

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

**MAPEAMENTO OTIMIZADO ENTRE
RRH-BBU VISANDO O BALANCEAMENTO
DE CARGA EM ARQUITETURA C-RAN
UTILIZANDO INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL**

ERMÍNIO AUGUSTO RAMOS DA PAIXÃO

DM 42/2018

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

2018

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

ERMÍNIO AUGUSTO RAMOS DA PAIXÃO

**MAPEAMENTO OTIMIZADO ENTRE
RRH-BBU VISANDO O BALANCEAMENTO
DE CARGA EM ARQUITETURA C-RAN
UTILIZANDO INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL**

DM 42/2018

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

2018

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

ERMÍNIO AUGUSTO RAMOS DA PAIXÃO

**MAPEAMENTO OTIMIZADO ENTRE RRH-BBU
VISANDO O BALANCEAMENTO DE CARGA EM
ARQUITETURA C-RAN UTILIZANDO INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL**

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

Orientador: Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso

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

2018

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

P142m PAIXÃO, ERMÍNIO.
MAPEAMENTO OTIMIZADO ENTRE RRH-BBU VISANDO O BALANCEAMENTO DE CARGA
EM ARQUITETURA C-RAN UTILIZANDO INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL / ERMÍNIO
PAIXÃO. — 2018.
53 f. : il.

Orientador(a): Prof. Dr. DIEGO CARDOSO
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia,
Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

1. C-RAN. 2. RRH. 3. BBU. 4. KPI. 5. QoS. I. Título.

CDD 006.3

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

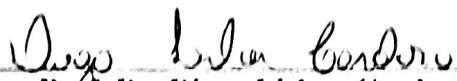
**"MAPEAMENTO OTIMIZADO ENTRE RH-BBU VISANDO O
BALANCEAMENTO DE CARGA EM ARQUITETURA C-RAN UTILIZANDO
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL"**

AUTOR: ERMÍNIO AUGUSTO RAMOS DA PAIXÃO

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

APROVADA EM: 20/12/2018

BANCA EXAMINADORA:



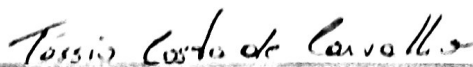
Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso

(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Tássio Costa de Carvalho

(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)

VISTO:



Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes

(Coordenadora do PPGEE/TEC/UFPA)

Este trabalho é dedicado à todos que buscam ser melhor que si mesmo todos os dias.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido a oportunidade de alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Antônio Pádua e Francinelma Ramos que sempre me incentivaram em alcançar o melhor de mim.

Aos meus avós, Raimundo Zacarias, Hildete Lemos e Leda Nunes, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu irmão, Antônio Hermes que sempre me aconselhou e me manteve no caminho certo.

À minha namorada, Cláudia Nogueira que está sempre ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus padrinhos, madrinhas e toda minha família que direta ou indiretamente me ajudaram a alcançar mais um passo na minha formação acadêmica.

Aos meus amigos que sempre almejam meu melhor e me acompanharam em mais essa conquista.

Aos meus amigos do Laboratório de Pesquisa Operacional (LPO), que sempre estiveram prontos para ajudar em qualquer circunstância.

Ao meu orientador, Diego Lisboa Cardoso, que tem seus méritos desde a instrução para a escolha da minha pesquisa e o comprometimento para me guiar até a conclusão.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsa para a realização desta pesquisa.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), pela oportunidade a mim ofertada para a realização desta dissertação.

"Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, com que se sintam humildes."
(Leonardo da Vinci)

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos Gerais	3
1.2	Descrição da Dissertação	3
2	Referencial Teórico	5
2.1	Considerações iniciais	5
2.2	Evolução das Redes Móveis	5
2.2.1	Primeiras Gerações das Redes Móveis (1G,2G,3G)	5
2.2.2	Quarta geração de redes móveis (4G)	6
2.2.3	Quinta geração de redes móveis (5G)	6
2.3	C-RAN	8
2.4	SDN	9
2.5	Network Function Virtualization (NFV)	9
2.5.1	Otimização Combinatória	10
2.6	NS3	11
2.7	Considerações finais	12
3	Trabalhos Correlatos	13
3.1	Considerações iniciais	13
3.2	Trabalhos Correlatos	13
3.3	Considerações finais	16
4	Formulação do Problema	17
4.1	Considerações Iniciais	17
4.2	Inteligência Computacional	17
4.2.1	Metaheurística	17
4.2.2	Particle Swarm Optimization (PSO)	17
4.3	RRH-BBU - modelagem	19
4.3.1	RRH-BBU - simulação	20
4.4	Considerações finais	22
5	Resultados	23
5.1	Considerações iniciais	23
5.2	Resultados da Modelagem	23
5.2.1	Resultados da Simulação no NS3	26
5.3	Considerações finais	29

6	Conclusões	30
6.1	Contribuições do Trabalho	30
6.2	Trabalhos Futuros	31
6.3	Dificuldades Encontradas	31
	Referências	32

Lista de ilustrações

Figura 1	Dispositivos e trafego [1]	1
Figura 2	Arquitetura de Rede Celular Geral 5G [20]	7
Figura 3	Arquitetura C-RAN	8
Figura 4	Ilustração do framework NFV [24]	10
Figura 5	Processo de execução do PSO	18
Figura 6	Fluxograma de novo pacote	22
Figura 7	Fluxograma de alocação do usuário	22
Figura 8	Número de Usuário por setor/BBU	24
Figura 9	19 RRHs gerenciadas pro duas BBUs dentro de uma BBU <i>pool</i> , cada BBU lida com 3 setores cada.	25
Figura 10	Métricas de QoS	27
Figura 11	Usuários Atendidos	28
Figura 12	Métricas de QoS	29

Lista de tabelas

Tabela 1	Características dos principais trabalhos correlatos	16
Tabela 2	Parâmetros do PSO	19
Tabela 3	Parâmetros Simulação	21
Tabela 4	Número médio de usuários	26
Tabela 5	Ocupação das BBUs / Pacotes Perdidos	27

Lista de abreviaturas e siglas

AMTS	Advanced Mobile Telephone System
AG	Algoritmo Genético
BBUs	Baseband Units
CAPEX	Capital Expenditure
CDI	Cell differentiation and integration
C-RAN	Cloud Radio Access Network
CDMA	Code Division Multiple Access
CPRI	Common public radio interface
DPSO	Discrete particle swarm Optimization
DPS	Dynamic Point selection
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EB	Exabytes
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GPRS	General Packed Radio Service
5G	Quinta Geração de Redes Móveis
GSM	Global System for Mobile Communication
GBR	Guaranteed Bit Rate
HC	Hard capacity
Hetnets	Heterogeneous Networks
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
ETSI	Industry Specification Group
ILP	Instruction-level parallelism

IEC	International Electrotechnical
IoT	Internet of Things
IVC	Inter-Vehicle communication
IC	Inteligência Computacional
KPIs	Key Performance Indicator r
MBS	Macro-cell Base Station
MTS	Mobile Telephone System
MMS	Multimedia messaging servisse
NS-3	Network Simulator
NFV	Network Function Virtualization
NFVI	Network Function Virtualization Infrastructure
OPEX	Operational Expenditure
PSO	Particle Swarm Optimization
1G	Primeira Geração das Redes Móveis
PTT	Push to Talk
PG	Promotion Group
QOS	Quality of Service
4G	Quarta geração de redes móveis
QCI	QoS Class Identifier
5G	Quinta geração de redes móveis
RRHs	Remote Radio Heads
2G	Segunda Geração das Redes Móveis
SDN	Software Defined Networking
SINR	Signal-to-interference-plus-noise ratio
SMS	Short Message Service
SON	Self Organising Network

SVD	Singular Value Decomposition
3G	Terceira Geração das Redes Móveis
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UHD	Ultra High Definition
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VNF	Virtual Network Functions
W-CDMA	Wide-Band Code-Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Resumo

Cloud Radio Access Network (C-RAN) é uma proposta de arquitetura, para próxima geração de redes móveis (5G), que visa processamento e gerência centralizada, rádio colaborativo e computação em nuvem em tempo real. Tais características possibilitam a esta arquitetura um ajuste lógico das conexões entre *Remote Radio Heads* (RRHs) e *Baseband Units* (BBUs) dinamicamente. Todavia, caso essa característica seja negligenciada, podem ocorrer problemas na rede como chamada bloqueada e conexão de baixa qualidade. Este trabalho aborda este assunto e propõe um modelo otimizado de mapeamento entre RRH-BBU, buscando um balanceamento mais justo e eficaz. Nesse sentido, o *Key Performance Indicator* (KPI) de chamadas bloqueadas foi utilizado para mensurar as métricas de *Quality of Service* (QoS). Objetivando minimizá-las, foi desenvolvido um algoritmo por Enxame de Partículas (PSO). Foi utilizado um cenário da literatura, composto de 19 RRHs distribuídas em uma área geográfica, as quais podem ser mapeadas em uma BBU pool que gerencia duas BBUs que possuem três setores cada. A configuração inicial gerou, em média, 80 chamadas bloqueadas. Resultados obtidos indicam redução de até 100% das chamadas bloqueadas e uma distribuição de carga mais igualitária entre as BBUs. Adicionalmente, cenários realísticos com diferentes perfis de usuários foram implementados, demonstrando que tais fatores impactam diretamente na carga gerada nas BBUs e, conseqüentemente, afetam o balanceamento das mesmas. Visando a verificação da formulação proposta, foi implementado no *Network Simulator* (NS-3) o mesmo cenário já utilizado na modelagem, através da comparação entre cenários otimizado e não-otimizado para que, assim, se verifique o impacto de atender mais usuários na rede, onde obteve-se resultados satisfatórios.

Palavras-chave: C-RAN, RRH, BBU, KPI, QoS.

Abstract

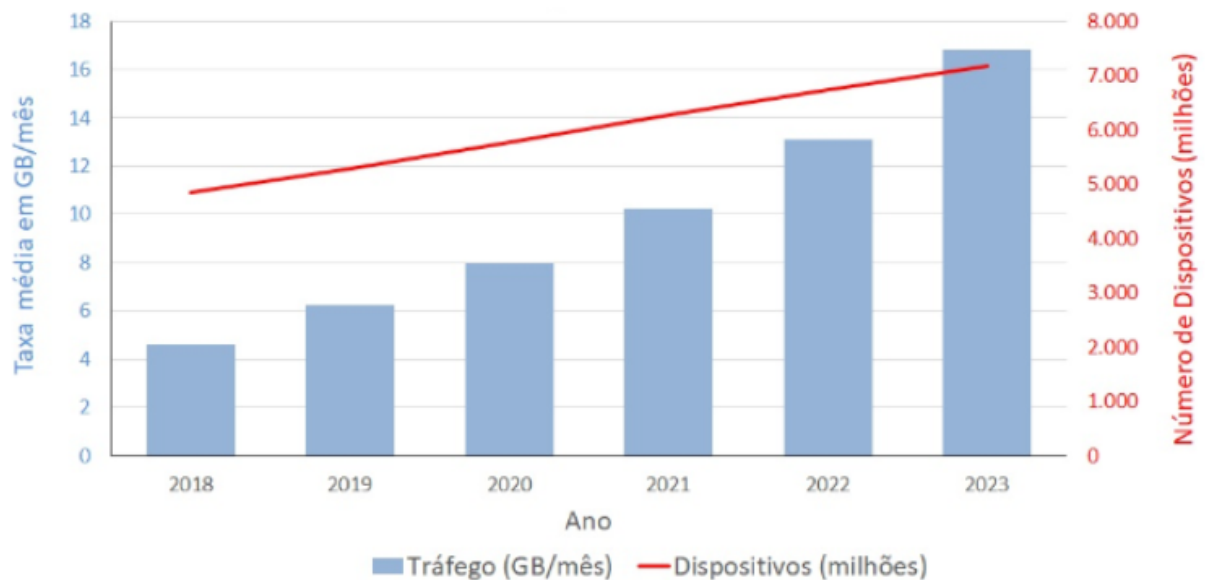
The Cloud Radio Access Network (C-RAN) is an architecture proposition for next-generation mobile networks (5G), aimed at centralized management and processing, collaborative radio and real-time cloud computing. Such features enable this architecture to dynamically adjust the connections between Remote Radio Heads (RRHs) and Baseband Units (BBUs). However, if this feature is neglected, network problems such as blocked call and poor connection may occur. This work addresses this issue and proposes an optimized mapping model between RRH-BBU, seeking a fairer and more efficient balancing. In this sense, the Key Performance Indicator (KPI) of blocked calls was used to measure Quality of Service (QoS) metrics. In order to minimize them, an algorithm by Particle Swarm (PSO) was developed. A literature scenario composed of 19 RRHs distributed in a geographical area was used, which can be mapped in a BBU pool that manages two BBUs that have three sectors each. The initial configuration generated, on average, 80 blocked calls. Results obtained indicate a reduction of up to 100% of blocked calls and a more egalitarian load distribution among the BBUs. In addition, realistic scenarios with different user profiles were implemented, demonstrating that such factors directly impact the load generated by the BBUs and, consequently, affect their balancing. In order to verify the proposed formulation, in Network Simulator (NS-3) the same scenario used in the modeling was implemented, through the comparison of optimized and non-optimized scenarios, in order to the impact of serving more users in the network, where satisfactory results were obtained.

Keywords: C-RAN, RRH, BBU, KPI, QoS.

1 Introdução

Com a alta demanda de taxa de dados e aplicações, as operadoras de redes moveis buscam soluções para fornecer essas solicitações de acesso. Conforme a Ericsson prevê [1], haverá um aumento do tráfego de dados móvel em torno de 43% por ano, chegando a 107 *exabytes* (EB) por mês no fim de 2023. A Figura.1 mostra o crescimento do número de dispositivos e taxa de dados esperado em 2023.

Figura 1 – Dispositivos e trafego [1]



Assim, pode-se perceber que uma constante adaptação e renovação das arquiteturas e sistemas de redes celulares é necessária. Uma pesquisa realizada pela [2], informa que em 2020, o tráfego de dados alcançará a marca de 49 exabytes mensais, representando uma taxa de crescimento anual de 47%, iniciada a partir do ano de 2016. O crescimento significativo e acentuado do tráfego de dados é algo que deve ser observado, pois impacta diretamente na necessidade de infra-estrutura de rede. O uso de pequenas células ou estações bases através da densificação das redes é uma estratégia comumente utilizada para atender esta demanda, assim, obtendo uma maior utilização de largura de banda.

Hetnets (*Heterogeneous Networks*) foram implantadas buscando ampliar a capacidade das redes celulares em áreas densas e com altas demandas de tráfego, preenchendo lacunas existentes na área de cobertura e descarregando o tráfego de dados das *Macro-cell Base Station* (MBSs). [3]. Porém, esta arquitetura ainda possui muitos desafios, como a flexibilidade adicional que implica a gestão da rede especialmente na alocação de espectro

entre macro e pequenas células (por exemplo, femtocell, microcell e picocell), a restrição de acesso exigida pelos reguladores, altos custos de CAPEX (Capital Expenditure) e OPEX (Operational Expenditure) para adicionar pequenas células a uma rede existente e limitações de baixa potência que acarretam em implantações de pequenas células.

Uma das possíveis soluções para alguns dos problemas citados, vem embarcado como uma proposta na nova geração de redes móveis que é a C-RAN, em que dentro de suas características estão o processamento centralizado dos dados, colaboração dos rádios e computação na nuvem em tempo real [4]. Este modelo apresenta, em sua arquitetura, RRHs que são conectadas a uma BBU *pool* através de um protocolo de interconexão, como o *common public radio interface* (CPRI), também conhecido como links fronthaul [5]. Dentro da BBU *pool* existem duas BBUs que serão responsáveis por gerenciar e tratar os dados, visando balancear a carga da rede. Essa arquitetura é amplamente utilizada na comunidade científica por superar muitos desafios existentes.

No entanto, devido às emergentes demandas das aplicações, percebe-se que ainda há várias lacunas no âmbito da arquitetura C-RAN, especialmente no que concerne ao balanceamento de carga em *Self Organised Cloud Radio Access Networks*, no qual é executado a reconfiguração e o mapeamento da rede, visando a distribuir e otimizar os recursos, pois o desbalanceamento dessa carga pode acarretar em usuários bloqueados, sobrecarregar os setores das BBUs devida a má distribuição e perda da eficiência energética.

Esta dissertação se propõe a investigar o mapeamento da carga de dados em uma arquitetura C-RAN que está em um ambiente 5G, onde foi utilizado um cenário retirado de [6], em que foi aplicado um KPI, que é uma métrica que o pesquisador determina de acordo com sua necessidade, esse é baseado em chamadas bloqueadas como métrica de QoS. A formulação proposta foi executada através de modelagem matemática, usando o *software* Matlab e simulação por *Network simulator* NS3, na qual ambos são comparados com os dados da literatura para fins de comprovação da eficiência da proposta.

Dentre as motivações para a pesquisa, o crescente tráfego e demanda por melhores conexões cria a necessidade de estudar tecnologias capazes de atender a tal demanda e, consequentemente, norteia a evolução das tecnologias que devem compor o futuro das redes móveis. Tendo isso em vista, o C-RAN é um candidato bem avaliado [7] e que traz consigo propostas adequadas para resolver problemas relacionados a escalabilidade, flexibilidade e eficiência energética [8].

Entretanto, para que tais propostas sejam atendidas, a tecnologia deve ser capaz de manter balanceado o número de clientes atendidos em uma BBU *pool*, pois isto garante que não haverá sobrecarga em setores específicos, fato este que impactará na qualidade do serviço e/ou subutilização, que acarretaria em baixa eficiência energética e aumento no custo de operação. Portanto, propostas voltadas a oferecer o uso mais eficiente dos recursos das BBUs, como é o caso deste trabalho, ajudam a maximizar a evolução no

cenário das redes móveis.

1.1 Objetivos Gerais

Tendo em vista os dados exibidos, este trabalho visa contribuir propondo um aperfeiçoamento do balanceamento de recursos entre os setores de mais de uma BBU, buscando, adicionalmente, realizar o balanceamento de carga nas BBUs. Com isso, almeja-se solucionar essas problemáticas da literatura, minimizando as chamadas bloqueadas e, ao mesmo tempo, balanceando a carga entre as BBUs.

No primeiro momento, dois algoritmos são utilizados para fins comparativos. Em seus resultados, ambas as técnicas utilizadas averíguam a importância do mapeamento da carga em uma arquitetura C-RAN. Essas técnicas tratam seus dados de maneiras distintas, o que possibilita verificar essas particularidades de otimização de cada uma delas. Vale destacar, que o menor número de chamadas bloqueadas e a melhor distribuição delas serão os fatores de maior importância no QoS. Essa abordagem tem o intuito de mostrar ao leitor qual técnica é mais eficiente nesse cenário.

Após realizar essas comparações no contexto da modelagem, a segunda parte concentra-se em explicar sobre avaliação, implantação do cenário C-RAN e verificação da formulação proposta através de um simulador de eventos discretos, no qual foi implicado características mais realistas e testado em um ambiente otimizado e em um não otimizado.

Como objetivos específicos desta dissertação, têm-se:

- Implementar a arquitetura C-RAN em um cenário 5G, atendendo todos os pré-requisitos contidos na literatura.
- Avaliar o comportamento do balanceamento de carga em uma arquitetura C-RAN;
- Aferir a capacidade do novo balanceamento, visando verificar sua eficácia;
- Minimizar o número de chamadas bloqueadas, buscando, assim, zerar o número de usuários bloqueados na rede;
- Avaliar novos cenários heterogêneos, buscando torna-los mais realísticos e tratar os usuários de maneiras diferentes;

1.2 Descrição da Dissertação

A presente dissertação está organizada da seguinte forma:

- Este capítulo expõe de maneira clara e objetiva os pontos relevantes desse trabalho que demonstram através de relatos ,pesquisas e experiências relacionados especificamente ao assunto abordado neste trabalho dissertativo. Os principais pontos objetivados com esse trabalho: são exibir alguns trabalhos correlatos e suas contribuições; mostrar a importância da pesquisa, evidenciar os objetivos desta dissertação, suas propostas e contribuições.
- No Capítulo 2, são exibidos determinados conceitos acerca das arquiteturas, onde é abordado suas principais características e funcionalidades e formulações em estudo;
- O Capítulo 3, mostra os artigos empregados nessa dissertação e detalha seus objetivos de maneira sucinta;
- O Capítulo 4 explora os aspectos do balanceamento e os algoritmos utilizados nesta dissertação e apresenta a formulação utilizada para incrementar a proposta de modelagem;
- No Capítulo 5, expõe-se os resultados obtidos de ambos os cenários e discorre-se sobre os mesmos. Tanto o modelado quanto o simulado;
- As considerações finais dispõe de conhecimento logrado, impasses e trabalhos futuros serão exibidos no Capítulo 6.

2 Referencial Teórico

2.1 Considerações iniciais

Nesse capítulo, estarão detalhadas várias tecnologias, que foram explanadas para produção desta pesquisa, onde são explicadas também as principais lacunas que a 5G promete preencher e suprir. Assim como algumas ilustrações das novas tecnologias que chegarão junto com essa nova arquitetura.

2.2 Evolução das Redes Móveis

Segundo [9], o número de telefones móveis conectados à rede e os elevados números de aplicações nesse cenário, levam as redes móveis a uma constante evolução, pois esses serviços estão cada vez mais exigindo robustez e flexibilidade.

De acordo com [10], a comunicação sem fio teve início no ano de 1970 e segue em ascensão. Por conta da alta demanda da taxa de dados, as redes de telefonia móvel tiveram diversas modificações em sua arquitetura, nas quais serão detalhadas nos subtópicos abaixo.

2.2.1 Primeiras Gerações das Redes Móveis (1G,2G,3G)

A 1G chegou no ano de 1980 e usava FDMA (Frequency Division Multiple Access) que é uma técnica, onde irá dividir as frequências alocadas por vários canais e cada canal transporta um sinal de dados para a comunicação sem fio[10].

Chegando em meados dos anos 90, a 2G utilizava a GSM (Global System for Mobile Communication) que começou a usar o sinal digital, possibilitando, assim, a criptografia digital transformando essa geração em uma comunicação mais segura. Seus objetivos principais eram disponibilizar aplicação como de texto, imagens, SMS, e-mails etc. Para isso, foi adotada uma largura de banda de 30 a 200 kHz, com taxa de dados de 64kbps[10]. Embora essa geração tenha conseguido lograr grandes resultado, ainda havia muito a fazer, o que impulsionou a chegada da Terceira geração 3G.

Iniciou-se no ano de 2000 e veio com o propósito principal de aumentar velocidade da taxa de dados, isto é, tornar a rede três vezes melhor do que GSM, ou melhor, 3GMS. Aplica uma técnica chamada UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) que comuta os pacotes da rede sem fio e de banda larga que possibilitou o acesso global e mais

transparência na comunicação. Ela trabalha em uma faixa de 2100 MHz e tem largura de banda de 15-20 MHz para internet de alta velocidade [11]. Todavia a 3G consumia mais energia do que o 2G, os telefones móveis 3G eram mais caros e exigiam maior largura de banda, o que ocasionou a chegada da quarta geração 4G [11].

2.2.2 Quarta geração de redes móveis (4G)

Lançada em 2012, a 4G chegou oferecendo velocidade de download de até 100 Mbps, Multi-Media Jornal, alta qualidade de streaming ao vivo, HDTV, serviços baseados em localização, chat com vídeo, Digital Video Broadcasting, serviços multimídia expandidas e navegação com alta velocidade. Além disso, a duração da bateria é elevada e seu custo foi reduzido. 4G foi produzido com a capacidade de acoplar o QoS (Quality of Service) e possui latência baixa em contrapartida a 3G, aproximadamente 50 milissegundos taxa de latência. Em apenas seis minutos ela é capaz de baixar filmes em alta resolução.

De acordo com [12], a implantação em larga escala da quarta geração (4G) trouxe aumento da área de cobertura, aumento da velocidade e capacidade de usuários, mas, em razão da comunidade sem fio estar em crescente aumento e o avanço dos dispositivos, agora a comunidade científica e os usuários se preparam para chegada da rede 5G, que está em processo de construção para ser lançada em 2020.

2.2.3 Quinta geração de redes móveis (5G)

À medida que aumenta o número de usuários da rede móvel a mesma sofre a necessidade de expandir sua capacidade e qualidade de atendimento. Portanto, a implantação do 5G se torna ainda mais relevante, uma vez que, existem aplicações que necessitam de uma latência menor, transmissão de dados mais veloz e aplicações mais robustas, tudo isso impulsiona as constantes mudanças nas redes móveis.

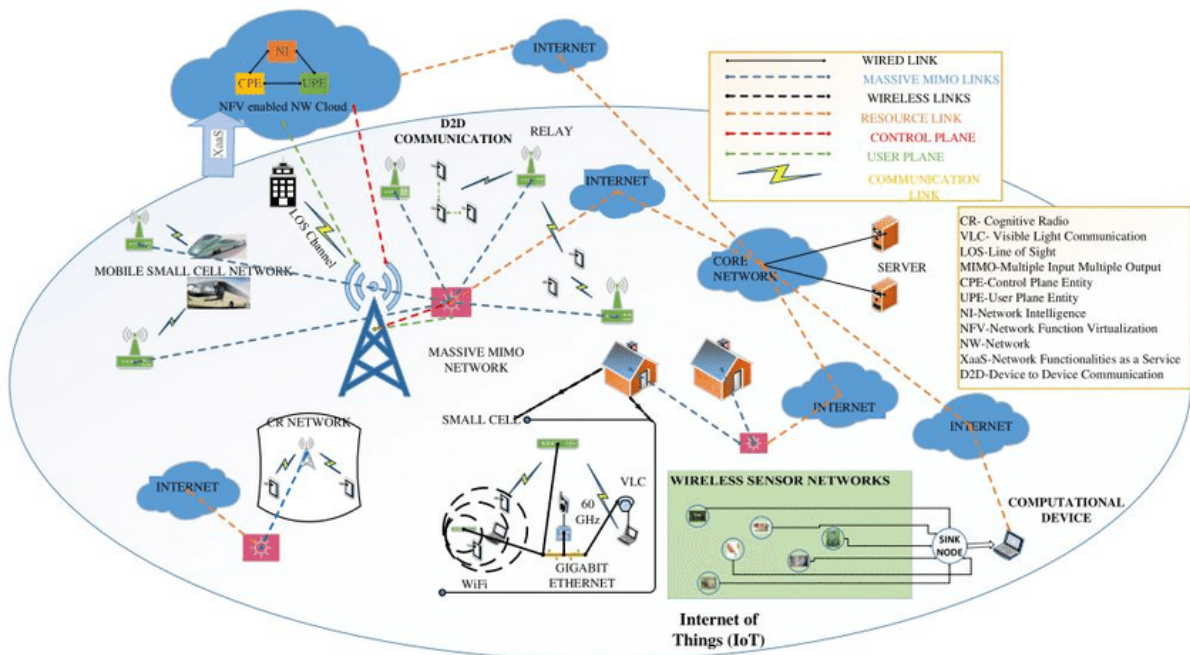
Pesquisas sobre 5G foram extensivamente realizadas, começando com uma investigação sobre as demandas dos usuários, cenários de aplicações, tendências técnicas e soluções em potencial, tendo como exemplo, o trabalho do grupo Metis na Europa, 5G fórum na Coreia do Sul e IMT-2020 Promotion Group (PG) na China [13].

Os smartphones e Internet of Things (IoT) são alguns dos principais impulsionadores para criação da futura rede móvel, pois irão ocupar uma vasta porção dela, visto que uma das principais características da 5G é suportar redes mais densas, dado que, essas tecnologias têm uma alta demanda de usuários e necessitam de elevada largura de banda. Em decorrência disso, o 5G vai estar em várias partes do cotidiano, como no trabalho, lazer, em casa e transportes [14].

As funções básicas, como realidade aumentada, realidade virtual, Ultra High Definition (UHD), Cloud Computing e Inter-Vehicle communication (IVC), serão inseridos nesse âmbito, como pode ser vista na Figura. 2. As exigências de desempenho para 5G são consequentes de cada cenário, conforme a distribuição prevista de usuários, percentual de serviços diferentes e requisitos de serviço. Os KPIs (Key Performance Indicator) para 5G incluem taxa de dados, experiência do usuário, densidade de conexão, latência de ponta a ponta, densidade do volume de tráfego, mobilidade e alta taxa de dados[15].

Esse crescimento contínuo em aplicativos de acesso móvel e centrados em máquinas tem causado demandas que excedem os recursos das tecnologias móveis atuais. Esses aplicativos de última geração para dispositivos móveis e Internet das coisas (IoT) exigirão acesso à Internet onipresente, com qualidade de serviço (QoS) garantida, alta capacidade e contínua[16]. Como solução para esta batalha de oferta e demanda, o desenvolvimento da tecnologia móvel de quinta geração (5G) está em andamento para permitir uma sociedade totalmente conectada e móvel até 2020 [17], [18].

Figura 2 – Arquitetura de Rede Celular Geral 5G [20]



Como resultado, a evolução das redes de acesso de rádio precisa ser complementada pela evolução das redes de transporte, a fim de realizar os benchmarks de 5G. Em particular, para suportar comunicação de baixa latência, alta capacidade, custo efetivo e mais ecológico, toda a rede de ponta a ponta deve ser revisada. Para lidar com a demanda de tráfego em crescimento exponencial que se prevê que aumente oito vezes nos próximos anos [19], o primeiro passo foi propor e expor o conceito de controle centralizado de sinais de rádio para ser introduzido na rede 5G, que é conhecida como a arquitetura Cloud

Radio Access Networks/ C-RAN (C-RAN).

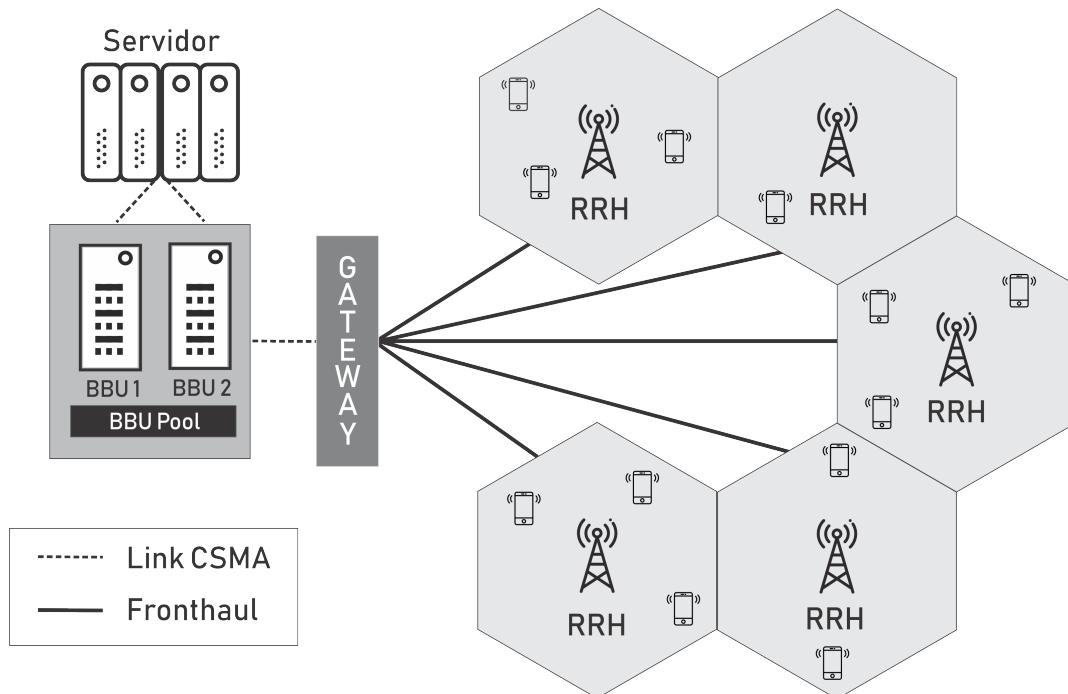
2.3 C-RAN

Foi introduzida pela primeira vez pela China Mobile em 2009 para acomodar o grande crescimento das redes móveis [21]. É uma nova arquitetura móvel que tem o potencial de lidar com tantas estações-base quanto a rede precisa usando o conceito de virtualização.

No C-RAN, o processamento de banda e canal é virtualizado e compartilhado entre os operadores em um pool de banda de base centralizado. Essa centralização e compartilhamento permitem um tratamento de tráfego mais dinâmico e uma melhor utilização de recursos, incluindo implantações de estações base.

Essa arquitetura teria o potencial de diminuir o custo das despesas, pois as estações de base são virtualizadas, em vez de implantadas fisicamente em diferentes áreas. Além disso, reduz o consumo de energia em comparação com as redes tradicionais, devido ao fato de as estações base estarem localizadas no mesmo dispositivo físico.

Figura 3 – Arquitetura C-RAN



No modelo apresentado na Figura.3, é exposta a arquitetura de uma C-RAN, onde as RRHs são conectadas à BBU pool através de um protocolo de interconexão, como o Common Public Radio Interface (CPRI) [5]. As BBUs na BBU pool estão interligadas e conectadas a um servidor intitulado "Host Manager", que verifica a carga em cada BBU e é encarregado de selecionar a configuração adequada de BBU-RRH. Cada BBU pode

trabalhar com "N" setores, os quais se configuram pelo número total de usuários que aquela BBU pode suportar, dependendo de sua capacidade. Cada setor contém múltiplas RRHs conectadas a ele. As RRHs pertencem unicamente a um setor em um intervalo de tempo.

A carga em cada BBU é dada pelo número total de usuários ativos conjuntamente aos setores da BBUs. Entretanto, devido a uma restrição de hardware ou software, o número de usuários ativos em cada setor é limitado, isto é conhecido como *Hard Capacity* (HC), que se trata de uma capacidade máxima de atendimento de cada setor. Desse modo, para solucionar esta problemática deve ser utilizada uma rede no modelo *Self Organising Network* (SON), que irá ajustar o mapeamento e distribuição de recursos na rede [22].

2.4 SDN

Software Defined Networking (SDN) é um modelo de redes baseada na proposta de separar o plano de controle de uma rede do plano de dados que encaminha o tráfego de rede. O objetivo dessa desagregação é criar uma rede que seja gerenciada centralmente e programável. A tecnologia é usada principalmente em data centers corporativos para clientes que exigem uma rede que possa se adaptar mais facilmente às necessidades do negócio em comparação com as arquiteturas de rede tradicionais [23].

Em SDNs, os dispositivos de rede tornam-se simples dispositivos de encaminhamento de pacotes (plano de dados), enquanto o "cérebro" ou controle lógico é implementado no controlador (plano de controle). Essa mudança de paradigma traz vários benefícios em comparação aos métodos usados até então. Primeiro, é muito mais fácil introduzir novas ideias na rede através de um programa de software, dado que este é mais fácil de alterar e manipular do que usar um conjunto fixo de comandos em dispositivos de rede. Segundo, a SDN apresenta os benefícios de uma abordagem centralizada à configuração de rede, em oposição ao gerenciamento distribuído: os operadores não precisam configurar todos os dispositivos de rede individualmente para fazer mudanças no comportamento da rede, mas sim tomar decisões de encaminhamento de tráfego em toda a rede em um local logicamente único, o controlador, com conhecimento global do estado da rede [23].

2.5 Network Function Virtualization (NFV)

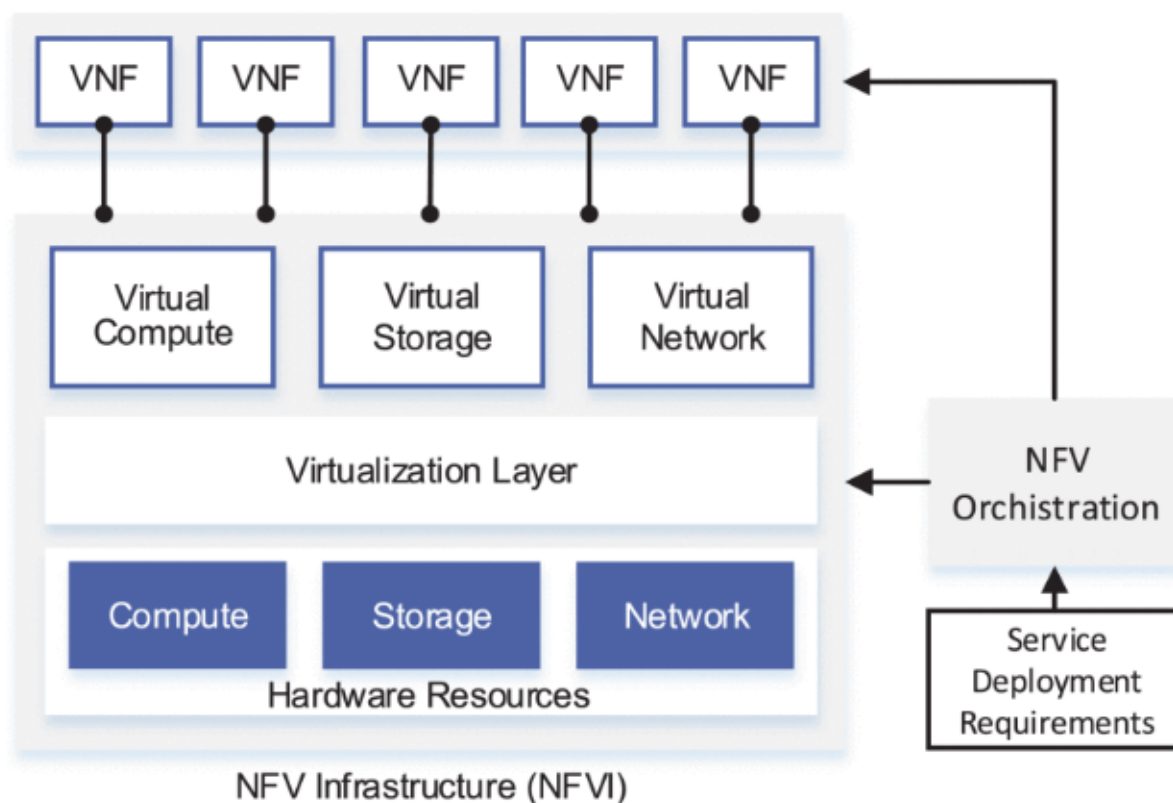
Foi inicialmente concebida por ETSI (Industry Specification Group), que propôs a Virtualização das Funções de Rede NFV, buscando controlar os serviços oferecidos de rede aos clientes de forma eficaz. A virtualização surgiu como uma abordagem para separar o processamento de redes de software e seus aplicativos e permitir que os serviços de rede sejam implementados como software.

Dessa forma, ao desacoplar as funções de rede dos dispositivos de hardware sub-

jacentes, a NFV fornece um provisionamento flexível de funcionalidades de rede baseadas em software sobre uma infraestrutura física compartilhada de maneira ideal. Objetivando minimizar o custo de fornecimento do serviço e maximizar a utilização dos recursos da rede, esta arquitetura aproveita a virtualização da rede e a inteligência logicamente centralizada. Assim, com a maior utilização de recursos obtida, terá menor investigação nos equipamentos de hardware, o que, por outro lado, simplifica as operações de rede [24].

Foi definido uma estrutura da arquitetura NFV, que permite que VNF (*Virtualized Network Function*) sejam implantadas e executadas em uma NFVI (*Network Function Virtualization Infrastructure*), como pode ser vista na Figura.4.

Figura 4 – Ilustração do framework NFV [24]



As implantações de NFVI, geralmente usam servidores comuns para executar versões de software de serviços de rede que anteriormente eram baseados em hardware. Esses serviços baseados em software, são chamados de VNF e são executados em um ambiente NFV.

2.5.1 Otimização Combinatória

Otimização, ou programação matemática, se refere a escolher o melhor elemento em um conjunto de alternativas disponíveis. Grande parte dos problemas computacionais são

de natureza discreta e envolvem a busca por uma solução atendendo certas propriedades, onde as possíveis alternativas crescem de forma combinatória [37].

Em um problema de otimização temos uma função objetivo e um conjunto de restrições, ambos relacionados às variáveis de decisão. Os valores possíveis às variáveis de decisão são delimitados pelas restrições impostas sobre essas variáveis, formando um conjunto discreto (finito ou não) de soluções factíveis a um problema. O problema pode ser de minimização ou de maximização da função objetivo. A resposta para o problema de otimização, ou seja, o ótimo global, será o menor (ou maior) valor possível para a função objetivo para o qual o valor atribuído às variáveis não viole nenhuma restrição. Em alguns casos, chega-se a valores cuja alteração discreta não conduz a resultados melhores, mas que não são também o ótimo global - a essas soluções chamamos de ótimo local [37].

Em suma, otimização combinatória trata-se de uma área que engloba grande quantidade de problemas e que busca por soluções que façam melhor uso dos recursos envolvidos. Nestes problemas, não basta ter uma das soluções possíveis, mas uma que também otimize os objetivos de interesse.

2.6 NS3

À medida em que as redes de dispositivos computacionais se tornam maiores e mais complexas, a necessidade de tecnologias para simulação de rede altamente precisas e escaláveis torna-se crítica. A simulação desempenha um papel vital em termos de escalabilidade, reprodutibilidade, rápida prototipagem e educação. Com estudos baseados em simulação, a abordagem pode ser estudada em detalhes e em diferentes escalas, com aplicações de dados variadas, condições de campo variáveis e irão gerar resultados reprodutíveis e analisáveis [25].

Na pesquisa prévia a elaboração do cenário de simulação, houve a análise das principais ferramentas disponíveis e sua comparação, a fim de escolher a alternativa que melhor se adequasse às necessidades deste trabalho. Dentre as opções analisadas, como OpenNet, OPNET, NS-2, NS-3 e OMNeT++, as três últimas alternativas se destacam por sua natureza *open-source*, que contribui para melhores documentações e comunidade mais ativa, e por serem extensíveis, de modo que é possível adapta-los para cenários que não foram desenvolvidos previamente.

O NS-3 foi escolhido, pois, segundo [26] o NS-3 demonstrou ser o simulador que alcançou a execução mais rápida entre os simuladores selecionados em medida ao tempo de compilação do problema, visto que em uma rede C-RAN a reconfiguração de recursos é feito sucessivamente. Mesmo que ele seja novo e ainda esteja em construção, o Ns-3 provou ter o melhor desempenho computacional entre todos.

2.7 Considerações finais

A alta demanda de usuários e a chegada de novas aplicações força as grandes empresas de telecomunicações e a comunidade científica a buscarem soluções cada vez mais robustas para solucionar esses desafios. Neste sentido esse capítulo listou e caracterizou alguns dos principais esforços para mitigar essas problemáticas.

3 Trabalhos Correlatos

3.1 Considerações iniciais

Nesta seção, serão expostos os trabalhos que foram utilizados como base na construção dessa dissertação. Por meio disto, almeja-se expor suas contribuições e possíveis temas que ainda não foram discutidos.

3.2 Trabalhos Correlatos

Diversos trabalhos estão sendo propostos, visando otimizar o processamento nas arquiteturas de quinta geração, tais como: centralização e balanceamento de carga, eficiência energética, redes SDN, NFV, entre outros.

O autor em [6] propõe um cenário com uma rede no modelo *Self Organised Cloud Radio Access Network*, com a capacidade de auto-otimizar e reconfigurar seus recursos em diferentes condições de tráfego, usando um algoritmo genético para mapear e alocar dinamicamente os seus recursos, visando resolver problemas de otimização e balanceamento do tráfego desta rede. Contudo é essencial que toda rede identifique padrões de tráfego satisfatórios, com o objetivo de mitigar possíveis problemas de desempenho e disponibilidade, onde foi definido como medida de desempenho o KPI baseado em chamadas bloqueadas, o qual é utilizado como medida para avaliar o QoS da proposta. A proposta obteve resultados aceitáveis ao maximizar o mapeamento, todavia, gerando um desbalanceamento de carga nas BBUs.

Já em [27] é abordada a chegada das novas arquiteturas de redes celulares e seus desafios. Foi proposto um esquema para introduzir NFV, que tem como objetivo implementar funções de rede, em sua maioria virtualizadas, para diminuir custos com energia e gastos com hardware, com Software Defined Networking (SDN), que por sua vez visa centralizar o controle da rede, para realizar um self-organizing scheme em futuras redes com objetivo de fazer alocação de energia para melhorar a eficiência energética, diminuir os custos da infraestrutura e organizar carga de dados de diferentes cenários visando otimizar a experiência dos usuários. Após a execução do modelo apresenta-se um cenário mais economicamente eficiente e maleável.

Levado pelo aumento do tráfego, problema da interferência nas inter-camadas e o custo em relação a receita das operadoras de telefonia móvel. O trabalho de [28] propôs,

um modelo de balanceamento de carga ideal para sistemas celulares com base em uma rede C-RAN, onde foi utilizado um método de otimização infinita para obter uma melhor distribuição de recursos. Os resultados mostram que a técnica proposta entrega uma alocação eficaz e sem adicionar tantos custos na parte operacional.

Em [29] é apresentada uma otimização do QoS de uma rede C-RAN através de soluções de balanceamento de carga baseados em alocação dinâmica de RRHs em setores de BBUs e uma rede auto-otimizada e com preocupações acerca das capacidades do hardware utilizado. As soluções apresentadas neste artigo incluem o uso de um AG (algoritmo genético) e um DPSO (*discrete particle swarm Optimization*).

Os autores em [30] discorrem acerca dos pontos gerais da arquitetura C-RAN e exploram as vantagens como redução do CAPEX e OPEX, eficiência energética e espectral e um melhor aproveitamento recursos computacionais disponíveis. Adicionalmente a C-RAN é apresentada em três camadas lógicas a fim de tornar o processamento centralizado mais eficiente e facilitar o provisionamento dos serviços. Os autores detalham os componentes do Plano de Serviços, Plano de Controle e Plano Físico, dentre eles são destacáveis para este trabalho: Virtualização de Provisionamento de Recursos e Interconexão de BBU Pool no Plano Físico, pois estes evidenciam as vantagens da C-RAN em flexibilização da infraestrutura de software e hardware para que estes se adequem às necessidades da área de cobertura da BBU Pool. O Plano de Controle, Ciência de Contexto e de Negociação de Serviço são importantes para que sejam coletadas informações da rede e dos terminais a ela conectados, como serviços utilizados, demandas de QoS, consumo de bateria, informação do estado do canal, mobilidade dos terminais etc. Essas informações são importantes para a organização da rede de modo ciente do QoS dos usuários.

Em [31], os autores propõe um esquema de mapeamento dinâmico BBU-RRH, usando uma abordagem de empréstimo, para alocar dinamicamente os recursos para RRHs de uma maneira inteligente e eficiente. Com o gerenciamento centralizado, o grupo menos ocupado empresta recursos para o grupo mais ocupado. Os resultados mostram que o mecanismo proposto reduz significativamente o desperdício do uso de recursos e melhora o rendimento da rede.

Em [32], os autores otimizam conjuntamente o mapeamento BBU-RRH e a associação de usuários com o objetivo de minimizar o custo do sistema incorrido pela conta de energia das RRHs e aluguéis das BBUs virtuais sob a restrição de manter os padrões de qualidade de serviço dos usuários, que é formulado como um problema de programação linear inteira (ILP). Além disso, os resultados ótimos alcançados pelo ILP são comparados com um algoritmo proposto pelos autores que, abrem mão de ótimos resultados por bons resultados em tempo computacional hábil. O problema é decomposto em dois subproblemas e os resultados obtidos pelos autores demonstram que o algoritmo proposto se aproxima das soluções ótimas obtidas pelo ILP.

Os autores em [33] propõem um algoritmo de diferenciação de integração de células (CDI) e um mapeamento dinâmico de BBU-RRH para maximizar o QoS e minimizar os handovers. A otimização do balanceamento de carga é feita através de um DPSO, e em dois cenários esta proposta é comparada a um Algoritmo Genético e a Busca Exaustiva, onde é observado que a solução dos autores é vantajosa por ser menos complexa e mais rápida que ambas as técnicas. Segundo os autores, o QoS da rede é maximizado baseado nos KPIs almejados pelo sistema e, portanto, a solução é modelada como uma otimização multi-objetivo que pode incluir outros critérios de acordo com os requerimentos do operador e/ou pesos diferentes para os critérios. Adicionalmente, a predição de carga na rede é utilizada em conjunto com o algoritmo CDI para estimar o número de RRHs e BBUs necessários para atender a rede, em seguida, o balanceamento de carga entre os componentes é feito pelo DPSO, alcançando dinamicamente uma configuração BBU-RRH otimizada.

Considerando o trabalho de [34] em que a rede e CRAN com processamento centralizado de banda básica, é fundamentalmente promissora para a rede de comunicação sem fio da próxima geração 5G. Atuando no sentido de investigar o problema da associação conjunta do RRH e do usuário-RRH para maximizar o mínimo de sinal-interferência-ruído SINR de todos os usuários sujeitos a cada restrição de capacidade fronthaul da RRH. Uma vez que, o balanceamento (SINR) downlink em CRAN sob capacidade limitada de fronthaul, necessitará de um método iterativo para este problema que desacopla o projeto de beamforming e associação de usuários, observando o número de usuários atendidos por cada RRH é reduzido iterativamente até que perceba-se um equilíbrio entre o beamforming e a associação de usuários em conformidade com as restrições de capacidade de fronthaul de todas as RRHs. Portanto, o algoritmo proposto alcança melhorias significativas de desempenho em relação a outras soluções heurísticas considerando o número de usuários atendidos, dentro de uma arquitetura que se adequa dentro de sua real capacidade.

O [35] disserta, sobre a transferência de dados que sempre foi um grande desafio, principalmente para próxima geração de comunicação móvel. O C-RAN é uma nova arquitetura de rede que visa fornecer serviços de banda larga. Para tanto, se faz necessário que o C-RAN disponibilize ao usuário uma rede livre de congestionamento, uma vez que com o C-RAN, os UEs podem receber dados de várias células de colaboração, aproveitando assim a tecnologia de seleção dinâmica de pontos (DPS). Isso significa que quando os equipamentos de usuários (UEs) entram em um ponto de acesso e não podem ser atendidos devido ao congestionamento, foi utilizado então, um descarregamento de dados do ponto de acesso para as células vizinhas para que haja o equilíbrio entre a carga das células proporcionando assim um resultado satisfatório na alocação de recursos em C-RAN, descarregado de forma heterogênea. Além da otimização do consumo de energia.

Em [36] é apresentado o módulo OFSwitch13, que adiciona ao NS-3 funcionalidades

de switches OpenFlow, que são aplicados em implementações de SDN, possibilitando assim, operações de controle de fluxo e tomada de decisão, ambas imprescindíveis para o desenvolvimento deste artigo. Com o intuito de mostrar a versatilidade da ferramenta foram executadas tabelas de grupos para agregação de enlaces, campos extensíveis para balanceamento de carga e tabelas de medição para controle de vazão.

Visando um entendimento mais conciso dos trabalhos já citados, a tabela 1, exhibe as propostas e desafios dos três principais trabalhos que servem de base para o desenvolvimento dessa dissertação.

Tabela 1 – Características dos principais trabalhos correlatos

Referência	Objetivo	Principais Características	Desafios
[KHAN et. al., 2015]	Mapeamento de recursos entre RRH-BBU	Análise através do balanceamento de recursos e atendendo o KPI proposto.	Foi realizado um mapeamento no qual se conseguiu atender o KPI proposto, mas o número de usuários por setor continuou desequilibrado.
[Chen, Na et al., 2018]	Esquema para introduzir NFV e SDN, para diminuir os custos com energia	Análise através de uma alocação de energia e controle de custos.	Foi realizado um mapeamento, visando diminuir os custos da infraestrutura e organizar a carga de dados.
[Chaves et. al., 2016]	Viabilizar o uso do OpenFlow 1.3 em simulações no do NS-3	Mostrar a ferramenta OFSwitch13 através uso de campos extensíveis para o balanceamento de carga.	A ferramenta foi exposta e demonstrou ser factiva para seus propósitos, mas se isso é aplicável ao um balanceamento de carga em uma rede C-RAN não foi discutido.

3.3 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados trabalhos que norteiam o tema proposto nesta dissertação, a fim de mostrar a diversidade de estratégias e lacunas existentes ainda não resolvidas. A formulação do problema, a técnica de IC e descrição da modelagem utilizada é apresentado no capítulo que segue.

4 Formulação do Problema

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, é abordado a técnica de otimização, bem como a formulação matemática da modelagem desenvolvida neste trabalho, onde será explanado os principais parâmetros utilizados. No subtópico seguinte, é explicado a simulação discreta do software NS3.

4.2 Inteligência Computacional

A inteligência computacional (IC) é um sistema que executa suas funções de forma inteligente, se baseia em técnicas da natureza e apresenta características humanas, como raciocínio, aprendizado, evolução e capacidade de se adaptar. Dentre as técnicas utilizadas em IC se destacam as redes neurais, Computação Evolucionária, Lógica Fuzzy e Sistemas Especialistas [38].

4.2.1 Metaheurística

De acordo com [39] são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais com estratégias de mais alto nível, de modo a criar um processo capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções de um problema. São aplicadas para resolver problemas sobre os quais há pouca informação, mas que, uma vez oferecida uma solução candidata, esta pode ser testada.

4.2.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

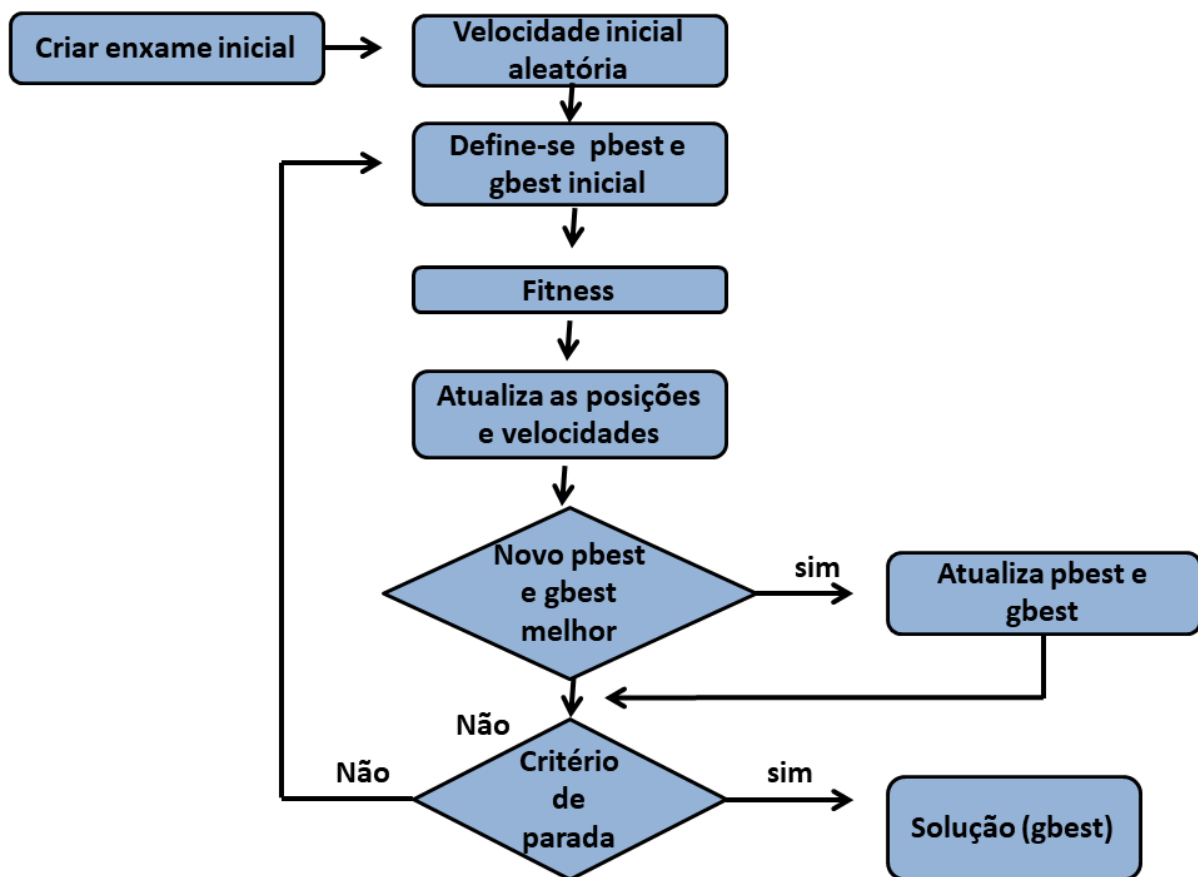
O particle swarm optimization (PSO) foi projetado em 1995 por James Kennedy e Russel Eberhart, e está no campo da computação evolucionária, visto que ele é inspirado no princípio do darwinismo sobre evolução das espécies e consegue tratar problemas de otimização. [40].

Esse algoritmo imita o hábito social de animais, como os insetos, peixes e pássaros, etc. A conformidade dos enxames de maneira cooperativa encontra os alimentos onde as mudanças de padrão das pesquisas estão de acordo com as experiências de aprendizagem possibilitando a autoaprendizagem e dos demais membros[41].

A ideia principal do PSO está intimamente ligada às pesquisas, cujo foco é o algoritmo evolutivo que juntamente com o PSO dão ênfase ao modo de enxame que tem capacidade de cobertura de uma região maior e função objetiva e otimizada. Além de estudar os sistemas artificiais com características de vida[41].

O processo de execução do PSO é exibido na Figura.5, onde o fluxograma inicia com a criação de um enxame de partículas em que cada partícula corresponde a uma solução candidata. Em seguida as partículas averiguam a área da solução aleatoriamente com velocidades distintas, após passar pela fitness do algoritmo as partículas são direcionadas aos seus melhores valores de aptidão. A velocidade de uma partícula individual é alterada de modo estocástico em cada iteração e sua atualização decorre da experiência da melhor posição histórica da respectiva partícula e a melhor experiência de posição de partículas vizinhas, isto é, a melhor posição global.

Figura 5 – Processo de execução do PSO



É apresentado como resultado, as melhores partículas, que são representadas por uma vetor $\{S_1^{i+1}, S_2^{i+1}, \dots, S_N^{i+1}\}$, onde cada partícula caracteriza uma combinação possível de RRHs distribuídas nos setores de BBU. Os parâmetros aplicados na simulação são mostrados na Tabela 2.

A posição de cada partícula é determinada pelo vetor e seu movimento pela velo-

Tabela 2 – Parâmetros do PSO

Parâmetros	Valores
Fator de aceleração local(Pbest)	1.8
Fator de aceleração global (Gbest)	1.8
Tamanho total	220
Limite do número de interações	100

cidade da partícula, que pode ser calculada de acordo com a fórmula abaixo:

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (4.1)$$

Vale ressaltar que quanto mais longe, maior o valor dessa velocidade. A informação disponível para cada indivíduo é baseada nas experiências até o momento, (e o sucesso em cada decisão) e o conhecimento do desempenho dos indivíduos em sua vizinhança. É comumente atribuído pesos aleatórios a cada parte e, portanto a velocidade é reformulada e determinada por:

$$\vec{v}_i(t) = \vec{v}_i(t-1) + \varphi_1 \cdot rand_1 \cdot (\vec{p}_i - \vec{x}_i(t-1)) \dots$$

$$\varphi_2 \cdot rand_2 \cdot (\vec{p}_g - \vec{x}_i(t-1)) \quad (4.2)$$

onde, 1 e 2 são dois números positivos e aleatórios com distribuição uniforme, na faixa de $[0,0, 1,0]$. Em (2), há três componentes principais para a atualização da velocidade:

Por vezes referido como “inércia” e/ou “Momentum”, modela a tendência da partícula de continuar na direção que tem viajado;

O pbest (melhor local) de cada partícula indica o quão próximo que os dados já chegaram ao destino;

E o gbest (melhor global), que só muda quando o valor do pbest de qualquer partícula se aproxima da meta, que é o gbest. A cada iteração do algoritmo, o gbest se aproxima do alvo, até que uma das partículas atinja o objetivo final.

4.3 RRH-BBU - modelagem

Conforme discutido em [6] essa dissertação utiliza um KPI definido como o número de chamadas bloqueadas, para representar o QoS do C-RAN. Baseado neste KPI, o *host manager* identifica as configurações adequadas para o conjunto BBU-RRH e faz o balanceamento dos recursos dos BBUs.

Considerando o mesmo cenário, onde 19 RRHs são distribuídas aleatoriamente e gerenciadas por uma BBU pool, contendo duas BBUs com três setores cada. buscando

minimizar o número de chamadas bloqueadas, busca-se um desequilíbrio na distribuição dos usuários entre os setores disponíveis de cada BBU. Um desequilíbrio pode ocasionar sobrecarga em determinados setores e BBUs e, conseqüentemente, gerar chamadas bloqueadas.

Assim, procurou-se balancear a carga das BBUs, minimizando o número de usuários por setor de forma a evitar chamadas bloqueadas e sobrecarga em um determinado setor, portanto, melhorando a rede. A função objetivo utilizada de [6] foi alterada, onde se buscou distribuir igualmente a quantidade de usuários pelo número de setores disponíveis nas “N” BBUs. Para isso, inicialmente é criado um vetor de usuários por setor, conforme é modelado na equação

$$U_s = \sum_{j=1}^N C_j R_s^{i+1}, S = 1, 2, \dots, K \quad (4.3)$$

Onde:

U_s é o número de usuários no setor;

N é o total de RRHs;

K é o total de setores;

C é a quantidade de usuários conectados na RRH j ;

R é uma variável binária onde assume o valor 1 se a RRH j está alocada no setor s .

O vetor U_s é usado na função objetivo, que irá variar de acordo com o número de usuários na rede de forma a garantir que os setores estarão balanceados e, portanto, suas respectivas BBUs também. Todos os possíveis U_s para todos os K (setores) serão avaliados para obter o menor valor possível de (KPI_{min}). Este processo envolve reduzir o número de chamadas bloqueadas e para, assim, conseqüentemente maximizar o QoS, visando , como demonstrado na Equação 4.4.

$$KPI_{min} = \sum_{s=1}^k (U_s - HC), \quad (4.4)$$

$$\{0, if(U_s - HC) < 0\} or \{(U_s - HC) if(U_s - HC) \geq 0\}.$$

A saída do modelo sugerido é dada por um vetor $S_j^{i+1} = \{S_1^{i+1}, S_2^{i+1}, \dots, S_N^{i+1}\}$, que representa os setores das BBUs S_j^{i+1} e RRHs que foram alocados para esses setores.

4.3.1 RRH-BBU - simulação

No que se refere a avaliação e implantação de arquitetura C-RAN em cenários de balanceamento de carga, encontra-se poucos artigos na literatura. Sendo assim, será utilizado o mesmo KPI, no qual se obteve métricas aceitáveis de balanceamento para seus usuários.

Neste âmbito, foi realizada uma simulação no NS-3, com objetivo de validar o KPI e extrair novos resultados, comprovando assim a eficácia da solução desenvolvida. A tabela 3 a seguir exhibe os parâmetros utilizados.

Tabela 3 – Parâmetros Simulação

Parâmetros	Valores
Área	1x1 km
Distancia entre RRHs)	500 m
Faixa de potência	Padrão
Pacotes perdidos	Cost231

O cenário que foi aplicado na simulação é composto de um conjunto de 19 RRHs, uma BBU Pool contendo duas BBUs e estas gerenciam três setores cada, de modo que as RRHs estão distribuídas entre 6 setores. A BBU Pool é representada por um conjunto de nós, sendo esses switches do módulo OFSwitch13, de modo a formar as estruturas de tomada de decisão e controle de fluxo inerentes ao modelo de uma BBU Pool.

O tráfego gerado pelos clientes nas RRHs é um fluxo UDP contínuo, e o KPI de chamadas bloqueadas é traduzido para pacotes perdidos na simulação, onde, após excedido o limite de conexões no setor da BBU, os pacotes dos clientes não alocados são perdidos na rede.

De acordo com [42] os valores QCI (QoS Class Identifier), que é QCI é uma ferramenta utilizada nas redes 3GPP *Long Term Evolution* (LTE) para assegurar que dados cheguem ao usuário e que ele receba QoS apropriado. Em rel-8 (13 QCIs rel-12, 15 QCIs rel-14) são padronizados e associados com características QCI em termos de tratamento de encaminhamento de pacotes que o tráfego de portador recebe *edge-to-edge* entre o UE e o P-GW. O QCI utilizado na simulação é voltado para aplicações de voz, tendo como características taxa de erro de pacote 10⁻², delay de pacotes de 100ms, GBR (*Guaranteed Bit Rate*) e prioridade 2 dentre os demais QCIs.

Os fluxogramas a seguir representam os dois modelos-chave do mecanismo de alocação de clientes a setores de BBUs, a Figura. 6 representa o evento de chegada de um pacote na BBU Pool. Primeiramente é analisado se o usuário que gerou este pacote já foi alocado a algum setor, tal análise é uma busca baseada no endereço IP do cliente, procurando se um setor já está associado ao mesmo, sendo assim, o primeiro pacote de todos os clientes deverá passar por um processo de alocação.

Já a Figura.7 representa, conseqüentemente, o seguintes pacotes dos clientes já devem seguir pelos setores estabelecidos e os que não forem alocados vão ter seus pacotes perdidos na rede e irão gerar o gráfico de Pacotes Perdidos, onde, dado que os usuários enviam 2 pacotes por segundo, o resultado esperado é que tenhamos 160 pacotes perdidos por segundo, representando os 80 clientes rejeitados no pior cenário.

Figura 6 – Fluxograma de novo pacote

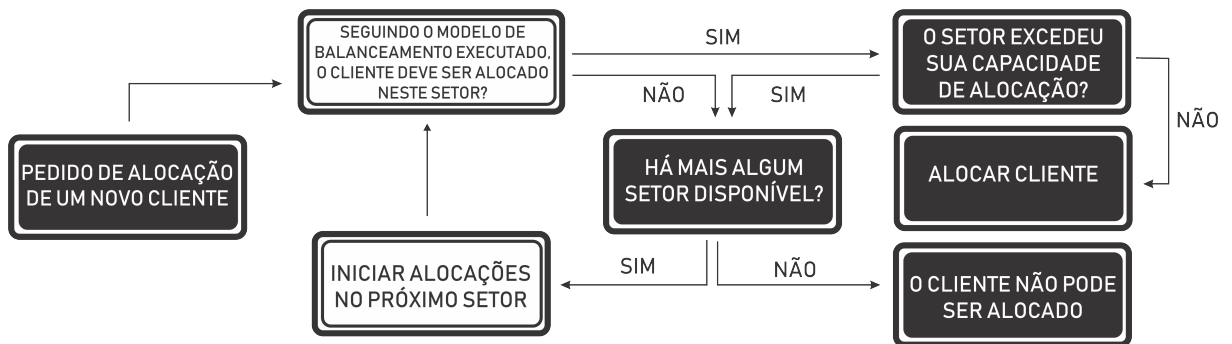
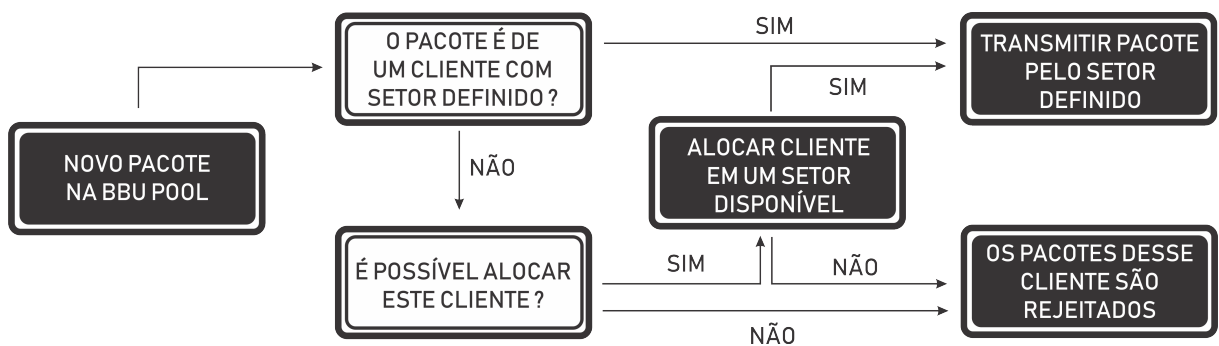


Figura 7 – Fluxograma de alocação do usuário



4.4 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados a formulação do problema, bem como a otimização utilizada nesta dissertação. A técnica de IC - PSO e modelagem foram descritas, visando um melhor esclarecimento a cerca das formulações. No capítulo posterior, são apresentado os resultados obtidos, e a discussão dos mesmos.

5 Resultados

5.1 Considerações iniciais

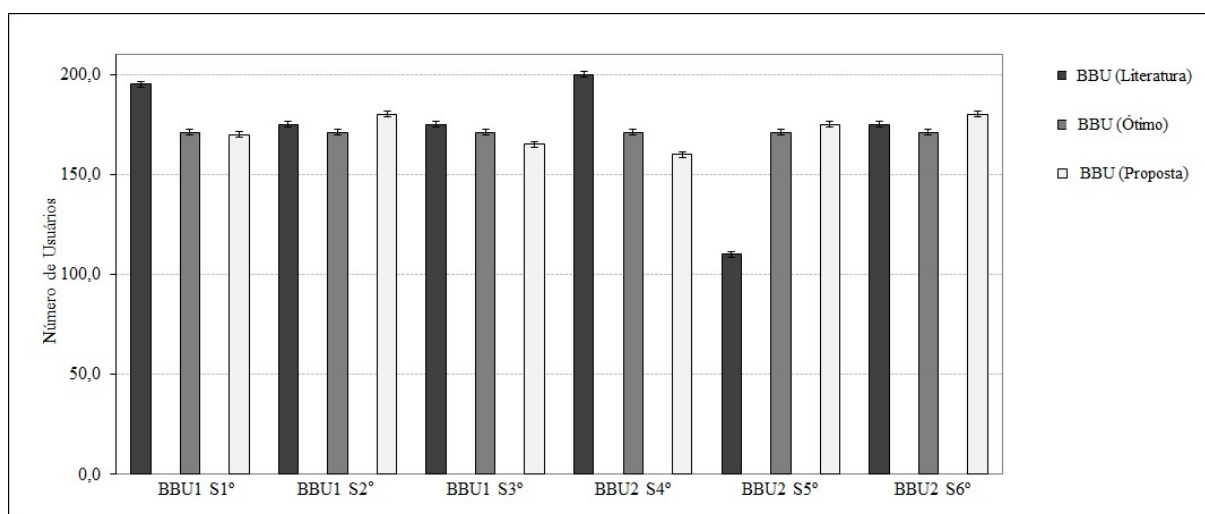
Neste capítulo, é apresentado o cenário utilizado, bem como todos os parâmetros necessários para a implementação do mesmo. Os resultados são divididos em duas sub-seções: a primeira, é voltada ao modelo analítico, no qual são avaliados alguns aspectos, tais como balanceamento de carga nas RRHs e no BBU *pool* e usuários bloqueados. Para fins de *benchmark*, foram implementadas duas novas propostas, uma denominada "Ótima", na qual a carga é dividida de forma uniforme entre os setores da BBU, sem levar em conta a distribuição dos usuários nas RRHs; a outra, denominada de "Literatura", que é apresentada em [6], e serve de base para este trabalho. A segunda parte dos resultados é voltada ao estudo do comportamento das aplicações quando o modelo proposto é utilizado. Esse foi implementado em um simulador de eventos discretos (NS-3) e foram utilizadas medidas tais como atraso, vazão, jitter e perda de pacotes para análise do QoS das aplicações. Nesta etapa, implementou-se apenas a proposta apresentada em [6] para fins de comparação.

5.2 Resultados da Modelagem

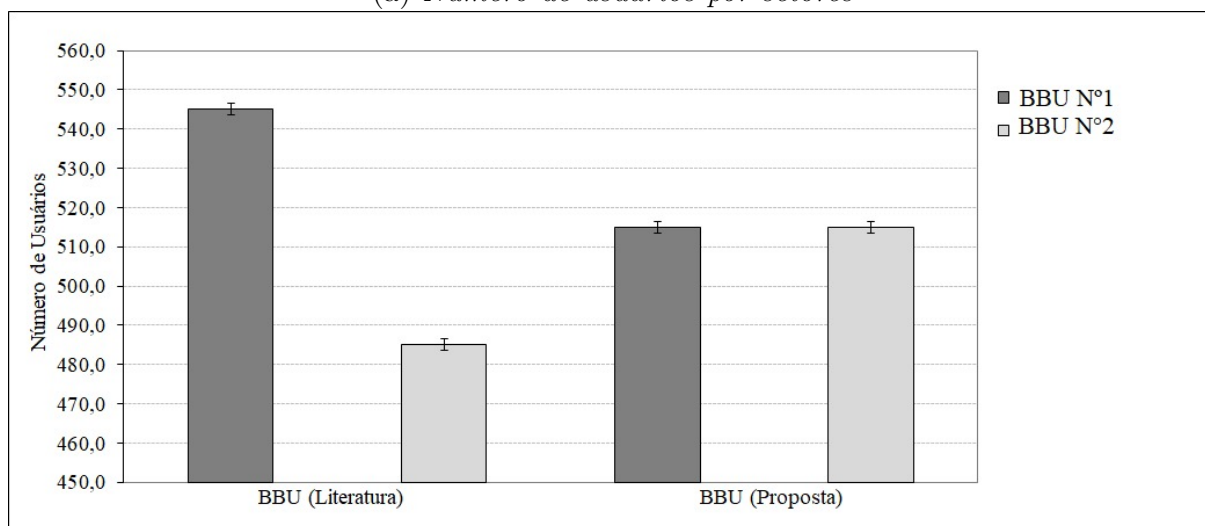
Foi utilizado o cenário proposto em [6] que foi no *software* MATLAB® (do inglês *MATrix LABORatory*) e é composto por 19 RRHs cuja distribuição é disposta aleatoriamente em uma área geográfica de 500x500m. A BBU *pool*, composta por duas BBU's que, por sua vez, possuem três setores cada, é responsável pelo gerenciamento da rede.

A Figura 8 apresenta a carga alocada a cada setor presente dentro de suas respectivas BBU's. Nota-se que o método utilizado na literatura fornece setores sem chamadas bloqueadas, todavia com certa disparidade na alocação de seus usuários. Na primeira BBU, 91% de sua capacidade total e, na segunda, 81%, havendo, assim, um desequilíbrio de 10% entre as BBU's, o que corresponde em um total de 60 chamadas a mais na primeira BBU em relação à segunda, ocasionando em um mapeamento de recursos não otimizado. O modelo proposto consegue, através de sua melhor distribuição dos usuários, equilibrar esta carga, ocupando 85% da capacidade total em cada uma das BBU's, possibilitando, assim, que mais usuários sejam atendidos e, além disso, não gerando estresses desnecessários no hardware destes equipamentos e, com isso, aumentando seu tempo de vida e otimizando o mapeamento.

Figura 8 – Número de Usuário por setor/BBU

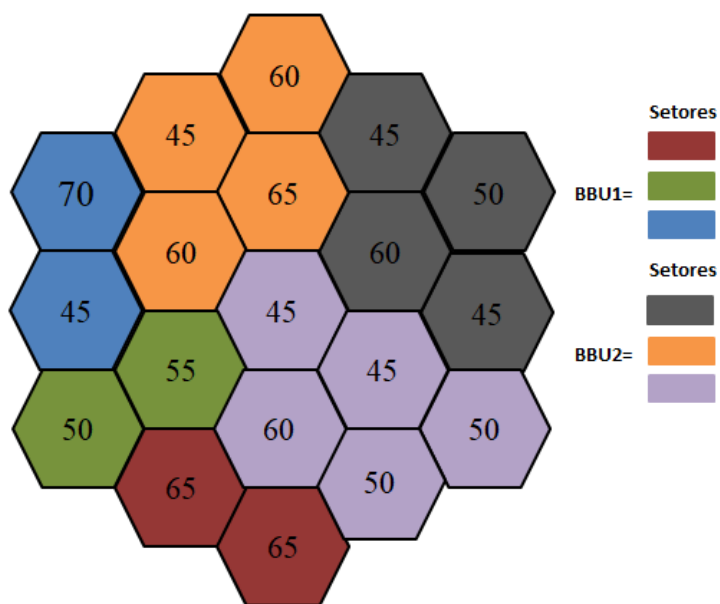


(a) Número de usuários por setores

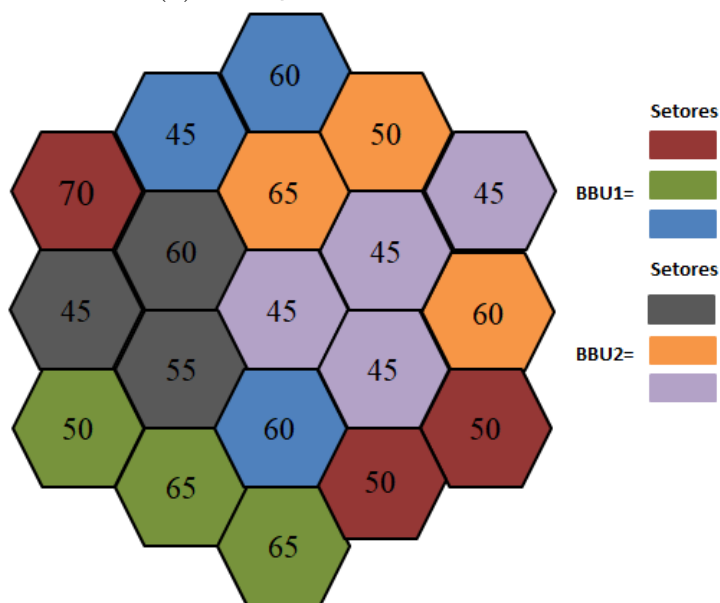


(b) Número de usuário por BBU

Figura 9 – 19 RRHs gerenciadas pro duas BBUs dentro de uma BBU pool, cada BBU lida com 3 setores cada.



(a) Alocação inicial das BBUs



(b) Alocação final das BBUs

Na Tabela 4, são apresentados a média de usuários alocados em cada setor após as 30 repetições. Além disso, é apresentada a variância desta carga. Pode-se observar que a função objetivo proposta consegue balancear os setores e respeitar a restrição do limite de capacidade impostos, diferente da apresentada por [6], que não se preocupa em distribuir as cargas proporcionalmente entre setores.

Tabela 4 – Número médio de usuários

Medidas (n° de usuários)	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Média (lit.)	195	175	175	199	110	174
Variância Padrão (lit.)	0.96	0.65	0.74	0.64	0.65	0.45
Média (proposta)	170	180	164	160	174	180
Variância Padrão (proposta)	0.40	0.36	0.41	0.57	0.70	0.67

A Figura. 9 apresenta o mapeamento entre as RRHs e os setores das BBUs antes e após o modelo proposto ser aplicado. No instante inicial, a figura mostra a distribuição inicial. Após a aplicação do algoritmo evolutivo PSO, temos os setores no tempo final com sua alocação final, que, além de mitigar o número de chamadas bloqueadas, consegue uma distribuição de cargas nos setores e nas BBUs mais igualitária.

Tratar os usuários de maneira homogênea, é pouco realista, uma vez que estes possuem comportamentos diferentes em cada ambiente ou horário de seu acesso. Em horários de trabalho, o uso de recursos de telefonia e de dados é mais elevado do que quando estes estão em um ambiente familiar [44]. Assim, no mesmo cenário, particionou-se as RRH em comerciais e residências e estas possuem cargas diferenciadas. As comerciais irão abranger 30% das antenas e as residenciais os 70% restantes. A carga gerada pelos usuários comerciais foi considerada 10% a mais que as residenciais [45].

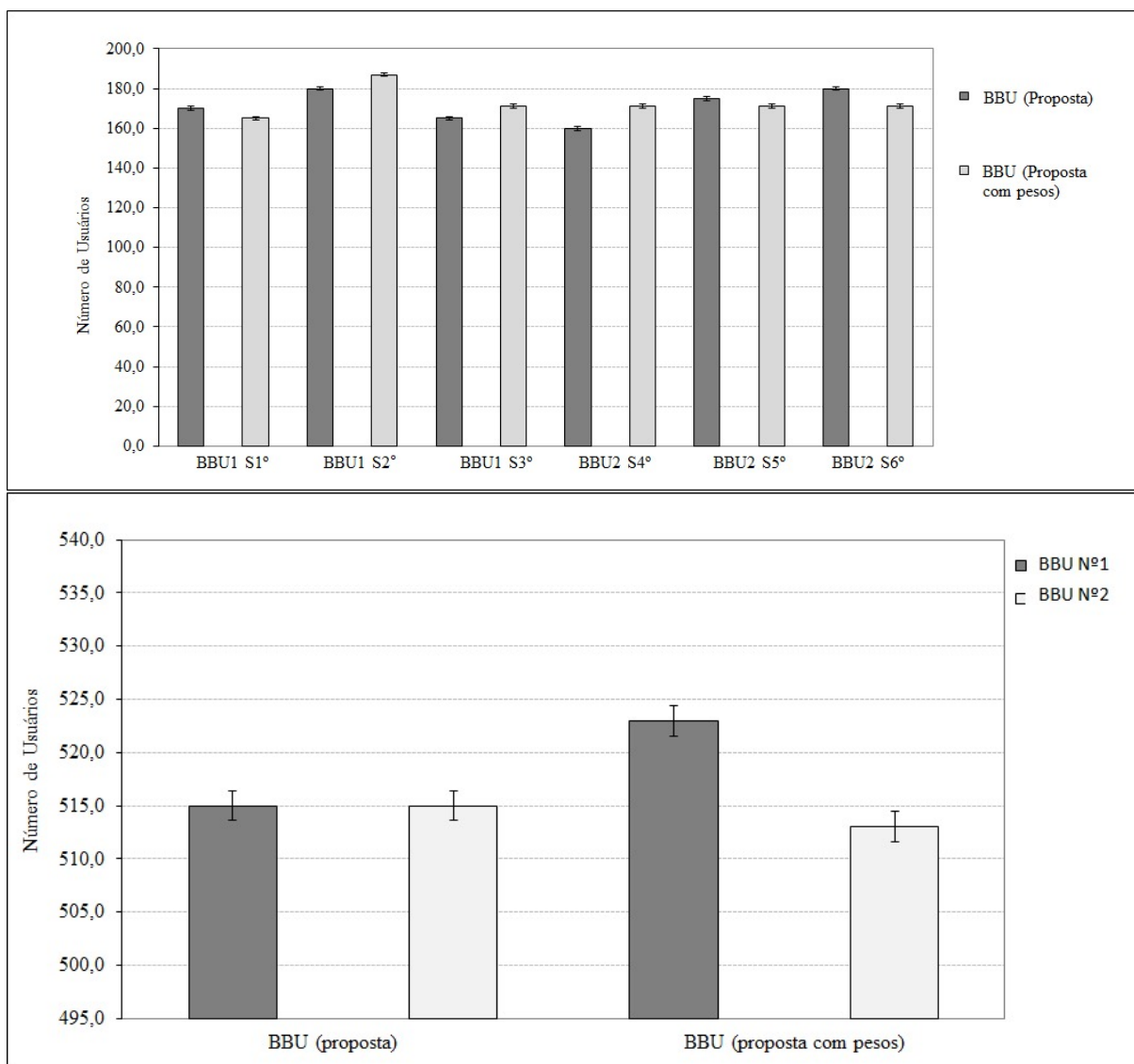
Abaixo na Figura 10, observa-se que a proposta apresentada neste trabalho entrega resultados satisfatórios e consegue atender a todas as restrições, mesmo tendo que lidar com cenários mais robustos. O balanceamento de setores obtido retorna um mapeamento aceitável perante o comparado, em razão de ocupar 89% de carga na primeira BBU e 85% na segunda.

5.2.1 Resultados da Simulação no NS3

Nesta subseção serão mostrados os resultados extraídos da simulação na ferramenta NS3, a fim de comparar as métricas de QoS entre um cenário onde é aplicado o algoritmo de balanceamento proposto neste trabalho e um de *benchmark*. As métricas analisadas envolvem *delay* médio e *jitter* médio e pacotes perdidos.

Ao analisar a Tabela 5, onde os dados expostos são o número total de usuários atendidos e se houve perda de pacotes, já é possível constatar parcialmente a eficácia do balanceamento proposto, pois este é capaz de alcançar maiores taxas de ocupação (con-

Figura 10 – Métricas de QoS



forme constatou-se no item anterior) e sem perdas de pacotes em comparação ao cenário de *benchmark*, que apresentou uma significativa perda, pois devido a má distribuição dos recursos alguns usuarios não conseguiram ser atendidos e seus pacotes foram perdidos.

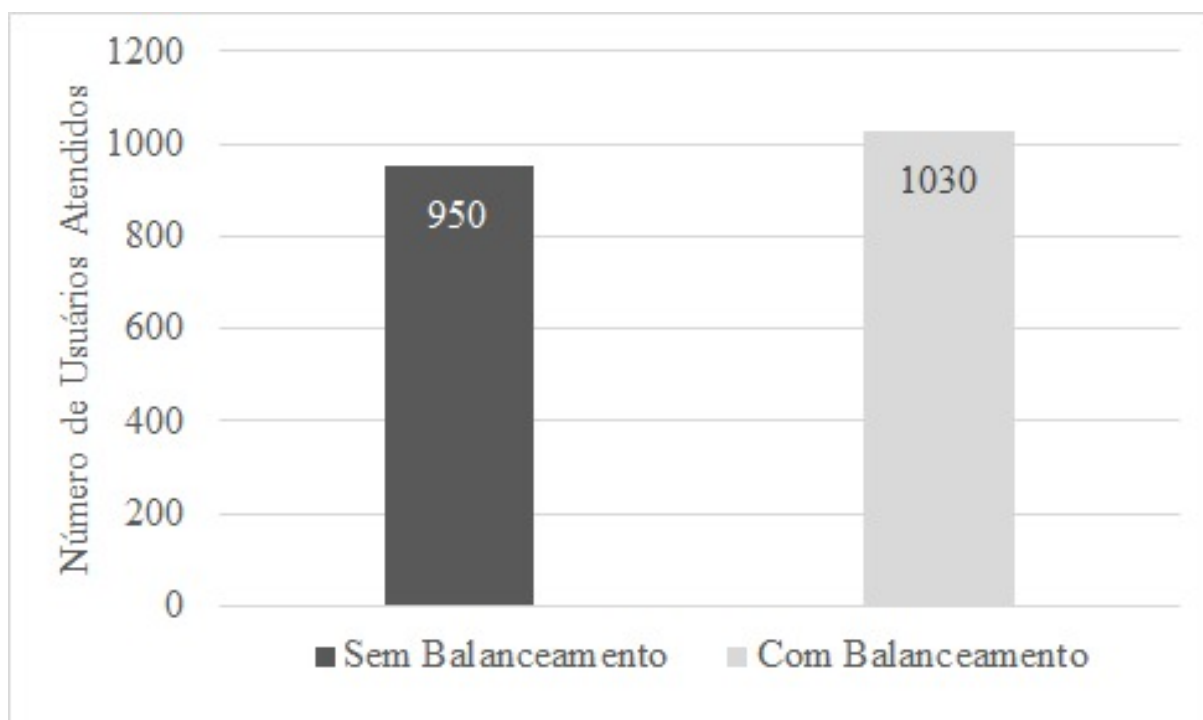
Tabela 5 – Ocupação das BBUs / Pacotes Perdidos

	Sem Balanceamento	Com Balanceamento
% ocupação das BBUs	78.91%	85.83%
Pacotes perdidos	7520	0

Na Figura 11, é apresentado o número de usuários atendidos em ambos os cenários. O modelo proposto tem resultados satisfatórios, pois, além de balancear efetivamente a carga entre as BBUs, mantendoas com uma ocupação de 85.83%, mais usuários conseguem ser alocados (representado 80 usuários a mais na rede), ou seja, uma adição de 8% em

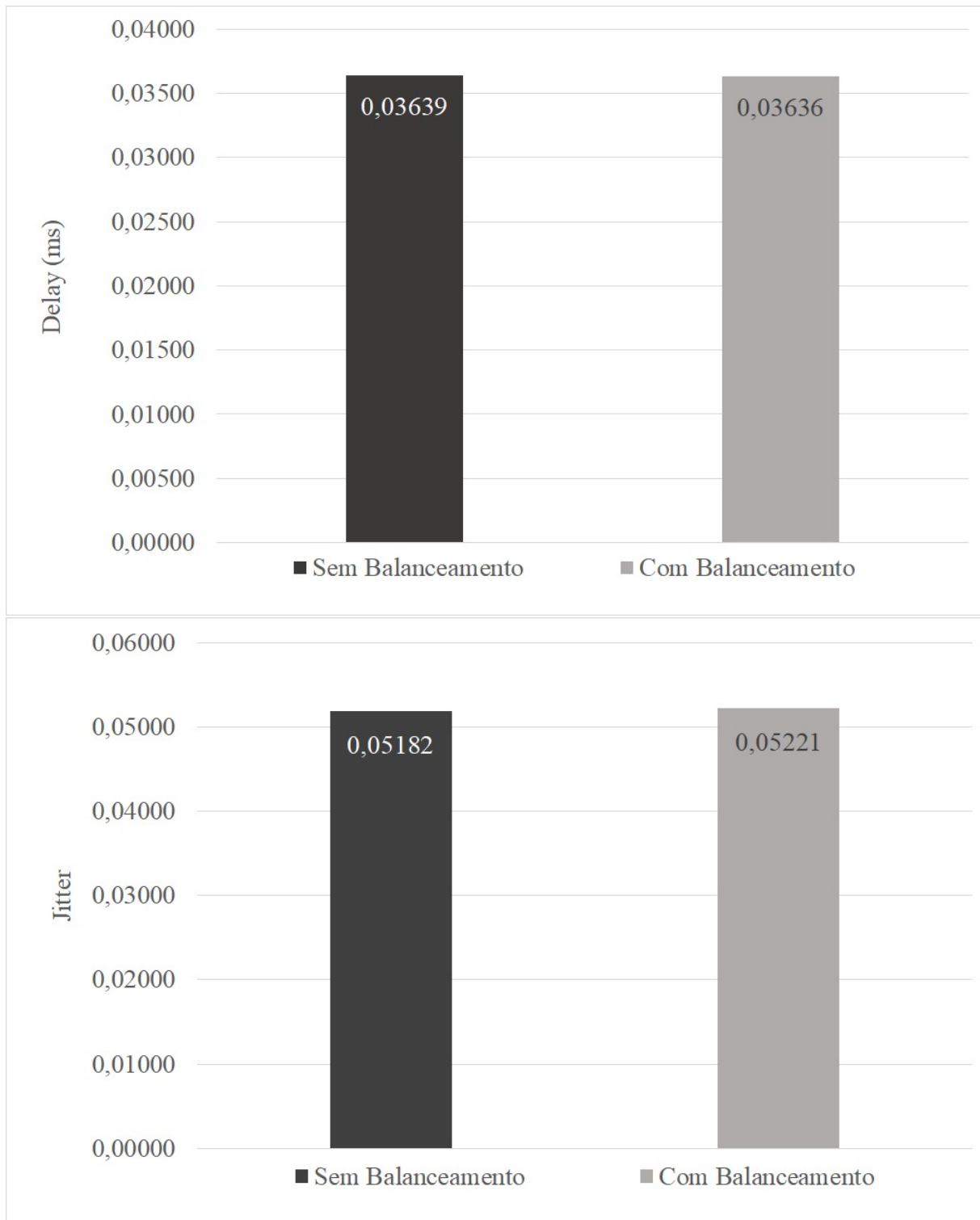
usuários atendidos.

Figura 11 – Usuários Atendidos



Já a Figura 12 mostra o *jitter* e *delay* dos cenários, em que o método de balanceamento proposto obteve seus resultados bem próximos ao cenário sem balanceamento. Percebe-se, então, mesmo que com a adição de novos usuários, o QoS nas aplicações da rede, como um todo, não sofre uma influência significativa, ou seja, sem perdas sensíveis na qualidade oferecida aos usuários.

Figura 12 – Métricas de QoS



5.3 Considerações finais

Os resultados obtidos através da modalegem proposta, entregou resultados superiores em relação ao comparado, conseguindo um melhor balanceamento de carga. A simulação, demonstra a eficácia da fórmula, mesmo em cenários mais realistas.

6 Conclusões

As redes móveis vem passando por constantes mutações, visando sempre maior alcance, maior poder de processamento, capacidade de virtualização e entre outros. Conforme é descrito na literatura, a arquitetura C-RAN é uma possível resposta para sanar várias problemáticas e/ou desafios impostos por essa evolução.

É notório que o uso da C-RAN aumenta a área de cobertura, proporciona mapear seus recursos, centralizar seu processamento tornando a rede assim mais eficiente e com um menor consumo de energia. Entretanto, traz consigo novos desafios, tais como o custo de implantação (pela necessidade de maior uso de fibra ótica), necessidade de novas tecnologias para atender a requisitos tão estritos de QoS, mapeamento entre RRHs e BBUs para atendimento inteligente, entre outros.

Assim, afim de agregar esclarecimento aos meios científicos e empresariais para essa tecnologia, este trabalho procurou aprofundar a discussão sobre o processo de mapeamento e reconfiguração da C-RAN, através do estudo e aperfeiçoamento de uma proposta proeminente da literatura. Este estudo estabeleceu um novo sistema para modelar o problema que foi implementado através de um algoritmo de otimização de partículas Swarm (PSO).

O PSO pôde convergir mais rapidamente e com menos iterações do que o algoritmo recomendado no [6]. Além de otimizar o QoS, ele pode alcançar um equilíbrio justo nos setores da BBU-RRH. Através dos resultados, observou-se um melhor desempenho do que o apresentado em [6], mesmo em diferentes cenários de carga. Perante ao exposto, foi atestado a eficácia da solução proposta, tanto na modelagem como na simulação, pois o seu comportamento mostrou que, mesmo em cenários mais complexos, consegue otimizar o uso dos recursos e, assim, maximizar o QoS dos usuários finais.

6.1 Contribuições do Trabalho

Levantamento bibliográfico minucioso acerca dos temas envolvidos nesta proposta de dissertação, tais como 5G, mapeamento RRH-BBU, otimização combinatória, PSO e avaliação de desempenho.

As elaborações de relatórios técnicos para auxiliar o desenvolvimento de pesquisas de iniciação científica;

A divulgação de trabalhos em conferências nacionais e internacionais, conforme

listado abaixo:

1. DA PAIXÃO, Ermínio Augusto Ramos et al. Optimized load balancing by dynamic BBU-RRH mapping in C-RAN architecture. In: Fog and Mobile Edge Computing (FMEC), 2018 Third International Conference on. IEEE, 2018. p. 100-104.
2. FOGAROLLI, RAFAEL.; PAIXAO, E.; SOUZA, D. S.; ARAUJO, W. V.; CARDOSO, D.L. Mapeamento BBU-RRH Utilizando Algoritmo Bat In: VIII CONFERÊNCIA NACIONAL EM COMUNICAÇÕES, REDES E SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO, 2018, Salvador.
3. PEREIRA, HENRIQUE.; PAIXAO, E.; CARDOSO, D.L. Simulação de arquiteturas C-RAN no NS-3: Dificuldades e Experiências In: XXXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, Campina Grande.

6.2 Trabalhos Futuros

Com a finalidade de evoluir esse trabalho, há varias alterações e melhorias que podem ser aplicadas, a saber:

- Há a necessidade de explorar e analisar outras medidas de desempenho, que podem afetar o balanceamento de carga nas redes;
- Adicionar indicadores de desempenho que possam ser medidos e avaliados, como o comportamento de aplicações para o usuário final.
- Utilizar novos algoritmos bioinspirados, de modo a avaliar a melhor técnica para balanceamento.

6.3 Dificuldades Encontradas

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

- Falta de tecnologias implantadas, para obter os requisitos mínimos para uma simulação do cenário 5G, visto que é uma rede que está em desenvolvimento;
- Executar o algoritmo, dentro dos parâmetros do cenário usado e simular um cenário que ainda não tem padronização;
- Alto poder computacional e extensas simulações, que requereram um tempo elevado;
- Dificuldades no processo de desenvolvimento da escrita desta dissertação.

Referências

- [1] Ericsson. "**Ericsson mobility report 2018.**"white paper, 2018.
- [2] Cisco Visual Networking Index: **Global Mobile Data Traffic Forecast Update**, 2016-2021. Cisco, 2017.
- [3] ZHANG, Ran et al. **Resource Management in Sustainable Green HetNets with Renewable Energy Sources**. In: 5G Mobile Communications. Springer, Cham, 2017. p. 503-529.
- [4] Ericsson, *Ericsson's fiber fronthaul solution deployed for China Mobile's LTE C-RAN*,http://www.ericsson.com/news/140707-ericssons-fiber-fronthaul-solutiondeployed_244099436_c, Novembro, 2017.
- [5] C. Specification, V4. 2(2010-09-29). **Ericsson AB, Huawei Technol. Co Ltd, NEC Corp.**, 2009.
- [6] Khan, M.; Alhumaima, R. S.; Al-Raweshidy, H. S. **Quality of service aware dynamic BBU-RRH mapping in cloud radio access network**. In: Emerging Technologies (ICET), 2015 International Conference on. IEEE, 2015. p. 1-5.
- [7] WU, Jun et al. **Cloud radio access network (C-RAN): a primer**. **IEEE Network**, v. 29, n. 1, p. 35-41, 2015.
- [8] PENG, Mugen et al. **Energy-efficient resource assignment and power allocation in heterogeneous cloud radio access networks**. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 64, n. 11, p. 5275-5287, 2015.
- [9] SATUF, Ivan. **Jornalismo móvel: da prática à investigação acadêmica. Jornalismo para dispositivos móveis. Produção, distribuição e consumo**. Covilhã: Livros LabCom, 2015. [10] BABA, Majid Irfan et al. **Evolution of Mobile Wireless Communication Systems from 1G to 5G: A Comparative Analysis**. 2018.
- [11] MOREIRA, Martha Miranda. **5G–Evolução, MIMO massivo, be-**

amforming e formas de onda. 2018.

[12] VIEIRA, Deborah Luisa Detânico. **Planejamento da cobertura de redes móveis de quarta geração através de metaheurística híbrida.** 2017.

[13] MONSERRAT, Jose F. et al. **Rethinking the mobile and wireless network architecture: The METIS research into 5G.** In: Networks and Communications (EuCNC), 2014 European Conference on. IEEE, 2014. p. 1-5.

[14] BOCCARDI, Federico et al. **Five disruptive technology directions for 5G.** IEEE Communications Magazine, v. 52, n. 2, p. 74-80, 2014.

[15] ALLIANCE, N. G. M. N. 5G white paper. **Next generation mobile networks,** white paper, p. 1-125, 2015.

[16] AKPAKWU, Godfrey Anuga et al. **A survey on 5G networks for the Internet of Things: Communication technologies and challenges.** IEEE Access, v. 6, p. 3619-3647, 2018.

[17] F. Boccardi et al, “**Five disruptive technology directions for 5G,**” IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, 2014.

[18] Next Generation Mobile Networks Alliance, “**NGMN 5G White Paper,**” White Paper, 2015. Available: <https://www.ngmn.org>.

[19] PANWAR, Nisha; SHARMA, Shantanu; SINGH, Awadhesh Kumar. **A survey on 5G: The next generation of mobile communication.** Physical Communication, v. 18, p. 64-84, 2016.

[20] A. Gupta, R. K. Jha: **Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,** pp 1206-1232, vol3, and 2015.

[21] MOBILE, China. **C-RAN: the road towards green RAN.** White Paper, ver, v. 2, p. 1-10, 2011.

[22] Chen, Na et al. **Self-organizing scheme based on NFV and SD-Narchitecture for future heterogeneous networks.** Mobile Networks and Applications, v. 20, n. 4, p. 466-472, 2015.

- [23] Pinheiro, A. B., et al. *Uma abordagem SDN para virtualização de redes*. 2016.
- [24] LI, Yong; CHEN, Min. **Software-defined network function virtualization: A survey**. *IEEE Access*, v. 3, p. 2542-2553, 2015.
- [25] PIRO, Giuseppe; BALDO, Nicola; MIOZZO, Marco. **An LTE module for the ns-3 network simulator**. In: **Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques**. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2011. p. 415-422.
- [26] BILALB, Sardar M. et al. **A performance comparison of network simulators for wireless networks**. arXiv preprint arXiv:1307.4129, 2013.
- [27] Chen, Na et al. **Self-organizing scheme based on NFV and SDN architecture for future heterogeneous networks**. *Mobile Networks and Applications*, v. 20, n. 4, p. 466-472, 2015.
- [28] RAN, C.; WANG, Shaowei; WANG, Chonggang. *Balancing backhaul load in heterogeneous cloud radio access networks*. *IEEE Wireless Communications*, v. 22, n. 3, p. 42-48, 2015.
- [29] KHAN, Muhammad; ALHUMAIMA, Raad S.; AL-RAWESHIDY, Hamed S. **QoS-aware dynamic RRH allocation in a self-optimized cloud radio access network with RRH proximity constraint**. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, v. 14, n. 3, p. 730-744, 2017.
- [30] WU, Jun et al. **Cloud radio access network (C-RAN): a primer**. *IEEE Network*, v. 29, n. 1, p. 35-41, 2015.
- [31] CHEN, Yuh-Shyan; CHIANG, Wen-Lin; SHIH, Min-Chun. **A dynamic BBU-RRH mapping scheme using borrow-and-lend approach in cloud radio access networks**. *IEEE Systems Journal*, v. 12, n. 2, p. 1632-1643, 2018.
- [32] YAO, Jingjing; ANSARI, Nirwan. **QoS-aware Joint BBU-RRH Mapping and User Association in Cloud-RANs**. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2018.
- [33] KHAN, M.; FAKHRI, Zainab H.; AL-RAWESHIDY, Hamed S. **Semis-**

tatic Cell Differentiation and Integration With Dynamic BBU-RRH Mapping in Cloud Radio Access Network. IEEE Transactions on Network and Service Management, v. 15, n. 1, p. 289-303, 2018.

[34] LIU, Liang; ZHANG, Rui. **Downlink SINR balancing in C-RAN under limited fronthaul capacity.** In: Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2016 IEEE International Conference on. IEEE, 2016. p. 3506-3510.

[35] HSU, Ching-Kuo et al. **Data offloading for dynamic point selection in cloud radio access networks (C-RAN).** In: Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2018 IEEE. IEEE, 2018. p. 1-6.

[36] Chaves, L., Garcia, I., Madeira, E., ***OFSwitch13: Viabilizando o uso o OpenFlow 1.3 no ns-3.***, Junho, 2016.

[37] GOLDBARG, Elizabeth. Titulo: **Otimização combinatória e metaheurísticas: algoritmos e aplicações:** Elsevier Editora Ltda. 27 de setembro de 2017.

[38] RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. **Artificial intelligence: a modern approach.**Malaysia; Pearson Education Limited,, 2016.

[39] LUZIA, L.; RODRIGUES, M. **Introdução ao Escalonamento e Aplicações: Estudo sobre as Metaheurísticas.** São Paulo, SP: Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo, 2009.

[40] EBERHART, Russell; KENNEDY, James. **A new optimizer using particle swarm theory.** In: **Micro Machine and Human Science**, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on. IEEE, 1995. p. 39-43.

[41] CHENG, Xiao et al. **Uplink resource allocation for trade-off between throughput and fairness in C-RAN-based neighborhood area network.** In: NOMS 2018-2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. IEEE, 2018. p. 1-6.

[42] 3GPP TS 23.203, ***3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control architecture***,[http://http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/23203-890.pdf](http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/23203-890.pdf), Março, 2010.

- [43] DE MELO, Lucas Santos et al. **ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS FOTOVOLTAICOS-UMA ABORDAGEM DIDÁTICA**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018. [44] Holm, Henrik et al. Optimal assignment of cells in C-RAN deployments with multiple BBU pools. In: Networks and Communications (EuCNC), 2015 European Conference on. IEEE, 2015. p. 205-209.
- [45] Ran, Chen; Wang, Shaowei; Wang, Chonggang. **Optimal load balancing in cloud radio access networks**. In: Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015 IEEE. IEEE, 2015. p. 1006-1011.