

I

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

**ANÁLISE DE HEURÍSTICAS DE IMPLANTAÇÃO DE
HETNETS DENSAS**

WELTON VASCONCELOS ARAÚJO

DM: 11/2017

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017**

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

WELTON VASCONCELOS ARAÚJO

**ANÁLISE DE HEURÍSTICAS DE IMPLANTAÇÃO DE
HETNETS DENSAS**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como quesito a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em Computação Aplicada.

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017**

Dados Internacionais de Catalogação - na – Publicação (CIP) Sistema de Bibliotecas da UFPA

Araújo, Welton Vasconcelos, 1992 -

Análise de heurísticas de implantação de hetnets densas / Welton Vasconcelos Araújo. – 2017.

Orientador: Diego Lisboa Cardoso

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica , Belém, 2017.

1. Redes de rádio cognitivo. 2. Dispositivos de redes sem fio. 3. Recursos de redes de computadores. 4. Sistemas de comunicação sem fio - tráfego. I. Título.

CDD 23. ed. 621.384

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

**ANÁLISE DE HEURÍSTICAS DE IMPLANTAÇÃO DE
HETNETS DENSAS**

AUTOR: WELTON VASCONCELOS ARAÚJO

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida à avaliação da banca examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará e julgada adequada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Computação Aplicada.

APROVADA EM _____/_____/_____

Professor. Dr. Diego Lisboa Cardoso - UFPA

ORIENTADOR

Professor Dr. Bruno Souza Lyra Castro

MEMBRO EXTERNO FACOMP CASTANHAL/UFPA

Professor Dr. Marcelino Silva da Silva

MEMBRO INTERNO PPGE/UFPA

Visto:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

COORDENADOR DO PPGE/ITEC/UFPA

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu primogênito e amado filho Noah Assunção Vasconcelos

Araújo.

Agradecimentos

Primeiramente agradecer ao meu Deus e Senhor, por ter me ajudado não só nesse trabalho, mas em toda a minha vida acadêmica e profissional, dando-me força e sabedoria para vencer as dificuldades encontradas.

À banca examinadora, composta pelo Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva e Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro, por aceitar participar comigo neste trabalho e pelas considerações que me fizeram evoluir como acadêmico e profissional.

A meu orientador, Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso, que me ajudou desde o início do projeto, incentivando e ajudando-me no que foi possível, sempre acreditando no meu potencial e mostrando os melhores caminhos para se percorrer.

À minha família que sempre me apoiou e incentivou-me nos momentos difíceis, em todas as fases e áreas da minha vida. Em especial, agradeço a meus pais, Wellington Araújo e Rosilene Araújo, que sempre me apoiam e estão ao meu lado.

Ao amor da minha vida, minha eterna namorada e, agora esposa, Luana Assunção Vasconcelos, por estar sempre comigo, me apoiando e me incentivando a ser melhor pessoal e profissionalmente, o meu muito obrigado.

E a todos que me auxiliaram não só desde o começo do mestrado, mas sim de toda minha vida acadêmica.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 MOTIVAÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivos Gerais	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 DIVISÃO DO TRABALHO	18
2. REDES 5G	19
2.1 EXPANSÃO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA	20
2.2 NOVOS TIPOS DE MODULAÇÃO	21
2.2.1 Filter Bank Multi-Carrier (FBMC)	21
2.2.2 Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC)	22
2.2.3 Filtered OFDM (F-OFDM)	23
2.3 EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO	23
2.4 POSSÍVEIS ARQUITETURAS PARA 5G	24
2.4.1 Arquitetura de duas camadas	24
2.4.2 Cognitive Radio Networks (CRN)	25
2.4.3 Comunicação Device-to-Device (D2D)	26
2.5 NOVA ESTRUTURA DE TRANSMISSÃO: REDES CENTRALIZADAS	27
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
3. TÉCNICAS DE IMPLANTAÇÃO DE HETNETS PARA 5G	30
3.1 MODELO DE PROPAGAÇÃO	31
3.2 TÉCNICA NÚMERO UM: BASEADA NOS USUÁRIOS	33
3.3 TÉCNICA NÚMERO DOIS: BASEADA NO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	35
3.4. TÉCNICA NÚMERO TRÊS: BASEADA NA VAZÃO TOTAL	38
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
4. COMPARAÇÃO DAS ARQUITETURAS C-RAN E D-RAN	41
4.1 COMPARAÇÃO DO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO ENTRE C-RAN E D-RAN	42
4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
5. TRABALHOS CORRELATOS	45
5.1 HETNETS	45
5.2 C-RAN	46
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47

6. ANÁLISE DE ALGORITMOS DE IMPLANTAÇÃO DE HETNETS DENSAS PARA DRAN E CRAN	48
6.1 PARÂMETROS UTILIZADOS	49
6.2 ORGANIZAÇÃO DA OBTENÇÃO DE RESULTADOS	53
6.2.1 Organização na comparação das técnicas de implantação	53
6.2.2 Organização na comparação das arquiteturas C-RAN e D-RAN	54
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
7. ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS SOBRE HETNETS	56
7.1.1 Simulação com 300 usuários	56
7.1.2 Simulação com 600 usuários	59
7.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS SOBRE C-RAN E D-RAN	61
7.2.1 Análise com 300 usuários	61
7.2.2 Análise com 600 usuários	63
8. CONCLUSÃO	65
8.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	66
8.2 TRABALHOS FUTUROS	67
8.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS	67
8.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS	69

Lista de Abreviaturas e Siglas

4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
BBU	BaseBand Unit
CAPEX	Capital Expenditure
C-RAN	Centralized Radio Access Network
CRN	Cognitive Radio Networks
D2D	Device-to-Device
DC-DC	Direct D2D communication with device controlled link establishment
DC-OC	Direct D2D communication with operator controlled link establishment
DOU	Diário Oficial da União
D-RAN	Distributed Radio Access Network
DR-DC	Device relaying with device controlled link establishment
DR-OC	Device relaying with operator controlled link establishment
FBMC	Filter Bank Multi-Carrier
FFT	Fast Fourier Transform
F-OFDM	Filtered OFDM
HetNets	Redes Heterogêneas
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
LTE	Long Term Evolution
MBS	Macro-cell Base Station
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMC	Massive Machine-type Connections
M-MIMO	Massive MIMO
multi-RAT	Multiple Radio Access Technologies
NFV	Network Function Virtualization
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation
PRB	Physical Resource Block

PU	Primary User
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RB	Resource Block
RRH	Remote Radio Head
SBS	Small-cell Base Station
SDN	Software Defined Networks
SU	Secondary User
SUI	Stanford University Iterim
TCO	Total Cost of Ownership
UDN	Ultra Dense Networks
UE	User Equipament
UFMC	Universal Filtered Multi-Carrier

Lista de Figuras

Figura 1: Espectro relevante para redes 5G.	20
Figura 2: Processo de modulação do sinal FBMC.	22
Figura 3: Processo de modulação do sinal UFMC.	22
Figura 4: Configuração de antenas com M-MIMO <i>base stations</i>	24
Figura 5: Arquitetura C-RAN.	28
Figura 6: Distribuição dos usuários.	50
Figura 7: <i>Small-cells</i> candidatas à implantação.	51
Figura 8: Quantidade de antenas implantadas utilizando as três técnicas (300 usuários).	56
Figura 9: Custo de implantação utilizando as três técnicas (300 usuários).	57
Figura 10: Vazão total da rede utilizando as três técnicas (300 usuários).	58
Figura 11: Quantidade de RRHs implantadas utilizando as três técnicas (600 usuários).	59
Figura 12: Custo de implantação utilizando as três técnicas (600 usuários).	60
Figura 13: Vazão total da rede utilizando as três técnicas (600 usuários).	61
Figura 14: Comparativo do custo de implantação utilizando as arquiteturas C-RAN e D-RAN (300 usuários).	62
Figura 15: Comparativo do custo de implantação utilizando as arquiteturas C-RAN e D-RAN (600 usuários).	64

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros do tipo de terreno para o modelo SUI	33
Tabela 2: Comparação ente as arquiteturas D-RAN e C-RAN.	41
Tabela 3: Distribuição dos usuários	50
Tabela 4: Lista de parâmetros utilizados na modelagem	52
Tabela 5: Parâmetros para o cálculo do custo da equação 7.	54

Resumo

O crescimento de tráfego em redes móveis demanda a busca por novas tecnologias que consigam trazer evoluções para o setor em questão. Tecnologias como redes heterogêneas (HetNets) e C-RAN (*Centralized Radio Access Networks*) aparecem como soluções proeminentes para esta demanda. Contudo, sem o devido planejamento na implantação dessas redes, problemas como custo de implantação, interferência, eficiência energética e posterior gerenciamento da rede podem ocasionar a inviabilização do projeto. Nesse sentido, esse trabalho investiga como planejar uma rede heterogênea, através de diversas heurísticas de implantação de HetNets, que serão explanadas posteriormente. Tais algoritmos são avaliados, em cenários com parâmetros que ilustram ambientes reais, além de analisar diversas métricas para a realização da apropriada avaliação de desempenho de cada abordagem. O planejamento da utilização de redes centralizadas também é abordado, havendo uma comparação com o modelo D-RAN (*Distributed Radio Access Network*) com o objetivo de mostrar em quais situações um é menos oneroso que o outro. Com a posse dos resultados, é possível perceber que a mudança do tamanho da rede (números de usuários conectados) influencia diretamente nos resultados, além de se ter um bom indício de qual tecnologia utilizar em determinada situação.

Palavras-chave: HetNets, C-RAN, D-RAN, implantação, otimização

Abstract

The growth of traffic in mobile networks demands a search for new technologies that can bring evolutions to the sector in question. Technologies such as heterogeneous networks (HetNets) and C-RAN (Centralized Radio Access Networks) appear as prominent solutions to this demand. However, without proper planning in the deployment of these networks, problems such as deployment cost, interference, energy efficiency and subsequent network management can lead to project unfeasibility. In this sense, this work investigates how to plan a heterogeneous network, through several heuristics in the implementation of HetNets, which will be explained later. These algorithms are evaluated in scenarios that illustrate real environments, in addition to analyzing several metrics to perform the appropriate performance evaluation of each approach. The planning of the use of centralized networks is also addressed, with a comparison with the Distributed Radio Access Network (D-RAN) model in order to show in which situations one is less costly than other. With the results, it is possible to perceive that the change in the size of the network (numbers of connected users) directly influences the results, as well as having a good indication of which technology to use in a given situation.

Keywords: HetNets, C-RAN, D-RAN, deployment, optimization.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do tráfego nas redes móveis é um fato que a cada dia fica mais visível. A indústria de aparelhos móveis está sempre inovando e diversificando os seus produtos, o que ocasiona uma aquisição crescente desses dispositivos, aumentando a vazão de dados nas redes em questão.

Em 2020, de acordo com a Cisco (2016), é esperado que o tráfego móvel global alcance 30,6 exabytes por mês, contrastando com o valor medido em 2015: 3,7 por mês. Esses dados apontam um crescimento, nos próximos 5 anos, de um pouco mais que 800% nas trocas de informações em todo o mundo.

Para acompanhar este crescimento, mudanças já começaram a ser realizadas nas redes 4G (quarta geração), uma delas, e muito importante, foi a criação de HetNets que, de acordo com Elsayy (2013) e Yang (2011), é uma combinação das grandes células de comunicação (*macro-cells*) com pequenas células (*small-cells*), em que as últimas possuem um pequeno raio de cobertura, mas com a mesma ou até melhor performance.

As HetNets trouxeram um grande aumento da capacidade das redes atuais, Farah (2016) comenta que seu uso junto com grande a densificação de pequenas células é a solução usada para o aumento da capacidade da rede e reuso de espectro de frequência. Esta tecnologia está ficando obsoleta, visto o grande crescimento da demanda de dados e o alto grau de interferência entre as células, assim um novo paradigma está surgindo: a arquitetura C-RAN, que pode ser utilizada em conjunto com as HetNets, gerindo-as. Essa nova arquitetura traz diversos benefícios como maior eficiência energética, taxa de dados e melhor gerenciamento da rede, ajudando no controle da interferência.

Grandes empresas e centros de pesquisa estão unidos para criar um novo paradigma de redes móveis, que está sendo chamado de redes de quinta geração (5G). Estas redes prometem conseguir gerenciar o aumento constante do tráfego de dados e ainda melhorar a qualidade do serviço, oferecendo alta confiabilidade e disponibilidade, maior vazão de dados, baixa latência e eficiência energética.

De acordo com a Ericsson (2016), as redes 5G irão prover conexão para um grande número de novas aplicações e casos de uso. Um dos fatores mais alarmantes é o gerenciamento de novos tipos de conexões como a MMC (*massive machine-type connections*), que gera um tráfego muito grande de pacotes de controle. Esse tipo de conexão causa um elevado congestionamento na rede, assim as redes 5G prometem solucionar tal problema.

Sabendo que a utilização de HetNets aumenta a capacidade e reuso de frequência enquanto a arquitetura C-RAN também se compromete em gerar tais benefícios e, além disso, garantir eficiência energética e total gerência da rede, os seus usos em conjunto prometem maximizar ainda mais os benefícios finais. Dessa forma, a comunidade científica tem visto com bons olhos tais tecnologias, sendo consideradas boas ferramentas para se conseguir a evolução do 4G para o 5G, conseguindo alcançar, senão todos, mas a maioria dos objetivos traçados para as futuras redes.

Existem diversos trabalhos e pesquisas na comunidade científica mostrando que realmente tais tecnologias irão fazer a diferença e elevarão as redes a um novo patamar, mas existe um empecilho que faz com que esses padrões precisem ser estudados mais a fundo antes de sua aplicação: o custo de implantação, o qual é um dos principais motivadores dessa dissertação.

1.1 MOTIVAÇÃO

Um dos grandes desafios em relação às redes 5G é conseguir criar uma infraestrutura capaz de gerenciar todo o tipo de dispositivo móvel e conexão existente atualmente, sendo escalável o suficiente para assegurar a expansão do número de usuários conectados e vazão de dados. Densificar a rede com *small-cells*, criando o conceito de *DenseNets* é a principal solução encontrada atualmente para aumentar a capacidade da rede, Peng H. (2016) confirma este fato ao comentar que a densificação de células é o maior fator de contribuição para o aumento da capacidade das redes móveis.

O aumento do número de estações base precisa ser gerenciado e não pode ser livremente deliberado, pois o crescimento do número desses equipamentos potencializa a interferência entre células. Na tentativa de diminuir este problema e garantir um melhor gerenciamento da rede, Bhushan (2014) comenta sobre a utilização da arquitetura C-RAN, que diminui a interferência na rede gerando-a de forma centralizada.

Dessa forma, é possível perceber que aliado a grande densificação de pequenas estações base, é necessário a utilização da arquitetura centralizada para se ter um melhor gerenciamento da rede. Os benefícios, na utilização das duas tecnologias em conjunto, já foram apresentados, restando saber se é possível monetariamente a implantação de tais técnicas, ou se o custo/benefício é satisfatório.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho está relacionado em estudar heurísticas de implantação de HetNets, assim como comparar o custo de implantação entre as arquiteturas C-RAN e D-RAN.

Como motivado na seção 1.1, HetNets e C-RAN podem trabalhar em conjunto para potencializar benefícios. Dessa forma, os resultados encontrados na análise de HetNets servirão para a realização do cálculo relacionado ao custo de implantação da arquitetura centralizada. Portanto, serão feitas abordagens de forma separada em que o único vínculo é o fato de que os resultados gerados pela primeira (HetNets) servirá como entrada para a análise relacionada com as CRANs. Diversos parâmetros foram usados para gerar cenários próximos da realidade e todos serão explanados nos capítulos seguintes.

Para a primeira abordagem, três técnicas são utilizadas para a devida comparação de seus resultados. Os algoritmos apresentados irão organizar a implantação de *small-cells* das diversas candidatas que estarão disponíveis. Cada técnica tem a sua peculiaridade, que servirá de diferencial e mudará a posição das estações base e conseqüentemente o funcionamento da rede. Diversos quesitos, comentados na seção anterior, serão calculados para que sejam feitas as devidas análises e comparações. É importante lembrar que a distribuição dos usuários irá influenciar diretamente na organização da rede, pois fatores de QoS (*Quality of Service*) serão usados como condição para o aceite ou não da forma como a rede se encontrar. Esta abordagem, além de mostrar as vantagens e desvantagens de cada técnica, tem como objetivo guiar o leitor a escolher qual técnica terá o melhor desempenho se o foco for uma das métricas que serão analisadas, este estudo é importante tanto para comunidade científica quanto para empresas que sempre estão procurando o melhor custo/benefício.

De posse da posição das estações de rádio que foram implantadas, a segunda abordagem irá medir o custo de implantação ou capital *expenditure* (CAPEX) que é o custo para a aquisição de recursos e instalação dos equipamentos, aqui se tem uma abordagem diferente da primeira em relação ao cálculo do custo, pois neste caso não serão usados valores reais para a realização do estudo. O objetivo é comparar custos entre uma rede centralizada e distribuída, descobrindo em quais situações uma é mais vantajosa que a outra.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar algoritmos capazes de organizar pequenas células em redes heterogêneas.
- Realizar uma modelagem analítica, para a obtenção do desempenho de cada heurística utilizada.
- Analisar os resultados obtidos pela modelagem e indicar em qual cenário/métrica cada técnica obteve o melhor desempenho.
- Comparar o custo de implantação entre as arquiteturas centralizada e distribuída
- Demonstrar em quais situações a arquitetura C-RAN é mais viável monetariamente do que a D-RAN

1.3 DIVISÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

- **Capítulo 2:** Explicação sobre as redes 5G, mostrando os seus objetivos e as diversas novas tecnologias que estão sendo estudadas para que tais metas sejam alcançadas.
- **Capítulo 3:** Explicar sobre o uso de HetNets, mostrando vantagens e desvantagens. Mostrar o modelo de propagação utilizado para a realização do cálculo das perdas de sinal. Explicar as três técnicas utilizadas para a organização de HetNets.
- **Capítulo 4:** Dissertar sobre a arquitetura C-RAN e realizar um comparativo com a distribuída, mostrando as vantagens e desvantagens de cada uma. Apresentar o modelo matemático para comparar o custo de implantação entre as duas arquiteturas.
- **Capítulo 5:** Mostrar trabalhos que se relacionam aos assuntos abordados na dissertação.
- **Capítulo 6:** Explicar como os cenários foram criados, como será feita a modelagem analítica, os parâmetros utilizados e as peculiaridades de cada abordagem.
- **Capítulo 7:** Analisar os resultados, realizando comparações e apontando qual tecnologia se portou melhor diante das métricas utilizadas.
- **Capítulo 8:** Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais relacionadas aos resultados encontrados. Também serão dissertadas as dificuldades encontradas e trabalho futuros.

2. REDES 5G

Quando foram implantadas, as redes 4G trouxeram uma grande evolução, principalmente no aumento da taxa de transmissão de dados, mas o tempo trouxe dispositivos mais avançados e capazes de realizar aplicações que necessitam de uma taxa de transferência maior e latência muito menor do que são servidas atualmente, fazendo com que as presentes redes móveis se tornem cada vez mais defasadas.

Os motivos, para a evolução, são diversos: grande aumento de ingressantes a rede, alto volume de dados, necessidade de transmissão mais veloz de dados, aplicações que necessitam de menores latências, entre outros. Os dispositivos e aplicações evoluíram, e na mesma medida as redes móveis precisam se transformar para atender estas novas necessidades.

Nesse sentido, as redes 5G estão sendo propostas e dentre seus principais objetivos, de acordo com Gupta (2015) e Osseiran (2014), se destacam: conexão onipresente, latência “zero” e conexão de alta velocidade (com taxas de Gbps). Em seu trabalho, Panwar (2016) comenta que as redes do futuro possuirão uma área de cobertura em todo o planeta, uma baixa latência (até 1 milissegundo) e conseguirá alcançar taxas de transferência de Gbps. Panwar (2016) apresenta uma comparação entre as redes 5G e 4G, mostrando a evolução da primeira em relação a segunda nos seguintes quesitos:

- Possibilidade de conexão de 10 a 100 vezes mais dispositivos na rede.
- Volume de dados por área 1000 vezes maior.
- Transmissão de dados 10 a 100 vezes mais veloz.
- 99.99% de disponibilidade do serviço.
- Consumo de energia 10 vezes menor.
- Processamento e transmissão de informações em tempo real.
- Integração das tecnologias sem fio atuais.

Como pode ser visto e de acordo com Felita (2013), a tecnologia 5G é uma evolução das redes de quarta geração em que se espera cobrir lacunas deixadas pelas redes 4G. A autora ainda comenta que através das redes 5G, será possível acessar diversas RATs (*Radio Access Technologies*) através de um único aparelho. Como exemplo de RATs, atualmente, se tem as tecnologias *Bluetooth*, *Wi-Fi*, *LTE (Long Term Evolution)*, *WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access)*, entre outros.

A rede 5G ainda está em processo de especificação, grandes empresas junto com grandes órgãos de pesquisa estão trabalhando para conseguir chegar a um padrão que possa ser implantado e comercializado. Diversas questões precisam ser analisadas como a utilização de frequências mais altas para transmissão, tipos de modulação, evolução das técnicas de transmissão e possíveis arquiteturas. Todos esses tópicos serão abordados adiante, tentando esclarecer ao leitor sobre o que está sendo proposto para a evolução dessas redes.

2.1 EXPANSÃO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

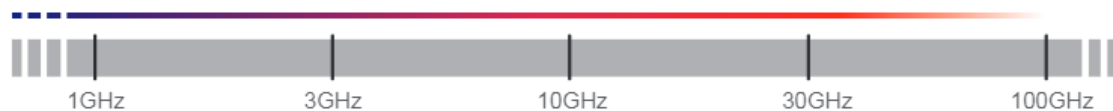
As faixas de frequências utilizadas pelas redes 4G atualmente estão abaixo de 6GHz. Parte desse espectro é utilizado por outros serviços, como rádio e televisão analógica, mas com o crescimento do número de usuários nas redes móveis essas faixas estão sendo negociadas.

No Brasil o desligamento da TV analógica já foi divulgado no DOU (Diário Oficial da União) no ano de 2014 e teve início marcado para 2015 na cidade de Rio Verde/GO e termino para 2018 em várias capitais do país. O espectro de 700MHz ficará com as redes 4G para aumentar a sua capacidade.

Com o objetivo principal de expandir ainda mais a capacidade das redes móveis, o espectro relevante das redes 5G ultrapassam as faixas de frequência de 6GHz, de acordo com a Ericsson (2016).

A migração de uma geração para a outra ocasionará mudanças em todo o mundo, por esse motivo é necessário realizar uma troca gradual. Com o intuito de gerar o menor impacto possível e ainda serem compatíveis com tecnologias de gerações passadas, as redes 5G manterão o espectro atual usado e realizarão uma expansão com frequências de até 100GHz. A figura 1 mostra a faixa de espectro relevante para as redes 5G.

Figura 1: Espectro relevante para redes 5G.



Fonte: Ericsson (2016).

De acordo com a Ericsson (2016), pretende-se usar faixas de frequência abaixo de 6GHz tanto para garantir a compatibilidade quanto para realizar conexões com grandes distâncias físicas, em que ondas de baixa frequência conseguem ser usadas por causa de sua pequena

perda no meio. Ondas acima de 6GHz serão usadas para casos específicos em que será necessário uma alta vazão de dados e baixa latência, tendo como pré-requisito uma distância muito pequena entre o receptor e o transmissor, taxas em Gbps poderão ser alcançadas com o uso de altas frequências.

2.2 NOVOS TIPOS DE MODULAÇÃO

Um dos objetivos das redes 5G é aumentar a escalabilidade da rede, o que aumenta o potencial de conexões MMC. De acordo com Liu (2016), as redes 5G precisam tratar de novos tipos de conexão, como as MMC, que geram um tráfego diferente do comum: com uma grande quantidade de pequenos pacotes.

Com a mudança do sistema de tráfego, estudos estão sendo realizados para gerar um suporte ideal, visto que a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) dificilmente conseguirá atender de forma satisfatória. Farhang-Boroujeny (2009) afirma que quando se tem uma conexão OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) com vários nós diferentes transmitindo de forma simultânea, a sincronização não é algo trivial.

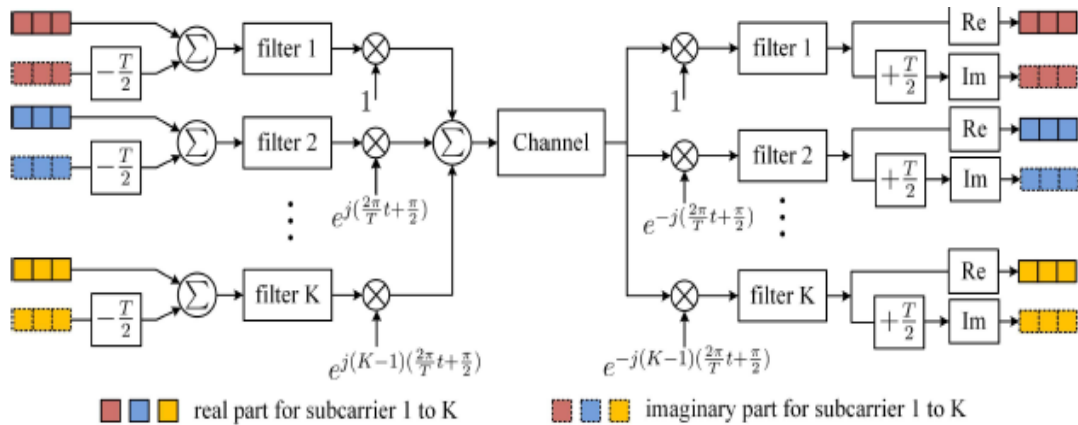
Alguns novos tipos de modulação estão sendo propostos, que são mais flexíveis. Esses novos paradigmas dão suporte a diferentes tipos de conexão, causando um menor tráfego de pacotes de controle, se comparado com a modulação atual (OFDMA). Alguns serão citados abaixo.

2.2.1 Filter Bank Multi-Carrier (FBMC)

A FBMC trabalha com a divisão de seus símbolos QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) em duas partes: uma real e outra imaginária, formando o OQAM (*Offset Quadrature Amplitude Modulation*) para cada subportadora. Na parte imaginária é acrescentado um *delay* de $T/2$ e o sinal é enviado ao filtro onde se realiza a modulação para a subportadora K correspondente, para então ser transmitido pelo canal. No receptor o processo é feito de forma inversa, como pode ser visto na figura 2.

Para garantir o uso total do espectro, os pulsos FBMC são sobrepostos e o esquema OQAM garante a não interferência, pois os sinais (real e imaginário) são recuperados separadamente no receptor. A resposta ao impulso do sinal FBMC comporta 4 símbolos, dificultando a transmissão de pequenas mensagens, pois, nesses casos, alguns símbolos ficariam inutilizados e ainda sim aumentariam o tráfego na rede.

Figura 2: Processo de modulação do sinal FBMC.

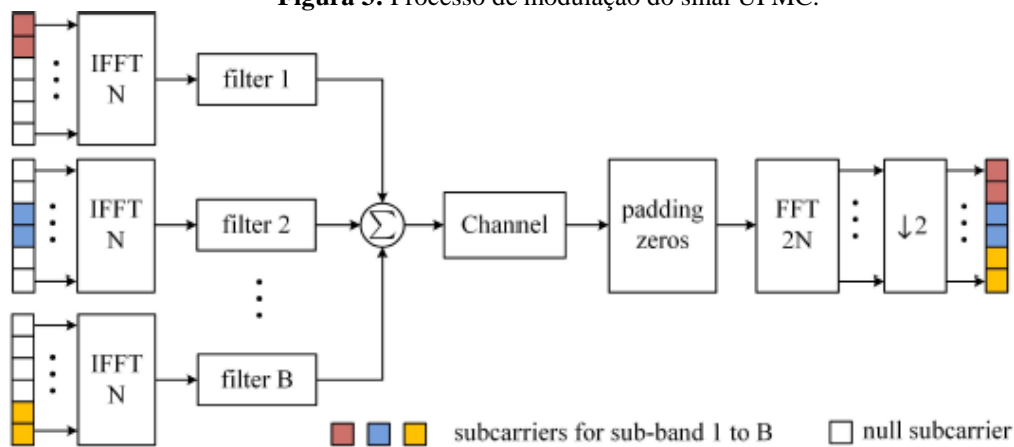


Fonte: Liu (2016).

2.2.2 Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC)

Diferentemente da FBMC, que trabalha com a divisão de subportadoras, a UFMC trabalha com a divisão de sub-bandas. Assim é possível realizar a aplicação de filtros com tamanho menor dos que são usados na FBMC, o que possibilita a UFMC ser usada em transmissões de mensagens pequenas.

Figura 3: Processo de modulação do sinal UFMC.



Fonte: Liu (2016).

A estrutura do sinal UFMC pode ser vista na figura 3. Primeiramente o sinal é transformado para o domínio do tempo com a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transformer*) de tamanho N, e esse sinal passa pelo filtro correspondente, cada sub-banda possui seu próprio filtro e o *shift* na frequência, que é feito na FBMC, não é realizado, pois o sinal UFMC já é mapeado antes da IFFT.

No receptor não são utilizados filtros para a recuperação do sinal, ficando a demodulação apenas por conta de uma FFT (*Fast Fourier Transform*) com tamanho igual a 2N.

2.2.3 Filtered OFDM (F-OFDM)

Para tentar adaptar aos diferentes tipos de transmissão, que o 5G irá trazer, de forma simultânea, está sendo estudado a criação do F-OFDM (*Filtered OFDM*) que promete conseguir filtrar o sinal recebido de forma completa, dividindo os RBs (*Resource Blocks*) e conseguindo identificar os diferentes tamanhos de cada mensagem.

Para alcançar este objetivo, é necessário criar um filtro que seja bastante flexível e que consiga se adaptar aos diferentes tipos de transmissão, recebendo o sinal completo e realizando a divisão das subportadoras no receptor.

2.3 EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO

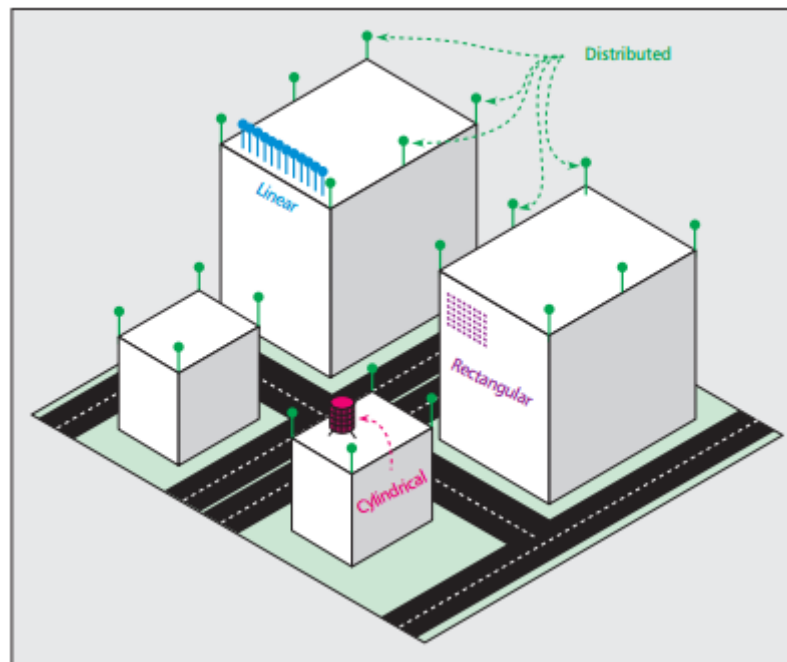
Wang C-X. (2014) acredita que para funcionar, a arquitetura 5G precisa ser muito diferente do que existe atualmente. Um dos fatores para a mudança de arquitetura é a forma como os usuários móveis estão se conectando: Chandrasekhar (2008) comenta que 80% dos usuários móveis estão em ambientes *indoors* e 20% em ambientes *outdoors*. Assim, Wang C-X. (2014) discursa sobre a preocupação nas trocas de informações entre UEs *indoors* e *outdoors* em que ocorre uma perda muito grande de sinal. Uma possível solução é o uso da tecnologia M-MIMO (*Massive Multiple Input Multiple Output*), usando um grande *array* de antenas que estão em ambientes externos.

A tecnologia M-MIMO é uma evolução da MIMO em que a diferença é a utilização de um conjunto de antenas muito maior do que é utilizado pela segunda. Larsson (2014) acredita que com a utilização de MIMO irão existir sistemas que utilizarão centenas de antenas para servir dezenas de terminais finais. A figura 4 ilustra diversas formas que as estações base M-MIMO podem ser implantadas, que são os modos distribuído, retangular, cilíndrico e linear. Cada modo de implantação de uma estação base depende do cenário em que ela será inserida, considerando, principalmente, a distribuição dos usuários.

Apesar de muitos ganhos com a utilização da técnica M-MIMO, existem alguns desafios que precisam ser superados. O primeiro é sincronia entre as antenas, considerado um processo simples: com a apropriada calibragem na estação base é possível realizar conexões garantindo os ganhos da M-MIMO. Outro desafio é o controle da chamada *pilot contamination* que gera interferência co-canal. Para resolver o problema, algoritmos estão sendo estudados com o objetivo diminuir a reutilização de *pilots* em células próximas e assim evitando a

interferência. O terceiro desafio está relacionado ao comportamento do sinal transmitido da estação base para o usuário final. Considerando que a transmissão pode ser feita por qualquer antena da estação base, as características do sinal recebido de uma mesma transmissão podem ser bastante diferentes, para entender esses comportamentos é necessário realizar teste por aferição e estudar os resultados.

Figura 4: Configuração de antenas com M-MIMO *base stations*.



Fonte: Larsson (2014).

2.4 POSSÍVEIS ARQUITETURAS PARA 5G

Um dos objetivos das redes 5G é criar uma rede que consiga abranger cada vez mais dispositivos, de diferentes tipos e conexões. De acordo com a Ericsson (2015), as redes 5G irão acelerar o desenvolvimento da *Internet of Things* (IoT), que é um paradigma novo de internet para substituir o atual, baseado em IP (*Internet Protocol*). Nesse sentido, existem vários tipos de arquitetura que podem ser implantadas com o advento das redes 5G e elas coexistirão e se comunicarão como se fossem um só, criando uma arquitetura de multicamadas.

2.4.1 Arquitetura de duas camadas

Este modelo foi idealizado ainda na 4G. Trata-se de utilizar *macro-cells* e *small-cells* de forma simultânea. Existem várias formas de se utilizar este recurso, o primeiro ponto que

deve ser considerado é o espectro de frequência, ele pode ser um espectro compartilhado para os dois tipos de células, podem ser totalmente separados (evitando interferência co-canal) ou podem ter partes separadas e unidas, simultaneamente.

As funções das *small-cells* são variadas e depende da demanda do local de implantação. Pequenos módulos de rádio são passíveis de cobrir os *blind spots*, que são áreas em que estão dentro do raio de cobertura de uma *macro-cell*, mas por algum motivo o sinal naquele local é muito atenuado ou inexistente. Outra função a ser frisada é o aprimoramento da conexão e melhoria de sinal em locais onde a qualidade de experiência (QoE) e o QoS são baixas.

Além de poder utilizar *small-cells* para elevar a qualidade da conexão e vazão de dados, é possível que as pequenas células sejam usadas para realizar tarefas de controle da rede como os processos de *handover e handoff*, gerenciar recursos da rede, ser um meio de conexão com o núcleo da rede, entre outros.

Em relação às desvantagens, a principal é a questão da interferência, tanto a interferência co-canal (que acontece quando se utiliza a mesma faixa de frequência) quanto a de canal adjacente (que acontece quando se utiliza faixas de frequência muito próximas) são passíveis de acontecer neste modelo, pois os equipamentos (*macro-cells* e *small-cells*) partilham da mesma ou utilizam faixas bem próximas. É possível, também, acontecer interferência entre estações base como, por exemplo, em edifícios onde existam várias *small-cells*, uma em cada apartamento.

O futuro caminha para a existência de muitas estações de pequeno porte, essa grande quantidade de estações base unidas criam a chamada UDN (*Ultra Dense Network*) que de acordo com a Nokia (2016) uma rede UDN pode ser considerada quando existem antenas muito próximas, com distância de, no máximo, 10 metros entre elas. Cada antena pode existir em um poste de luz ou em cada sala de grandes edifícios, esses são alguns exemplos práticos da disposição de redes UDN. Kamel (2016) também relata sobre as redes ultra densas, mostrando que o principal objetivo é garantir que o usuário final fique o mais próximo possível de sua fonte de sinal, melhorando a qualidade do mesmo.

2.4.2 Cognitive Radio Networks (CRN)

De acordo com Panwar (2016), uma CRN é um conjunto de rádios chamados SUs (*Secondary Users*) que utilizam o espectro de frequência, de forma oportunista, que está inutilizado pelos PUs (*Primary Users*). Cada PU possui um espectro de frequência licenciado, em que sempre poderá ser utilizado quando for preciso, possuindo alta taxa de

transmissão e confiabilidade, enquanto que um SU pode apenas ocupar as faixas de frequência inutilizadas e por esse motivo possuem baixo poder de transmissão e confiabilidade.

Hong (2014) explica que existem dois tipos de conexões CRN, a cooperativa e não cooperativa. A principal diferença está em como o espectro de frequência é utilizado, na primeira existem apenas canais licenciados e divididos para os PUs existentes, sendo que os SUs só podem realizar conexões quando existirem faixas de frequência vagas, do contrário não poderão transmitir. No segundo modo, não cooperativo, são criadas duas interfaces diferentes e o espectro é dividido da seguinte forma: a primeira parte é dividida para os PUs, com cada um possuindo uma parte licenciada que apenas ele poderá utilizar (na ociosidade, o espectro fica inutilizado) e a segunda parte é separada para SUs, que se conectam quando encontram qualquer faixa do espectro de frequência ociosa.

2.4.3 Comunicação Device-to-Device (D2D)

Pesquisas estão sendo feitas para que seja possível garantir a comunicação direta entre dois UEs (*Users Equipments*), ou seja, sem a necessidade de uma estação base, podendo ser usada para o estabelecimento e controle do *link* de transmissão. A comunicação D2D ainda necessita superar alguns desafios para poder se tornar um padrão a ser utilizado em grande escala como gerenciamento de interferência, alocação de recursos, latência e custo de transmissão. Existem quatro tipos de conexão D2D:

- **DR-OC (*Device relaying with operator controlled link establishment*):** Ocorre quando um UE está na beira do raio de cobertura de uma *macro-cell* e existe outro que está dentro deste raio, assim o primeiro UE se conecta ao segundo para acessar a antena de comunicação.
- **DC-OC (*Direct D2D communication with operator controlled link establishment*):** Emissor e receptor se conectam e trocam informações sem a necessidade de uma *macro-cell*, mas são assistidas por ela no estabelecimento da conexão.
- **DR-DC (*Device relaying with device controlled link establishment*):** Emissor e receptor se conectam usando um terceiro UE para retransmissão, sem envolver nenhuma estação base, a conexão é estabelecida e gerenciada apenas por UEs.

- **DC-DC (*Direct D2D communication with device controlled link establishment*):** Emissor e receptor se conectam diretamente, e não necessitam de terceiros para estabelecer a conexão.

2.5 NOVA ESTRUTURA DE TRANSMISSÃO: REDES CENTRALIZADAS

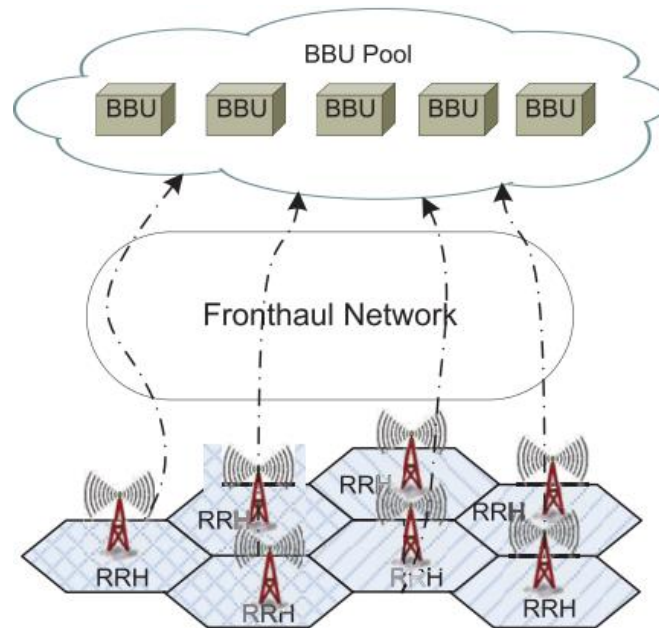
Como foi possível constatar na subseção anterior, as redes 5G possuem vários tipos de arquiteturas que precisarão coexistir e partilhar os recursos da rede. Para conseguir gerenciar tantas mudanças que estão ocorrendo nas redes atuais, pesquisas estão sendo realizadas para a implantação de C-RANs que, inclusive, já possuem protótipos e testes realizados: seu primeiro teste foi feito pela *China Mobile Research Institute* em abril de 2010.

A tecnologia C-RAN de acordo com Wang R. (2014), é uma nova arquitetura de redes móveis que é centralizada e baseada em *cloud computing*, possuindo suporte para os atuais e futuros padrões de conexão *wireless*.

A arquitetura C-RAN é dividida em dois componentes principais: RRHs (*Remote Radio Heads*) e BBUs (*Baseband Units*). As RRHs possuem as funções de rádio e se comunicam com os UEs, enquanto as BBUs possuem a função de processar as informações recebidas das RRHs e realizar a conexão ao núcleo da rede. Nas arquiteturas tradicionais, as BBUs são implantadas junto com as RRHs, mas na arquitetura centralizada a ideia é centralizar em um único ponto todas as BBUs, formando o *BBU pool*, e realizar o compartilhamento de recursos.

A conexão entre RRH e BBU é chamada de *fronthaul* da rede, como pode ser visto na figura 5. Bartelt (2013) comenta que a taxa de dados necessária para a troca de informações entre BBU e RRH é muito alta, por isso é indispensável que a tecnologia de ligação entre os dois componentes seja robusta o suficiente para alcançar a vazão requerida. Dessa forma, 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.

Bojic (2013) apresenta novas tecnologias *wireless* que utilizam altas faixas de frequência (entre 60GHz e 80GHz) e podem alcançar taxas de dados em torno de dezenas de Gbps, sendo possível a sua utilização para compor o *fronthaul* da arquitetura C-RAN. O autor também comenta que a densificação de *small-cells* 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 a estrutura necessária que atenda as demandas e que não seja muito custoso.

Figura 5: Arquitetura C-RAN

Fonte: Wang R. (2014).

De acordo com Panwar (2016), a arquitetura C-RAN é escalável e flexível. O gerenciamento da rede é facilitado, pois o BBU *pool* processa as informações referentes a tráfego, interferência, mobilidade (*handover*) e balanceamento de carga, processos antes realizados pelas estações base. O consumo de energia, tanto dos UEs quanto das estações base, podem ser diminuídos com uma possível utilização da nuvem para guardar informações e realizar processos que seriam tarefas dos dispositivos em questão.

O custo para implantar uma nova MBS (*macro-cell base station*) ou SBS (*small-cell base station*) é muito alto, assim a C-RAN pode ser considerada um fator chave para a redução do custo de implantação e consequentemente custo do serviço ao usuário final. Essa redução está relacionada à divisão realizada pela arquitetura centralizada, assim na implantação de uma nova ou estação base só será necessário implantar RRHs. Outro ponto que acarreta a redução de custos é o número necessário de BBUs para servir a rede. Em uma rede tradicional é necessário uma BBU para cada estação base, mas na arquitetura centralizada, várias RRHs podem ser servidas por uma única BBU, se o limite de processamento desta não for ultrapassado. O ponto negativo em relação aos custos é sua implantação inicial, pois, geralmente, é necessário criar um *fronthaul* bastante custoso, o que geraria um investimento inicial muito alto.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou as principais características que norteiam as futuras redes 5G. Foi visto que as três principais características desta rede são garantir as trocas de informações com maior capacidade, o baixo *delay* e a garantia de onipresença. A expansão do espectro de frequência poderá ajudar nos objetivos que envolvem a velocidade de transmissão e atraso, porém encontra-se dificuldade para garantir compatibilidade com as redes existentes.

Novas técnicas de modulação estão surgindo para suportar os novos tipos de conexões que estão emergindo, com destaque para as conexões MMC que geram um grande volume de pacotes simultâneos. Apesar de existir outros, os modelos FBMC, UFMC e F-OFDM foram destacados pelo fato de terem o grande potencial para se tornar o padrão das redes 5G.

Várias arquiteturas foram aparecendo com o decorrer do tempo, em que se destacou: CRN, D2D e arquitetura de duas camadas. Estas tecnologias já são utilizadas nas redes atuais, mas não existe uma integração entre elas.

O objetivo das redes 5G é unificar e centralizar todos esses modelos, para que seja possível realizar conexões entre diversos dispositivos diferentes através da rede móvel. Neste sentido, destaca-se o modelo C-RAN que promete conseguir gerenciar todo o tráfego gerado garantindo aumento da capacidade da rede, economia de energia e de recursos.

Muitos desafios ainda precisam ser superados, assim, no próximo capítulo, será destacada a organização de UDNs, considerando tanto a capacidade da rede quanto o custo para a sua implantação.

3. TÉCNICAS DE IMPLANTAÇÃO DE HETNETS PARA 5G

O conceito de redes heterogêneas, já mencionado no capítulo 1, é ratificado por Damjanovic (2011). O autor considera que as HetNets estão baseadas na utilização de estações base de grande potência (*macro-cell*) e baixa potência (*small-cell*) de forma simultânea. Esse novo paradigma de rede surgiu com o advento da utilização de pequenas estações base, que trabalham em conjunto com as grandes torres de telefonia melhorando a qualidade do serviço prestado ao usuário.

Outro conceito validado é o da principal função de HetNets, em que para López-Pérez (2015), a função das *small-cells* é prover um aumento da capacidade em locais específicos, tanto *indoors* quanto *outdoors*, enquanto as *macro-cells* possuem a característica de cobrir uma grande área e garantir a conexão de UEs que detêm maior mobilidade. Ainda segundo o autor, o principal método utilizado para aumentar a capacidade da rede é a densificação de estações base de pequeno porte, pois possui uma boa relação custo/benefício.

O sucesso na utilização de pequenas estações base começou a trazer alguns problemas, Peng H. (2016) comenta que a excessiva implantação de *small-cells* acarreta em alguns significativos desafios relacionados com interferência, mobilidade e *backhaul*.

A interferência é um desafio que está presente desde o começo da utilização de redes móveis. Em redes densas (UDNs) é muito complicado fazer a gerência deste problema, pois com o grande aumento do número de estações base, existe uma maior probabilidade de que transmissões interfiram no sinal desejado. Em uma UDN, a divisão do espectro entre as células também pode ser considerado um grande desafio, visto que, nesse caso, é mais comum existir células próximas com canais iguais ou vizinhos, gerando interferência co-canal e de canal adjacente. Com a utilização de *small-cells* de diferentes tamanhos, a divisão das células heterogêneas acaba adicionando maior dificuldade na divisão espectral.

Os UEs móveis detêm um alto grau de mobilidade, em sua maioria, o que resulta no processo de *handover*, ocorrendo quando um UE muda de uma estação base para outra. Como as *macro-cells* possuem um grande raio de cobertura, esse processo não acontece com grande frequência. Considerando, em UDNs, uma antena implantada em cada poste de luz de uma cidade, o processo de *handover* será tão constante que gerará tráfegos capazes de obstruir a rede, por este motivo a mobilidade é apontada como um grande desafio em redes densas.

O processo de *backhauling* de uma rede está intimamente ligado com o custo de implantação, preço dos equipamentos e mão de obra necessária para implantar e conectar a rede. Em redes densas esses custos são maximizados, visto que é necessário ligar diversas

estações bases. Este fato gera uma dificuldade, pois a prestadora de serviço precisa construir uma infraestrutura que seja monetariamente viável.

Fundamentado na necessidade de encontrar soluções para os diversos desafios que as HetNets densas trazem, este trabalho procura estudar diferentes métodos para a implantação de *small-cells* levando em consideração diversos fatores: gerenciamento de interferência, QoS, área de cobertura, custo de implantação e vazão total. Serão apresentadas três técnicas (heurísticas) diferentes para a implantação de *small-cells*, cada uma possui uma característica ímpar que influenciará na decisão que como as células serão implantadas no cenário.

A divisão das particularidades de cada técnica utilizada é comentada a seguir: A primeira leva em consideração apenas a aglomeração de usuários, a segunda possui o princípio de analisar o custo de implantação e a terceira considera como fator determinante a vazão total da rede.

Existem dois objetivos em comum entre os processos abordados, o primeiro está relacionado à cobertura dos usuários: todos precisam estar dentro do raio de cobertura de alguma célula para poder se conectar. O segundo é relacionado a uma medida de QoS, medida pela vazão mínima que o usuário necessita alcançar.

Um conjunto St possui a posição geográfica das estações de rádio que são candidatas a serem implantadas. No começo, todas as *small-cells* são consideradas instaladas e então são retiradas uma a uma para indicar se são ou não imprescindíveis para a rede. Testes condicionais são realizados com todos os usuários, considerando a cobertura dos mesmos e um valor mínimo de QoS, se pelo menos um dos usuários não obtiver um dos requisitos, é considerado que aquela estação base é necessária para aquele UE e conseqüentemente para a rede.

A seqüência das células é organizada em formato de pilha e a definição do topo até a sua base depende da característica singular de cada técnica utilizada.

3.1 MODELO DE PROPAGAÇÃO

Para simular a propagação dos sinais das antenas, foi utilizado o modelo de propagação SUI (*Stanford University Interim*), apresentado pelo grupo IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) 802.16 (2001). Necessitava-se de um modelo que considerasse cenários mais reais (com maiores perdas) do que o modelo de espaço livre. Nesse sentido, a motivação para o uso deste modelo de propagação é que ele considera o desvanecimento do sinal causado pelo tipo de terreno e vegetação, desde vegetações mais elevadas e altas até as

mais baixas, além de ser amplamente utilizado pela comunidade científica. Com o correto uso de seus parâmetros de entrada, também é possível simular ambientes urbanos e suburbanos com sombreamento. De acordo com o grupo IEEE 802.16 (2001), existem três tipos de terrenos que foram adicionados para o uso do modelo SUI, eles são:

- **Terreno tipo A:** Terrenos com altas regiões montanhosas e com vegetação densa. Possui o maior índice de desvanecimento de sinal.
- **Terreno tipo B:** Terrenos intermediários, com vegetação média, possui índice de desvanecimento médio.
- **Terreno tipo C:** Terreno geralmente plano, com pouca vegetação ou vegetação baixa, contém o menor índice de desvanecimento de sinal entre os três tipos de terreno.

Para calcular o desvanecimento do sinal, três equações são utilizadas e mostradas a seguir:

$$L_{SUI} = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + S, d > d_0 \quad (1)$$

$$A = 20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda} \quad (2)$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (3)$$

Onde:

- d = distância da antena ao ponto medido, em metros.
- d_0 = 1 metro, distância de referência de acordo com Sulyman (2016).
- λ = comprimento de onda, em metros.
- γ = expoente de perdas.
- h_b = Altura da estação base, podendo estar entre 10 a 80 metros.
- a , b e c = parâmetros que depende do tipo de terreno utilizado, seus valores podem ser vistos na tabela 1.
- S = é o desvanecimento causado pelas áreas de sombreamento, podendo estar entre 8,2 a 10,6 dB.

Tabela 1: Parâmetros do tipo de terreno para o modelo SUI

Parâmetro	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno tipo C
A	4.6	4	3.6
B	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20

Fonte: Grupo IEEE 802.16 (2001)

De posse do valor de perda de sinal em determinado ponto, é necessário encontrar a potência recebida naquele local, a fórmula 4 é usada para este cálculo, já transformada em Watts:

$$Pot_w = \frac{10^{\frac{Pot_i - L_{SUI}}{10}}}{1000} \quad (4)$$

Em que Pot_w é a potência recebida em watts, Pot_i é a potência inicial ou irradiada (da antena, em dBm) e L_{SUI} é o valor do desvanecimento do sinal. Uma vez obtido o valor de potência, é possível calcular o valor de SINR (fórmula 5) e então a vazão máxima (fórmula 6) do UE conectado:

$$SINR = \frac{Pot_w}{\sigma^2 + I} \quad (5)$$

$$V_{max} = B * \log_2(1 + SINR) \quad (6)$$

σ^2 é a soma das potências de todas os módulos de rádio que interferem na transmissão do sinal, enquanto que I é o valor do ruído branco. Na fórmula 6, B é a quantidade de banda disponível para o usuário.

3.2 TÉCNICA NÚMERO UM: BASEADA NOS USUÁRIOS

A técnica baseada em usuários teve inspiração nas práticas das grandes empresas de telefonia. A infraestrutura de telefonia móvel geralmente é criada em locais onde existe uma grande quantidade de usuários em potencial. As grandes cidades são um exemplo e nelas as redes móveis precisam ser muito robustas para garantir uma boa qualidade no serviço prestado.

O objetivo desta técnica é sempre evoluir a rede de acordo com a posição dos usuários: onde existir um maior conglomerado, melhor e mais robusta será a infraestrutura e isso resulta em uma densificação de módulos de rádio nesses locais. Levando este princípio em consideração, foi criado um algoritmo que se baseia na quantidade de usuários conectados a cada estação base. Este fato é chamado de grau de importância e quanto maior o número de usuários conectados àquela estação, mais importante ela se torna.

A organização da pilha de testes é feita de acordo com o grau de importância das células, o topo da pilha começa com a estação menos importante e a sequência é montada de forma crescente, ficando na base a estação rádio base considerada mais importante.

Os algoritmos 1 e 2 ilustram como funciona o processo de montagem da pilha e a escolha de quais *small-cells* irão continuar ou não implantadas. A entrada *St*, como comentado anteriormente, são as posições geográficas de todas as *small-cells* que são candidatas a serem implantadas, logo na primeira linha do algoritmo 1 a função **Checar_Paramêtros_Rede()** é chamada.

A função ilustrada no algoritmo 2 primeiramente calcula a distância euclidiana entre um usuário e todas as RRHs, assim o UE é atribuído naquela *small-cell* em que a distância é menor, conectando-se a ela. Após esse processo é calculado a matriz de importância, abrangendo todas as RRHs. Após todos os UEs estarem conectados, o segundo *loop* realiza o cálculo de SINR e vazão máxima de cada um. A vazão máxima e a matriz de importância são os parâmetros de saída do algoritmo 2.

A linha 2 do algoritmo 1 inicia um *loop* que será executado até que todas as *small-cells* sejam testadas. O parâmetro *isOut* é booleano e serve para indicar se a *small-cell* será ou não implantada, inicia com valor verdadeiro e se for mantido a RRH será descartada. Na linha 4 é escolhida a *small-cell* com menos importância e na 5 ela é removida. O método **Checar_Paramêtros_Rede()** é chamado novamente para calcular os novos valores de vazão para cada usuário e matriz de importância.

A partir da linha 8 até a 12 existe uma decisão dentro de um *loop* que percorre todos os usuários e para cada um é testado se ele possui cobertura de pelo menos uma célula e se a sua vazão é maior ou igual do que a mínima determinada (parâmetro de QoS). Sendo todos os testes verdadeiros, nada é feito e a célula é descartada na linha 15, pois o parâmetro *isOut* continuará setado como verdadeiro, mas se apenas um (teste) for falso, a mesma é considerada indispensável e é implantada na linha 17. O processo se repete até que todas as RRHs sejam avaliadas. Se uma célula for implantada, todos os usuários atribuídos a ela são

descartados de testes futuros. No fim, a saída S_n terá as posições de todas as *small-cells* que deverão ser implantadas.

Algoritmo 1: Implantação de *smallcells* (técnica usuários).

Entrada: St

1. $[V_{max}, importancia] = \text{Checar_Param\u00eetros_Rede}(St)$
2. **Enquanto** ($|St| > 0$) **fa\u00e7a**
3. $isOut = true$
4. $RRH_{chosen} = \min(Importancia)$
5. $St = \text{remove}(St, RRH_{chosen})$
6. $[V_{max}, importancia] = \text{Checar_Param\u00eetros_Rede}(St)$
7. **Para** (todos $UE_{temp} = 1 \rightarrow UE$) **fa\u00e7a**
8. **Se** ($UE_{temp} \subseteq (RRH, UE)$) && ($V_{max}(UE_{temp}) \geq V_{max}(Threshold)$) **ent\u00e3o**
9. n\u00e3o fa\u00e7a nada
10. **Sen\u00e3o**
11. $IsOut = false$
12. **fim Se**
13. **fim Para**
14. **Se** ($IsOut = true$)
15. $off_list = off_list \cup RRH_{chosen}$
16. **Sen\u00e3o**
17. $S_n = S_n \cup RRH_{chosen}$
18. **fim Se**
19. **fim Enquanto**

Sa\u00edda: S_n

Algoritmo 2: Checar_Param\u00eetros_Rede

Entrada: St

1. **Para** (todas $RRH \in St$) **fa\u00e7a**
2. Calcular a atribui\u00e7\u00e3o dos usu\u00e1rios nas RRHs (RRH, UE)
3. Calcular a matriz de import\u00e2ncia
4. **fim Para**
5. **Para** (todos $UE_{temp} = 1 \rightarrow UE$) **fa\u00e7a**
6. Atualizar $SINR(UE_{temp})$
7. Calcular $V_{max}(UE_{temp})$
8. **fim Para**

Sa\u00edda: $V_{max}, importancia$

3.3 T\u00c9CNICA N\u00daMERO DOIS: BASEADA NO CUSTO DE IMPLANTA\u00c7\u00c3O

As empresas, sejam de telefonia ou n\u00e3o, sempre lan\u00e7am os seus produtos pensando no lucro final. Estudos s\u00e3o realizados para garantir que o custo de produ\u00e7\u00e3o seja o mais baixo poss\u00edvel, mas ao mesmo tempo o produto final precisa ser impec\u00e1vel. Essas vari\u00e1veis impactam diretamente no gasto com a produ\u00e7\u00e3o e conseq\u00fcentemente no lucro, assim \u00e9 necess\u00e1rio agradar o consumidor para continuar vendendo e ainda diminuir ao m\u00e1ximo os custos para que o lucro seja maximizado.

Levando em considera\u00e7\u00e3o o princ\u00edpio apontado acima, o trabalho de Ranaweera (2015), estuda a implanta\u00e7\u00e3o de *small-cells* em ambientes urbanos, considerando um limite de cobertura do mapa a ser alcan\u00e7ado e tamb\u00e9m o custo de implanta\u00e7\u00e3o e liga\u00e7\u00e3o das RRHs aos

pontos de fibra existentes. São considerados pontos em que as estações podem ser ou não implantadas, em alguns já existe conexão de fibra ótica para realizar o processo de *backhauling*, enquanto em outros é inexistente: caso uma estação base seja implantada em um ponto em que não possui conexão, esta precisa ser ligada em algum ponto de fibra.

A técnica baseada no custo de implantação foi inspirada no trabalho de Ranaweera (2015). Como em todas as outras abordagens, é necessário que os usuários sejam totalmente cobertos, similarmente ao trabalho usado como base (que considera uma porcentagem de usuários cobertos). A organização da pilha é feita de acordo com o custo de implantação, dessa forma no topo da pilha ficam as *small-cells* que possuem o maior custo e a organização é feita de forma decrescente, permanecendo na base àquelas com menor custo.

O cálculo do custo leva em consideração três fatores: o custo de uma *small-cell*, custo para a realização do *trenching* até o ponto de fibra mais próximo e o custo de fibra necessária para interligação. Assim a fórmula do custo é ilustrada na equação 7:

$$C_{total} = \frac{C_{cell}}{N_{users}} + C_{fiber} * N_{fibers} + C_{trench} * N_{trench} \quad (7)$$

O C_{total} é o custo total calculado para cada RRH. O parâmetro C_{cell} é o custo de aquisição de uma RRH, N_{users} é a quantidade de usuários conectados na RRH. O valor de C_{fiber} indica o custo de um metro de fibra ótica, enquanto N_{fibers} é o comprimento, medido em metros, necessário para interligar a estação base ao ponto de fibra mais próximo. Os valores de C_{trench} e N_{trench} significa, respectivamente, o custo por metro de escavação para a passagem de fibra e o comprimento necessário de escavação, medido em metros.

Conexões de fibra geralmente são feitas por baixo da terra e quase sempre de acordo com a orientação das ruas, as quais possuem, na sua maioria, formas horizontais e verticais. Levando isso em consideração, não é recomendável usar a distância euclidiana para calcular o comprimento de fibra (assim como escavação) necessário, que ligará a RRH aos pontos de fibra. A abordagem mais apropriada para a situação é a distância de taxi apresentada por Bristin (1985), que considera apenas caminhos verticais e horizontais, a fórmula é apresentada abaixo:

$$D = |X_1 - X_2| + |Y_1 - Y_2| \quad (8)$$

O algoritmo 3 descreve a implantação de RRHs com a técnica baseada no custo de implantação. Como entrada se tem a matriz St , que contém as posições das estações base

candidatas a serem implantadas e a Fp que possui as posições, no cenário, em que existe conexão de fibra. A linha 1 chama o método ilustrado no algoritmo 2, aqui se faz necessário saber em qual RRH os usuários estão conectados. Na linha 2 é chamado o procedimento ilustrado no algoritmo 4, que tem como objetivo encontrar o custo de implantação para cada estação base.

O algoritmo 4 possui um único *loop* que percorre todas as estações base, na linha 2 é calculada a distância de táxi entre a RRH corrente e todos os pontos de fibra existentes, sendo a menor distância a escolhida para o cálculo do custo. O cálculo do custo de acordo com a fórmula 7 é feito na linha 3 e o seu valor é guardado no vetor *Custo*. O cálculo se repete até que todas as *small-cells* possuam um valor de custo, todos esses valores são retornados como saída da função.

Retornando ao algoritmo 3, é possível perceber bastante similaridade (entre as linhas 3 a 14) com o que foi explanado na seção anterior. A única diferença está na linha 5, em que a RRH escolhida para ser removida é a que contém o maior custo, na seção anterior era a que tinha a menor importância. Com todos os testes de usuário feitos, é analisado o parâmetro *IsOut*: caso o seu valor seja verdadeiro, a RRH é simplesmente descartada e o procedimento retorna para realizar o teste com a próxima estação base. Enquanto que com valor, da variável booleana, falso a RRH será implantada e ainda será considerada um ponto de fibra existente (linha 19), assim o vetor de custo precisa ser atualizado e isso é feito na linha 20.

Algoritmo 3: Implantação de *smallcells* (técnica trenching).

Entrada: St, Fp

```

1. [Vmax, importancia] = Checar_Paramêtros_Rede(St)
2. [Custo] = Calcular_Custo(St, Fp)
3. Enquanto ( $|St| > 0$ ) faça
4.   isOut = true
5.   RRH_chosen = max(Custo)
6.   St = remove(St, RRH_chosen)
7.   [Vmax, importancia] = Checar_Paramêtros_Rede(St)
8.   Para (todos  $UE_{temp} = 1 \rightarrow UE$ ) faça
9.     Se ( $UE_{temp} \subseteq (RRH, UE)$ ) && ( $Vmax(UE_{temp}) \geq Vmax(Threshold)$ ) então
10.      não faça nada
11.   Senão
12.     IsOut = false
13.   fim Se
14. fim Para
15. Se ( IsOut = true)
16.   off_list = off_list U RRH_chosen
17. Senão
18.   Sn = Sn U RRH_chosen
19.   Fp = Fp U RRH_chosen
20.   [Custo] = Calcular_Custo(St, Fp)
21. fim Se
22. fim Enquanto
Saída:  $Sn$ 

```

Algoritmo 4: Calcular_Custo

Entrada: St, Fp

1. **Para** (todas $RRH \in St$) **faça**
2. Achar a menor distância entre RRH e algum ponto de Fp
3. Calcular o custo de implantação da RRH
4. Guardar o valor no vetor $Custo$
5. **fim Para**

Saída: $Custo$

O processo se repete até que todas as *small-cells* sejam testadas, A saída, como na técnica anterior, contém a matriz Sn possuindo a localização das células que serão implantadas.

3.4. TÉCNICA NÚMERO TRÊS: BASEADA NA VAZÃO TOTAL

A técnica baseada na vazão total teve a sua fundamentação no trabalho realizado por El-beaino (2015), que consistia em testar o impacto da ausência de cada uma das estações base que estavam sendo propostas à implantação. Para o teste, era necessário a aplicação de uma medida, assim foi escolhido um fator de QoS: a vazão total da rede com a ausência da RRH em questão. Realizava-se a retirada, uma a uma, das *small-cells* e o cálculo do SINR de todos os usuários (e conseqüentemente da vazão) era feito para saber se estava acima de um limite permitido.

Nesta técnica, a pilha de decisão é organizada de acordo com a vazão total da rede após a retirada de cada RRH , a vazão total é calculada somando as vazões máximas de todos os usuários. A RRH que gera o menor impacto ao ser retirada (rede com maior vazão total) fica no topo da pilha, o restante é arrumado de forma decrescente, ficando na base a RRH que gera maior impacto na rede.

O algoritmo 5 e 6 exemplifica a heurística utilizada, primeiramente é usado como entrada a matriz St contendo todas as $RRHs$ candidatas à implantação. Na linha 1 do algoritmo 5 é chamada a função **Checar_Vazão_Total()** representada pelo algoritmo 6, nela é possível calcular a vazão total com a ausência de cada estação base.

O algoritmo 6 começa com um *loop* que percorrerá todas as estações base contidas na matriz St , em cada iteração um módulo de rádio diferente é excluído (linha 2) e então entre as linhas 3 e 6 são feitos os cálculos de SINR e vazão máxima de todos os usuários, para que na linha 7 elas sejam somadas para se obter a vazão total com a ausência da RRH removida. Na linha 8 a *small-cell* é recolocada na matriz de estações base para que seja usada nos próximos cálculos. Assim é possível perceber que em cada cálculo de vazão total, apenas uma RRH está fora e o índice do elemento no vetor $Vtotal$ é igual ao índice da RRH que foi retirada para o

calculado do valor representado no vetor. A saída **Vtotal** contém os valores que serão usados para a organização da pilha de decisão no algoritmo 5.

Assim como na técnica baseada na implantação, as linhas 2 a 13 não possuem alteração, apenas na linha 5 em que a RRH escolhida (topo da pilha) é a que possui o maior valor Vtotal. Entre as linhas 14 a 19 existe a decisão de implantação ou não da *small-cell*. Sendo a opção o descarte: na linha 15 acontece a adição da RRH na lista de exclusão, em caso contrário é executado a linha 17 que coloca a *small-cell* na matriz de implantados e a linha 18 que repõe a célula na coleção (St) que será usada para os futuros testes. A linha 20 chama novamente o procedimento **Checar_Vazão_Total()** e calcula os novos valores de vazão total para a realização dos testes.

O algoritmo 5 termina quando todas as *small-cells* são testadas, a saída **Sn** contém todas as células que serão implantadas.

Algoritmo 5: Implantação de small-cells (técnica vazão).

Entrada: St

```

1. [Vtotal] = Checar_Vazão_Total(St)
2. Enquanto (|St| > 0) faça
3.   isOut = true
4.   RRH_chosen = max(VTotal)
5.   St = remove(St, RRH_chosen)
6.   [Vmax, importância] = Checar_Paramêtros_Rede(St)
7.   Para (todos UEtemp = 1 → UE) faça
8.     Se (UEtemp ⊆ (RRH, UE)) && (capacity(UEtemp) ≥ 400 Kbps) então
9.       não faça nada
10.    Senão
11.      IsOut = false
12.    fim Se
13.  fim Para
14.  Se (IsOut = true)
15.    off_list = off_list U RRH_chosen
16.  Senão
17.    Sn = Sn U RRH_chosen
18.    St = St U RRH_chosen
19.  fim Se
20.  [Vtotal] = Checar_Vazão_Total(St)
21. fim Enquanto

```

Saída: Sn

Algoritmo 6: Checar_Vazão_Total

Entrada: St

```

1. Para (todas RRH ∈ St) faça
2.  Remover RRH atual
3.  Para (todos UEtemp = 1 → UE) faça
4.    Atualizar_SINR(UEtemp)
5.    Atualizar_Vmax(UEtemp)
6.  fim Para
7.  Calcular VTotal = soma(Vmax)
8.  Recolocar RRH atual
9. fim Para

```

Saída: Vtotal

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo buscou mostrar os diversos problemas que as redes densas estão gerando na atualidade. Dessa maneira, apresentaram-se algumas técnicas para a implantação de *small-cells* objetivando enfrentar os problemas gerados em UDNs, em que cada abordagem possui uma meta específica.

Os algoritmos apresentados possuem embasamento em trabalhos realizados na literatura, além de suas características peculiares existem metas em comum relacionadas com a cobertura e vazão dos UEs. Ilustrou-se através de pseudocódigos o funcionamento das três técnicas apresentadas, com o objetivo de mostrar as diversas diferenças na construção da rede final.

No capítulo que retrata sobre a simulação e resultados, serão mostradas as vantagens e desvantagens de forma quantitativa relacionadas com cada abordagem utilizada.

4. COMPARAÇÃO DAS ARQUITETURAS C-RAN E D-RAN

O modelo C-RAN, como visto na seção 2.5, é considerado uma nova estrutura de organização das futuras redes móveis. Apesar de todos os benefícios apresentados na referida seção, existem muitos estudos que comparam as redes centralizadas com as D-RANs (*Distributed Radio Access Networks*), expondo os pontos positivos e negativos de cada arquitetura.

De acordo com Jaber (2016), existem estudos que defendem o modelo C-RAN como superior, desde que se obtenha um *fronthaul* de fibra ótica, para garantir grande largura de banda e baixa latência. Ainda segundo o autor, outros estudos sugerem o D-RAN como superior, pois o mesmo opera sobre um *backhaul* realista, mas alerta os benefícios perdidos pela falta de centralização. A tabela 2 realiza uma comparação em relação aos dois métodos de organização da rede, comparando métricas relacionadas com custo de implantação e equipamentos, consumo de energia, gerenciamento da rede, entre outros.

Tabela 2: Comparação ente as arquiteturas D-RAN e C-RAN.

Fator	D-RAN	C-RAN
Custo de uma RRH ou <i>small-cell</i> .	Alto	Baixo
Custo de Planejamento, implantação e manutenção de RRHs.	Alto	Baixo
Eficiência energética de uma RRH.	Baixo	Alto
Custo de uma BBU.	Nenhum	Alto
Custo de Planejamento, implantação e manutenção de BBUs.	Nenhum	Baixo
Eficiência energética de uma BBU.	Nenhum	Alto
Potencial agrupamento de recursos	Limitado	Alto
Requisitos de <i>fronthaul</i>	Flexível	Exigente
Custo de <i>backhaul/fronthaul</i>	Alto	Altíssimo
Nível de coordenação entre células	Limitado	Máximo

Fonte: Jaber (2016)

Pela tabela 2 podemos perceber, primeiramente, que o custo tanto de CAPEX quanto de OPEX (*Operational Expenditure*) de uma estação base para D-RAN é maior do que o modelo C-RAN. Isto ocorre pelo fato de que a *small-cell*, no modelo distribuído, precisa ser mais robusta para conseguir realizar os processos de transferência e processamento do sinal, além de realizar o seu próprio processo de *backhaul* com o núcleo da rede. As RRHs usadas na arquitetura C-RAN possuem apenas a função de transmissão e recebimento do sinal de/para o UE além do envio das informações para as BBUs, dessa forma o equipamento se torna mais barato.

O conceito de BBU só existe no modelo centralizado, seu custo é relativamente alto por ser um equipamento que necessite de grande poder de processamento, porém o custo de planejamento, implantação e manutenção é baixo por causa de sua estruturação aglomerada chamada *pooling*, criando assim os BBUs *pools*.

O agrupamento e gerenciamento de recursos no modelo C-RAN é bastante eficiente, principalmente pelo fato de conter todas as BBUs da rede em um único ponto geográfico, no D-RAN as bases de processamento estão espalhadas junto com as *small-cells*, dificultando a gerência de forma simultânea.

Os requisitos de *fronthaul* no modelo D-RAN são mínimos, a proximidade entre o setor de transmissão e processamento de dados possibilita a criação de um *fronthaul* com técnicas *wireless*, reduzindo muito o custo. Para o modelo centralizado, as grandes distâncias entre uma RRH e o BBU *pool* requerem uma robustez maior na infraestrutura de *fronthaul* para garantir alta taxa de transmissão de dados e baixo *delay*. Dessa forma, a ligação precisa ser feita com fibras óticas, aumentando o seu custo.

A coordenação entre as células é maior no modelo C-RAN justamente por existir uma gerência central que consegue controlar toda a rede de forma única, em vista disso o processo de *handover* e o controle de interferência entre as células são mais bem gerenciados se comparado com o modelo distribuído, fatos que são confirmados por Rost (2014) que comenta sobre o gerenciamento central da arquitetura C-RAN

Wang R. (2014) discursa sobre o potencial que a arquitetura C-RAN tem em gerir uma rede com multi-RATs (*Multiple Radio Access Technologies*), além de possuir suporte para NFV (*Network Function Virtualization*) e SDN (*Software Defined Networks*). Dispondo desses dados, fica nítido que o modelo C-RAN traz bastantes benefícios, mas esbarra em um grande impasse: o seu custo de implantação.

4.1 COMPARAÇÃO DO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO ENTRE C-RAN E D-RAN

Através da análise dos dados obtidos na tabela 2, foi possível perceber que o modelo centralizado possui diversos benefícios em relação ao distribuído, mas o custo de implantação ainda é um impasse para que a centralização seja aceita de forma unânime. Partindo deste princípio, Checko (2014) baseia o seu trabalho na comparação do custo de implantação entre arquiteturas tradicionais (D-RAN) e centralizadas (C-RAN).

Em seu trabalho, Checko (2014) considera relevante os valores de BBU e fibra ótica. O custo de uma RRH/*small-cell* é considerado igual nos dois modelos e não entra na equação de custo. A equação 9 ilustra o custo de implantação:

$$TCO = BBU_c * N_{BBUs} + FC_{km} * N_{kmF} * \frac{1}{CostFactor} \quad (9)$$

Onde:

- BBU_c = Custo para implantar uma BBU;
- N_{BBUs} = Número de BBUs necessárias para servir a rede;
- FC_{km} = Custo para implantar um quilômetro de fibra;
- N_{kmF} = A quantidade de quilômetros de fibra necessária para conectar todas as RRHs ao centro de BBUs;
- $CostFactor$ = Um fator que indica quantas vezes o valor de uma BBU é maior que um quilômetro de fibra;

A variável $CostFactor$ possui um importante papel na equação, enquanto o custo da BBU e o quilômetro de fibra são setados com valores iguais, o $CostFactor$ é que irá indicar quão mais caro é uma BBU se comparado com um quilômetro de fibra.

É sabido que no modelo D-RAN todas as estações base que forem implantadas, necessitarão de uma BBU para processar suas informações. Em contrapartida, não é necessário o uso de fibra ótica na criação do *fronthaul* da rede, por conta da proximidade entre a *small-cells* e a BBU. Na arquitetura C-RAN é considerado, de acordo com Checko (2014), que uma BBU consegue trabalhar com dados de até 70% da capacidade máxima de transmissão de uma RRH, dessa forma a BBU poderá servir 1 ou mais RRHs até que esse limite seja alcançado. A posição do BBU *pool* será no centro do cenário e o cálculo do comprimento de fibra necessário para ligar cada RRH ao *pool* será feito pela equação 8.

Como exemplo, considerando que a capacidade máxima de uma *small-cell* é de 100Mbps e tendo 5 células que, juntas, alcancem 60Mbps de capacidade, apenas uma BBU será necessária para processar as informações das 5 estações base, em contrapartida, se apenas 1 célula possuir 80Mbps de capacidade máxima, serão necessários 2 BBUs para garantir o devido processamento desses dados.

As características do cenário e a distribuição dos usuários serão apresentadas no capítulo 6. Para a escolha das posições em que as estações base serão implantadas, serão usadas as técnicas apresentadas no capítulo 3.

4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada uma comparação entre as arquiteturas distribuída e centralizada em redes móveis com o objetivo de mostrar os pontos positivos e negativos de cada uma. Percebeu-se que a arquitetura C-RAN traz diversos benefícios, em que se pode citar: maior aproveitamento de recursos, gerenciamento centralizado, menor consumo de energia, menor custo de gerenciamento, entre outros. Frisou-se também o motivo do modelo C-RAN ainda não ser uma unanimidade na comunidade científica que é o custo de implantação dessa arquitetura.

O objetivo do capítulo era apresentar um modelo para calcular o impacto do custo de implantação das tecnologias C-RAN e D-RAN. Através da equação 9 será possível realizar o cálculo do custo de implantação nos dois modelos. Nas variáveis BBU_c e FC_{km} já estão incluídos o custo de aquisição, instalação (mão de obra e equipamentos), e *trenching* (para fibra). Encontrou-se dificuldades para obter um valor real do custo de implantação de uma BBU, assim o valor do TCO (*Total Cost of Onwership*) não será em nenhuma moeda existente. Para contornar este problema, a variável *CostFactor* será usada para definir o quanto o custo da variável BBU_c é maior que o da FC_{km} .

Os cenários e resultados da simulação serão apresentados no capítulo 6, no próximo capítulo será apresentado uma revisão do estado da arte em relação a redes 5G, HetNets e C-RANs.

5. TRABALHOS CORRELATOS

As redes 5G trarão benefícios em diversos pontos: área de cobertura, vazão máxima, eficiência energética, atraso mínimo, escalabilidade, entre outros. Para alcançar esses objetivos, Peng M. (2014) comenta que as HetNets e C-RANs são tecnologias em potencial para alcançar as metas propostas pelas redes 5G.

O uso de estações base menores (*small-cells*) se tornou um grande método para atender as demandas existentes. Seu uso se estendeu tanto que as HetNets passaram a ser chamadas UDN, devido a grande densidade de pequenas antenas. Rost (2014) declara que as redes ultra densas podem ser uma alternativa para que sejam satisfeitas as diversas finalidades das redes 5G, por dois motivos: o primeiro está relacionado com a distância do usuário para o ponto em que está conectado, como a estação base é de baixa potência e possui um raio de cobertura pequeno a conexão só é possível se o usuário estiver em uma pequena distância da fonte em que ele está conectado. O segundo motivo está relacionado com o melhor aproveitamento do espectro de frequência que acontece com a existência de múltiplas células.

O uso de uma arquitetura centralizada, de acordo com Rost (2014), se destaca no sentido de conseguir gerir de forma bastante eficiência uma rede ultra densa. O gerenciamento centralizado possibilita o uso de algoritmos capazes de garantir a devida distribuição de recursos e ainda mitigar ao máximo a interferência entre células. Nesse sentido é possível perceber que a arquitetura C-RAN em conjunto com redes UDNs são recursos indispensáveis para alcançar os diversos propósitos das redes 5G.

Dessa forma se fez necessário apresentar trabalhos que estavam relacionados com a organização de HetNets, assim como outros que trabalhassem com os desafios do custo das redes centralizadas. As heurísticas foram apresentadas no capítulo 3 e a comparação entre os modelos distribuído e centralizado no capítulo 4, neste capítulo serão apresentados os incrementos que o presente trabalho realizou, em detrimento daqueles que serviram de base.

5.1 HETNETS

As heurísticas apresentadas no capítulo 3 servem para organizar as HetNets, escolhendo as *small-cells* necessárias para garantir que as demandas da rede sejam alcançadas. Três algoritmos foram utilizados para a realização dos testes e o primeiro diferencial do presente trabalho, se comparado com outros relacionados ao tema, é justamente a garantia de 100% de cobertura e vazão mínima (limiar) dos usuários. Fator esse que está em todas as três técnicas.

Apenas as técnicas baseadas no custo de implantação e na vazão total da rede foram baseadas em artigos já consolidados na literatura. A heurística dois teve embasamento no trabalho de Ranaweera (2015), em que era realizada a seleção de RRHs dependendo do custo de implantação das mesmas. Em seu trabalho, Ranaweera (2015) tinha o objetivo de conseguir o menor custo para a rede que conseguisse abranger 80% de cobertura do mapa. Os possíveis locais de implantação poderiam ser ou não pontos de fibra, se alguma célula fosse implantada onde não existisse ponto de fibra, seria necessário realizar a conexão em algum ponto existente, assim eram calculados os custos de cada estação base que precisasse ser implantada.

Este trabalho seguiu a mesma linha de raciocínio, como foi apresentado na seção 3.3, mas a cobertura foi feita em relação à posição de usuários e não em relação a uma área geográfica, sendo a cobertura de 100% e não 80%. O ponto de fibra inicial é o BBU *pool*, dessa forma só se tem um ponto de fibra inicial, diferenciando do trabalho de Ranaweera (2015) que possuía vários pontos iniciais espalhados pelo mapa, caracterizando redes distribuídas em vez de centralizadas.

A heurística relacionada com a vazão total dos usuários teve como base o trabalho de El-Beaino (2015), em que se retirava uma *small-cell* e se realizava o cálculo de SINR de todos os usuários com a retirada daquela célula. O algoritmo de número três seguiu, quase que em sua totalidade, a essência do trabalho de El-Beaino (2015), a diferença que pode ser apontada foi o uso de um modelo de propagação diferente da utilizada no trabalho que serviu como base, além da comparação com outras heurísticas, utilizando métricas que não foram utilizadas na pesquisa de El-Beaino (2015).

De uma forma geral, a comparação entre heurísticas diferentes, em cenários diversos e utilizando um modelo de propagação com grandes perdas, fez com que esta dissertação possuísse uma grande contribuição na comunidade científica, gerando resultados, mostrados no capítulo 7, relevantes.

5.2 C-RAN

No capítulo 4, através do trabalho de Jaber (2016), foram apresentadas as principais características e diferenças entre o modelo D-RAN e o modelo C-RAN, a partir dessas inferências foi possível perceber que o modelo centralizado possui mais características benéficas do que o distribuído, este fato deveria credenciar o C-RAN como o melhor modelo,

mas o custo de implantação é um motivo chave para que se continuem as pesquisas para decidir qual será ao melhor tecnologia, dentre as duas, a ser utilizada em redes futuras.

Em virtude da dúvida relacionada ao custo de implantação, Checko (2014) criou uma forma de comparar o TCO entre os dois tipos de arquitetura. Este trabalhou também apresentou os mesmos princípios explanados no trabalho de Checko (2014), tendo como exemplo a mesma forma utilizada (equação 9) com a utilização do valor de *CostFactor* variando de 1 a 15.

O primeiro incremento deste trabalho foi a utilização da distribuição de usuários e modelo de propagação para ser possível realizar a organização das células necessárias para a rede, o que não ocorre no trabalho de Checko (2014). A utilização da distância de táxi também foi um diferencial relacionado ao trabalho usado como base, que utiliza a distância euclidiana para conectar as fibras ao ponto central (BBU *pool*). Por ultimo foram utilizadas heurísticas para organizar as *small-cells* na rede, dessa forma os resultados podem ser considerados mais próximos da realidade, distorcendo de outros que são obtidos em ambientes ideais.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo buscou explicar sobre os incrementos e diferenças criadas em relação aos trabalhos utilizados como base. Foi possível perceber que diversos acréscimos foram feitos, caracterizando uma grande contribuição para a comunidade científica.

O próximo capítulo mostrará a organização dos cenários de simulação, assim como os resultados obtidos, tanto na utilização das técnicas apresentadas no capítulo 3 quanto na comparação entre D-RAN e C-RAN apresentada no capítulo 4.

6. ANÁLISE DE ALGORITMOS DE IMPLANTAÇÃO DE HETNETS DENSAS PARA DRAN E CRAN

No decorrer deste trabalho, foi mostrado as diversas características relacionadas às HetNets, dentre elas aquelas que são vantajosas e as que causam alguns prejuízos. Apesar de existir uma vasta economia quando se instala uma *small-cell* em detrimento a uma *macro-cell*, a grande densificação de pequenos rádios ligou o alerta em relação ao custo das redes heterogêneas densas. Por este motivo que, atualmente, os custos de implantação de HetNets são considerados elevados, além das diversas dificuldades físicas que norteiam a instalação de qualquer tipo de estação base. Esses aspectos podem fazer com que um projeto seja considerado inviável, principalmente no sentido monetário.

Nesse sentido, é fundamental investigar as abordagens existentes com o intuito de realizar um planejamento da melhor estratégia de implantação dentre os diversos cenários possíveis. Essas inferências, de possíveis cenários, via de regra são realizadas utilizando-se uma combinação entre prototipação e modelagem para avaliação de desempenho. Apesar de possuir, como vantagem, resultados bastante satisfatórios e próximos da realidade, a prototipação é muito custosa e foi considerada inviável para a realização dos testes que foram feitos e que serão apresentados adiante.

Em contrapartida, a modelagem é uma técnica com baixo custo e viável para a construção dos testes executados. Além de custo pequeno, as suas principais vantagens são a facilidade na troca de parâmetros e rapidez na obtenção de resultados. Diante deste fato, foram construídos cenários com diversos parâmetros, em que se buscou uma aproximação da realidade e também foram analisadas diversas métricas para a possível avaliação de desempenho das diversas técnicas de otimização de HetNets, assim como a comparação de seus custos de implantação nas arquiteturas C-RAN e D-RAN.

Assim como mencionado na seção 1.2, os resultados foram produzidos em abordagens separadas, primeiramente são analisadas as técnicas de otimização na implantação de HetNets apresentadas no capítulo 3 em que são analisadas as métricas: **número de RRHs implantadas, custo de implantação e vazão total da rede**. A segunda abordagem gira em torno da comparação entre C-RAN e D-RAN, extraíndo os resultados da primeira abordagem e utilização em conjunto com a equação 9 para a obtenção das soluções comparativas.

Nas próximas seções serão apresentados os parâmetros utilizados e os cenários montados para implantar, de forma otimizada, rádios de acesso que podem ser aplicados tanto para redes

4G como 5G, características essas que consequentemente servirão para a construção dos resultados da segunda abordagem.

6.1 PARÂMETROS UTILIZADOS

Diversos parâmetros precisaram ser definidos para a total modelagem dos cenários e assim ser possível a geração de resultados, a lista de parâmetros é mostrada a seguir:

- Área total do cenário.
- Número total de usuários.
- Organização dos usuários no cenário.
- Potência máxima de transmissão.
- Frequência utilizada para transmissão
- Quantidades de RRHs candidatas à implantação e sua distribuição
- Altura e raio de cobertura das RRHs.
- Valores dos parâmetros a, b e c do modelo SUI de acordo com o tipo de terreno utilizado.
- Valor do desvanecimento por sombreamento.
- Posição do BBU *pool* ou primeiro ponto de fibra.
- Quantidade de PRBs (*Physical Resource Blocks*) e largura de banda, para cada estação base.

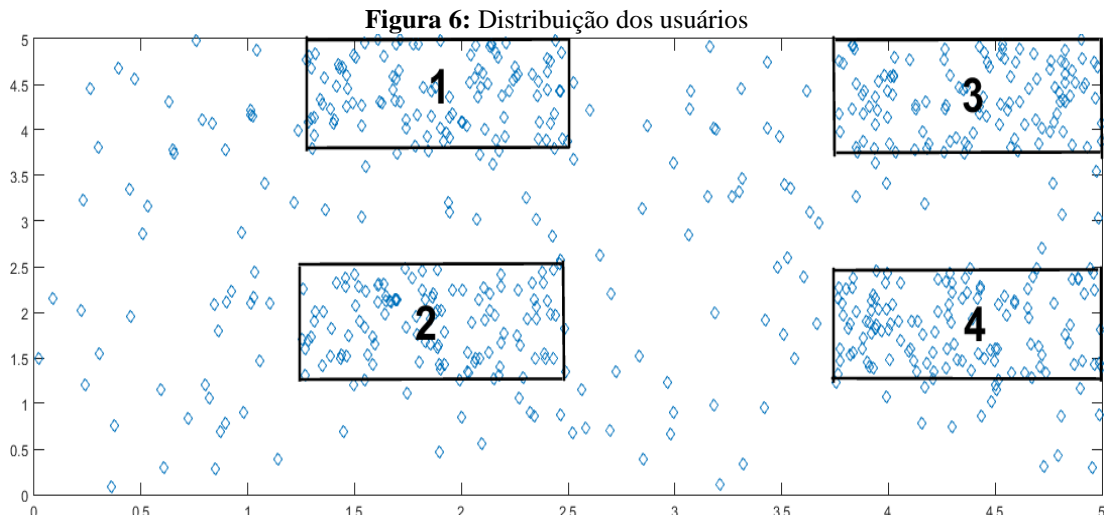
Começando pela área do cenário, foi utilizado um cenário quadrado de 5 quilômetros de lado, formando um total de 25km² de extensão, esses valores tiveram base no trabalho de El-beaino (2015) que utilizou o mesmo valor em suas simulações. O número total de usuários assim como a sua distribuição no cenário também teve inspiração no trabalho de El-Beaino (2015) em que é utilizado um total de 600 usuários distribuídos randomicamente pelo mapa e são concentrados 60 outros usuários em cada ponto específico, simulando áreas em que a aglomeração de UEs é grande, em que se tem como exemplo: estádios, shoppings, praças, etc. Em vista disso foram realizadas simulações com 300 e 600 usuários para verificar o impacto que o crescimento do número de UEs causa nos resultados finais, a distribuição desses equipamentos estão ilustradas na tabela 3.

Tabela 3: Distribuição dos usuários

Número do quadro	Intervalo do quadro	Porcentagem de usuários
Quadro 1	X1 = 1.25km até 2.5km Y1 = 3.75km até 5.0km	Aproximadamente 16.6%
Quadro 2	X2 = 1.25km até 2.5km Y2 = 1.25km até 2.5km	Aproximadamente 16.6%
Quadro 3	X3 = 3.75km até 5.0km Y3 = 3.75km até 5.0km	Aproximadamente 16.6%
Quadro 4	X4 = 3.75km até 5.0km Y4 = 1.25km até 2.5km	Aproximadamente 16.6%
Quadro 5	X5 = 0.0km até 5.0km Y5 = 0.0km até 5.0km	Aproximadamente 33.6%

A distribuição dos UEs foi feita em 5 quadros diferentes e os seus pontos no eixo X e Y podem ser visualizados na tabela 3, é possível perceber que as áreas de 1 a 4 são menores, possuindo 1,25km de lado, com o intuito de representar espaços com alto conglomerado de usuários. O quadro 5 tem a área total do cenário, assim 33.6% dos usuários podem estar em qualquer parte do mapa, inclusive dentro dos quadros de 1 a 4.

A figura 6 ilustra um exemplo de como ficou a distribuição dos usuários, os quadrados enumerados expõem os quadros em que existe a maior aglomeração de usuários, nesta imagem o exemplo apresentado contém no total 600 usuários, sendo 200 distribuídos em todo o mapa e na área de cada quadro foram distribuídos 100 usuários. A distribuição foi feita de forma randômica.



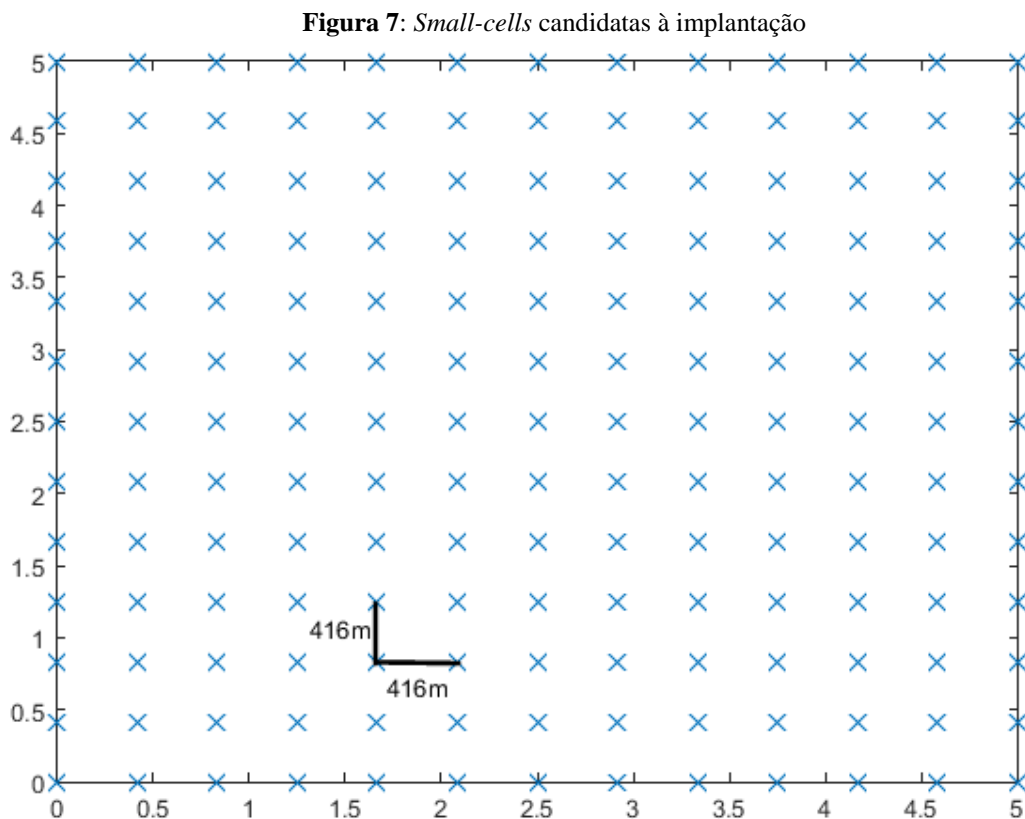
Para a escolha da potência máxima de transmissão, levou-se em consideração o trabalho de Fushiki (2014) que analisa o impacto gerado na rede com a mudança da potência da transmissão de *small-cells*, são usados valores característicos de antenas de baixa potência (20dBm e 30dBm) mas o valor escolhido para os cenários de simulação foi 20dBm para tentar evitar ao máximo a interferência entre células.

A escolha da frequência de transmissão também teve embasamento no trabalho de Fushiki (2014), com o valor de 3.5GHz caracterizando o uso de faixas de frequências maiores do que as utilizadas atualmente pelas redes LTE (em que são usadas faixas menores que 2GHz). O grupo IEEE 802.16 comenta que a utilização do modelo SUI com faixas de frequência maiores que 2GHz carece do fator de correção que será somado a equação de perda (equação 1) e que está representado na equação 10:

$$\Delta L_{bf} = 6 * \log \frac{f}{2000} \quad (10)$$

Em que f é a frequência utilizada em MHz, dessa forma o valor de f ficaria igual a 3500 MHz.

Para escolher a quantidade de RRHs candidatas a implantação, foi levado em consideração dois objetivos: conseguir cobrir todos os usuários e possuir um elevado número de células para garantir que se tenha diversas opções no momento da decisão de inserção de uma *small-cell*. A distribuição é feita de forma uniforme e a distância, no eixo X e Y, entre as células são de aproximadamente 416 metros, como mostra a figura 7.



O raio de cobertura utilizado foi de 400 metros, valor embasado no trabalho de Joyce (2015), tal medida foi utilizada para que os usuários pudessem estar dentro da cobertura de

várias células e assim se conectar na qual gerar a melhor vazão para o mesmo. Em relação à altura da RRH usou-se como parâmetro a altura de postes de luz, sendo uma forma de reutilização da base já existente para instalar a antena. A empresa ILUMITEL, que comercializa postes de luz, mostra em seu site que os tamanhos de seus produtos variam de 6 a 12 metros, é sabido também que a altura mínima da antena de transmissão para a utilização do modelo SUI é de 10 metros, por esse motivo o valor da altura da RRH foi setado em 10 metros.

O tipo de terreno utilizado foi o terreno C. Usando a altura da antena igual a 10 metros e calculando o coeficiente de perda através da equação 3, se obtém um valor aproximado de 5,5, que de acordo com Rappaport (2002) está perto da faixa de valor do coeficiente de perda de áreas urbanas com sombreamento (3.5 a 5) e está dentro da faixa de áreas *indoor* com obstáculos (4 a 6). O objetivo é simular em um cenário com grandes perdas, pois é o que ocorre em grandes cidades onde se tem diversos obstáculos que afetam a qualidade do sinal transmitido. Por fim, o valor de desvanecimento por sombreamento possui 9dB, seu valor foi escolhido por estar perto do termo central do intervalo de possíveis valores que vai de 8.2dB a 10.8dB de acordo com o grupo IEEE 802.16.

A posição do BBU *pool* ou do primeiro ponto de fibra foi escolhida sendo no centro do mapa que é simétrica pelo aspecto quadrático do cenário, este valor possui o embasamento no trabalho de Checko (2014). Por fim, o valor de largura de banda para cada PRB é o que está descrito no trabalho de Ku (2013), que é de 180KHz e a sua quantidade é igual a 100 PRBs para cada estação base. Este valor foi usado, pois o padrão para as redes 5G ainda está em estudo, assim usou-se o padrão de referencia do LTE. A tabela 4 resume todos os parâmetros utilizados e suas respectivas referências.

Tabela 4: Lista de parâmetros utilizados na modelagem

Parâmetro	Valor/Tipo	Referência
Área total do cenário	Quadrada com 5Km de lado	El-beaino (2015)
Número de UEs	300/600	El-beaino (2015)
Organização dos UEs	Randômica, em 5 quadros	El-beaino (2015)
Pmax	20dBm	Fushiki (2014)
Frequência	3.5GHz	Fushiki (2014)
Nº RRHs candidatas	169	Empírica
Distribuição das RRHs	Uniforme	El-beaino (2015)

Raio de cobertura	400 metros	Joyce (2015)
Altura da antena	10 metros	ILUMITEL (2017)
Tipo de Terreno	Tipo C	Rappaport (2002)
Sombreamento	9dB	IEEE 802.16 (2001)
BBU <i>pool</i> / Ponto de fibra	X = 2.5Km e Y = 2.5Km	Checko (2014)
Largura de banda (PRB)	180KHz	Ku (2015)
Quantidade de PRBS	100	Ku (2015)

6.2 ORGANIZAÇÃO DA OBTENÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados possuem dois aspectos diferentes e que não se associam, existem os que comparam as três técnicas do capítulo 3 e aqueles que contrapõem os modelos C-RAN e D-RAN. Em vista disso, nessa seção serão explanados de forma separada, mostrando as peculiares de cada um dos vieses. Alguns parâmetros adicionais serão explanados de acordo com a abordagem realizada, indicando as peculiaridades que cada análise contém.

6.2.1 Organização na comparação das técnicas de implantação

Os algoritmos apresentados no capítulo 3 foram executados 30 vezes em cenários com características iguais (parâmetros da tabela 4), esse número de iterações é necessário para que se tenha um espaço amostral considerável, garantindo que os resultados obtidos não sejam viciados. Em cada iteração as posições dos usuários foram modificadas. Serão comparados os resultados obtidos com a mesma quantidade de usuários (300 ou 600).

Na utilização da técnica exposta na seção 3.3, existem alguns parâmetros adicionais que estão relacionados com a equação do cálculo do custo total (equação 7). Os parâmetros são os custos, de implantação, unitários de *small-cell*, um metro de *trenching* e um metro de fibra ótica. Os valores utilizados provêm do trabalho de Farias (2016) e são apresentados na tabela 5.

Em relação às métricas analisadas, o cálculo da vazão total foi feito com a soma da vazão máxima de todos os usuários conectados a rede, o custo de implantação teve seu valor

extraído através da equação 7 e o número de RRHs foi obtido com o término da execução de cada técnica apresentada no capítulo 3.

Tabela 5: Parâmetros para o cálculo do custo da equação 7.

Parâmetro	Valor
Custo de <i>small-cell</i>	1600 (US\$)
Custo de fibra (m)	0.16(US\$)
Custo de <i>trenching</i> (m)	1300(US\$)

Fonte: Farias (2016).

É importante frisar que ao calcular o custo de implantação total, a *small-cell* mais custosa tem o seu valor calculado primeiro e se torna um ponto de fibra. Este ponto já possui o valor de *trenching* calculado até o centro (núcleo da rede) e na realização do cálculo da segunda célula em diante, o custo individual será feito para todas as posições (de fibra) possíveis e aquele com o menor valor será escolhido para determinar o custo individual daquela estação base.

6.2.2 Organização na comparação das arquiteturas C-RAN e D-RAN

O comparativo entre as duas arquiteturas será realizado em uma única iteração de cada uma das três técnicas. Como o objetivo é comparar o custo de implantação, serão escolhidas aquelas distribuições de usuários e, conseqüentemente, de células que foram mais custosas. O valor da variável *CostFactor* da equação 9 será variado de 1 a 15 e o impacto da diferença de preço entre BBU e quilômetro de fibra será analisado. O valor da capacidade de cada *small-cell* será de 200Mbps e o valor da vazão máxima (capacidade) de cada usuário será calculado pela equação de Shannon (equação 5), em que o valor de largura de banda dependerá da quantidade de PRBs alocado para aquele usuário, a alocação é feita de forma igualitária de acordo com o número de usuários conectados em cada célula.

O valor do TCO, nesta abordagem, será adimensional, pois não serão usados valores reais de custo, o objetivo é comparar a arquitetura menos custosa em termos de porcentagem.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os principais parâmetros utilizados para a montagem da modelagem, com o intuito de explicar os cenários que serão utilizados para a obtenção de

resultados. O processo será dividido em duas vertentes que foram mencionadas acima, seus resultados não possuem relação e as análises serão feitas de forma separada.

Os parâmetros utilizados possuem características de ambientes reais, e foram utilizados justamente para que os resultados fossem próximos de testes com simuladores. O capítulo seguinte irá mostrar os resultados e suas análises comparativas, apontando vantagens e desvantagens das diversas tecnologias abordadas.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

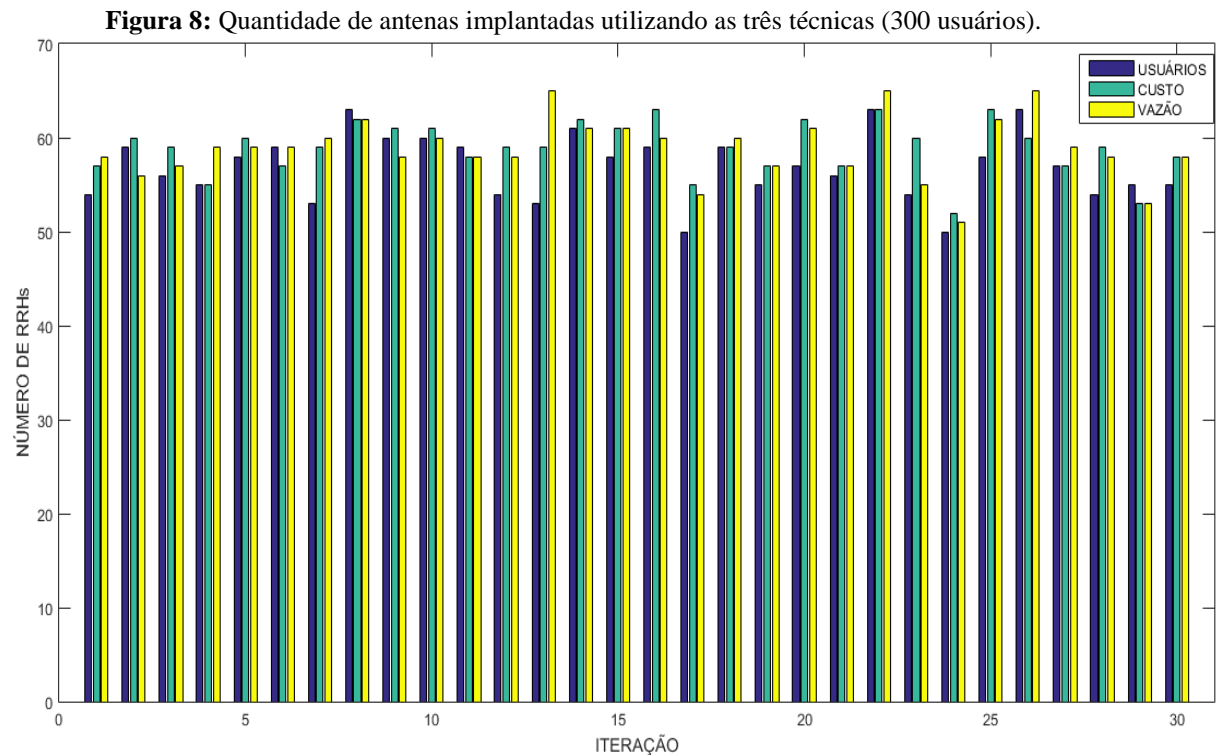
De acordo com o capítulo 6, a simulação é dividida em duas abordagens: Técnicas para organização de HetNets e comparação entre os modelos C-RAN/D-RAN. Em vista disso, primeiramente serão analisados os resultados referentes à HetNets e em seguida os que estão relacionados com as arquiteturas.

7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS SOBRE HETNETS

Os resultados serão divididos pelo número de usuários, assim serão feitas análises para 300 e 600 usuários separadamente.

7.1.1 Simulação com 300 usuários

Primeiramente será feita análise relacionada ao **número de RRHs implantadas**, a figura 8 mostra um gráfico de barras e compara a quantidade de RRHs implantadas em cada uma das 30 iterações, lembrando que o número de RRHs candidatas são 169.



A legenda na figura 8 denota qual cor está relacionado com a devida técnica, assim é possível perceber que o número de RRHs com a utilização da técnica relacionada com os usuários consegue o melhor resultado, tendo o número menor de RHHs na maioria das

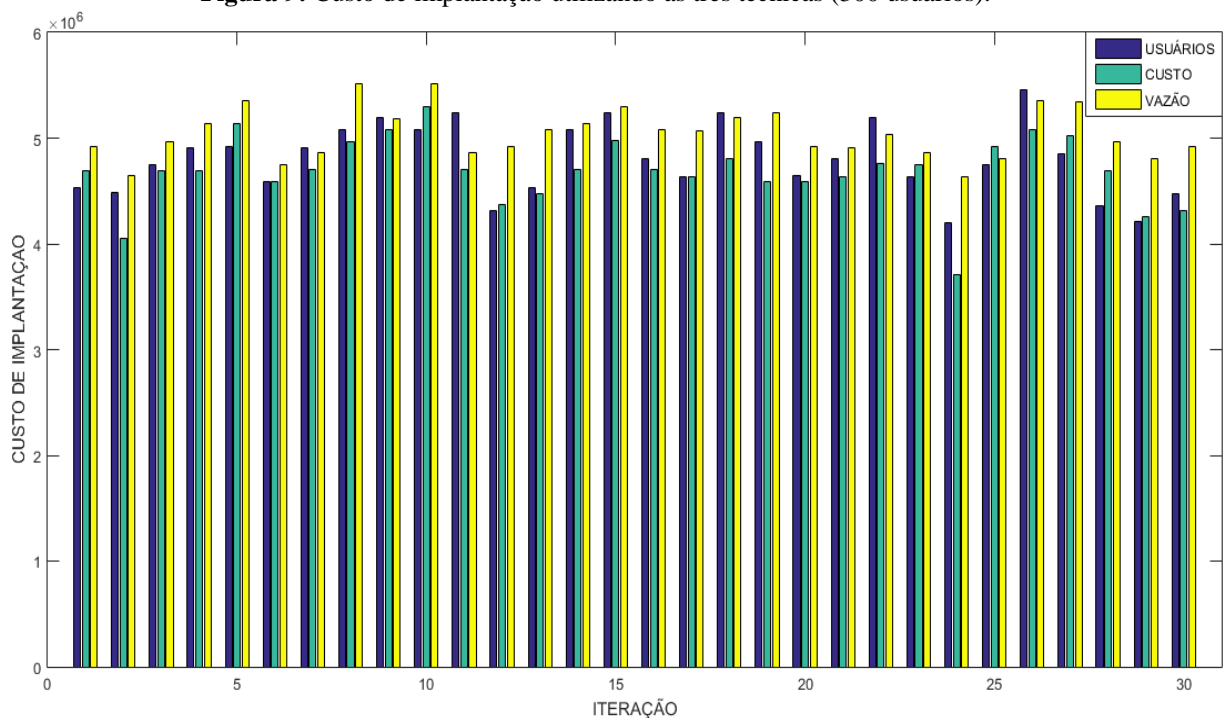
iterações, em, exatamente, 23 delas. Em valores percentuais tem-se aproximadamente 76% dos casos em que a técnica relacionada com os usuários é mais efetiva em diminuir o número de RRHs necessários para cobrir todos os usuários e garantir QoS.

É muito importante frisar que cada técnica conseguiu diminuir o quantitativo de módulos de rádio, a diminuição média foi de 112, 110 e 110 RRHs, respectivamente relacionadas com as técnicas de usuários, custo e vazão. Em porcentagem esses valores são de 66%, 65% e 65%, respectivamente. Dessa forma é possível perceber que apesar da primeira técnica (usuários) ser melhor na maioria dos casos, a diferença de desempenho entre as três, relacionadas com esta métrica, é bem pequena.

Apesar de pouca diferença, a melhor performance por parte da abordagem relacionada com os usuários pode ser explicada pelo fato de que, como apresentado na seção 3.2, as RRHs são alocadas em pontos com maior aglomeração de usuários e sendo o raio de cobertura relativamente alto, uma célula consegue abranger uma boa quantia de usuários e servi-los de forma satisfatória, diminuindo assim a necessidade de outras estações base.

A segunda métrica a ser analisa é o **custo de implantação**, a figura 9 ilustra os seus valores, em dólares, em cada iteração. A técnica que se destaca nesta métrica é a relacionada ao custo de implantação que obtém os melhores resultados em 20 das 30 iterações, um desempenho de 66,6%. A técnica relacionada com a vazão dos usuários não consegue obter o menor custo em nenhuma iteração, assim pode-se afirmar que se fosse utilizado esta técnica os custos seriam maiores.

Figura 9: Custo de implantação utilizando as três técnicas (300 usuários).

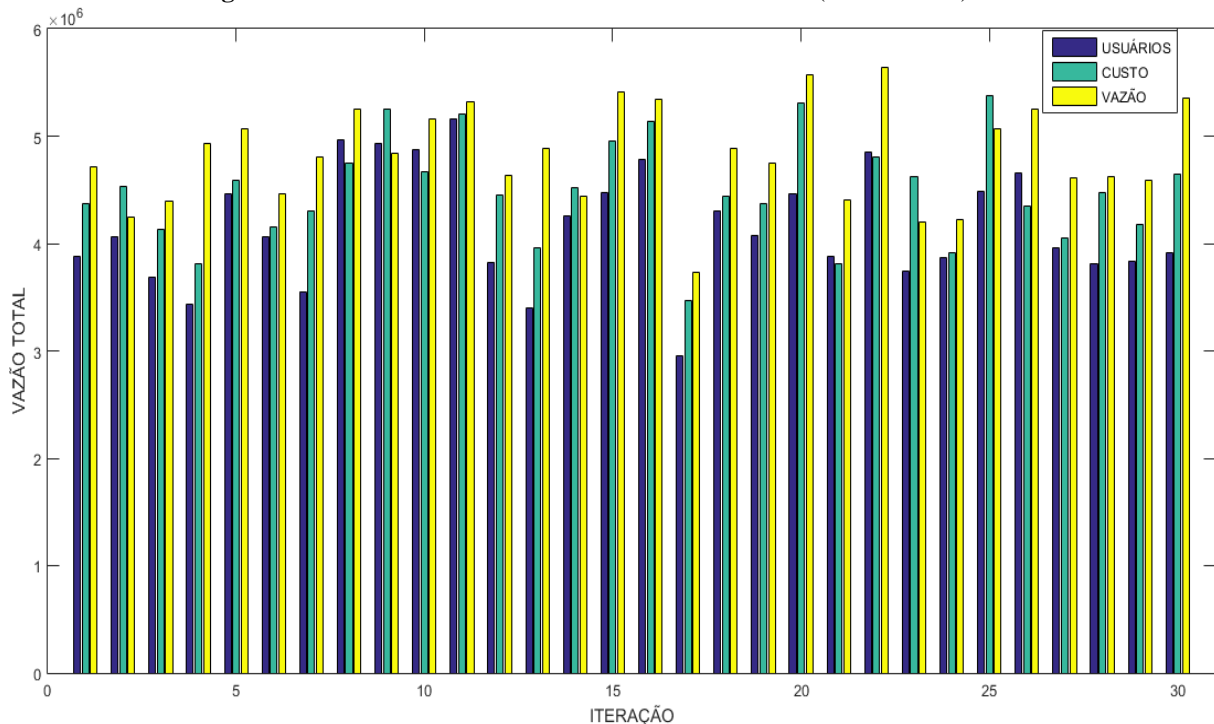


O custo médio de cada técnica é: 4,804, 4,696 e 4,999 milhões de dólares, respectivamente relacionadas às técnicas de usuários, custo e vazão. Diante dos resultados médios é possível perceber que a técnica de custo economiza um pouco mais de 2% de gastos se relacionada com a técnica de usuários e 6% se comparada com a técnica de vazão de usuários. São valores pequenos que só gerariam uma diferença plausível se a rede fosse bastante custosa e esses valores se mantivessem de forma proporcional.

O melhor desempenho por parte da segunda técnica pode ser explicada pelo melhor aproveitamento do *trenching* criado pelas primeiras células implantadas: as *small-cells* implantadas posteriormente aproveitam os pontos que já foram cavados, por isso possuem um custo de implantação bem reduzido (pois o *trenching* é a principal causa de custo elevado). Assim, apesar de, geralmente, possuir mais RRHs implantadas, a segunda técnica alcançou o menor custo de implantação na maioria das iterações.

A terceira métrica a ser analisada é a **vazão total** da rede a figura 10 mostra os resultados relacionados às três técnicas utilizadas. A terceira técnica, que tem como foco a organização da pilha de acordo com a vazão total da rede, possui o melhor desempenho em 25 das 30 iterações, o equivalente a 83% do total. É possível perceber que apesar de ser uma técnica que causa mais gastos, como foi visto anteriormente, consegue atender a demanda a que se propõe, potencializando a vazão total da rede na maioria dos casos.

Figura 10: Vazão total da rede utilizando as três técnicas (300 usuários).



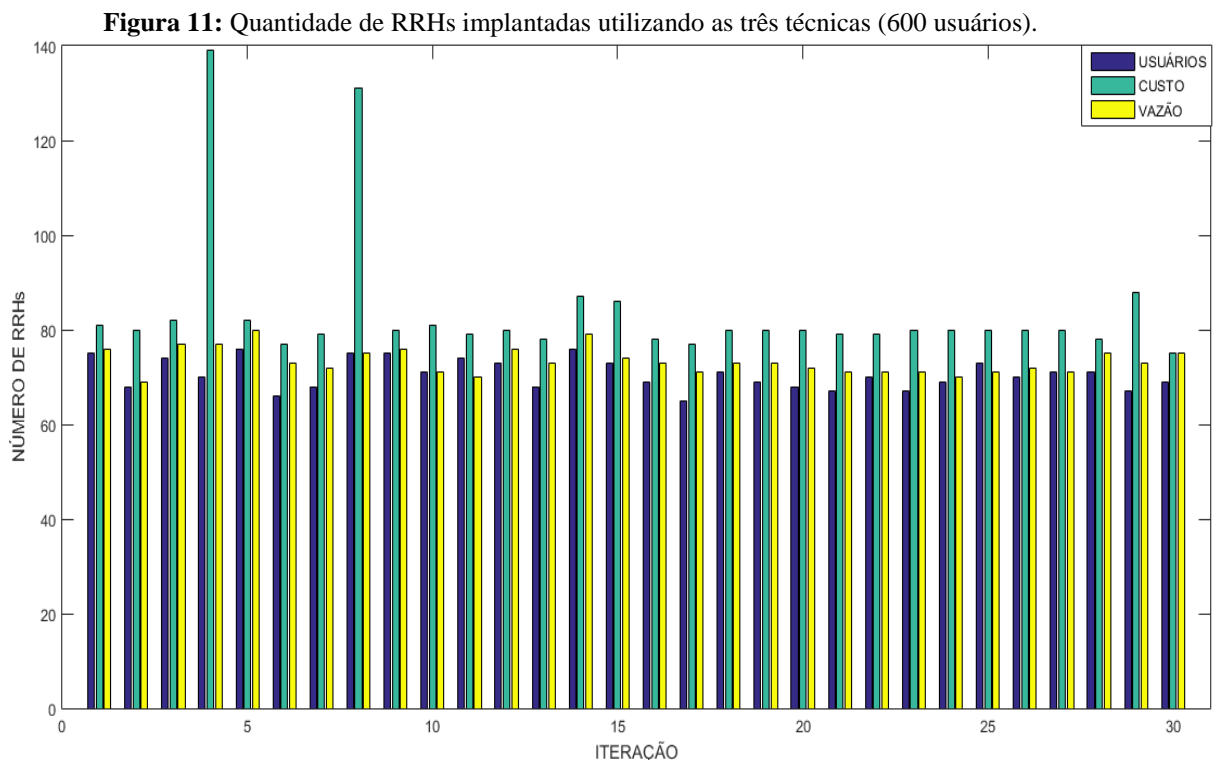
É importante frisar que a técnica baseada em usuários não alcançou o melhor desempenho em nenhuma iteração, este acontecimento pode ser esclarecido pelo fato apontado acima, de

que as RRHs são implantadas em locais onde existem muitos usuários e geralmente abrangem muitos deles, não necessitando de mais estações. Isso acarreta mais usuários em uma única estação base, o que reduz as vazões individuais e consequentemente a vazão total.

Os valores médios são: 4,0656, 4,4605 e 4,8174 Gbps respectivamente relacionados à primeira, segunda e terceira técnica. Com esses dados é possível realizar comparativos: a terceira técnica alcança 18% a mais de vazão que a primeira e 8% a mais que a segunda.

7.1.2 Simulação com 600 usuários

A análise da simulação com 600 usuários seguirá o mesmo roteiro da anterior (300 usuários) assim a primeira métrica a ser investigada é a **quantidade de RRHs implantadas** para atender os diversos usuários espalhados pelo mapa. A figura 11 mostra os resultados relacionados com essa métrica.



Através dos resultados é possível perceber que a primeira técnica obtém o melhor desempenho em 93,3% das iterações (28 de 30), comparado com as simulações realizadas usando 300 usuários, houve uma melhora, o que afirma o seu desempenho em redes maiores.

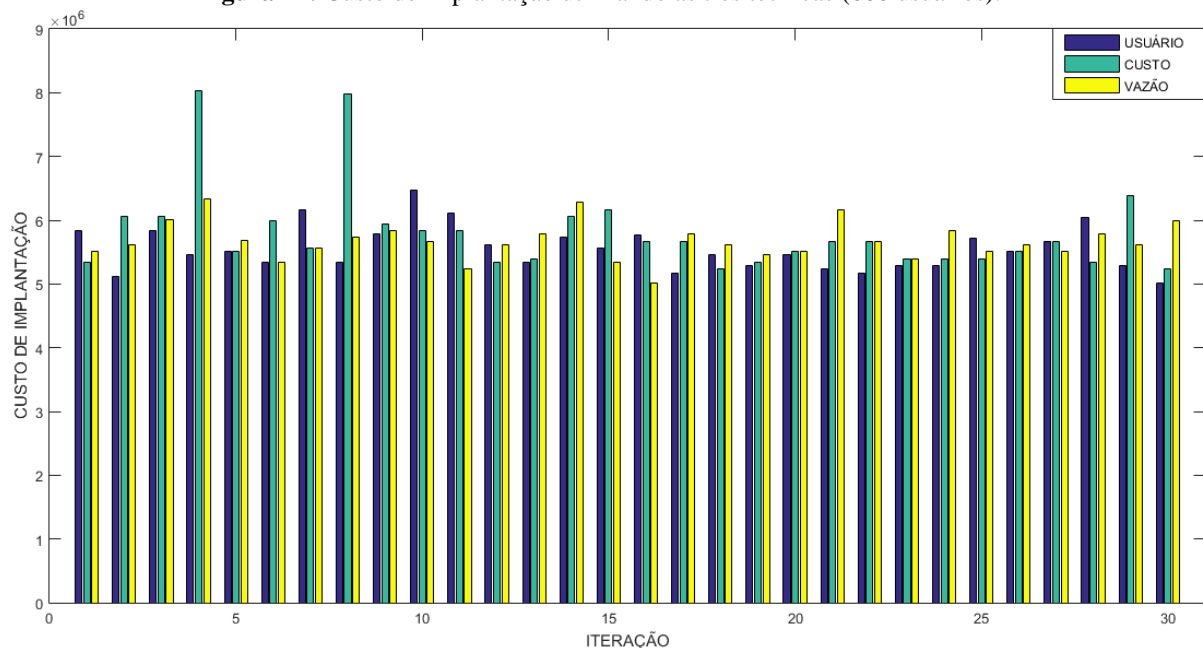
A segunda técnica obteve os piores resultados, mas, além disso, as iterações 4 e 8 chamaram a atenção por possuir valores muito altos em relação as outras duas técnicas, isso se deve ao fato da distribuição dos usuários ser muito esparsa dificultando um melhor desempenho por parte da técnica relacionada ao custo de implantação. Outra inferência que

pode ser obtida a partir deste resultado é o grande distanciamento desses dois valores em questão, ao intervalo de confiança obtido, que ficou entre 78,85 e 91,40 relacionado ao número de RRHs reduzida. Os valores obtidos pelas iterações 4 e 8 foram respectivamente 30 e 38 RRHs reduzidas, números bem distantes do intervalo, confirmando que especificamente nestes cenários, a técnica número 2 possui um desempenho muito aquém do esperado.

Levando em consideração a diminuição média de RRHs, os resultados foram: 99, 89 e 96 de RRHs excluídas relacionadas respectivamente com a primeira, segunda e terceira técnica. Esses números, em porcentagem, demonstram uma diminuição de 58%, 52% e 56%. Números não tão próximos como aconteceu nos resultados com 300 usuários, mas mostra a técnica número um sendo a melhor se o quesito for diminuir o número de RRHs necessárias para garantir o serviço a todos os UEs existentes.

A segunda métrica analisada é o **custo de implantação**. Seus resultados podem ser vistos na figura 12, a técnica relacionada ao custo de implantação não consegue repetir o mesmo desempenho obtido com 300 usuários, apenas 6 das 30 iterações possuem o menor valor de custo com a utilização desta técnica, ou seja, 20% das iterações. A técnica que consegue o maior desempenho é a primeira, sendo a melhor em 18 das 30 iterações, o equivalente a 60%.

Figura 12: Custo de implantação utilizando as três técnicas (600 usuários).



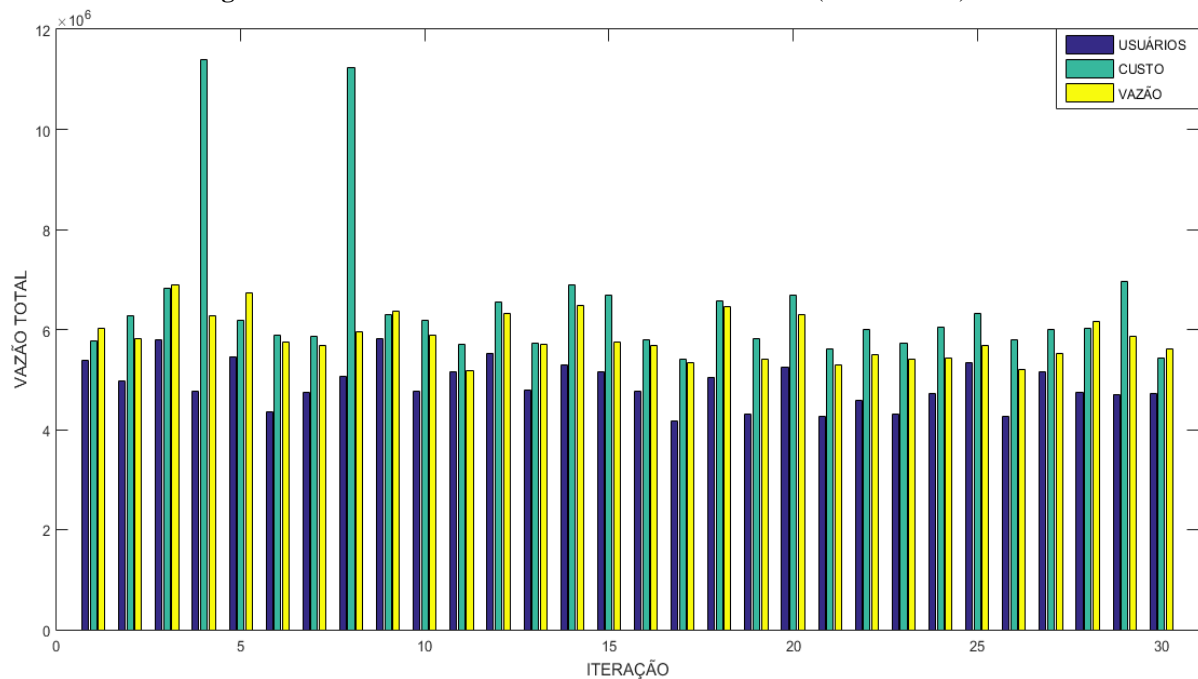
A queda de desempenho em relação à segunda técnica pode ser explicada pelo aumento do número médio de RRHs necessárias para servir todos os UEs, pois apesar de aproveitar de uma melhor forma o *trenching* (como mencionado na seção anterior) o seu desempenho não conseguiu repercutir no cenário com 600 usuários. Dessa forma pode-se concluir que em redes maiores esta técnica perde desempenho e não consegue cumprir a sua obrigação. O

custo médio ficou: 5,4795, 5,6688 e 5,6177 milhões de dólares, relacionados com as técnicas um, dois e três respectivamente. Em porcentagem, a técnica baseada nos usuários foi, em média, 4% mais barata que a segunda e 2,5% que a terceira.

E por fim foi medida a vazão total da rede, os valores estão ilustrados na figura 13. Como era de se esperar, devido ao grande número de RRHs implantadas, a segunda técnica obteve o melhor desempenho, obtendo sucesso em 24 das 30 iterações, 80% dos casos.

Os valores das vazões médias em Gbps foram: 4,7746, 6,0336 e 5,7505 relacionados à primeira, segunda e terceira técnica respectivamente. A diferença entre a segunda e a primeira técnica foi bastante alta, a segunda obteve aproximadamente 26,3% a mais de vazão do que a primeira, algo em torno de 1,23Gbps. Comparando a segunda técnica com a terceira, obteve-se um aumento de 4,9%, um pouco mais de 250Mbps.

Figura 13: Vazão total da rede utilizando as três técnicas (600 usuários).



7.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS SOBRE C-RAN E D-RAN

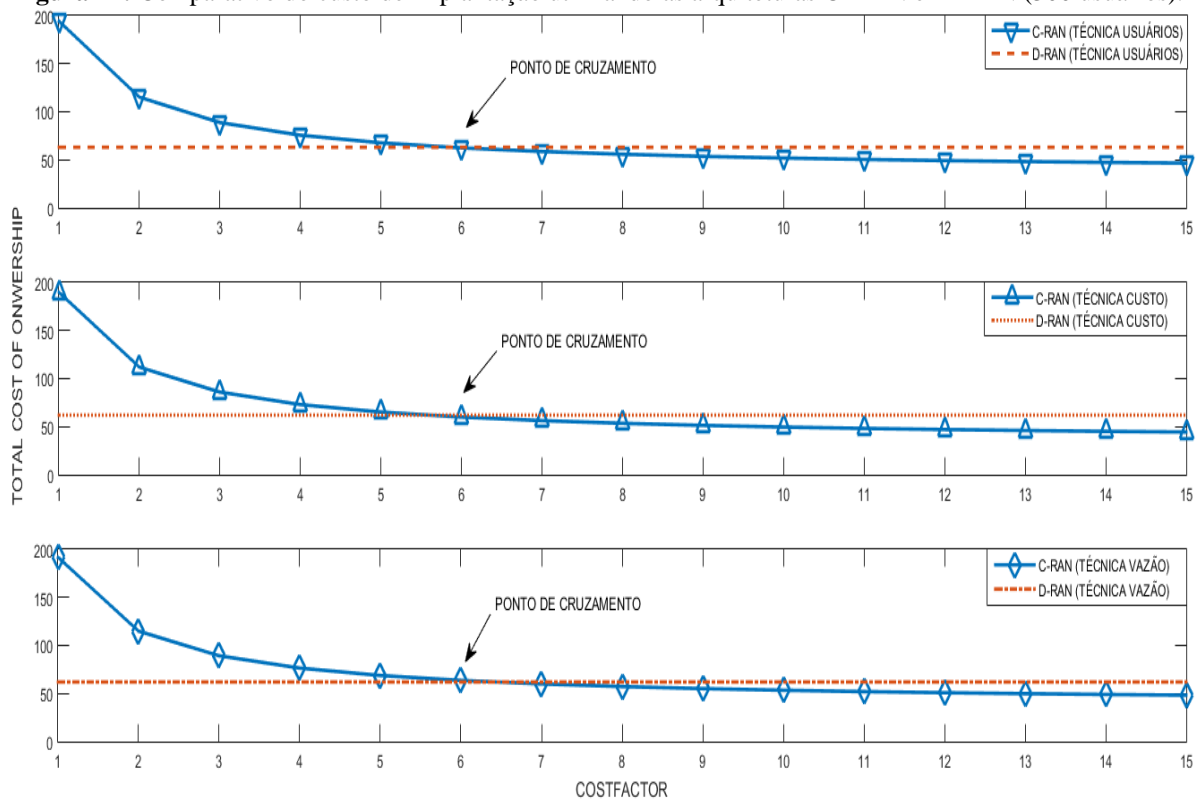
A comparação entre as duas arquiteturas também será feita com os resultados obtidos pelas 3 técnicas, utilizando 300 e 600 usuários. Precisou-se escolher uma das 30 iterações para assim então calcular os custos utilizando a equação 9. A oitava e a quarta iterações foram escolhidas para as simulações com 300 e 600 UEs respectivamente.

7.2.1 Análise com 300 usuários

A iteração 8 foi utilizada para servir como entrada no cálculo comparativo entre C-RAN e D-RAN. O valor do TCO para a arquitetura distribuída é igual ao número de RRHs, porque cada *small-cell* necessita de uma BBU para o processamento de suas informações e o *fronthaul* é feito por conexões sem fio. Utilizando a arquitetura D-RAN o número de BBUs necessário é 63, 62 e 62 respectivamente relacionadas com as técnicas um, dois e três. Na arquitetura C-RAN, os valores são, respectivamente, 36, 34 e 38 BBUs. Assim é possível perceber que houve uma diminuição de 43%, 46% e 39%. A técnica de vazão necessita de mais BBUs, pois é aquela que tem a maior demanda (vazão total da rede).

Todos esses valores explanados acima podem ser visualizados na figura 14. Em cada um dos três gráficos é possível perceber uma reta constante, que indica o valor de TCO utilizando a D-RAN e uma curva, mostrando o valor no uso da C-RAN.

Figura 14: Comparativo do custo de implantação utilizando as arquiteturas C-RAN e D-RAN (300 usuários).



A quantidade de fibra ótica necessária para a ligação das RRHs ao BBU *pool* tiveram valores próximos e foram, aproximadamente, iguais a 158,33Km, 155,83Km e 153,75Km. Utilizando o valor do *CostFactor* igual a 1 os valores de TCO para o C-RAN ficam iguais a 194,33, 189,83 e 191,75. Percebe-se então que quando o valor de 1km de fibra é igual ao valor de uma BBU, o custo de implantação de uma arquitetura C-RAN é quase o triplo do custo da arquitetura D-RAN, podendo tornar o projeto inviável monetariamente. Na medida

em que a variável *CostFactor* aumenta, tem-se uma diminuição no custo de implementação do C-RAN que ainda é considerado maior até a iteração 6 (*CostFactor* = 6), neste ponto se encontra o chamado ponto de cruzamento, que marca o início em que a arquitetura C-RAN se torna mais barata que a D-RAN.

É sabido que o modelo C-RAN possui diversos benefícios em relação ao D-RAN, tendo como principal desvantagem a grande diferença no custo de implantação. Em vista disso é possível afirmar que a partir do ponto de cruzamento a utilização do modelo C-RAN traz o maior custo/benefício. Estes resultados não são uma regra, pois nas iterações 4 e 5 é possível perceber que os valores entre as duas arquiteturas estão bem próximos, levando isso em consideração e dependendo do capital disponível é possível a implementação da C-RAN também nesses casos.

7.2.2 Análise com 600 usuários

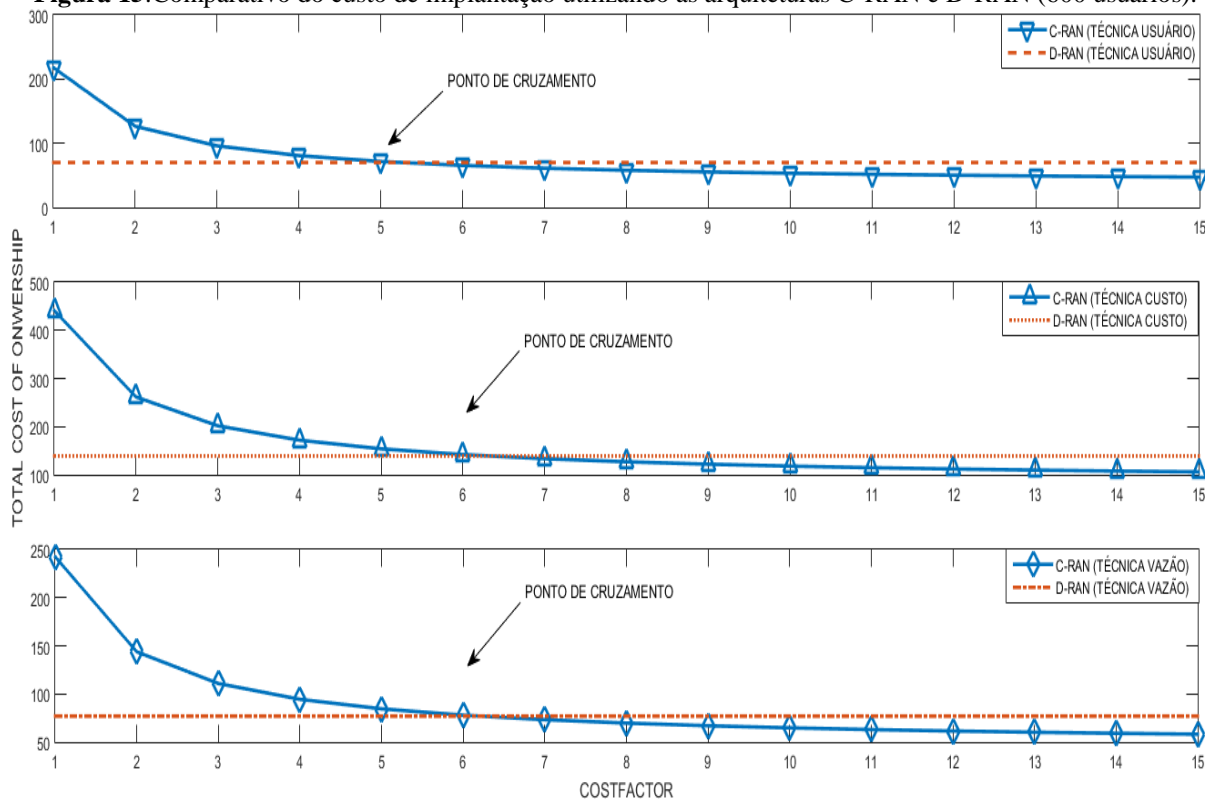
A iteração 4 das simulações feitas com 600 usuários foi a escolhida para se comparar as arquiteturas C-RAN e D-RAN. A análise feita é parecida com o que foi explicado acima, em vista disso o valor de custo para a arquitetura D-RAN das técnicas um, dois e três respectivamente são: 70, 139 e 77. O alto valor relacionado com a técnica baseada no custo é resultado da necessidade de 139 RRHs para servir os 600 usuários espalhados no mapa. Igualmente aos resultados apresentados na seção 7.2.1, o ponto de cruzamento acontece com o valor de *CostFactor* igual a 6 utilizando as técnicas 2 e 3, diferente do que acontece com a técnica baseada nos usuários, em que o seu ponto de cruzamento acontece na iteração 5, esses dados podem ser enxergados na figura 15.

Esta diferença no resultado em relação à primeira técnica pode ser explicada pelo baixo número de RRHs e consequentemente de vazão total da rede, o que diminui o número de BBUs necessárias com a utilização de C-RAN. Em relação a esses valores, o número de BBUs necessárias para a técnica de usuários é 35, para a técnica relacionada ao custo é 82 e relativa à técnica de vazão é 45, uma diminuição de 50%, 41% e 41,5% do número de BBUs. Em contrapartida, o comprimento de fibra necessário para interligar as RRHs de cada técnica ao centro (BBU *pool*) são: 182,91Km (técnica usuário), 359,16Km (técnica custo) e 197,5Km (técnica vazão).

Os custos com o valor do *CostFactor* igual a um segue a mesma linha da simulação realizada com 300 usuários: é quase o triplo do valor obtido pelo modelo D-RAN. Após os

respectivos pontos de cruzamento, a C-RAN se torna menos custosa e viável para ser aplicada.

Figura 15: Comparativo do custo de implantação utilizando as arquiteturas C-RAN e D-RAN (600 usuários).



8. CONCLUSÃO

A tecnologia móvel está em constante evolução, cada vez mais os usuários e seus respectivos dispositivos requerem maior capacidade da rede, relacionada a diversos parâmetros de QoS e QoE. Diversas tecnologias estão surgindo com o objetivo de alcançar tais requerimentos. De acordo com a literatura, a utilização de HetNets e C-RAN são os carros-chefes para a melhoria da rede e quando utilizadas em conjunto o resultado final é otimizado.

É sabido que a utilização de HetNets aumenta a capacidade da rede principalmente quando ocorre a massiva densificação de pequenas estações base. O uso de *small-cells* melhora a relação sinal ruído da transmissão, pois aproxima os usuários de suas fontes de sinal. O reuso de frequência é amplificado e o motivo está ligado ao grande número de pequenas células implantadas.

A principal desvantagem na utilização de redes densas é a gerência de interferência entre as células. Em UDNs esse problema é mais grave devido ao alto número de nós (*small-cells*) que a rede possui. Assim é necessário saber o melhor posicionamento das RRHs para que a relação custo/benefício seja a maior possível

A arquitetura C-RAN está intimamente ligada ao gerenciamento da rede como um todo. Sua utilização pode gerar diversos benefícios justamente por possuir a gerência centralizada. Aumento da capacidade da rede, melhoria no reuso de frequência, economia de energia e melhor distribuição de recursos são alguns dos benefícios gerados por esse tipo de arquitetura. Seu custo é a principal desvantagem, devido ao *fronthaul* requerer bastante capacidade de transmissão. Assim a conexão geralmente é feita de forma cabeada e com fibra ótica, encarecendo o custo total de implantação da rede.

Devido às diversas interrogações apresentadas acima, este trabalho procurou mostrar tanto o impacto causado nas diferentes formas de se implantar redes heterogêneas quanto mostrar um comparativo relacionado ao custo de implantação entre as arquiteturas C-RAN e D-RAN. A principal motivação esta voltada em mostrar para comunidade científica e até mesmo para empresas em quais situações é preferível utilizar alguma das tecnologias apresentadas.

Os resultados apresentam dados comparativos que mostram quais tecnologias são melhores, dependendo do parâmetro e cenário escolhido. Na primeira abordagem, a variação do número de usuários é fator determinante para mostrar que a técnica número 2 não consegue cumprir o seu papel em grandes redes, da mesma forma que ocorreu na simulação com 300 usuários. Em relação ao parâmetro: número de RRHs implantadas, a técnica número

um consegue cumprir o seu papel em ambos os cenários (300 e 600 usuários), assim é considerada forte candidata quando não se tem um grande número de estações base disponível. Os resultados relacionados ao parâmetro vazão total da rede mostraram que a técnica número 3 consegue o melhor desempenho apenas com 300 usuários, e com 600 o melhor desempenho fica com a técnica número 2, mas é válido lembrar que a técnica número dois também possui um maior custo, dessa forma seria necessário saber o quanto é possível gastar e assim escolher a forma mais adequada para a implantação da rede.

Os resultados da segunda abordagem mostraram que a arquitetura C-RAN se torna viável monetariamente quando o custo de uma BBU é pelo menos 6 vezes maior que o custo de 1 quilômetro de fibra. Este fato só se tornou diferente com a utilização dos resultados da técnica baseada nos usuários com 600 usuários, foi possível perceber que este fator diminuiu, assim o preço da BBU precisaria ser apenas 5 vezes maior. Com esses resultados foi possível constatar o alto custo necessário para a implantação de C-RAN, servindo para ratificar o que a comunidade científica mostra sobre o assunto.

Os resultados foram considerados satisfatórios, no quesito de que apresenta ao leitor uma noção do que pode ocorrer quando o assunto estiver voltado para a implantação de redes da nova geração 5G. Mas muito ainda precisa ser estudado, para garantir resultados mais precisos e mais próximos da realidade.

8.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições ocasionadas por este trabalho serão listadas a seguir:

- Realização de uma pesquisa relacionada às futuras redes de tecnologia móvel, mostrando suas características, vantagens e desafios junto com uma boa revisão bibliográfica dos trabalhos mais atuais relacionados ao tema.
- Realização do comparativo entre diversas técnicas de implantação de HetNets.
- Criação de algoritmos capazes de organizar redes heterogêneas, considerando diversos tipos de abordagens.
- Comparação do custo de implantação entre arquiteturas de redes centralizada e distribuída.
- Uso de um modelo de propagação próximo da realidade, que simula perdas tanto em áreas urbanas como em rurais. Além da construção de cenários capazes de

reproduzir um conglomerado urbano, utilizando dados que possuem referência na comunidade científica, o que valida os resultados obtidos.

- Através dos resultados foi possível mostrar em qual ocasião cada uma das tecnologias utilizadas era mais eficiente, relacionadas tanto com a primeira abordagem quanto com a segunda.
- A divulgação de trabalho apresentando em conferência internacional, publicado no segundo semestre de 2016:
 - ARAUJO, W.V; CARDOSO, D. L. **Custo de Implantação de Redes do Futuro**. 14^a Conferência Ibero Americana WWW/Internet, Lisboa, Portugal.

8.2 TRABALHOS FUTUROS

Para expandir os resultados apresentados neste trabalho é possível realizar diversas modificações e evoluções, tais como:

- Estudar novas formas de implantação de HetNets, que se baseiem em outro tipo de parâmetro ou com o mesmo embasamento apresentado neste trabalho, mas com algoritmos diferentes.
- Pesquisar sobre como diminuir o custo da arquitetura centralizada, visto que essa é a sua principal desvantagem.
- Aumentar o cenário, tanto em extensão quanto na questão da densificação de usuários.
- Trabalhar além da modelagem analítica, a simulação com algum programa (simulador) confiável.

8.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS

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

- Dificuldade para modelar cenários da tecnologia 5G, por ser algo que ainda está em construção e não possui uma padronização definida.
- Dificuldade para entender diversos conceitos que ainda são novos e não possuem muito detalhamento, por estarem em fase de pesquisa.

- Desafios na criação dos algoritmos, pois é necessário lidar com diversos vetores que representam os usuários, pontos de fibra e *small-cells*, além da necessidade de criar a peculiaridade de cada técnica utilizada.
- Grande quantidade de simulações, que exigiram bastante tempo e poder computacional.

8.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mundo está voltado no estabelecimento de tecnologias para alcançar o padrão da quinta geração de redes móveis. Muitos trabalhos já possuem resultados sólidos e validados, mas muito ainda precisa ser feito. Este trabalho obteve resultados satisfatórios que poderão servir tanto para análise como de modelo para aplicação de novas pesquisas. No futuro, pretende-se levar essa pesquisa a um nível mais profundo e conseguir resultados ainda mais relevantes.

REFERÊNCIAS.

Bartelt J, Fettweis G. **Radio-Over-Radio: I/Q-Stream Backhauling for Cloud-Based Networks via Millimeter Wave Links**. IEEE Globecom Workshops, 2013.

Bhushan N, Li J, Malladi D, Gilmore R, Brenner D, Damnjanovic A, Sukhavasi R, Patel C, Geirhofer S. **Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5g**. IEEE Communications Magazine, vol. 52, pp. 82–89, 2014.

Bojic D, Sasaki E, Cvijetic N, Wang T, Kuno J, Lessmann J, Schmid S, Ishii H, Nakamura S. **Advanced wireless and optical technologies for small-cell mobile backhaul with dynamic software-defined management**. IEEE Communications Magazine, vol. 51, pp. 86 – 93, 2013.

Bristin R, Paul A. 1985. **Taxicab trigonometry**, Pi Mu Epsilon Journal, vol. 8 pp.89-95, 1985.

Chandrasekhar V, Andrews J G, Gatherer A. **Femtocell Networks: A Survey**. IEEE Communications Magazine, vol. 46, pp. 59–67, 2008.

Checko A, Holm H, Christiansen H. **Optimizing small cell deployment by the use of C-RANs**. IEEE Proceedings of European Wireless, 2014.

Cisco VNI Forecast. **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015–2020**, 2016.

Damnjanovic A, Montojo J, Wei Y, Ji T, Luo T, Vajapeyam M, Yoo T, Song O Malladi D. **A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks**. IEEE Wireless Communications, vol. 18, 2011.

EI-Beaino W, EI-Hajj A M, Dawy Z. **On Radio Network Planning for Next Generation 5G Networks: A Case Study**. IEEE Communications, Signal Processing, and their Applications, 2015.

Elsawy H, Hossain E. **HetNets with Cognitive Small Cells: User Offloading and Distributed Channel Access Techniques**, IEEE Communications Magazine, vol. 51, pp. 28-36, 2013.

Ericsson White Paper. **5G Radio Access**, 2016.

Farah R, Asif R, Khaizuran A. **Advanced Inter-cell Interference Management Technologies in 5G Wireless Heterogeneous Networks (HetNets)**. IEEE Student Conference on Research and Development, 2016.

Farhang-Boroujeny B, Yuen C H. **Cosine Modulated and Offset QAM Filter Bank Multicarrier Techniques: A Continuous-Time Prospect**. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010.

Farias F S. **Designing Cost-efficient-transport Solutions for Fixed and Mobile Broadband Access Network**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) – UFPA, Tese Doutorado, 2016.

Felita C, Suryanegara M. **5G Key Technologies: Identifying Innovation Opportunity**. IEEE QiR. 2013.

Fushiki M, Akimoto Y, Konishi S. **Analysis on the Effect of Transmission Power Applied to Small Cells in LTE-Advanced Downlink**. IEEE Intelligent Signal Processing and Communications Systems, 2013.

Gupta K, Jha R K. **A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies**. IEEE Access, vol. 3, pp. 1206 – 1232, 2015

.

Hong X, Wang J, Wang C-X, and Shi J. **Cognitive Radio in 5G: A Perspective on Energy-Spectral Efficiency Trade-off**. IEEE Communications Magazine. vol. 52, pp. 46-53, 2014.

IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. **Channel Models for Fixed Wireless Applications**. IEEE Call for Contributions, 2001.

ILUMITEL, **Postes e Decorações**. Disponível em: <http://www.postesdecorativos.com.br/>. Acesso em: 10 de jan. 2017.

Jaber M, Owens D, AliImran M, Tafazolli R, Tukmanov A. **A Joint Backhaul and RAN Perspective on the Benefits of Centralised RAN Functions**. IEEE Communications Workshops (ICC), 2016.

Joyce R, Zhang L. **Locating Small Cells Using Geo-located UE Measurement Reports & RF Fingerprinting**. IEEE Mobile and Wireless Networking Symposium, 2015.

Kamel M, Hamouda W, Youssef A. **Ultra-Dense Networks: A Survey**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, pp. 2522 – 2545, 2016.

Ku G, Walsh J M. **Resource Allocation and Link Adaptation in LTE and LTE Advanced: A Tutorial**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, pp. 1605 – 1633, 2015.

Larsson E G, Edfors O, Tufvesson F, Marzetta T L. **Massive MIMO for next generation wireless systems**. IEEE Communications Magazine, vol. 52, pp. 186-195, 2014.

Liu Y, Chen X, Zhong Z, Ai B, Miao D, Zhao Z, Sun J, Teng Y, Guan H. **Waveform Candidates for 5G Networks: Analysis and Comparison**. ARXIV, 2016.

López-Pérez D, Ding M, Claussen H, Jafari A H. **Towards 1 Gbps/UE in Cellular Systems: Understanding Ultra-Dense Small Cell Deployments**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, pp. 2078 – 2101, 2015.

Nokia Corporation. **Ultra Dense Network (UDN) White Paper**. 2016.

Osseiran A, Boccardi F, Braun V, Kusume K, Marsch P, Maternia M, Queseth O, Schellmann M, Schotten H, Taoka H, Tullberg H, Uusitalo M A, Timus B, Fallgren M. **Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project**. IEEE Communications Magazine, vol. 52, pp. 26 – 35, 2014.

Panwar N, Sharma S, Singh K A. **A Survey on 5G: The Next Generation of Mobile Communication**. Elsevier Physical Communication, 2015.

Peng H, Xiao Y, Ruyue Y-N, Yifei Y. **Ultra-Dense Network: Challenges, Enabling Technologies and New Trends**. IEEE China Communications Vol. 13, pp. 67-79, 2016.

Peng M, Li Y, Zhao Z, Wang C. **System Architecture and Key Technologies for 5G Heterogeneous Cloud Radio Access Networks**. IEEE Network, vol. 29, pp. 6 – 14, 2015.

Ranaweera C, Lim C, Nirmalathas A. **Cost-Optimal Placement and Backhauling of Small-Cell Networks**. Journal of Lightwave Technology, vol. 33, pp. 3850-3857, 2015.

Rappaport T S. **Wireless Communications, Principles and Practice**. Prentice Hall, PTR, 2002.

Rost P, Bernados C J, Girolamo M D, Wubben D. **Cloud Technologies for Flexible 5G Radio Access Networks**. IEEE Communications Magazine, vol. 52, pp. 68-76, 2014.

Sulyman A I, Alwarafy A, MacCartney G R, Rappaport T S, Alsanie A. **Directional Radio Propagation Path Loss Models for Millimeter-Wave Wireless Networks in the 28-, 60-, and 73-GHz Bands**. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, pp. 6939 – 6947, 2016.

Wang C-X, Haider F, Gao X, You X-H, Yang Y, Yuan D, Aggoune H, Haas H, Fletcher S, Hepsaydir E. **Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks**. IEEE Communications Magazine, vol. 52, pp. 122-130, 2013.

Wang R, Hu H, Yang X. **Potentials and Challenges of C-RAN Supporting Multi-RATs Toward 5G Mobile Networks**. IEEE Access, vol. 2, pp. 1187- 1195, 2014.

Yang C, Li J, Sheng M, Liu Q. **Green heterogeneous networks: a cognitive radio idea**. IET Communications, vol. 6, pp. 1952 – 1959, 2012.