C-RAN) propõe a centralização, compartilhamento e alocação inteligente de recursos computacionais. A arquitetura C-RAN é uma solução

---

viável para atender aos requisitos de capacidade, ao mesmo tempo em que aborda as questões de escalabilidade relacionadas ao poder de processamento [5], [6].

Aliada à C-RAN, a 5G traz consigo diversas tecnologias que possibilitam a consolidação desta nova realidade, tais como: Redes Ultradensas, Coordenação Avançada para Interferência entre Células, Múltiplas-entradas e Múltiplas-saídas [7], além de Ondas milimétricas (mm-wave), Modulação Multiportadora, Redes Definidas por Software, Gestão Flexível do Espectro, *Smallcells*, Redes Heterogêneas, e Colheita de Energia. Estas tecnologias permitirão a quinta geração de redes móveis atingir seus objetivos.

Os benefícios oriundos da atualização das arquiteturas tradicionais e da implantação de C-RAN são comprovados em diversos estudos, porém, a implementação de tais tecnologias ocasionam desafios em termos de custo, eficiência energética [8] e processamento [9]. Por outro lado, a centralização das funções da camada física de rádio introduz requisitos estritos de latência e capacidade na rede de transporte. Assim, estratégias de implantação de C-RAN eficientes tornam-se extremamente importantes, de modo a minimizar o custo global da rede e tornar o conceito de C-RAN atraente para os operadores móveis.

Aliado a isso, estudos relacionados ao TCO (*Total Cost of Ownership* ou Custo Total de Propriedade) devem ser realizados, a priori, a fim de tornar a arquitetura C-RAN viável para que operadoras de telefonia móvel possam fazer sua implantação. Especialmente em cenários onde deseja-se aproveitar a infraestrutura existente (abordagem, *brownfield*), a fim de encontrar as configurações mais viáveis e escolha de tecnologias. O TCO pode ser denominado como despesas com capital, ou *capital expenditure* (CAPEX), e despesas operacionais, ou *operational expenditure* (OPEX). Os custos com CAPEX incluem toda a implantação da rede, ou seja, infraestrutura e equipamentos. Os custos com OPEX incluem, por exemplo, a operação e manutenção das redes, despesas com energia elétrica e aluguel de espaço físico.

Avaliar um cenário com tais características é uma tarefa bastante subjetiva, uma vez que, no mercado, a presença de opções de investimento em equipamentos e fatores naturais que influem diretamente no custo, e uma realidade trivial. Apesar disso, a modelagem de custo busca ser o mais próximo da implantação de uma infraestrutura de rede, sendo uma prática de altos investimentos por parte de provedores de serviço, bem como, de outras organizações empenhadas em provisionar recursos de telecomunicações.

Com o desafio proposto às operadoras de telefonia móvel, de atender a demanda futura de dados e para que o planejamento e implantação das tecnologias necessárias para a 5G seja possível, é necessária a padronização de serviços e o desenvolvimento de

---

modelos que visem o controle de aspectos econômicos. Tendo em vista estas necessidades, esta dissertação propõe a modelagem do Custo Total de Propriedade para topologia C-RAN voltada à redes móveis de 5G.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação está relacionado em estudar e modelar os principais custos de implantação e operação de uma rede de acesso centralizada que serão , tendo mais uma ferramenta que auxilie as operadoras de telefonia no planejamento de implantação de C-RAN.

Diante dos desafios que as operadoras de rede precisam encarar para ter um futuro cenário com tráfego de dados ordenado por novas aplicações e serviços de próxima geração e os esforços discutidos acima, observou-se que a escolha do estudo e planejamento econômico de redes centralizadas é, não apenas proeminente, mas também um tópico importante a ser abordado.

Para desenvolver um modelo de TCO que busca analisar, coletar e identificar os fatores de custos mais elevados nos segmentos de *backhaul* e *fronthaul* e, com isso, oferecer um modelo que facilite o planejamento da implantação e operação de redes centralizadas, primeiramente foi feito o levantamento de diversos parâmetros para gerar cenários de comparação, parâmetros que serão abordados nos próximos capítulos.

Com a elicitación dos parâmetros, será possível criar diferentes cenários de comparação entre os de arquitetura de rede centralizada e redes tradicionais mais utilizados na literatura, visando mostrar os principais pontos de custos e diferenças entre as arquiteturas.

A este respeito, os objetivos específicos abordados nesta dissertação são apresentados a seguir:

- Aplicar um estudo de caso comparativo, envolvendo as arquiteturas distribuída e centralizada, de forma a buscar validar o modelo de TCO.
- Analisar os resultados que serão gerados pela modelagem, indicando os pontos contrastantes de cada arquitetura no estudo de caso.
- Demonstrar a aplicabilidade do TCO em um cenário específico, destacando os principais pontos que a C-RAN possui para assumir como arquitetura ideal para a próxima geração.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida da seguinte maneira:

Capítulo 2: Levantamento sobre conceitos que permeiam a quinta geração das redes móveis, mostrando o seu contexto e seus objetivos. Além de sobre a arquitetura C-RAN de forma mostrar as suas características.

Capítulo 3: Apresentar a metodologia de pesquisa seguida no desenvolvimento deste estudo e a modelagem matemática de Custo Total de Propriedade, principal contribuição deste estudo.

Capítulo 4: Documentar os diversos trabalhos acadêmicos que abordam e tratam inovações nos assuntos correlacionados.

Capítulo 5: Explicar o estudo de caso com os cenários escolhidos, os parâmetros utilizados.

Capítulo 6: Expor a análise dos resultados de cada abordagem a fim de destacar os custos característicos de cada cenário em comparação com as redes centralizadas.

Capítulo 7: Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais relacionadas aos resultados encontrados, assim como as contribuições. Também serão apresentadas as dificuldades encontradas e trabalho futuros.

# Capítulo 2

## Tecnologias Referenciadas

Este capítulo concentra-se em apresentar uma visão geral sobre a quinta geração de redes móveis, com atenção especial em redes de acesso móveis centralizadas. Com o propósito de agregar um aporte teórico, são retratadas aqui, as tecnologias presentes na literatura científica com eixo inclinado, sobretudo, ao contexto de avaliação de custo de infraestruturas de redes de acesso móveis centralizadas. Busca-se, com esta abordagem, elencar os pontos chave, para que o mesmo possua um embasamento teórico para todos os âmbitos de sustentação desta proposta.

### 2.1 QUINTA GERAÇÃO DE REDES MÓVEIS

As pesquisas na área das comunicações celulares de quinta geração é um tema que trata as necessidades de comunicação para os seres humanos e aparelhos. Em contrapartida das alterações efetivadas nas gerações anteriores, a 5G das redes móveis tem como principal função de ser uma proposta de rede mais heterogênea, permitindo uma mudança de paradigma nos serviços oferecidos. Dentre os anos, outras tecnologias de comunicação têm surgido para melhorar a forma como as pessoas e os dispositivos se correlacionam, alterando a maneira de vida do coletivo. Ao alcance que as tecnologias sem fio estão crescendo em relação às taxas de dados, mobilidade, cobertura e eficiência espectral, novas oportunidades são criadas, mas conseqüentemente novos problemas precisam ser resolvidos.

Segundo [10], se compararmos com outras gerações de telefonia celular, 5G terá características e vantagens extraordinárias, entre as quais:

- Melhor área de cobertura e alta taxa de dados na borda da célula;

- Baixo consumo de bateria, com uso de equipamentos mais inteligentes;
- Disponibilidade de vários caminhos de transferência de dados;
- Aproximadamente 1 Gbps de taxa de transferência de dados;
- Maior segurança;
- Eficiência energética e eficiência espectral.

Essas novas tecnologias e requisitos acima mencionados direcionam para os desafios ao desenvolvimento da 5G. Sendo a centralização um dos principais objetivos das redes móveis 5G, porque o processamento e a gestão precisam ser flexíveis e adaptados aos requisitos reais do serviço [5]. Isso levará a uma atualização da rede descentralizada de hoje para a rede totalmente centralizada de acesso à rede de processamento em nuvem. A próxima seção apresenta o conceito de *Centralized Radio Access Networks*.

## 2.2 CENTRALIZED RADIO ACCESS NETWORKS

Na arquitetura C-RAN, o hardware responsável pelo processamento da banda base, o *Base Band Unit* (BBU), é deslocado das estações base para um escritório central (*Central Office* - CO) onde é feito o compartilhamento de recursos computacionais em uma *BBU Pool* de forma que um grande grupo de Remote Radio Heads possa ser atendido de forma eficiente. A interconexão entre a *BBU Pool* e as RRHs são feitas por links digitais de alta velocidade para a transmissão de amostras de (I/Q) digitalizadas [11].

A Figura 2.1 representa os setores de *fronthaul* e *backhaul* da rede móvel centralizada. O *fronthaul* é a ligação entre os RRHs e as BBUs [12] [13]. Já a nomenclatura *backhaul*, que do mesmo modo utiliza fibra como canal de retorno e refere-se às conexões de rede entre as estações de base e a rede principal, ou *core network* [12] [13].

O conceito de C-RAN, Cooperativo e em Nuvem foi promovido pelo *China Mobile Research Institute* [14]. *China Mobile Research Institute* destaca que a arquitetura C-RAN possui benefícios significativos nas seguintes áreas-chave:

- Eficiência energética: o consumo de energia do sistemas de resfriamento do ambiente e outros equipamentos de suporte do site podem ser amplamente reduzidos devido à consolidação da BBU de processamento.

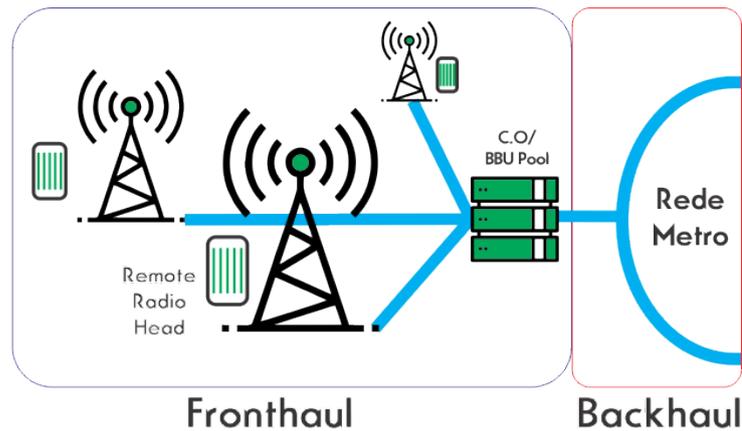


Figura 2.1: *Fronthaul* e *Backhaul* da C-RAN

- Capacidade: tecnologias de comunicação sem fio e transmissoras de transmissão e recebimento mais avançadas, como o processamento cooperativo multiponto (CoMP), podem ser implementadas usando a infraestrutura C-RAN, levando às melhorias de capacidade de rede notáveis.
- Deslocamento de tráfego: a pool de BBU pode servir como ponto de partida local natural para descarregar o tráfego de rede principal para diferentes nós de rede, bem como para acesso de rádio diferente tecnologias disponíveis.

Um ponto a ser destacado são as despesas de capital e despesas operacionais, pois o agrupamento de BBUs permite gerenciamento e operação centralizados, levando a economia significativa de custos no aluguel de sites, bem como a operação e manutenção, pontos esses que serão o foco do trabalho.

O custo de implantação de equipamentos de *fronthaul* o *backhaul* de redes tradicionais é muito alto, logo a questão do custo-benefício das redes C-RAN pode ser considerada um fator primordial para a implantação da nova geração de redes móveis, proporcionando uma redução dos custos de infraestrutura e, com isso, menores custos para os usuários finais.

Essa economia é ocasionada pela centralização da arquitetura, tendo, em comparação às redes tradicionais, a eliminação de alguns equipamentos e o compartilhamento, como é o caso das BBUs, pois em uma rede tradicional é necessária uma BBU para cada estação base, porém, na arquitetura centralizada, várias RRHs podem ser servidas por uma BBU Pool, se o limite de processamento desta não for ultrapassado. Segundo [15] uma BBU pode atender seis RRHs. Por esta razão, o conceito de C-RAN é uma forma viável de reduzir as despesas de capital e de operação das operadoras.

As figuras 2.2 e 2.3, mostram exemplo reais de um *Central Office* com a *BBU*

*Pool* e uma comparação entre Estação Base Tradicional e uma estação Base com RRH, respectivamente.



Telecom Italia Demo

Figura 2.2: Estação Base Tradicional e Estação Base com RRH [1]

Para aplicação do C-RAN, se faz necessário um link com alta taxa de transmissão e baixa latência. A maior diferença entre RRHs implantados para C-RAN, em comparação com soluções anteriores, é que, o sinal ocorre ao longo de muitos quilômetros, enquanto na última arquitetura, essa distância é menor, geralmente até alguns quilômetros [16]. Portanto, o atraso adicional causado pelo aumento da distância de transmissão precisa ser monitorado. O mais provável é a utilização de links cabeados, como de fibra ótica, mas padrões wireless também podem ser utilizados, desde que alcancem os requisitos necessários entre o *fronthaul* e o *backhaul*.

O segmento de *fronthaul* da rede móvel, utiliza protocolos específicos para comunicação, os mais analisados e conceituados pela literatura são o *Common Public Radio Interface* (CPRI), o *Open Base Station Architecture Initiative* (OBSAI) e o *Open Radio Interface* (ORI). Estes protocolos asseguram a transmissão dos componentes dos sinais em fase e em quadratura (I/Q), controle e sincronismo entre as unidades de rádio [16]. Dentre as vantagens desta arquitetura, destacam-se: a melhor utilização dos recursos, gerência e operação das redes, aumento de cooperação entre as estações de base, possibilidade de atendimento de cargas dinâmicas com maior eficiência, economia no consumo de energia, virtualização, entre outras.

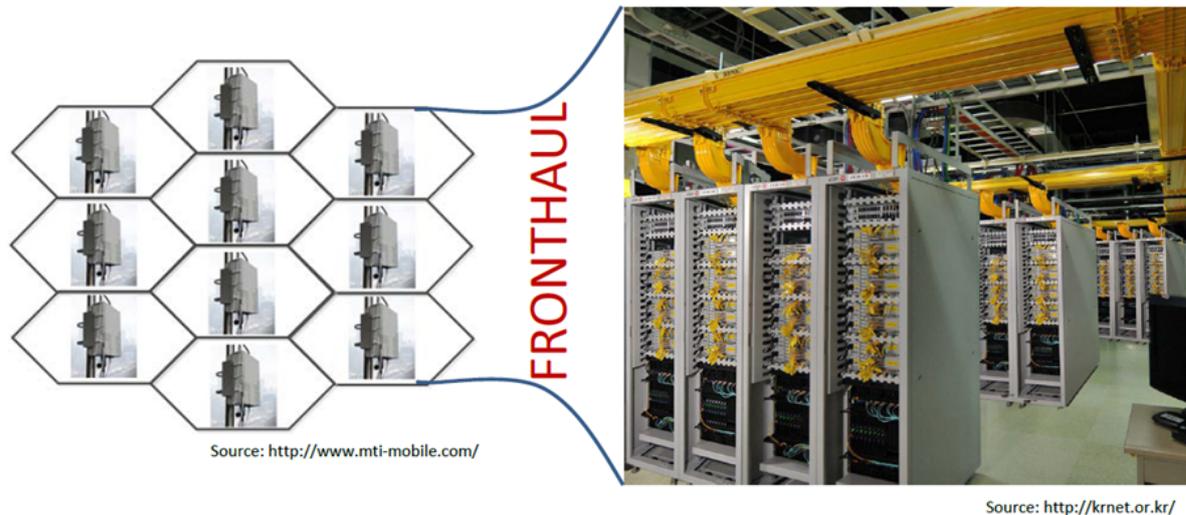


Figura 2.3: Fronthaul com as Estações Base com RRH e a *BBU Pool* [1] [2]

O comprimento do *fronthaul* e, portanto, a área de cobertura da *BBU pool* é limitada por atraso de propagação [17]. O procedimento híbrido de redes centralizadas ARQ (HARQ) requer mensagens rápidas de ACK / NACK em subtramas que limitam o comprimento da fibra entre o pool BBU e RRH a 20-40 km dependendo do atraso de processamento [14].

A interconexão entre BBUs é necessária funcionar com baixa latência, alta velocidade, alta confiabilidade e transmissão em tempo real de 10 Gbps. O planejamento dinâmico do uso de recursos da operadora implementado no *BBU pool* pode aumentar a redundância do uso do BBU e aumentar a confiabilidade [16].

Segundo relatório da China Mobile [14] o *BBU Pool* precisa suportar 100 estações de base em uma rede urbana de tamanho médio (cobertura 5x5 km e 1000 estações base em um perímetro de 15x15 km). Além desses pontos, é benéfico quando a BBU possui um bom gerenciamento para suportar serviços adicionais como Rede de distribuição de conteúdo e serviço distribuído Rede [14].

A virtualização dos recursos da estação base é necessária para ocultar a características físicas da *BBU pool* e ativar a alocação dinâmica de recursos, pois o agrupamento ideal de recursos do BBU é necessário no C-RAN. No trabalho de [18] é proposto um esquema de gerenciamento dos recursos da *BBU pool* para minimizar o número de recursos computacionais necessários. Outros trabalhos abordam como primordial o estudo da alocação e gerenciamento da *BBU pool* no cenário das redes centralizadas, contudo não é o foco deste trabalho.

---

Em paralelo a centralização de recursos e equipamentos, se tem como proposta para a próxima geração a utilização de *macrocells* e *smallcells* de forma simultânea. O futuro caminha para a existência de muitas estações de pequeno porte, e essa grande quantidade de estações base unidas criam as HetNets. Segundo [19] cada antena de *smallcell* pode existir em um poste de luz ou em cada apartamento dos edifícios, sendo esses alguns exemplos práticos da disposição de redes UDN, que é um conceito a ser avaliado ao se pensar em avaliação de custos.

## 2.3 HETNETS

O conceito de HetNets decorre da evolução das tecnologias existentes, que consistem em várias camadas de redes celulares (por exemplo, *macrocells*, *microcells*, *smallcells*, etc.) e várias tecnologias de acesso por rádio (por exemplo, GSM, 3G, LTE, WiFi, etc.) [7]. HetNets é considerada uma parte indiscutível de futuras redes celulares e receberam uma atenção focalizada do trabalho de padronização do grupo 3GPP [20].

As *smallcells* podem ter tamanhos diferentes, podem ser internas ou externas e podem ser planejadas pelo operador ou não para atender uma demanda específica de serviço (por exemplo, *femtocells*, que são os pontos de acesso celular de baixa potência conectados à Internet). Sua característica comum é que são nós de baixa potência e de baixa altura usadas para descarregamento de dados [21].

Além disso, *smallcells* fornecem um aumento na cobertura e descarga das *macrocells*, aliviando assim, a rede móvel que não foi projetada inicialmente para o tráfego de dados. No entanto, a alocação ótima das *smallcells* como proposto no trabalho de [19], ainda é uma questão aberta e torna-se ainda mais complexa quando fatores como rede de transporte e qualidade mínima de serviço são levados em consideração.

Em redes heterogêneas, os custos de implantação e operação podem gerar um grande impacto no custo total de propriedade, visto que é necessário ligar diversas estações bases. Este fato gera um novo ponto de planejamento, o TCO, pois a prestadora de serviço precisa construir uma infraestrutura que seja economicamente viável.

## 2.4 CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

O TCO é uma métrica de avaliação de custo que tem como objetivo calcular os ativos relacionados a infraestrutura da rede móvel. Esta métrica é um meio de se abordar

---

o custo real atribuindo-o ao gerenciamento e infraestrutura de telecomunicações como um todo, considerando de forma abrangente o custo de capital inicial, os custos operacionais, entre outros componentes que completam uma estimativa de custo base [22].

Em se tratando de estimativa de custo base, o TCO trabalha conforme alguns requisitos, que juntos formam o modelo de avaliação total, entre eles os custo de: Compra de equipamentos, instalação de equipamentos, infraestrutura, energia, manutenção, suporte, entre outros [22].

O TCO abrange duas métricas que detalham especificamente os parâmetros de implantação e operação, sendo elas o CAPEX, que representa os custos relacionados à aquisição e implantação de equipamentos e o OPEX representando os custos relacionados ao consumo de energia, aluguel de espaço físico, manutenção e gerenciamento de riscos de uma infraestrutura de telecomunicações.

### 2.4.1 Despesas de Capital

O CAPEX é uma métrica de avaliação que se refere aos custos concernentes à aquisição de bens de capital, abrangendo itens de investimento e ainda, a introdução de melhorias em uma determinada organização. O CAPEX é importante para uma avaliação de custos, pois a partir dele, é possível especificar os gastos de capital inicial incorridos de algum investimento, como visto na aquisição de infraestrutura, instalação, equipamentos, sistema, etc [23].

Assume-se que o CAPEX, em infraestruturas de redes móveis se baseia em duas vertentes de igual importância, e que podem ser perfeitamente ramificadas para outros aspectos. A princípio, a primeira vertente consiste em investimentos iniciais, referente a fase de aquisição de equipamentos de forma geral. Segundamente, a implantação destes equipamentos é feita durante a montagem da infraestrutura que revigora todo o processo de instalação realizado.

### 2.4.2 Despesas Operacionais

Com este propósito, o OPEX é tratado como uma métrica de custo que visa especificar parâmetros relacionados à despesas operacionais de um produto ou serviço. Para esta proposta, o OPEX é baseado em categorias com ramificações particulares, como por exemplo, consumo de energia, manutenção, gerenciamento de riscos, aluguel de espaço físico, entre outras despesas de cunho operacional.

---

Em contexto prático, o custo de operação está altamente relacionado à tendências de investimento, pois as despesas especificadas por ele servem como parâmetros para manter o funcionamento de uma infraestrutura, por exemplo, destacando como pontos que mais irão ter parte no TCO da rede móvel [24].

## 2.5 DEPRECIÇÃO

Depreciação é um termo correspondente aos encargos decrescentes que determinados bens de capital sofrem, seja por uso, obsolescência ou desgaste. É uma taxa que o hardware de um provedor de serviço deverá perder de seu valor financeiro, situação que pode incorrer muitas vezes devido ao advento de algumas novas tecnologias. Em todo caso, os clientes tendem a mudar seus equipamentos ou tecnologias, deixando claro que as políticas exercidas pelos provedores devem ser baseadas na obtenção de lucro até o momento em que os bens não sejam mais utilizados ou sejam depreciados ao máximo [25].

Esta abordagem é aplicada em cenários diversos, com o intuito de prever a perda de valor de equipamentos, o que geralmente é especificado em anos. A depreciação é identificada através de uma porcentagem que é reduzida do valor do bem de capital, ou seja, a cada ano esta porcentagem será aplicada de forma recursiva.

Avaliar a depreciação de equipamentos auxilia nas atividades que objetivam a redução de custo de investimentos de um provedor de serviço, por exemplo. Em contrapartida, quando a depreciação de equipamentos não é considerada, isso pode refletir diretamente nos custos de manutenção e, conseqüentemente, diminuir a capacidade dos equipamentos de operar com eficiência.

## 2.6 MODELAGEM

A Modelagem consiste na aplicação de um conjunto de técnicas e modelos matemáticos ou problemas complexos com intuito de se obter uma solução. Em se tratando de avaliação de custo, esta prática fornece um entendimento qualitativo e quantitativo dos aspectos tecnológicos de viabilidade financeira de uma infraestrutura [26] [27].

Para analisar o design técnico e os componentes de uma rede centralizada é certamente necessário modelar suas operações e o seu comportamento, descrevendo todos os atributos básicos que circundam sua estrutura física, como *Central Offices*, macrocélulas, quantidade fibra necessária ou o impacto na escolha de topologias de rede juntamente

---

com suas funcionalidade e capacidade [26].

A modelagem, além de ser bastante empregada atualmente, é também a forma pela qual as operadoras de telefonia possam avaliar de forma prévia, os custos gerais de suas infraestruturas, na perspectiva de propor melhores serviços e preços mais atraentes. Por este motivo, os provedores utilizam técnicas de modelagem matemática para avaliar ambientes sensíveis ao custo, tais como: despesas de capital de investimento e de operação [28].

## 2.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Os operadores de rede precisam considerar os pontos ao projetar suas arquiteturas. Os operadores precisam analisar suas necessidades atuais ou infraestrutura futura, tornando-o expansível para o futuro. Inevitavelmente, haverá uma compensação entre custo e eficiência da rede.

Este capítulo teve como objetivo fundamental apresentar as principais tecnologias e conceitos retratados no desenvolvimento deste trabalho, expondo os componentes utilizados para formular a avaliação de custo de infraestrutura de rede centralizada.

Esta fase da pesquisa e seus respectivos objetivos, adquirem, em particular, a fundamentação proposta por este trabalho. Considera-se, ainda, este capítulo como de grande relevância, uma vez que apresenta os principais conceitos e tecnologias associados à modelagem matemática de uma rede centralizada.

As redes centralizadas de próxima geração são um modelo de arquitetura, que tem o potencial de responder aos desafios e requisitos mencionados acima e em outros capítulos. Todavia, C-RAN não é a única arquitetura que pode responder às mudanças enfrentadas pelas operadoras de redes móveis. Logo um estudo econômico se faz necessário para avaliar a questão custo-benefício desta proposta. O próximo capítulo abordará, com detalhes, todas as facetas que precisam ser analisadas e o impacto econômico que cada elemento possui no TCO.

# Capítulo 3

## Modelagem de Custos

Com a apresentação do contexto em que esta dissertação atua e possui seu foco, assim como apresentação das tecnologias envolvidas nos últimos capítulos, este capítulo tem como função apresentar a metodologia de pesquisa seguida no desenvolvimento deste estudo. A metodologia aplicada foram etapas seguidas, as quais serão detalhadas na próxima seção, apontando todos os passos, desde o levantamento bibliográfico até a formulação da modelagem de custo.

Logo após apresentar a metodologia de pesquisa, será apresentada a modelagem matemática de Custo Total de Propriedade. Na seção da modelagem econômica, fundamenta-se no modelo de avaliação de custo, no qual sua utilização é feita para justificar tal proposta. O capítulo encerra-se ao fazer as considerações finais em um breve apanhado tudo o que fora explanado na seção.

### 3.1 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este trabalho foi desenvolvido com base em estágios de pesquisas que amparam no desenvolvimento. A metodologia da pesquisa aplicada, quanto aos objetivos, foi a explicativa [29], pois o trabalho visa destacar os pontos importantes que mais influenciam nos custos de TCO. A Figura 3.1 possui 4 etapas, todas representando o processo de desenvolvimento deste trabalho. No início do processo foi efetuado um levantamento bibliográfico, o mesmo sempre recorrente ao longo do estudo, a fim de buscar especialmente, desvendar os relacionamentos entre conceitos, ideias e características do contexto do trabalho, sobre os estágios de pesquisa utilizado. Em geral, a metodologia utilizada tem como objetivo principal calcular os custos de um cenário de rede centralizada, com o intuito de destacar

seus principais pontos de discussão.

## METODOLOGIA DE PESQUISA

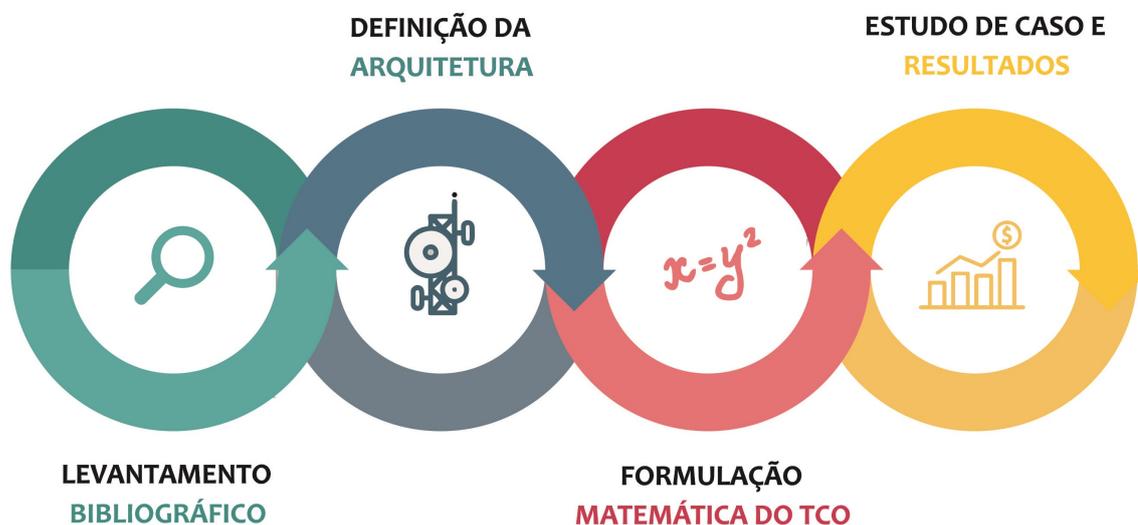


Figura 3.1: Metodologia de pesquisa

O passo seguinte, após a análise de redes centralizadas, foi a definição do cenário baseada no levantamento bibliográfico, incluindo as principais literaturas que abordam estudos correlatos. A maior parte do referencial teórico consiste na avaliação do cenário de redes tradicionais sob aspectos financeiros, e na afirmativa de que esta seria uma grande oportunidade para criar um cenário de avaliação econômica de um cenário abordando redes móveis centralizadas de próxima geração envolvendo novos elementos dispersos na literatura. Na sequência, foi montada uma arquitetura para aplicar a avaliação de custo e, sobretudo, modelar o cenário com suporte da ferramenta Matlab e da formulação matemática que será descrita seguir.

Uma vez definida a arquitetura e o cenário avaliado, seguiu-se para etapa de implementar a formulação matemática de custo total de propriedade. Nesta etapa foi desenvolvido a formulação matemática e aplicado os parâmetros que foram coletados durante o levantamento bibliográfico, esses valores servem para caracterização do cenário base, tal qual o de uma infraestrutura e operação. Uma vez realizada a modelagem, foi realizado um estudo de caso com o intuito de aplicar o modelo proposto em um cenário de abordagem *greenfield*, onde uma nova infraestrutura será implantada.

A última etapa foi a realização da avaliação do estudo caso, proposto no trabalho, e a apresentação do resultado final utilizando de uma abordagem qualitativa. Portanto, a metodologia de pesquisa e avaliação, aqui discutida, ilícita todas as fases concernentes ao

desenvolvimento deste trabalho. É evidente que, para analisar as variáveis mais pertinentes ao modelo TCO, o primeiro passo é fazer um levantamento sobre todas as informações pertinentes ao tema, buscando sempre seguir um passo a passo bem definido.

## 3.2 MODELAGEM DE CUSTO

Nesta seção é apresentado um modelo de TCO que abrange os custos de CAPEX e OPEX de uma rede móvel em arquiteturas centralizadas, sendo a principal contribuição deste trabalho. A formulação matemática detalha todos os investimentos relacionados a implantação da rede, incluindo também, os gastos de custo operacional. A modelagem de TCO, como mostra na Figura abaixo, é fundamentalmente o somatório do CAPEX, que se preocupa com as despesas de capital inicial (equipamentos, infraestrutura e instalação) e do OPEX, com os custos de operacionais (energia, locação de fibra ótica, manutenção, gerenciamento de falhas e espaço físico).

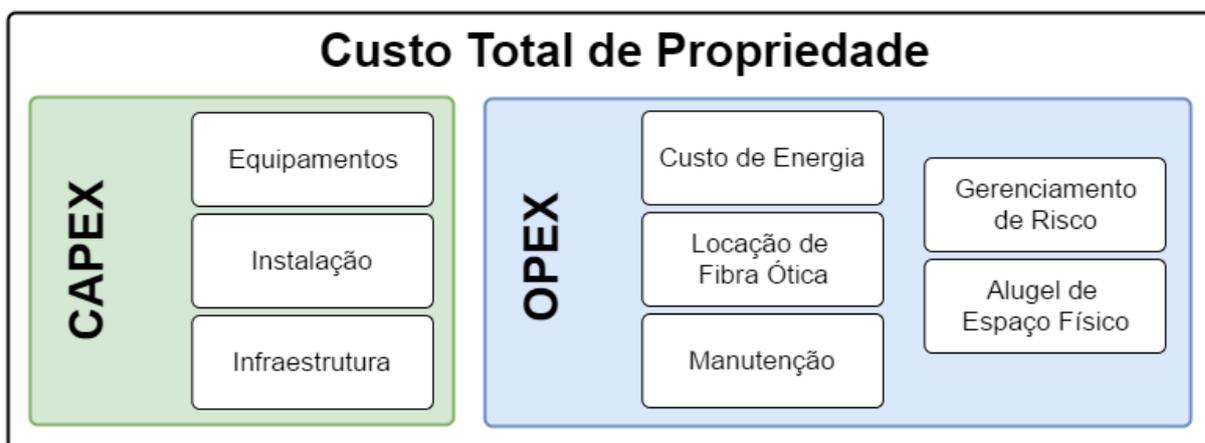


Figura 3.2: Custo Total de Propriedade

Como já mencionado, o TCO consiste no somatório de todas as despesas relacionadas à implantação de infraestrutura, incluindo CAPEX e OPEX, conforme previsto na equação 3.1.

$$TCO = CAPEX + OPEX \quad (3.1)$$

A formulação do modelo TCO foi elaborada com base na literatura científica, utilizando-se dos elementos necessários para a avaliação de custo presente no cenário de redes centralizadas. Esta é uma tarefa complexa que pode ser mitigada, uma vez consideradas as metodologias de avaliação de custos descritas no trabalho.

Para implementação do modelo, foi utilizada uma formulação matemática já consolidada na área de modelagem de custo, responsável por avaliar a aquisição de bens inerentes à produtos de softwares ou hardware. O TCO é relacionado, somente, à avaliação de custo de aquisição e operação de bens (equipamentos e componentes de TI), fornecendo uma base aproximada dos custos de um determinado investimento.

A formulação matemática foi implementada via ferramenta Matlab, o qual fornece um ambiente interativo de alta performance, voltado para cálculos complexos. Os parâmetros utilizados foram normalizados a partir dos valores que são tratados pelo referencial bibliográfico.

### 3.2.1 Despesas de Capital

O CAPEX é o termo fornecido pela literatura para contabilizar os custos relacionados aos bens de capital, isto é, despesas de investimento inicial [23]. Da mesma forma que o modelo TCO, o CAPEX foi abstraído de outras fontes e, através de outra base matemática, prevê os valores concernentes à aquisição, implantação, infraestrutura e instalação.

O CAPEX representa os custos relacionados a fase de implantação da rede, abrangendo a compra( $Equip_{cost}$ ) e instalação de equipamentos( $Inst_{cost}$ ), além da implantação da infraestrutura ( $Infra_{cost}$ ), conforme equação 3.2.

$$CAPEX = Equip_{cost} + Inst_{cost} + Infra_{cost} \quad (3.2)$$

O grande diferencial do CAPEX é o seu custo, determinado somente nas fases iniciais de estudos financeiros, após isso, a depreciação de equipamentos entra em cena, delineando uma nova performance para o custo de equipamentos e infraestrutura. A ideia é de fornecer um modelo para estimativa de custo que atenda a necessidade do centro de custos, e que possa ser amplamente utilizado como forma para investimentos em infraestrutura de rede móvel centralizada.

Na sequência, a formulação será detalhada, apresentado quais elementos estão relacionados com cada variável especificada.

### 3.2.1.1 Equipamentos

A equação 3.3 representa o total de despesas relacionadas à compra dos equipamentos e componentes de *backhaul* e *fronthaul* necessários para a implantação da rede centralizada.

$$Equip_{cost} = \sum_{i=1}^n N_i^{Eq} P_i^{Eq} \quad (3.3)$$

Em que  $N_i^{Eq}$  e  $P_i^{Eq}$  representam cada tipo de equipamento  $i$  e seus respectivos preços. O tipo de equipamentos e sua quantidade depende, especificamente, da arquitetura escolhida para implantação e da tecnologia de acesso que servirá de *fronthaul*.

Finalizada a fase de compra de todos os equipamentos de *fronthaul* e *backhaul*, a equipe técnica passa à fase de instalação e testes de todos os equipamentos. O custo total para a instalação de cada equipamento em suas devidas localidades é expresso na equação 3.4.

$$Inst_{cost} = \sum_{i=1}^n (T_i^{InstallPort} N_i^{Ports}) N_i^{Eq} P_{tech} \quad (3.4)$$

Em que  $T_i^{InstallPort}$ ,  $N_i^{Ports}$ ,  $N_i^{Eq}$  e  $P_{tech}$  representam, respectivamente, o tempo em horas necessário para se instalar uma porta do equipamento  $i$ , o número de portas a serem instaladas para o equipamento, o quantitativo de equipamentos e o salário do técnico responsável. Sendo  $i$  a representação de cada tipo de equipamento.

### 3.2.1.2 Infraestrutura

Abrange os investimentos relacionados ao custo total da infraestrutura de um segmento de *fronthaul* e *backhaul* em um cenário móvel, utilizando-se da fibra como tecnologia de acesso. Os segmentos de fibras são colocados dentro dos dutos que estão enterradas sob o solo (tunelamento). O custo da infraestrutura de fibra inclui todas as despesas relacionadas com a escavação de dutos, compra e implantação de cabos de fibra nos dutos. Esta despesa pode ser expressa da seguinte forma:

$$Infra_{cost} = L_{trench} P_{trench} + L_{fiber} P_{fiber} + L_{lease} P_{lease} \quad (3.5)$$

As variáveis  $L_{trench}$ ,  $P_{trench}$ ,  $L_{fiber}$  e  $P_{fiber}$  representam a distância total do tunela-

mento, o preço do tunelamento por quilômetro(Km), o total de fibra ótica a ser utilizado e seu preço por Km, respectivamente. As variáveis  $L_{lease}$  e  $P_{lease}$  referem-se aos gastos iniciais referentes ao aluguel da infraestrutura fibra ótica, quando necessários.

### 3.2.2 Despesas de Operação

O OPEX [24], refere-se às despesas operacionais de equipamentos, o que, para esta proposta, consiste na especificação de todos os custos incorridos da infraestrutura após o momento de instalação, sendo estes, as despesas periódicas. Este método também foi implementado através de formulações matemáticas que calculam, detalhadamente, os fatores operacionais, tais como: custo de energia, locação de fibra ótica, manutenção, gerenciamento de riscos aluguel de espaço físico, entre outras cotações.

O OPEX calcula os ativos necessários para executar uma infraestrutura de rede, a qual geralmente é a menor parcela do TCO inicialmente, tende a aumentar devido o seu crescimento ser exponencial e atualizado periodicamente. A este método de avaliação, são atribuídos fatores que variam, com o passar dos anos, apresentando altos riscos para quem o implementa, justamente pelos seus ativos operacionais estarem sujeitos a modificação de valor que pode impactar diretamente no custo de propriedade.

Outro ativo que está relacionado com o OPEX é a depreciação dos equipamentos, ou seja, o quanto um equipamento se desvaloriza ao passar dos anos. Este método de avaliação impacta, diretamente, todos os custos de equipamento físicos, uma vez que o surgimento de novas tecnologias e, por conseguinte, a desvalorização de outras, sugerem a substituição de equipamentos, devido maiores riscos com sua utilização, tais como: riscos de perda, defasagem, altos consumo de energia e funcionamento ineficiente.

$$OPEX = En_{cost} + FL_{cost} + Mt_{cost} + FM_{cost} + FS_{cost} \quad (3.6)$$

A formulação do OPEX, equação 3.6, constitui-se da soma de  $En_{cost}$  (custo de consumo de energia),  $FL_{cost}$  (custo de locação de fibra ótica) quando houver,  $Mt_{cost}$  (custo de manutenção),  $FM_{cost}$  (custo de gerenciamento de riscos) e  $FS_{cost}$  (custo de aluguel do espaço físico) .

#### 3.2.2.1 Custo de Consumo de Energia

O consumo de energia de uma rede móvel centralizada que utiliza fibra é obtida a partir da soma do consumo de energia de todos equipamentos nos setores de backhaul e

fronthaul(*Central Office, Cell sites, BBU Pool, etc.*).

$$En_{cost} = EC_{CellSite} + EC_{CO} \quad (3.7)$$

O cálculo de consumo de energia de um *Cell Site* ( $EC_{CellSite}$ ) é mostrado na equação 3.8.

$$EC_{CellSite} = \sum_{i=1}^n EC_i^{CSEquip} P_{OutdoorKwh}, \quad (3.8)$$

Em que  $EC_i^{CSEquip}$  e  $P_{OutdoorKwh}$  representam, respectivamente, o gasto de energia em cada célula  $i$  e o preço por unidade de energia (isto é, kWh) consumida.

O custo do consumo de energia da *Central Office* ( $EC_{CO}$ ) é mostrada pela equação 3.9.

$$EC_{CO} = \sum_{i=1}^{N_{CO}} R \sum_{i=1}^n EC_i^{COEquip} P_{IndoorKwh}, \quad (3.9)$$

Em que  $EC_i^{BBUPEquip}$  representa o gasto de energia de cada equipamento  $i$  alocado dentro de uma *Central Office*. O coeficiente de refrigeração ( $R$ ) é usado para contabilizar o resfriamento na *Central Office*.

### 3.2.2.2 Locação de Fibra Ótica

Em cenários que apresentam infraestrutura legada, faz-se necessário se preocupar com o custo de locação de fibra, o qual é expresso pela equação 3.10.

$$FL_{cost} = L_{lease} P_{lease} \quad (3.10)$$

Sobre a locação de fibras, a operadora de telefonia faz pagamento de uma taxa anual para a manutenção e reparação, além das despesas iniciais descritas na seção 3.1.2. Este custo é calculado multiplicando o comprimento total de fibras alugadas em Km ( $L_{lease}$ ) pela taxa anual de manutenção por Km ( $P_{lease}$ ).

### 3.2.2.3 Custo de Manutenção

Os custos de manutenção representam os gastos relacionados ao monitoramento e reparo dos equipamentos do *Central Office* e dos *Cell Sites*. Inclui-se, também, os custos de taxa anual para as licenças de software. Os custos relacionados a manutenção são necessários para manter o *fronthaul* e *backhaul* sempre em boas situações de operação. O custo total é calculado usando a equação 3.11.

$$Mt_{cost} = Mt_{CS} + Mt_{CO} + Mt_{SWL}, \quad (3.11)$$

As variáveis  $Mt_{CS}$  e  $Mt_{CO}$  são os custos de manutenção dos *Cell Sites* e dos *Central Office*, respectivamente. Por fim, é contabilizado a taxa anual de licenças de software ( $Mt_{SWL}$ ). A equação 3.12 traz o cálculo de manutenção do *Cell Site*:

$$Mt_{CS} = P_{Tech}(RT_{CS} + 2T_{Travel}), \quad (3.12)$$

Em que  $P_{Tech}$ ,  $RT_{CS}$  e  $T_{Travel}$  representam, respectivamente, o salário do técnico por hora, o tempo requerido para manutenção de cada *Cell Site* e o tempo de viagem para locação onde está cada *Cell Site*.

O *Central Office* é a localidade da rede em que estão localizados os equipamentos responsáveis para funcionamento da C-RAN, como por exemplo, a OLT e as *BBU Pools*, logo os operadores consideram a necessidade de se ter várias rodadas de procedimentos de manutenção para cada *Central Office*, dependendo do número de usuários e serviços abrangidos por cada um deles. Esse cálculo de custo de manutenção é expresso da seguinte forma:

$$Mt_{CO} = RT_{COR}N_{CO}P_{Tech} + P_{Upgrade}, \quad (3.13)$$

Em que  $RT_{COR}$ ,  $N_{CO}$  e  $P_{Upgrade}$  representam, respectivamente, o tempo necessário em homens horas para reparação de cada *Central Office* em um ano, a quantidade de *Central Office* e o custo a ser pago para atualização de hardware e para substituição de componentes, por exemplo, as baterias.

### 3.2.2.4 Gerenciamento de Risco

O gerenciamento de riscos é referente às despesas de reparo no *fronthaul* e *backhaul* na ocorrência de falhas na rede. Este é um ponto de operação a ser estudado porque existem muitos fatores que devem ser considerados no processo de reparar uma falha. Em primeiro lugar, a falha deve ser detectada e localizada.

$$FM_{cost} = \sum_{i=1}^n ((RT_i + 2T_{Travel})N_{Tech}P_{Tech} + P_{rp})ANF_iN_i^{Eq}, \quad (3.14)$$

Em que  $RT_i$ ,  $N_{Tech}$  e  $P_{rp}$  representam na equação 3.14, em ordem, o tempo de reparo cada equipamento  $i$ , o número de técnicos necessários para reparo da falha e o custo da reparação caso seja necessária a compra de um novo componente. O número médio de falhas por ano de cada tipo de componente  $i$  ( $ANF_i$ ), pode ser calculado com base na taxa de falha do componente que, ao ser multiplicado pelo número de equipamentos do tipo  $i$  na rede ( $N_i^{Eq}$ ), resulta no número esperado de falhas do componente do tipo  $i$  durante período de  $10^9$  horas [30].

### 3.2.2.5 Aluguel de Espaço Físico

O custo de espaço ( $FS_{cost}$ ) é uma taxa de aluguel anual paga pela operadora da rede para alojar seus equipamentos, como mostrado na expressão 3.15:

$$FS_{cost} = FS_{CO} + FS_{CS} \quad (3.15)$$

A variável  $A_{Rack}$  determina o espaço necessário para um rack, levando em consideração o espaço de trabalho aceitável na frente dele para que os técnicos possam atuar no rack. O número de racks dentro de um *Central Office* é medido dividindo o número de equipamentos por *Central Office* ( $N_{Eq}^{CO}$ ) e pelo número de equipamentos permitidos por rack ( $N_{Rack}^{CO}$ ), como mostrado na equação 3.16.

$$FS_{CO} = (A_{Rack}(N_{Eq}^{CO}/N_{Rack}^{CO}))P_{IndoorM2} \quad (3.16)$$

Somado a equação anterior, temos agora a 3.17 que, calcula o custo do espaço físico para os *Cell Sites*, em que  $A_{CS}$ ,  $N_{CS}$  e  $P_{OutdoorM2}$  representam o espaço necessário para implantação de um *Cell Site*, a quantidade de *Cell Sites* e o preço do aluguel anual pago pelas operadoras de telefonia.

---

$$FS_{CS} = A_{CS}N_{CS}P_{Outdoor}M_2 \quad (3.17)$$

### 3.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo buscou apresentar a metodologia de pesquisa e o modelo de avaliação utilizados na elaboração deste trabalho, discorrendo sobre as principais etapas de desenvolvimento. O papel deste capítulo foi apresentar as etapas até se alcançar o objetivo principal de estimativa de custos de uma infraestrutura e sua operação.

Logo, os pontos aqui retratados são uma das contribuições desta proposta, embora seja um método disseminado pela literatura científica, é de grande interesse a toda comunidade acadêmica por ser um modelo de avaliação altamente oportuno, uma vez que a proposta de uma rede centralizada como um modelo de arquitetura da próxima geração de redes móveis é presentes em diversas pesquisas, nesse sentido, tendem a contribuir cada vez mais para as pesquisas das telecomunicações.

# Capítulo 4

## Trabalhos Correlatos

O conceito C-RAN vem como uma forma viável de reduzir as despesas de capital e de funcionamento dos operadores de redes móveis de próxima geração. Por outro lado, a introdução de C-RAN no cenário atual resulta em um impacto econômico relacionado à atualização da arquitetura das redes móveis distribuídas, pois o crescente quantitativo de equipamentos de *backhaul* e *fronthaul* traz consigo novos desafios e questionamentos para as operadoras em relação às margens de lucro e viabilidade econômica das novas soluções. Diversos trabalhos acadêmicos abordam e tratam inovações nos assuntos correlacionados. Assim, esta seção será dividida em trabalhos correlatos sobre análise de custos de D-RAN, Redes Heterogêneas e C- RAN, assuntos basilares deste trabalho.

### 4.1 ANÁLISE DE CUSTOS DE REDES DISTRIBUÍDAS

Em [31] é feita uma avaliação total de custo de propriedade para *backhaul* móvel de Redes de Acesso à Rádio Distribuídas ou *Distributed Radio Access Networks* (D-RAN). O foco do trabalho é determinar o *backhaul* mais adequado, dentre cinco opções de arquiteturas com diferentes tecnologias de acesso, com base nas duas abordagens de implantação: *greenfield* e *brownfield*. As fases iniciais de planejamento levam em consideração o cálculo do tráfego de demanda, onde é calculado os requisitos esperados de tráfego da rede em uma determinada área. Após essa fase, é realizado o planejamento da implantação de redes sem fio com levantamento de número de estações bases necessárias na área. Na fase de implantação e migração do *backhaul*, é determinada a quantidade de equipamento de *backhaul* necessário para atender às estações de base macro e *smallcells* na área.

As entradas do cálculo do TCO são recorrentes dessa fase de planejamento do

*backhaul* (por exemplo, implantação ou migração), assim como do custo do equipamento e serviços disponíveis (por exemplo, consumo de energia, infraestrutura de fibra, *leasing* de espectro). Com base nestas entradas e em um modelo de TCO especificamente adaptado, o CAPEX e o OPEX das arquiteturas de *backhaul* de cenários de redes consideradas são calculados, tendo assim, uma metodologia abrangente que pode ser usada para analisar o custo total de propriedade de uma série de opções de *backhaul*.

No trabalho de [32] são apresentadas metodologias abrangentes para avaliação de TCO na implantação de redes heterogêneas, porém, não aplicadas especificamente à arquiteturas centralizadas. A análise econômica é aplicada em dois cenários urbanos com arquiteturas de *backhaul* distintos, um cenário utilizado apenas microwave como tecnologia de acesso e um segundo cenário usando fibra até o prédio, destacando, em seus resultados, os fatores que mais influenciam no valor final de TCO em cada cenário. Apontando que, no caso de uma implantação de HetNet, com um grande número de *smallcells*, o cenário de *Microwave* possuiu um *backhaul* mais caro.

Em [32], [31] os elementos de TCO são formalizados e parametrizados em detalhes, contudo, as formulações atendem apenas arquiteturas distribuídas.

## 4.2 ANÁLISE DE CUSTOS DE REDES HETEROGÊNEAS

Como apresentado por [33] a criação de um *fronthaul*, que utiliza a fibra ótica, possui um TCO bem alto, se tratando de *greenfield*, [33] mostra algumas tecnologias sem fio que utilizam altas faixas de frequência (entre 60GHz e 80GHz) que alcançam taxas de dados em torno de dezenas de Gbps, é apresentado no trabalho que a densificação de *smallcells* torna a utilização de *fronthaul* unicamente sem fio inviável, em vista disso a solução é realizar uma combinação entre tecnologias (sem e com fio) para se alcançar um *fronthaul* que atenda as demandas e que não possua um TCO inviável.

Ao adotar uma abordagem de alocação heurística usando futuros modelos de propagação de rede, em [34] buscou-se fornecer, aos usuários, os níveis mínimos de qualidade de serviço necessários e reduzir o custo total da implantação. Como pode ser visto a partir dos resultados analisados, uma diminuição significativa nos valores de TCO, de maneira especial, em cenários pequenos, os quais dependem da distribuição do usuário, posição e número dos pontos de acesso de fibra, todos esses fatores que influenciam no TCO. A lacuna a ser trabalhada, a partir desse trabalho, é abordar mais pontos do TCO, especificamente do capital de operação, tais como: gerenciamento de riscos, manutenção e aluguel de espaço físico, além de trabalhar diferentes cenários de rede distribuída.

As redes centralizadas são uma das principais propostas de arquitetura para atender as redes 5G e deve ser capaz de suportar taxas de dados superiores (até 10 Gb/s) e mais largura de banda do que as tecnologias celulares de gerações anteriores. Segundo [34], pesquisas mostram que 80% dos usuários estão concentrados em 20% das células da rede. De tal modo, o uso e o estudo das tecnologias de alta capacidade, como *backhaul* e *fronthaul* na arquitetura C-RAN aliados à HetNets, como alternativa, se torna necessário.

### 4.3 ANÁLISE DE CUSTOS DE C-RAN

Duas abordagens podem ser levadas em consideração durante o planejamento da implantação de uma nova arquitetura de rede móvel, a primeira consiste na migração e adaptação da infraestrutura, já existente, para a nova arquitetura, (*brownfield*), e a outra abordagem que é considerada nesta dissertação onde propõe-se a implantação completa de uma nova infraestrutura, (*greenfield*). A abordagem de estudo de viabilidade econômica, levada em consideração nos trabalhos acadêmicos, trata de aspectos de maneira mais individual, CAPEX ou OPEX, conceitos que circundam o TCO de uma rede móvel.

No estudo desenvolvido em [35], são propostas soluções para otimizar as novas implantações de C-RAN em termos de minimização do custo de capital da rede. É levado em consideração o cenário de grande escala, onde é necessária a implantação de múltiplas BBU pools, mostrando como atribuir células em diferentes BBU pools no cenário proposto no artigo. Fazendo uso do método de programação linear inteira ou *Integer Linear Programming*(ILP), é feita a derivação de diretrizes de forma a minimizar o capital operacional da implantação de uma rede centralizada, logo, neste trabalho, é apresentado apenas CAPEX da rede móvel centralizada.

Holm [35] propõe soluções sobre como otimizar novas implantações de C-RAN em termos de minimização de TCO. Isso envolve uma distribuição ótima de células residenciais e de escritório, a fim de reduzir o número de BBUs exigidos para um pool de BBU e a parcela ótima de C-RAN com RRH *versus* BSs tradicionais em diferentes fatores de custo. Foi investigado o ganho de multiplexação estatística, que pode ser alcançado em C-RAN, usando abordagens analíticas e de modelagem. Para o perfil de tráfego analisado, ambos mostram que o ganho ótimo pode ser obtido conectando 20% a 30% de BSs de escritório e 70% a 80% de BSs residenciais ao *BBU pool* e que o ganho de multiplexação estatística atingindo até 1,6 pode ser alcançado.

Em [36] uma análise sobre o ganho de multiplexação estatística em função da organização das células é realizada com base na variação da população, entre o dia e a

---

noite, na área metropolitana de Tóquio. A análise mostra que o número de BBUs pode ser reduzido em 75% em comparação com a arquitetura de rede de acesso tradicional, levando em consideração o valor de CAPEX.

Em [8] é trabalhado, apenas, o capital de operação. O artigo analisa o desempenho energético de redes de acesso, onde cada rede de acesso utiliza uma opção diferente para dividir as funções de processamento de Banda Base. Os resultados mostram que, com as interfaces de rádio LTE, o consumo de energia da rede de transporte equivale, apenas, uma pequena porcentagem do consumo total da energia da rede. Como resultado, as arquiteturas de rádio LTE, totalmente centralizadas, são uma opção viável, levando em consideração a economia de energia em comparação com as tradicionais. Sibel salienta que, as redes de quinta geração centralizadas, se não forem cuidadosamente projetadas, podem tornar-se impraticáveis devido ao excesso de consumo de energia da rede de transporte.

O impacto do nível de centralização em arquiteturas C-RAN suportadas por redes óticas é avaliado por [37]. Para esse fim, diferentes níveis de centralização são comparados, em termos de CAPEX e OPEX, utilizando um modelo ILP misto para dimensionamento de locais que hospedam *BBU pools* (ou seja, escritórios centrais (CO)) para minimizar CAPEX em termos de virtualização de recursos e equipamentos de rede, levando em consideração as diferentes interfaces necessárias. Do projeto de alocação dos CO resultante, o impacto do nível de centralização também é estudado a partir da perspectiva de OPEX, em termos de consumo de energia dos equipamentos de rede. Em comparação com o nível máximo de pontos de centralização, os resultados mostraram uma economia de custos quando se considera um menor nível de centralização, de forma a atender os usuários e com TCO baixo.

O principal objetivo de [38] foi analisar diferentes estratégias para a implementação de C-RAN em uma rede LTE-A existente, utilizando da abordagem *brownfield*, aproveitando a divisão funcional de uma estação base em RRH e BBU. São comparadas quatro estratégias diferentes: Minimizar o atraso, balanceamento de carga, maximizar o ganho de multiplexação e minimizar o número de *pools*. Os resultados obtidos para a cidade do Porto provam que uma implementação C-RAN no cenário proposto com 19 *pools* é possível, sem problemas de latência no cenário do abordado. O operador de rede pode combinar diferentes perfis de tráfego e conseguir um ganho de multiplexação até 1.31 que pode ser traduzido em economia de capacidade e custo, obtendo reduções de 63% no investimento de capital e 31% nas despesas operacionais, como energia e manutenção.

A proposta de [39] tem como foco a avaliação do custo de migração da Rede de Acesso de Rádio Distribuído para o C-RAN. Para isso, é determinado o custo do C-RAN

e definido um problema de otimização de posicionamento do pool de BBU para minimizar esse custo utilizando ILP, sendo feito a combinação do custo de implantação no CAPEX, e apenas, do consumo de energia no OPEX.

Em [35], [36], [8], [38], [37] e [39] aspectos da C-RAN são analisados. Estes trabalhos apresentam pontos importantes, contudo, aspectos de CAPEX, tais como, aquisição de equipamentos, tunelamento, fibra ótica e instalação destes, e de OPEX, tais como mão de obra, consumo de energia, aluguel de espaço físico, gerenciamento de risco, entre outros, ainda não foram abordados na literatura em conjunto e voltados à arquiteturas centralizadas de redes de acesso.

## 4.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo de trabalhos correlatos buscou mostrar a literatura atual relacionada a redes heterogêneas, D-RAN, C-RAN e suas análises de implantação com foco em modelagem econômica. Além desses, muitos outros trabalhos estão sendo realizados ou já foram publicados, visto que esses assuntos são os mais atuais e mais procurados pela comunidade científica.

# Capítulo 5

## Estudo de Caso

Neste capítulo, é explanada a última etapa da metodologia de pesquisa utilizada neste trabalho, onde a modelagem do TCO, discutida nos capítulos anteriores, serão aplicados nos cenários propostos.

Os cenários apresentados, neste estudo de caso, foram obtidos da literatura e visam demonstrar que a análise de custo proposta, consegue abranger tanto cenários homogêneos (possuem mesma arquitetura/mesmos equipamentos) como heterogêneos (multi-arquitetural). Para os homogêneos, cenários que possuem, apenas, as macrocélulas [32], se utilizou como base o trabalho [35]. Já os cenários heterogêneos, onde há a implantação de *smallcells*, foram utilizados, como base, os cenários de [31].

O estudo de caso, discutido nas próximas seções, estão divididos em duas partes: a primeira parte aborda um cenário de rede de acesso centralizada homogêneo *greenfield* e, ainda, com uma abordagem utilizando infraestrutura legada nos resultados, *brownfield*. A segunda parte traz a elaboração de cenários de redes de acesso heterogêneas *greenfields* tradicionais e um novo cenário de C-RAN, utilizando tecnologias heterogêneas.

### 5.1 CENÁRIO HOMOGÊNEO

Esta seção apresenta um estudo de caso em que o modelo de TCO proposto é aplicado ao cenário idealizado para avaliar os custos de implantação e operação da rede móvel com abordagem *greenfield*. O cenário utilizado, que abrange uma área de 15 Km<sup>2</sup>, é composto por 4 BBU Pools e 169 células com RRHs, sendo 70% destas localizadas em áreas residenciais, e o restante, em áreas comerciais, que apresentam elevados índices de tráfego [35].

Durante esta primeira parte do estudo de caso, para alocação de RRHs em cenários com múltiplas BBU Pools, foi utilizada, como estratégia, uma proposta baseada na otimização apresentada em [35] na qual utiliza um modelo de programação linear inteira para minimizar o CAPEX da rede.

A alocação considera o limite de cada *BBU Pool* em termos de tamanho e carga, a máxima distância entre RRH e *BBU Pool*, a qual é respeitada para evitar atrasos na rede, e por fim, o mesmo número de células comerciais é alocado a cada *BBU Pool* de modo que o ganho de multiplexação estatística seja maximizado.

Diferente de [35], que utilizou de distância euclidiana para estipular as distâncias entre as localidades da rede móvel, foi utilizada a distância de Táxi, abordagem apresentada por [40] que considera apenas caminhos horizontais e verticais, retratando com fidelidade um cenário urbano real. A interconexão do *fronthaul* é feita com fibra ótica monomodo, utilizando um padrão de sinal de rádio digital sobre fibra (D-RoF), como o CPRI. Distribuições de perfis de tráfego distintas são apresentadas, isso implica na ligação da *BBU Pool* com o *Cell Site*, pois, dependendo da carga que cada célula possui é determinado o seu processamento para a *BBU Pool* mais próxima e com processamento disponível para alocação.

## 5.2 CENÁRIOS HETEROGÊNEOS

Para efeito de comparação com o a arquitetura centralizada proposta e a utilização do conceito de HetNets, esta seção do trabalho visa destacar a criação de diferentes arquiteturas distribuída que serão utilizados para avaliação. As arquiteturas distribuídas, apresentadas abaixo, que serão utilizadas neste estudo de caso, foram baseadas na proposta de [31]. Os cenários utilizados nos cenários heterogêneos, abrangem uma área de 15 Km<sup>2</sup>, e são compostos por 4 *BBU Pools* e 85 células com RRHs e 84 células utilizando *smallcells* em seus edifícios, cenário onde cada edifício possui 5 andares com 2 apartamentos por andar.

O objetivo ainda desta seção é apresentar as principais tecnologias das redes de acesso das operadoras de telecomunicações, Fibra e *Microwave*, que chegam até o usuário final. Entende-se por rede de acesso, o segmento que permite, a cada usuário ou conjunto de usuários a ele conectados, terem acesso ao núcleo da rede dessas operadoras que se conecta a Internet.

### 5.2.1 Arquitetura 01 : Rede de Acesso a Rádio utilizando *Microwave*

A arquitetura baseada em *Microwave* foi analisada, neste trabalho, pelo fato de ser a tecnologia banda larga que possui uma implantação mais rápida seguido por um baixo esforço de implantação, estas características tornarão a tecnologia de *Microwave* uma das principais arquiteturas de *backhaul* em cenários *outdoor* e *indoor*, com a capacidade de atender demandas na escala de Gbps para cenários heterogêneos [41].

O uso generalizado da banda larga sem fio, na última década, levou ao desenvolvimento e implantação de múltiplas tecnologias de acesso de rádio sem fio de banda larga (RATs) como EVDO, WiMAX, HSPA e LTE [9].

A arquitetura de *Microwave* é a tecnologia de rede de acesso mais difundida, tanto em cenários urbanos quanto em cenários rurais [43]. A difusão desta tecnologia é devido baixo custo de capital de investimento para implantação, além de possui, permite, à operadora de rede, um período mais curto em relação a outras arquiteturas [44]. Quando avaliamos o OPEX é observado um custo mais alto, principalmente, devido ao alto custo de energia.

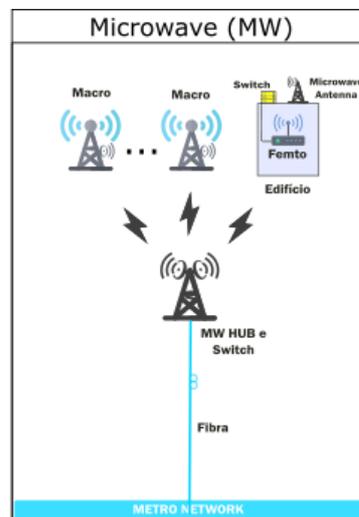


Figura 5.1: Arquitetura de Acesso Móvel Distribuída de Microwave

A arquitetura que será utilizada neste estudo de caso, foi baseada na proposta de [31]. Como demonstrado na Figura 5.1, as macrocélulas do ambiente *outdoor* são atendidas pela tecnologia de *Microwave* conectadas a um hub usando um link de *Microwave* dedicado. Já no ambiente *indoor*, as femtocélulas localizadas dentro de um edifício estão conectadas a um *Gigabit Ethernet Switch* (GES) usando cabos com a tecnologia de cobre

(por exemplo, CAT 5/6/7). O papel do GES é agregar o tráfego das fotocélulas dentro do edifício, para os usuários *indoors* e fornecer conectividade através de uma antena de *Microwave* situada no topo do edifício.

A antena, por sua vez, é conectada a um hub usando um link de *Microwave* dedicado. Nos hubs há a presença de switches que irão servir para agregar o tráfego das antenas de *Microwave* e conectar-se à rede de metro. A transmissão em direção à rede Metro é realizada usando links ópticos ponto-a-ponto.

### 5.2.2 Arquitetura 02 : Rede de Acesso a Rádio utilizando *Fiber-to-the-Home* e *Microwave*

O segundo cenário, proposto neste trabalho, traz a junção de duas tecnologias para atender os diferentes ambientes, *Fiber-to-the-Home* (FTTH) e *Microwave*, como mostrado na Figura 5.2. Os benefícios econômicos da fibra são relevantes. A escolha da fibra como *fronthaul* pode impulsionar o desenvolvimento econômico, possibilitando o funcionamento de diversos serviços, e assim, impactando a forma como as pessoas vivem e trabalham. Para operadores de rede que procuram implantar fibra, existem vários fatores que precisam ser levados em consideração ao planejar uma instalação, tais como escolhas técnicas e custos de implantação e operação.

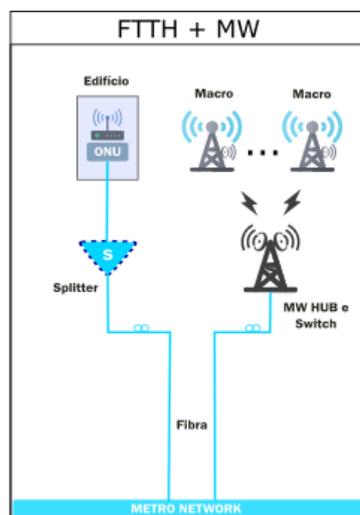


Figura 5.2: Arquitetura de Acesso Móvel Distribuída de Fiber-to-the-Home + Microwave

A arquitetura é *Passive Optical Network* (PON) ou Rede Óptica Passiva, onde o operador instala um *Optical Line Terminal* (OLT) ou terminal de linha óptica no CO. Uma fibra é ligada no divisor óptico passivo (Splitter) com capacidade de conectar um máximo de 64 usuários finais, onde cada um possui uma *Optical Network Unit* (ONU)

ou Unidade de Rede Óptica no ponto onde a fibra finaliza. Neste cenário de FTTH e *Microwave*, as femtocélulas presentes no ambiente *indoor*, estão utilizando da arquitetura PON, onde cada femtocélula, dentro de um edifício, encontra-se conectada a uma ONU. As ONUs são conectadas a OLTs através de divisores ópticos passivos (Splitters). Os OLTs estão conectados à rede metro usando links óticos e transceptores SFP+. Já no ambiente *outdoor*, as macrocélulas utilizam a rede de *Microwave* com topologia em estrela.

Uma infraestrutura PON é menos dispendiosa para implementar e manter do que o P2P, isso ocorre porque ele usa menos portas na instalação, e logo, menos cabos de fibra. Outro fator positivo é o consumo de energia, já que os splitters no centro de uma infraestrutura PON não requerem nenhuma fonte de alimentação e, portanto, podem ser implantados, praticamente, em qualquer lugar.

### 5.2.3 Arquitetura 03 : Rede de Acesso a rádio utilizando *Fiber-to-the-Home*

A terceira solução de backhaul de redes tradicionais proposta, é intitulada como *backhaul Fiber-to-the-Home* (FTTH), é mostrada na Figura 5.3. Esta arquitetura é baseada em PONs para atender as estações base *indoor*, femtocélulas, e *outdoors* com as macrocélulas. Neste cenário, cada femtocélula e macrocélula está equipada com uma ONU conectada a um OLT através de uma rede de distribuição óptica passiva.

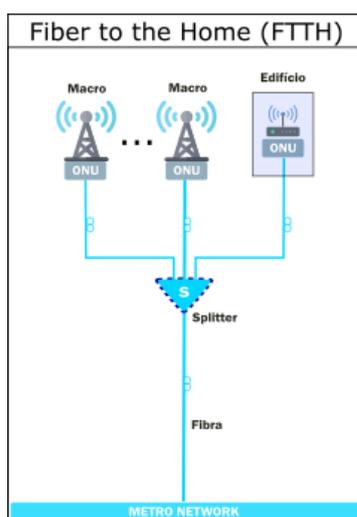


Figura 5.3: Arquitetura de Acesso Móvel Distribuída de *Fiber-to-the-Home*

A arquitetura utilizando FTTH foi escolhida pelo fato de ser a tecnologia banda larga para o mercado de massa dos próximos anos, e também já adotado por muitas

operadoras de serviços. O FTTH permitirá o transporte simultâneo de uma série de serviços, como por exemplo, a Internet com acesso eficiente e eficaz, telefonia e televisão através de uma única fibra óptica. A arquitetura *Fiber-to-the-Home*, é baseada em PONs para atender as demandas técnicas, tanto das femtocélulas presentes nos edifícios, quanto para atender as macrocélulas

#### 5.2.4 Arquitetura 04 : Rede de Acesso a Rádio Centralizada

Destacada como arquitetura 4, é uma rede de acesso de rádio Centralizada utilizando FTTH para entrega de serviços aos usuários dos ambientes *indoor* e *outdoors*, como ilustrado na Figura 5.4. Com o uso da FTTH, a rede de acesso será fundamentada na fibra e capaz de prover velocidades restritas somente pelos equipamentos existentes nas extremidades da rede. Neste cenário, cada femtocélula e macrocélula é equipada com uma ONU conectada a OLT e a BBU *Pool* da arquitetura C-RAN.

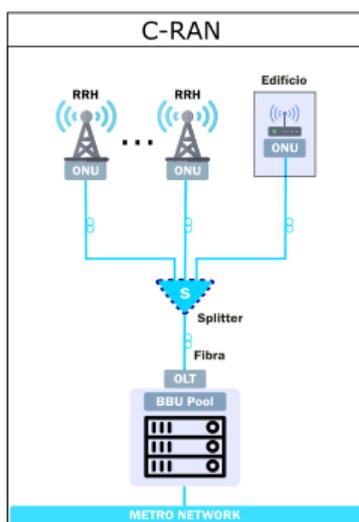


Figura 5.4: Arquitetura de Rede de Acesso de Rádio Centralizada

Embora exista benefícios atrativos, a implantação do C-RAN traz desafios consideráveis para os operadores de redes móveis. Um fator importante é a restrição de *fronthaul*, que deve garantir uma certa latência, assim como a implantação da infraestrutura e a colocação da BBU pool, estão entre os principais desafios a se concentrar.

### 5.3 COMPONENTES DE INFRAESTRUTURA

Os componentes de infraestrutura são elementos utilizados para implantação da arquitetura, sendo eles equipamentos físicos de hardware ou software, dispositivos ou partes que, juntos, totalizam a arquitetura de rede. Estes componentes são indispensáveis para qualquer avaliação de custo, e com efeito, também para este trabalho.

O grande problema encontrado na pesquisa de componentes, foi o fornecimento escasso de informações precisas, uma vez que não são muito difundidas por parte da literatura científica, e boa parte dos trabalhos apresentavam somente alguns valores, apesar de disponibilizar algumas formulações matemáticas de avaliação. Foi necessário uma pesquisa mais aprofundada, principalmente, entre artigos científicos, já citados anteriormente, possibilitando a implementação do cenário via Matlab.

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados

Item	Normalizado	Instalação(h)	Falhas(FIT)	Reparo(h)	Energia(W)
Ag. Switch	1,875	0,16	200	2	0
Antenna	12,5	0,16	540	1	20
BBU Pool	838,5	24	193548,36	2	270
CES	18,75	1	200	2	50
Femto	10	1	1612,9	2	45
GES Switch	15	1	200	2	85
KWh	0,00125	-	-	-	-
Macrocelula	137,5	24	32258,06	2	45
MW Hub	18,3125	24	3000	2	53
ONU	0,9125	1	256	1	5
Fibra(km)	1	-	-	7	-
OLT	18,75	1	756	1	105
Splitter	0,875	0,16	120	1	0
Salário Tech.(h)	0,325	-	-	-	-
Treching(km)	812,5	-	570/Km	7	-

A Tabela 5.1 resume os parâmetros de custos normalizados e parâmetros utilizados para calcular o TCO de *fronthaul* e *backhaul* de uma arquitetura centralizada e dos demais cenários utilizados na avaliação comparativa. A normalização dos preços utilizados foi baseada no preço do quilômetro de fibra ótica, que apresenta unidade de custo igual a 1. Em casos de *CostFactor* muito baixo, mesmo que o número de BBUs necessárias

seja muito menor, o comprimento de fibra a ser instalado é alto tornando a arquitetura impraticável, nestes casos a diferença entre o custo de uma BBU e um quilômetro de fibra é muito pequeno.

Os parâmetros indicados pela Tabela 5.1, foram obtidos de [31], [35], [45], [32] e [30], apresentando o custo e os valores de cada componente. Sua organização consiste em: descrição de equipamentos/serviços, seu custo normalizado, tempo necessário de instalação, tempo que o equipamento permanece em funcionamento antes de falhar, tempo necessário de reparo em horas e consumo de energia em *Watts*.

## 5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os cenários elaborados a partir da literatura, tendo assim, a sua relevância para validação da modelagem de TCO. Os cenários do estudo caso citado, apresentam características distintas em relação a sua arquitetura, equipamentos e tecnologias de acesso utilizadas, a fim de servir como cenários comparativos à rede centralizada nos resultados apresentados no próximo capítulo.

# Capítulo 6

## Resultados

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos através do emprego da modelagem proposta, de modo a destacar as diferenças das arquiteturas de redes de acesso tradicionais com o cenário de C-RAN proposto, destacando os principais pontos de custos.

### 6.1 RESULTADOS DAS REDES HOMOGÊNEAS

O cenário de entrada [35] e a alocação resultante são ilustrados pela Figura 6.1, em que estão representadas as 4 *BBU Pools* e as 169 células com seus respectivos perfis de tráfego, onde as células de perfil comercial são destacadas com bordas em negrito. A alocação das RRHs é representada de acordo com a cor referente a cada *BBU Pool*.

Segundo os resultados obtidos, no cenário com a utilização do ILP, o cenário otimizado necessita de 592 Km de fibra ótica para conectar todas as macrocélulas com as suas respectivas *BBU Pools*. Tendo em vista que, o modelo sempre prioriza a otimização do uso de recursos da *BBU Pool* e a minimização do CAPEX. Ao realizar a alocação de RRHs, logo é possível observar que certas células são alocadas a BBUs de outros setores.

Uma das alternativas do modelo proposto em [32] foi utilizado para estimação do custo total de propriedade de um cenário comparativo de arquitetura tradicional distribuída FTTH.

A Figura 6.2 apresenta uma projeção de CAPEX e OPEX em um período de 20 anos para ambas as arquiteturas. É possível observar que o cenário C-RAN apresenta uma economia de, aproximadamente, 28% do custo total de propriedade em relação a arquitetura distribuída.

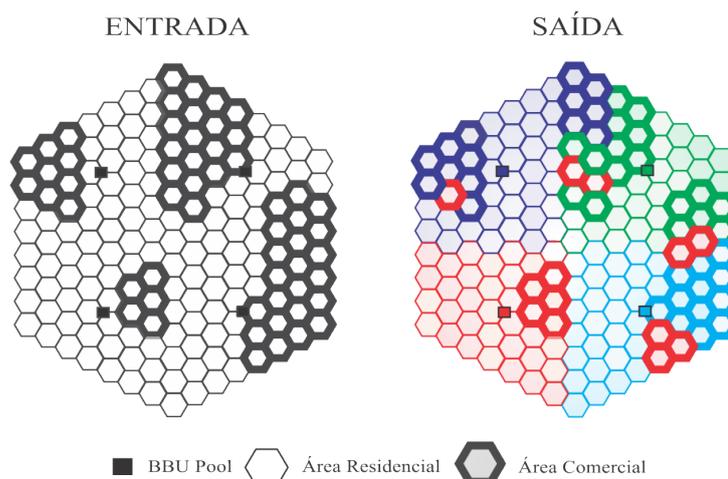


Figura 6.1: Cenário de Entrada e Saida para Alocação RRH-BBU pool

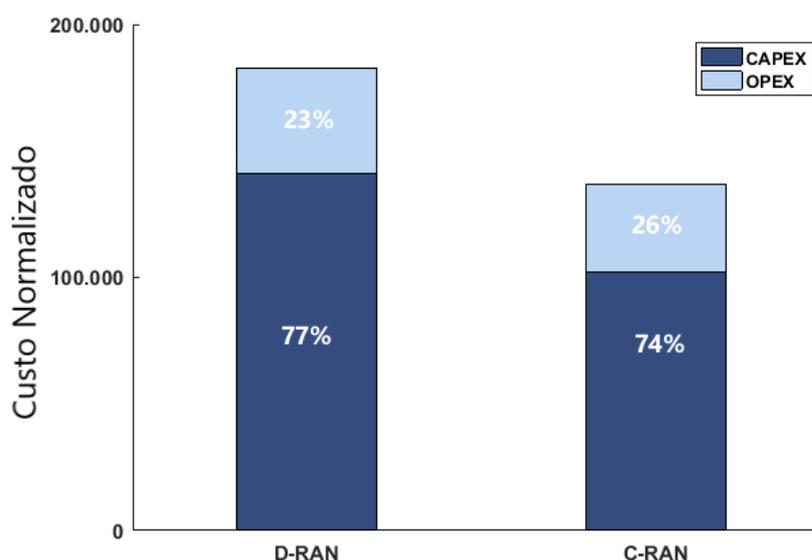


Figura 6.2: Comparação dos Custos entre a Arquitetura D-RAN e C-RAN

O modelo tradicional, por ser distribuído, utiliza uma BBU para cada RRH do cenário, justificando a economia na compra de equipamentos presente na C-RAN. Em contrapartida, na arquitetura C-RAN são necessários 32 BBUs, contagem essa baseada no trabalho de [45] onde o mesmo relata que cada BBU atende até 6 macrocélulas, referentes às 04 BBU Pools e 592 Km de fibra. Para situações em que o custo de uma BBU é expressivo, a abordagem C-RAN se torna mais atraente pois reduz o número de BBUs necessárias em, aproximadamente, 81% devido ao compartilhamento de recursos computacionais.

A Figura 6.3 ilustra os valores de CAPEX e OPEX do cenário de arquitetura centralizada, os quais são apresentados em uma perspectiva anual. É importante reforçar que, como já dito em [46], os custos relacionados a infraestrutura representam uma grande

parte do capital inicial investido para implantação de um cenário de abordagem *Greenfield*, este fato é justificado pela necessidade de realizar o tunelamento de fibra em todas as localidades do *fronthaul*.

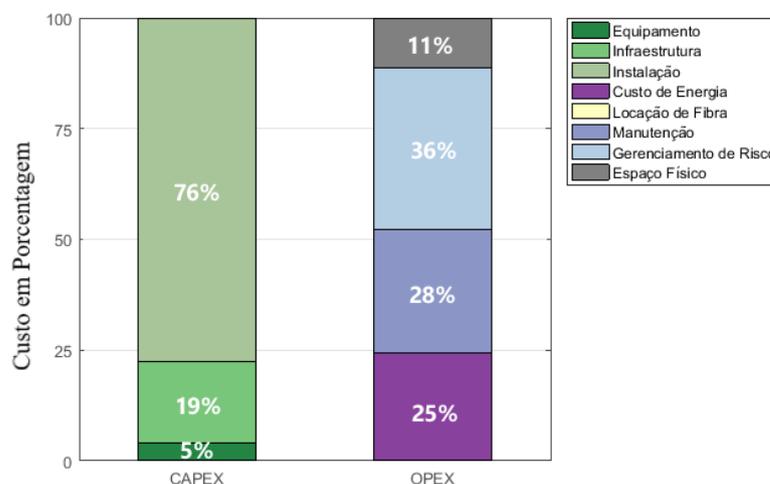


Figura 6.3: Resultados dos custos de TCO de C-RAN com Arquitetura Homogênea

No cenário em estudo, as despesas de infraestrutura representam 76% do valor total de CAPEX, levando em consideração que não há locação de equipamentos, fibra ou dutos já existentes. Desta forma, os custos de compra de equipamentos e suas instalações, representaram uma fatia menor do CAPEX.

Em relação ao OPEX, é importante notar a economia nos custos de consumo de energia, manutenção da rede e aluguel de espaço físico. A diminuição no consumo de energia é justificada pela diminuição no quantitativo de equipamentos da rede, pela centralização do processamento e pelo compartilhamento de recursos computacionais na *BBU Pool*.

Tais fatores também são responsáveis pela economia, no setor de manutenção e gerenciamento de riscos da rede móvel. A arquitetura centralizada permite, à operadora de telefonia móvel, uma maior flexibilidade nesses quesitos, essa vantagem está relacionada à possibilidade de melhor gerenciamento, pois grande parte dos serviços podem ser feitos remotamente.

À economia no aluguel de espaço físico, em comparação às arquiteturas distribuídas atuais, é justificada pela centralização das unidades de processamento de banda base, diminuindo, consideravelmente, o espaço necessário para implantação de um novo *Cell Site*.

A metodologia proposta neste trabalho, possibilita que diversos cenários possam ser avaliados. As redes de *fronthaul* e *backhaul* baseadas em fibra são organizadas em

topologias de árvore ou em ponto-a-ponto. O *backhaul* baseado em fibra, oferece capacidade praticamente ilimitada em longas distâncias. No entanto, é relativamente caro e lento para implementar em áreas onde não existe infraestrutura de fibra. Cenários com uma infraestrutura legada diminuem consideravelmente o valor do TCO, por exemplo, pode ser observado na Tabela 6.1, a qual apresenta os custos normalizados, um aumento significativo no investimento total, aproximadamente 60% de aumento no TCO entre os cenários mais extremos, ou seja, sem aluguel de fibra óptica. O valor significativo, e superior ao OPEX dos 20 anos analisados.

Tabela 6.1: Valores de TCO para 20 anos - Aluguel de fibra óptica

Fibra Alugada (%)	CAPEX	OPEX
80	39198	49040
60	54900	45480
40	70602	41940
0	102006	34840

Quando foca-se no CAPEX (Figura 6.4), percebe-se uma mudança de 31% entre os cenários de 80% e 0% de rede de fibra óptica alugada. É importante destacar a relação entre CAPEX e OPEX, pois quanto maior é o CAPEX investido em aluguel de fibra óptica já existente, menor é o OPEX, pois tal fato é atribuído a menor manutenção dada aos enlaces alugados, limitando a necessidade de técnicos, software e equipamentos de manutenção. Um fato importante a ser destacado é a linearidade no aumento do TCO apresentado, onde o aumento é fixo de 15% entre cada cenário, fato atribuído a não variabilidade de alguns custos (mão de obra, aluguel, etc).

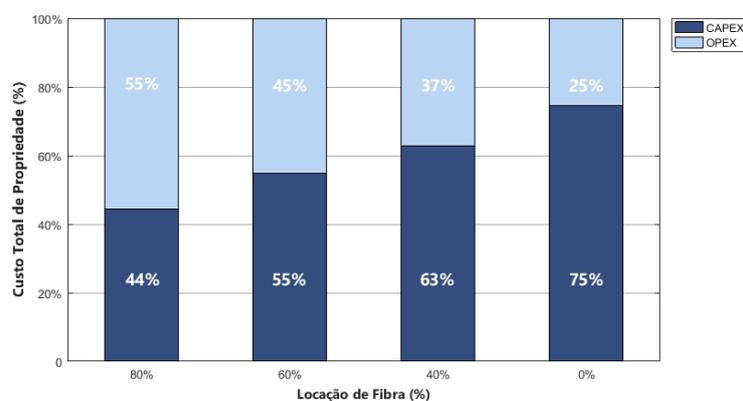


Figura 6.4: Custo Total de Propriedade com uso de Infraestrutura Legada

## 6.2 RESULTADO DAS REDES HETEROGÊNEAS

A Figura 6.5 mostra os valores de CAPEX das arquiteturas utilizadas para o comparativo. É evidente que o TCO das arquiteturas, possuem um custo diferenciado na presença de implantação de HetNets, comparado aos valores dos cenários Homogêneos.

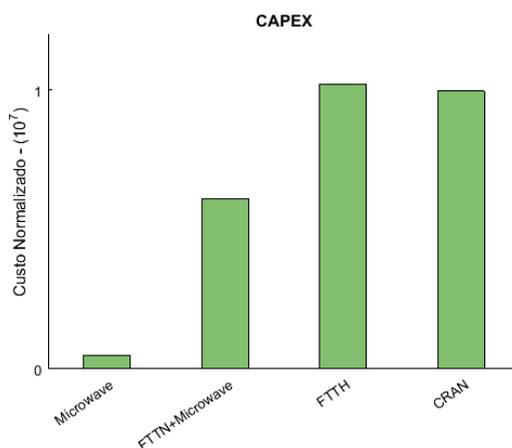


Figura 6.5: CAPEX das Arquiteturas Heterogêneas

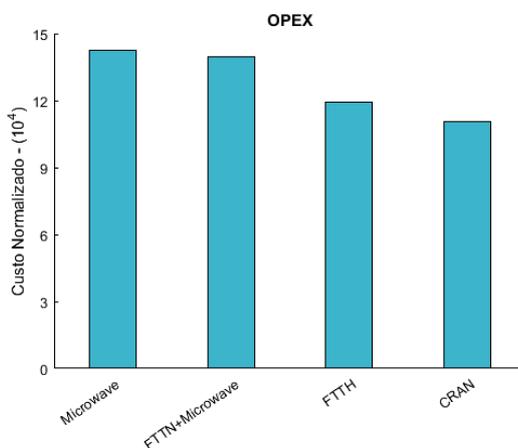


Figura 6.6: OPEX das Arquiteturas Heterogêneas

A Figura 6.6 mostra que OPEX da arquitetura de *Microwave* é maior do que os baseados em tecnologias de acesso de fibra. Logo, em áreas com alta densidade de *small-cells*, as arquiteturas baseadas em fibra são mais econômicas em relação aos investimentos de operação. Tendo em contrapartida os valores de CAPEX, onde os cenários baseados em fibra foram superiores, devido à necessidade de infraestrutura.

A figura 6.7 mostra o Custo Total de Propriedade das arquiteturas de redes heterogêneas avaliadas no período de um ano. O TCO traz a junção dos custos de capital de investimento e capital de operação, custos esses que serão detalhados a seguir.

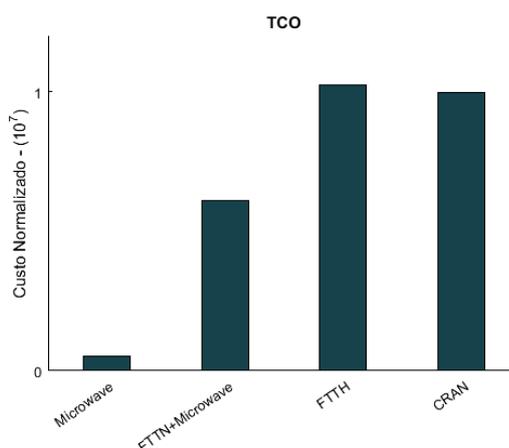


Figura 6.7: TCO das Arquiteturas Heterogêneas

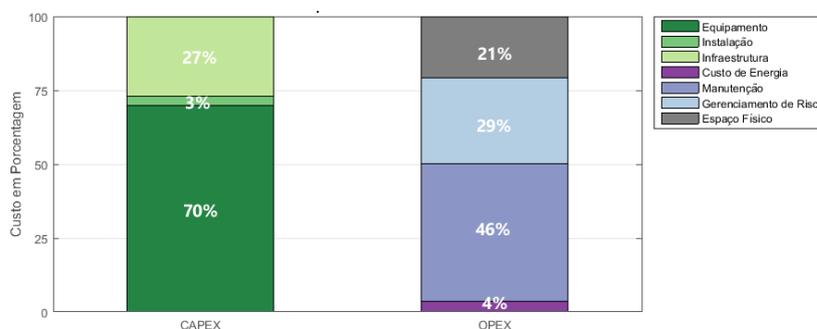


Figura 6.8: Resultados dos custos de TCO da Arquitetura Distribuída 01 - Microwave

No cenário de *Microwave*, Figura 6.8, as despesas com compras e instalações de equipamentos, representam 73% do valor total de CAPEX. Desta forma, os custos com infraestrutura representaram uma fatia menor do CAPEX.

Levando em consideração os investimentos em operação, é importante notar que de acordo com a Figura 6.6, a arquitetura de *Microwave* possui o maior OPEX dentre as arquiteturas analisadas, contendo: o consumo de energia (4%), manutenção da rede (46%), gerenciamento de riscos (29%) e aluguel de espaço físico (21%)(Figura 6.8). No caso dos cenários baseado em *Microwave*, os custos de Gerenciamento de riscos é parte mais considerável do TCO, devido à grande quantidade de equipamentos.

No segundo cenário, FTTH e *Microwave*, Figura 6.9, as despesas de infraestrutura representam 94% do valor total de CAPEX, pois o aumento desse custo em relação ao primeiro cenário, se deu pela necessidade da escavação de dutos para a infraestrutura de fibra. Desta forma, os custos de compra de equipamentos e seus custos de instalação representaram uma fatia menor do CAPEX.

Referente aos valores de OPEX, salienta-se que, de acordo com a Figura 6.6, a arquitetura de FTTH e *Microwave* possui o segundo maior OPEX dentre as arquiteturas



Figura 6.9: Resultados dos custos de TCO da Arquitetura Distribuída 02 - FTTH e *Microwave* analisadas, pois os custos contabilizam: consumo de energia (4%), manutenção da rede (57%), gerenciamento de riscos (20%) e aluguel de espaço físico (19%).

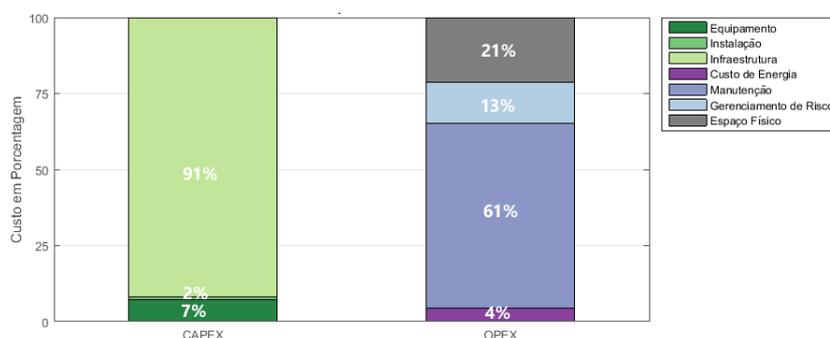


Figura 6.10: Resultados dos custos de TCO da Arquitetura Distribuída 03 - FTTH

Analisando o terceiro cenário, de FTTH, Figura 6.10, as despesas de infraestrutura representam 91% do valor total de CAPEX. Os custos de compra de equipamentos e seus custos de instalação, resultaram em uma fatia menor do CAPEX.

Logo, com os investimentos em operação, é possível notar que, como mostrado na Figura 6.6, a arquitetura de FTTH possui o terceiro maior OPEX dentre as arquiteturas escolhidas para comparação. Os valores de operação foram 4% de consumo de energia, além de manutenção da rede (61%), gerenciamento de riscos (13%) e aluguel de espaço físico (21%).

No cenário de C-RAN, as despesas de infraestrutura se destacam, totalizando 96% do valor total de CAPEX. Salientando que não há locação de equipamentos, fibra ou dutos já existentes, os custos de compra de equipamentos e seus custos de instalação representaram uma fatia menor do CAPEX, Figura 6.11.

Tendo em vista os valores resultantes do OPEX, é importante notar a diminuição de impacto no valor total de manutenção da rede e gerenciamento de riscos, como já destacado nos resultados da arquitetura homogênea. A arquitetura centralizada possibilita,



Figura 6.11: Resultados dos custos de TCO da Arquitetura Centralizada - C-RAN

à operadora de telefonia móvel, uma maior flexibilidade nesses quesitos, tendo assim, um melhor gerenciamento devido a maior parte dos serviços poderem ser feitos remotamente, assim como o gerenciamento de riscos.

Para este estudo foi feita uma projeção de 20 anos para os valores de OPEX e CAPEX, utilizando o custo do salário do técnico, e o custo de energia no primeiro ano, valores apresentados na Tabela 5.1. Após o primeiro ano, assumimos um aumento anual com base em progressão geométrica, onde o salário técnico e o custo de energia no ano possui um índice de aumento de 1,03 [31], influenciando, diretamente, no aumento anual do OPEX. Como forma de se avaliar o impacto que o valor de capital de investimento sofrerá, ao longo dos anos, uma depreciação anual fixa de 5% também é especificada sobre o valor dos equipamentos da rede.

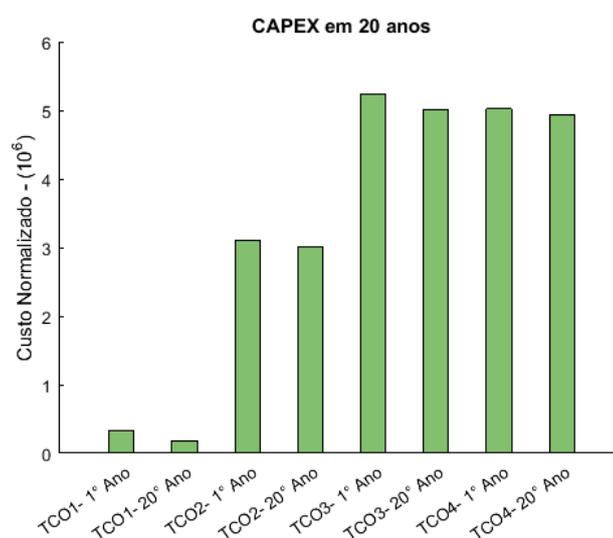


Figura 6.12: Resultados dos custos de CAPEX das Arquiteturas Heterogêneas em 20 anos

A partir da projeção de custos expressa pela Figura 6.12, foi possível notar um comportamento decrescente quanto ao custo de capital investido na implantação da rede, reduzindo de 43% do valor inicial da arquitetura de *Microwave* (TCO1), 3% da arquitetura de

FTTH e *Microwave* (TCO2), 4% da arquitetura FTTH (TCO3) e 2% da C-RAN(TCO4). Observou-se, também, uma queda mais acentuada da arquitetura *Microwave*, devido os custos de equipamentos representarem a fatia maior do seu valor de CAPEX, diferente das outras arquiteturas.

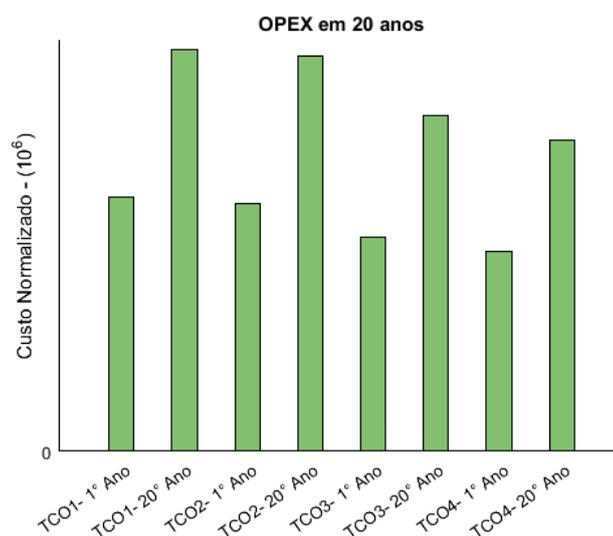


Figura 6.13: Resultados dos custos de OPEX das Arquiteturas Heterogêneas em 20 anos

Tratando-se da projeção do OPEX para 20 anos, Figura 6.13, nota-se um crescimento logo a partir do segundo ano, no qual a crescente é dada pela taxa de aumento aplicada no custo de energia e na mão de obra dos profissionais. Sobre a taxa de crescimento do OPEX, observou-se um crescimento expressivo de 58% do valor inicial da arquitetura de *Microwave*, 59% da arquitetura FTTH e *Microwave*, 57% da arquitetura FTTH e 55% da C-RAN. Observou-se um aumento maior da arquitetura FTTH e *Microwave*, seguindo de valores próximos dos outros cenários, devido à quantidade superior de equipamentos, impactando nos custos de energia, manutenção e gerenciamento de falhas.

A projeção em 20 anos do CAPEX e OPEX é mostrada nas figuras 6.14, destacando a queda do CAPEX em todas as arquiteturas relacionada à depreciação dos equipamentos e o aumento dos valores de OPEX, onde os principais pontos afetados serão o consumo de energia, o gerenciamento de riscos e a manutenção da rede. Essas informações mostram que embora os custos de aquisição se depreciem, há um aumento significativo nos ativos de operação das arquiteturas ao longo dos anos.

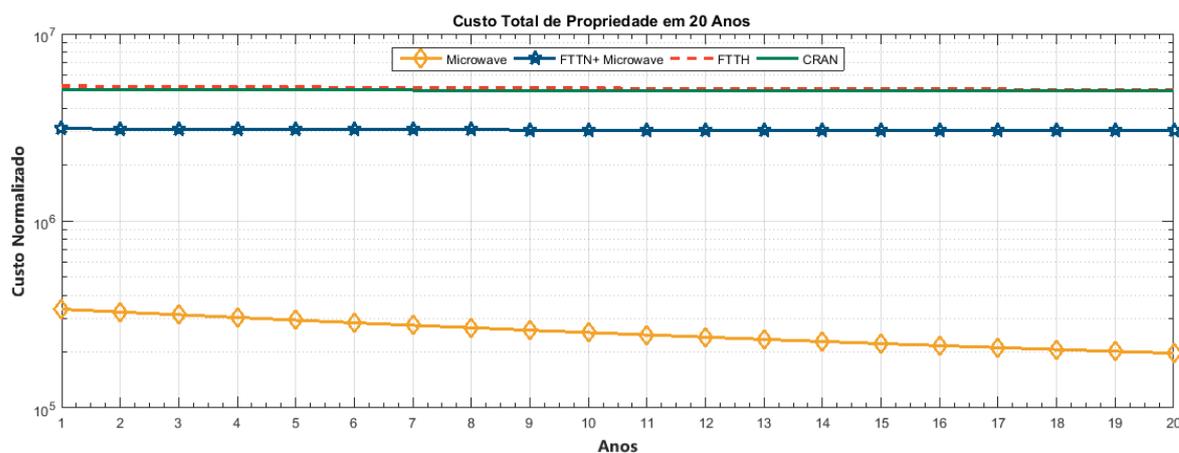


Figura 6.14: Resultados dos custos de TCO das Arquiteturas Heterogêneas em 20 anos

### 6.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Os resultados apresentam os custos para avaliar o impacto de cada elemento no TCO, para as quatro opções de cenários consideradas no estudo de caso. Os elementos de custo estão relacionados a: gerenciamento de falhas, espaço, manutenção, energia, infraestrutura, instalação e compra de equipamentos. Os gráficos apresentados podem ajudar as operadoras a identificar as partes mais caras do TCO, o que é essencial para melhorar a eficiência de custos da rede. A partir das figuras, torna-se evidente que cada item de custo tem um impacto diferente no TCO, dependendo da tecnologia e da arquitetura implantada.

Assim, este trabalho deriva dos cálculos de TCO para implantação de arquiteturas C-RAN para a quinta geração de telefonia móvel, e propõe uma metodologia de estudo de implantação com base nos trabalhos apresentados, anteriormente, a fim de preencher algumas lacunas. A metodologia proposta é feita de maneira generalizada, de modo a ser possível adaptá-la à diferentes tecnologias de *fronthaul* e *backhaul* de redes centralizadas, a fim de identificar fatores de custo mais significativos no segmento e, conseqüentemente, melhorar a eficiência no planejamento dos investimentos.

# Capítulo 7

## Considerações Finais

A proliferação de internet de banda larga móvel apresenta uma oportunidade única para o desenvolvimento de uma nova arquitetura de rede. Esta deve ser evoluída, que permita novas aplicações e serviços e uma maior eficiência em termos de custo benefício. Para conservar o ganho e o desenvolvimento, as operadoras móveis devem encontrar soluções para reduzir custos. Com isso, a implantação de arquiteturas de próxima geração de redes móveis, como o C-RAN, se faz necessária com um gerenciamento de redes bem elaborado.

Levando em consideração que o gerenciamento de redes está associado ao controle das atividades e ao monitoramento do uso dos recursos no ambiente da rede nos anos que segue em operação, um planejamento prévio de instalação e operação é de extrema importância, coletando dados das tarefas mais básicas de gerência e operação de redes. Resumidamente, com esses dados é possível: obter as informações da rede, tratá-las para diagnosticar possíveis problemas de operação e aplicar as soluções destes problemas, tendo assim, uma resposta rápida e eficiente, afetando, de maneira favorável a relação custo benefício de toda a rede móvel.

Este trabalho apresenta, como contribuição, uma modelagem de TCO para redes móveis, focada em arquiteturas C-RAN. O foco do trabalho é apresentar uma solução de *backhaul* e *fronthaul*, utilizando fibra ótica como tecnologia de acesso, que possa suportar o crescente tráfego da quinta geração de redes celulares. Foi desenvolvido um estudo de caso comparativo que apresenta um cenário de abordagem Greenfield de topologia ponto-a-ponto, com o objetivo de destacar as vantagens da arquitetura C-RAN em relação a D-RAN. Os resultados evidenciam a considerável economia, tanto em CAPEX como em OPEX, advindas da centralização do processamento de banda base e compartilhamento de recursos computacionais.

Percebe-se que, baseados nos resultados propostos, combinações de cenários podem

ser avaliados, dependendo do perfil que as empresas de telecomunicações desejam investir. As operadoras podem avaliar e ponderar a implantação das redes, bem como montar cenários mais favoráveis. Por exemplo, um baixo investimento inicial em infraestrutura, pode possibilitar uma atenção maior em outras atividades (marketing, desenvolvimento de aplicativos, etc). Além disso, pode-se analisar cenários de migração entre diferentes arquiteturas, como de D-RAN para C-RAN, se utilizando da possibilidade de aluguel de enlaces de fibras em áreas estratégicas e posterior apropriação desta infraestrutura.

## 7.1 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

As principais contribuições específicas desta Dissertação são descritas a seguir:

- Realização de uma pesquisa relacionada aos principais conceitos que permeiam as redes de tecnologia móvel de próxima geração, mostrando suas características, vantagens e desafios, junto com uma boa revisão bibliográfica dos trabalhos mais atuais relacionados ao tema.
- A proposta de modelagem de TCO possui flexibilidade e completude ao abranger diversos itens de custo para o cálculo do TCO de uma rede centralizada, tornando a abordagem abrangente e podendo ser ampliada com a modificação ou inserção de novos equipamentos em diversos cenários.
- Aplicação da modelagem de TCO em um estudo de caso comparativo, envolvendo cenários com arquiteturas distribuídas e centralizadas, ressaltando dentro do CAPEX e OPEX de cada arquitetura, e os pontos que mais influenciam no valor final do custo de propriedade.
- Através dos resultados, foi possível mostrar o proveito da arquitetura centralizada em um cenário específico *greenfield*, destacando os principais pontos da arquitetura C-RAN e de seus fatores positivos e negativos em relação as outras arquiteturas.

Divulgação de trabalho apresentado à outros pesquisadores por meio de conferência nacional:

- **SOUZA, D. S.;** TEIXEIRA, C. A. M. ; SERUFFO, M. C. R. ; CARDOSO, D. L. . Modelagem de Custo para Redes Móveis Centralizadas de Nova Geração. In: XXII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS), 2017,

---

Belém. XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2017.

O conhecimento adquirido na elaboração deste trabalho, foi utilizado na participação em outros trabalhos apresentados por meio de conferência nacional e aprovação em periódico:

- ARAÚJO, W. V. ; **SOUZA, D. S.** ; TEIXEIRA, C. A. M. ; SERUFFO, M. C. R. ; CARDOSO, D. L. . Análise de Heurísticas de Implantação de Small-cells em Arquiteturas Centralizadas: Análise Baseada em Custo e Capacidade. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017, São Pedro - SP. Educação e Inovação em Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017.
- ARAUJO, W. V. ; OLIVEIRA, E. L. ; **SOUZA, D. S.** ; CARDOSO, D. L. . Heuristics for the Optimized Deployment of Small cells in Next-generation Networks. JOURNAL OF MICROWAVES, OPTOELECTRONICS AND ELECTROMAGNETIC APPLICATIONS, v. 16, p. 697-707, 2017.
- Participação no projeto PIBIC intitulado Planejamento e Avaliação de Desempenho de Tecnologia Femtocélula Visando à Economia de Energia e Qualidade de Serviço para o Norte do Brasil: Abordagens Baseadas em Medições, Modelagem e Simulação, sobre coordenação do Professor Drº Diego Lisboa Cardoso. Junto ao bolsista PIBIC Carlos André de Mattos Teixeira, auxiliando o mesmo em atividades de iniciação científica, resultando em elaboração de artigo, acima já mencionado.
- Coorientação de Trabalho de Conclusão de Curso do Aluno Igor Wenner Falcão, cuja a orientação era do professor Drº Marcos César da Rocha Seruffo, sobre o tema de Modelagem de Custo Total de Propriedade (TCO) de uma Infraestrutura Computacional em Nuvem.

## 7.2 CONTRIBUIÇÕES ADICIONAIS

Lista de artigos publicados não incluídos neste trabalho e atividades exercidas em paralelo a esta dissertação:

- **SOUZA, D. S.**; SERUFFO, M. C. R. ; ELIASQUEVICI, M. K. . Recommendations to Improve User Experience in Second Screen Applications: A Case Study.. In: ACM Symposium on Applied Computing (SAC'17), 2017, Marrakech. Smart Human Computer Interaction, 2017.

- OLIVEIRA, C. C. ; **SOUZA, D. S.** ; SERUFFO, M. C. R. ; FRANCES, C. R. L. . Nobody's Faster: Casual Game: Desenvolvimento Centrado no Usuário. In: Interaction South America, 2017, Florianópolis. ISA.
- COSTA, J. B. D. ; SERUFFO, M. C. R. ; ELIASQUEVICI, M. K. ; **SOUZA, D. S.** . Utilização de Redes Bayesianas para Avaliação da Qualidade de Experiência do Usuário: Um Estudo de Caso com Segunda Tela. In: XXXVI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação - CSBC, 2016, Porto Alegre. 43° SEMISH - Seminário Integrado de Software e Hardware, 2016.
- SOUSA, G. O. ; PEREIRA, M. D. M. ; **SOUZA, D. S.** . Mobilidade Urbana: Um Estudo de Caso de Avaliação de Acessibilidade com a Aplicação Mundo Acessível. In: I Simpósio de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2017, Castanhal. SIEPEX, 2017.
- SILVA, H. B. ; CONDE, E. G. F. ; LOPES, C. A. B. ; **SOUZA, D. S.** . Utilização das Técnicas de Design Thinking para o Desenvolvimento do Sistema Huelivery. In: I Simpósio de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2017, Castanhal. SIEPEX, 2017.
- Falcão, I. W. S. , **SOUZA, D. S.**, SERUFFO, M. C. R. Usability and Cognitive Benefits of a Serious Game to Combat Aedes aegypt Mosquito. (Submetido a periódico, aguardando avaliação).
- Coorientação de Trabalho de Conclusão de Curso da Aluna Cláudia Caroline Lima de Oliveira, cuja a orientação era do professor Drº Marcos César da Rocha Seruffo, sobre o tema de Metodologia de Desenvolvimento Centrada no Usuário Aplicada a Criação e Avaliação de um Casual Game: Um Estudo de Caso.
- Orientação de Trabalho de Conclusão de Curso do Aluno Elton Rodrigues Barbosa Júnior, cuja a Coorientação era do professor Drº Diego Lisboa Cardoso, sobre o tema de Desenvolvimento de um Sistema de Informação para Automatização de Processos no mbito da Contabilidade Empresarial: um Estudo de Caso em uma ONG Local.

### 7.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Os desafios apresentados na organização deste trabalho são listados a seguir:

- Dificuldade para modelar cenários da tecnologia de redes de quinta geração, pelo

motivo de que, neste contexto, ainda está em planejamento e não possui uma padronização definida;

- A realização do estado arte sobre os conceitos que permeiam a próxima geração de redes móveis, redes centralizadas e sobre o funcionamento de cada um dos componentes que, frequentemente, são utilizados neste contexto, para um adequado processo de caracterização do custo total de propriedade;
- Ausência de informações precisas sobre os custos de equipamentos entre outros ativos determinantes para uma infraestrutura centralizada;
- Empenho no processo de desenvolvimento dos modelos matemáticos deste trabalho, de modo a achar uma forma de modelá-los da maneira mais objetiva e simples possível, além de corresponder com a forma de funcionamento no mundo real;
- Tempo necessário para se aperfeiçoar no uso de ferramentas como Matlab, para a correta implementação de todos os modelos matemáticos e gráficos gerados nesta dissertação.

## 7.4 LIMITAÇÕES

Este trabalho fundamentou-se em uma avaliação de custos de rede móvel centralizada para o fornecimento de recursos de telecomunicações, a começar por uma modelagem de custos que calcula todos os ativos relacionados a uma arquitetura C-RAN, pelo cenário correspondente ao ambiente de avaliação e pelos resultados obtidos. Essas contribuições limitaram-se, somente, aos custos no planejamento de uma arquitetura C-RAN, sem ter um planejamento mais amplo com adição, por exemplo, do estudo de tráfego de dados do cenário ou um estudo mais aprofundado da implantação da rede sem fio e todos os seus agravantes. Apesar disso, o trabalho contemplou todas as áreas que foram objetivadas inicialmente, sendo estas limitações, somente um aporte complementar a este trabalho.

## 7.5 TRABALHOS FUTUROS

No que tange a possibilidade de trabalhos futuros, pretende-se dar continuidade a este estudo, remodelando os seus resultados, obtendo uma abordagem mais significativa dos benefícios que uma avaliação de custo de TCO pode proporcionar aos operadores de rede no quesito de custos e de avaliação. Para consolidar esta visão futurística, alguns

ramos de pesquisa são considerados, dentre eles as arquiteturas híbridas com diferentes tecnologias de acesso.

Para ampliar as contribuições apresentadas neste trabalho, é possível fazer diversas modificações e evoluções, tais como: alternar o tipo de tecnologia de acesso usado nos cenários montados, a topologia da rede, além das arquiteturas utilizadas neste trabalho, para verificar a aplicabilidade e flexibilidade da modelagem desenvolvida.

Os custos operacionais apresentam outras variáveis que podem ser levadas em consideração no instante de planejar a implantação de uma nova arquitetura, tais variáveis não são abordadas nos trabalhos acadêmicos de modo a elicitarem seus principais pontos de discussões, por esse motivo esses custos não são discutidos nesta dissertação. Podem se destacar entre esses custos, os profissionais que cuidam da operação da telefonia móvel através de um sistema de anti-fraude, impedindo que a operadora e seus clientes tenham prejuízos, além dos profissionais que atuam através de mentoria de um certo equipamento, o qual possui especialização, resultando em uma satisfatória operação dos serviços de telefonia.

Em relação a centralização, foi realizada, neste trabalho, um estudo do TCO em CAPEX e OPEX. Com efeito, pretende se efetivar um estudo mais aprofundado em cada parcela da avaliação de custos, visto que os ativos de energia, manutenção, gerenciamento de riscos, alocação inteligentes dos equipamento e mão de obra, já foram definidos como os ativos mais sensíveis ao investimento e, conseqüentemente merecem ser avaliados sob outras perspectivas.

# Referências Bibliográficas

- [1] Aleksandra Checko, “Cloud ran fronthaul. options, benefits and challenges.,” <http://fp7-harp.eu/>, 2014.
- [2] Krnet, “Korean internet conferece,” <http://krnet.or.kr/>, 2015.
- [3] Cisco, “Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016-2021,” <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>, 2017, Acessado: 2017-04-06.
- [4] Dionysis Xenakis, Nikos Passas, and Christos Verikoukis, “An energy-centric handover decision algorithm for the integrated lte macrocell?femtocell network,” *Computer Communications*, vol. 35, no. 14, pp. 1684–1694, 2012.
- [5] A. Gupta and R. K. Jha, “A survey of 5g network: Architecture and emerging technologies,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [6] P. Rost, C. J. Bernardos, A. D. Domenico, M. D. Girolamo, M. Lalam, A. Maeder, D. Sabella, and D. Wi $\frac{1}{2}$ bben, “Cloud technologies for flexible 5g radio access networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 68–76, May 2014.
- [7] M. Jaber, M. Ali Imram, M. Tafazolli, and A. Tukmanov, “5g backhaul challenges and emerging research directions: A survey,” *IEEE Access*, 2016.
- [8] Matteo Fiorani, Sibel Tombaz, Jonas Martensson, Bjorn Skubic, Lena Wosinska, and Paolo Monti, “Modeling energy performance of c-ran with optical transport in 5g network scenarios,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 11, pp. B21–B34, 2016.
- [9] W. K. Lai and C. L. Tang, “Qos-aware downlink packet scheduling for lte networks,” *Computer Networks*, vol. 57, pp. 1689–1698, 2013.

- 
- [10] Ekram Hossain and Monowar Hasan, “5g cellular: key enabling technologies and research challenges,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 18, no. 3, pp. 11–21, 2015.
- [11] T. Pfeiffer, “Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures [invited],” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 11, pp. B38–B45, November 2015.
- [12] Jens Bartelt, Peter Rost, Dirk Wubben, Johannes Lessmann, Bruno Melis, and Gerhard Fettweis, “Fronthaul and backhaul requirements of flexibly centralized radio access networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 105–111, 2015.
- [13] Dominic Schulz, Volker Jungnickel, Christos Alexakis, Michael Schlosser, Jonas Hilt, Anagnostis Paraskevopoulos, Liane Grobe, Péter Farkas, and Ronald Freund, “Robust optical wireless link for the backhaul and fronthaul of small radio cells,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1523–1532, 2016.
- [14] K Chen and R Duan, “C-ran the road towards green ran,” *China Mobile Research Institute, white paper*, vol. 2, 2011.
- [15] PoE Power over Ethernet, “Connecting the dots: small cells shape up for high-performance indoor radio,” *Ericsson Review*, 2014.
- [16] A. Checko, H. Holm, and H. Christiansen, “Optimizing small cell deployment by the use of c-rans,” *European Wireless*, 2014.
- [17] Rami Al-obaidi, Aleksandra Checko, Henrik Holm, and Henrik Christiansen, “Optimizing cloud-ran deployments in real-life scenarios using microwave radio,” pp. 159–163, 2015.
- [18] Sourjya Bhaumik, Shoban Preeth Chandrabose, Manjunath Kashyap Jataprolu, Gautam Kumar, Anand Muralidhar, Paul Polakos, Vikram Srinivasan, and Thomas Woo, “Cloudiq: A framework for processing base stations in a data center,” pp. 125–136, 2012.
- [19] Welton V Araujo, Edvar da L Oliveira, Daniel da S Souza, and Diego L Cardoso, “Heuristics for the optimized deployment of small cells in next-generation networks,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 16, no. 3, pp. 697–707, 2017.
- [20] Jie Tang, Daniel KC So, Emad Alsusa, Khairi Ashour Hamdi, and Arman Shojaeifard, “Resource allocation for energy efficiency optimization in heterogeneous

- 
- networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 10, pp. 2104–2117, 2015.
- [21] Adnan Aijaz, Hamid Aghvami, and Mojdeh Amani, “A survey on mobile data offloading: technical and business perspectives,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 2, pp. 104–112, 2013.
- [22] Xinhui Li, Ying Li, Tiancheng Liu, Jie Qiu, and Fengchun Wang, “The method and tool of cost analysis for cloud computing,” in *Cloud Computing, 2009. CLOUD’09. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 93–100.
- [23] Julio Alba Soto, “Opennebula: implantação de uma nuvem privada e orquestração das máquinas virtuais no paradigma da computação em nuvem,” *Monografia, Departamento de Engenharia de Teleinformática-Universidade Federal do Ceará-Fortaleza*, 2011.
- [24] MM Rahman, Charles Despins, and Sofiene Affes, “Analysis of capex and opex benefits of wireless access virtualization,” in *Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 436–440.
- [25] Bhanu Sharma, Ruppa K Thulasiram, Parimala Thulasiraman, Saurabh K Garg, and Rajkumar Buyya, “Pricing cloud compute commodities: A novel financial economic model,” in *Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2012 12th IEEE/ACM International Symposium on*. IEEE, 2012, pp. 451–457.
- [26] Evangelia Filiopoulou, Persefoni Mitropoulou, Anargyros Tsadimas, Christos Michalakelis, Mara Nikolaidou, and Dimosthenis Anagnostopoulos, “Integrating cost analysis in the cloud: A sos approach,” in *Innovations in Information Technology (IIT), 2015 11th International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 278–283.
- [27] Daniel Edache Ajeh, Jeremy Ellman, and Shelagh Keogh, “A cost modelling system for cloud computing,” in *Computational Science and Its Applications (ICCSA), 2014 14th International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 74–84.
- [28] Hamza Ouarnoughi, Jalil Boukhobza, Frank Singhoff, and Stéphane Rubini, “A cost model for virtual machine storage in cloud iaas context,” in *Parallel, Distributed, and Network-Based Processing (PDP), 2016 24th Euromicro International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 664–671.
- [29] Antonio Carlos Gil, *Métodos e técnicas de pesquisa social*, 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

- 
- [30] Jiajia Chen, Lena Wosinska, Carmen Mas Machuca, and Monika Jaeger, “Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 56–65, 2010.
- [31] F. S. Farias, “Designing cost-efficient transport solutions for fixed and mobile broadband access network,” *UFPA*, 2016.
- [32] M. Mahloo, P. Monti, J. Chen, and L. Wosinska, “Cost modeling of backhaul for mobile networks,” *ICC’14 - W9: Workshop on Fiber-Wireless Integrated Technologies, Systems and Networks*, 2014.
- [33] Dejan Bojic, Eisaku Sasaki, Neda Cvijetic, Ting Wang, Junichiro Kuno, Johannes Lessmann, Stefan Schmid, Hiroyasu Ishii, and Shinya Nakamura, “Advanced wireless and optical technologies for small-cell mobile backhaul with dynamic software-defined management,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 9, pp. 86–93, 2013.
- [34] Welton Vasconcelos ARAÚJO et al., “Análise de heurísticas de implantação de hetnets densas,” 2017.
- [35] H. Holm, A. Checko, R. Al-obaidi, and H. Christiansen, “Optimal assignment of cells in c-ran deployments with multiple bbu pools,” *European Conference on Networks and Communications*, 2015.
- [36] Shinobu Namba, Takashi Matsunaka, Takayuki Warabino, Shoji Kaneko, and Yoji Kishi, “Colony-ran architecture for future cellular network,” in *Future Network & Mobile Summit (FutureNetw), 2012*. IEEE, 2012, pp. 1–8.
- [37] A Asensio, P Saengudomlert, M Ruiz, and L Velasco, “Study of the centralization level of optical network-supported cloud ran,” in *Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2016 International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [38] Tiago J. Monteiro; Luis M Correia; Ricardo Dinis, “Analysis of different cloud-ran implementation strategies in small cells scenarios,” in *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall, pages=1–5, year=2017, organization=IEEE*.
- [39] Shari Sofia Lisi, Abdulrahman Alabbasi, Massimo Tornatore, and Cicek Cavdar, “Cost-effective migration towards c-ran with optimal fronthaul design,” in *Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on*. IEEE, 2017, pp. 1–7.
- [40] Ruth Brisbin and Paul Artola, “Taxicab trigonometry,” *Pi Mu Epsilon Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 89–95, 1985.

- 
- [41] Mikael Coldrey, Jan-Erik Berg, Lars Manholm, Christina Larsson, and Jonas Hansryd, “Non-line-of-sight small cell backhauling using microwave technology,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 9, pp. 78–84, 2013.
- [42] L. D. P. Mendes and J. J. P. C. Rodrigues, “A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, pp. 523–534, 2011.
- [43] Orawan Tipmongkolsilp, Said Zaghoul, and Admela Jukan, “The evolution of cellular backhaul technologies: Current issues and future trends,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 1, pp. 97–113, 2011.
- [44] Tzvika Naveh, “Mobile backhaul: fiber vs. microwave: Case study analyzing various backhaul technology strategies,” *White Paper from Ceragon*, 2009.
- [45] Federico Tonini, Matteo Fiorani, Marija Furdek, Lena Wosinska, Carla Raffaelli, and Paolo Monti, “Minimum cost deployment of radio and transport resources in centralized radio architectures,” in *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2016 International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [46] C. Ranaweera, C. Lim, A. Nirmalathas, C. Jayasundara, and E. Wong, “Cost-optimal placement and backhauling of small-cell networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 18, pp. 3850–3857, Sept 2015.