



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

LÁSZLON RODRIGUES DA COSTA

ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO EM REDES
MULTICELULARES E DE MULTISSERVIÇOS COM RESTRIÇÕES DE
QoS

SOBRAL

2016

LÁSZLON RODRIGUES DA COSTA

ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO EM REDES MULTICELULARES E DE
MULTISSERVIÇOS COM RESTRIÇÕES DE QoS

Tese ou Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação do *Campus* de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de concentração: Sistemas de Comunicação.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima.

SOBRAL

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C873a Costa, Lászlón Rodrigues da.
Alocação de recursos de rádio em redes multicelulares e de multisserviços com restrições de QoS /
Lászlón Rodrigues da Costa. – 2016.
87 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e de Computação, Sobral, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima.
1. Alocação de recursos de rádio. 2. Gerência de interferência. 3. Qualidade de serviço. I. Título.
CDD 621.3
-

LÁSZLON RODRIGUES DA COSTA

ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO EM REDES MULTICELULARES
E DE MULTISSERVIÇOS COM RESTRIÇÕES DE QoS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Ceará, *Campus* Sobral, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de concentração: Sistemas de Comunicação.

Aprovada em: 05/08/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Vicente Ângelo de Sousa Júnior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Aos meus pais e irmão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Juscelino Gomes da Costa e Lucielida Rodrigues da Costa, por me apoiarem nas realizações dos meus sonhos. Agradeço por todos seus ensinamentos e valores morais. Também agradeço ao meu irmão, Lucas Rodrigues da Costa. Sou grato por todo amor incondicional de vocês.

Ao Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima, meu orientador. Meus agradecimentos por todo o suporte, incentivo, confiança, orientações tanto profissional quanto pessoal e as oportunidades que me deu. Agradeço por compartilhar conhecimento, pela ajuda e paciência que me permitiu concluir esta dissertação de mestrado.

Aos membros que aceitaram participar da banca dessa dissertação Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior e Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva.

Agradeço ao Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva que durante o período deste mestrado me acompanhou nos trabalhos do UFC 42. Aos participantes do UFC 42, Darlan Cavalcante, Rafael Guimarães, Khaled, Eduardo e professor Walter, agradeço pelo convívio e discussões que contribuíram para meu crescimento profissional.

Aos meus amigos do GTEL e de pós-graduação Weskley Vinicius, Alexandre Matos, Yuri Carvalho, Marciel Barros, Raphael Braga, Matheus Nascimento, Alexandre Albano, Diego Aguiar, Victor Farias, Daniel Araújo, Igor Guerreiro, Fazal Asim, Hugo Costa, Marcio Caldas, Samuel Valduga, Carlos Filipe, José Mairton e Allysson Alex, com quem compartilhei momentos de tensão e risadas.

Ao GTEL, grupo de pesquisa que tive oportunidade e orgulho de participar. A UFC, pelos professores com alto nível de capacitação e conhecimento. E por fim, agradeço a FUNCAP pelo suporte financeiro durante a produção deste trabalho.

A todos minha sincera gratidão.

“The highest reward for a man’s toil is not what he gets for it but what he becomes by it”. John Ruskin

RESUMO

A popularização das comunicações móveis têm aumentado as exigências de QoS (do inglês, *Quality of Service*). Redes modernas oferecem diferentes tipos de serviços com necessidades não homogêneas que devem ser consideradas para uma distribuição justa dos recursos de rádio disponíveis no sistema. Para atender grandes demandas de tráfego, uma das principais técnicas para a próxima geração de comunicação móvel é a densificação de PAs (Pontos de Acesso). Esta técnica tem como objetivo o aumento na disponibilidade de canais de comunicação por área através da diminuição da distância entre APs. Porém com a densificação, a interferência gerada no sistema se mostra um dos principais limitantes e seu gerenciamento deve ser feito de forma adequada. Este trabalho propõe soluções ótimas para distribuição de PRB (do inglês, *Physical Resource Block*) com o objetivo de maximizar a soma da taxa de dados total de um sistema multicelular com múltiplos serviços e restrições que assegurem um percentual mínimo de usuários satisfeitos para cada serviço. A natureza deste tipo de problema tende a privilegiar usuários com melhores qualidades de canais, levando a obtenção de baixas taxas de dados para terminais próximo a borda da área de cobertura em células hexagonais. A formulação proposta permite que os mesmos critérios de qualidade sejam alcançados na borda da célula. Também é proposta uma variação para problemas em redes com geometria estocástica. Devido a complexidade exponencial das soluções ótimas dos problemas estudados é proposta uma solução heurística de baixa complexidade com uma perda de desempenho reduzida quando comparada a solução ótima.

Palavras-chave: Alocação de Recursos de Rádio, Gerência de interferência e Qualidade de Serviço.

ABSTRACT

The popularization of mobile communications leads to the continuous increase of Quality of Service (QoS) demands. Modern networks offer many services types that need to be considered to a fair distribution of the available radio resources. One of the main strategies of the next generation of mobile communications in order to deal with that traffic increase is the densification of Access Points (PA). This approach consists in reducing the distances between transmitters and receivers in order to maximize the available channels per area. However, the PA densification also comes with a drawback: the increase in the interference that should be appropriately managed. This work proposes an optimal solution to the Physical Resource Block (PRB) distribution in order to maximize the sum rate in a multicell and multiservice system and constrained to a percentage of users that should be satisfied per service. The nature of this kind of problem usually gives priority for terminals in better channel qualities that leads to an unfair solution to terminals in the edge of hexagonal cells. The proposed formulation allows that the same criteria of quality can be applied in the edge of cell. A variation of this problem considering stochastic geometry is also proposed with small performance loss. Because of optimal solutions complexity, this work proposes a low complexity heuristic solution with reduced loss performance.

Keywords: Radio Resource Allocation, Interference Management and Quality of Service.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desafios do 5G, métodos e projetos para 5G	18
Figura 2 – Ilustração da multiplexação OFDM.	19
Figura 3 – Arquitetura C-RAN.	28
Figura 4 – 12 PAs servindo células com 200 metros de raio em um grid hexagonal.	29
Figura 5 – 20 usuários (círculos vermelhos) e 40 PAs (triângulos azuis e cinzas) posicionados aleatoriamente em uma área de 1000 x 1000 metros.	31
Figura 6 – Rede com geometria hexagonal e divisões entre o centro e borda das células.	33
Figura 7 – Fluxograma do algoritmo de redução usuários.	42
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo para realocação de PRBs.	44
Figura 9 – Fluxograma da heurística completa proposta.	49
Figura 10 – Taxa de <i>outage</i> para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com uma célula.	53
Figura 11 – Taxa de <i>outage</i> para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com duas células.	54
Figura 12 – FDAs da soma da taxa de dados dos métodos “ótimo proposto”, “heurística proposta” e RAISES no cenário hexagonal com 2 células e exigências de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.	55
Figura 13 – Médias de usuários satisfeitos localizados no centro e na borda das células dos métodos “sem duplicação de serviços” e “ótimo proposto” no cenário com duas células.	56
Figura 14 – Taxa de <i>outage</i> para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com três células.	57
Figura 15 – FDA da soma da taxa de dados dos métodos “ótimo proposto”, “heurística proposta” e RAISES no cenário hexagonal com 3 células e exigências de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.	58
Figura 16 – Médias de usuários satisfeitos localizados no centro e na borda das células dos métodos “sem duplicação de serviços” e “ótimo proposto” no cenário com três células.	59
Figura 17 – Taxa de <i>outage</i> do “ótimo proposto” para cenário com geometria estocástica e com 1, 2, 3, 4 e 5 células.	61
Figura 18 – Taxa de <i>outage</i> para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com três células no cenário com geometria estocástica.	62
Figura 19 – FDA da soma da taxa de dados dos métodos “ótimo proposto”, “heurística proposta” e RAISES no cenário com 3 células, geometria estocástica e exigências de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.	63

- Figura 20 –Taxa de *outage* para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com cinco células no cenário com geometria estocástica. 64
- Figura 21 –FDAs da soma da taxa de dados dos métodos “ótimo proposto”, “heurística proposta” e RAISES no cenário com 5 células, geometria estocástica e exigências de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps. 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limiar de SINR para adaptação de enlace.	26
Tabela 2 – Parâmetros da simulação células hexagonais.	52
Tabela 3 – Percentual de degradação da soma da taxa de dados no 50º percentil em relação ao ótimo para a “heurística proposta” e RAISES no cenário com duas células.	56
Tabela 4 – Percentual de degradação da soma da taxa de dados no 50º percentil em relação ao ótimo para a “heurística proposta” e RAISES no cenário com três células.	59
Tabela 5 – Parâmetros da simulação geometria estocástica.	60
Tabela 6 – Percentual de degradação da soma da taxa de dados no 50º percentil em relação ao ótimo para a “heurística proposta” e RAISES no cenário com geometria estocástica e três células.	62
Tabela 7 – Percentual de degradação da soma da taxa de dados no 50º percentil em relação ao ótimo para a “heurística proposta” e RAISES no cenário com geometria estocástica e cinco células.	65
Tabela 8 – Descrição dos parâmetros utilizados nos algoritmos.	72
Tabela 9 – Complexidade computacional de cada passo do algoritmo de remoção de usuários descrito na Figura 7.	76
Tabela 10 – Complexidade computacional de cada passo do algoritmo de realocação de PRBs descrito na Figura 8.	79
Tabela 11 – Complexidade computacional de cada passo da heurística proposta descrito na Figura 9.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Quinta Geração
AMPS	do inglês, <i>Advanced Mobile Phone System</i>
PA	Ponto de Acesso
BB	do inglês, <i>Branch and Bound</i>
BLER	do inglês, <i>Block Error Rate</i>
C-RAN	do inglês, <i>Cloud-Radio Access Network</i>
CDMA	do inglês, <i>Code Division Multiple Access</i>
EDGE	do inglês, <i>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</i>
ERB	Estação Rádio Base
FDA	Função de Densidade Acumulada
FDM	do inglês, <i>Frequency Division Multiplexing</i>
GPRS	do inglês, <i>General Packet Radio Services</i>
GRR	Gerência de Recurso de Rádio
GSM	do inglês, <i>Global Systems for Mobile communications</i>
ILP	do inglês, <i>Integer Linear Program</i>
IP	do inglês, <i>Internet Protocol</i>
LP	do inglês, <i>Linear Program</i>
LTE	do inglês, <i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	do inglês, <i>Long Term Evolution - Advanced</i>
MCS	do inglês, <i>Modulation and Coding Scheme</i>
METIS	do inglês, <i>Mobile and Wireless Communications Enablers For The Twenty-Twenty Information Society</i>
MIMO	do inglês, <i>Multiple Input Multiple Output</i>
NMT	do inglês, <i>Nordic Mobile Telephone</i>
OFDM	do inglês, <i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OFDMA	do inglês, <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PRB	do inglês, <i>Physical Resource Block</i>
QoE	do inglês, <i>Quality of Experience</i>
QoS	do inglês, <i>Quality of Service</i>
RAISES	do inglês, <i>Reallocation-based Assignment for Improved Spectral Efficiency and Satisfaction</i>
SINR	do inglês, <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SNR	do inglês, <i>Signal to Noise Ratio</i>
SMS	do inglês, <i>Short Message Service</i>
SRS	do inglês, <i>Sounding Reference Signal</i>
TACS	do inglês, <i>Total Access Communication System</i>
TDD	do inglês, <i>Time Division Duplexing</i>

TDMA	do inglês, <i>Time Division Multiple Access</i>
TTI	do inglês, <i>Transmission Time Interval</i>
UBB	Unidade Banda Base
UMTS	do inglês, <i>Universal Mobile Telecommunications Systems</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Fundamentação teórica	16
1.1.1	Comunicações móveis além de 2020	16
1.1.2	OFDMA	17
1.1.3	Gerência de recursos de rádio	19
1.2	Estado da arte	20
1.3	Objetivos da dissertação e contribuições	22
1.3.1	Produções científicas	23
1.3.2	Organização da dissertação	24
2	METODOLOGIA E MODELAGEM DO SISTEMA	24
2.1	Modelagem do sistema de comunicação sem fio	24
2.2	Interface enlace para sistêmica	26
2.3	Cenários com múltiplas células	27
2.3.1	C-RAN	27
2.3.2	Geometria hexagonal	29
2.3.3	Geometria estocástica	30
3	ALOCAÇÃO DE PRB EM SISTEMAS COM MÚLTIPLAS CÉLULAS	31
3.1	Formulação dos problemas	31
3.1.1	Geometria hexagonal	32
3.1.2	Geometria estocástica	34
3.1.3	Caracterização das soluções ótimas	35
3.1.3.1	<i>Geometria hexagonal</i>	36
3.1.3.2	<i>Geometria estocástica</i>	38
3.2	Heurística de baixa complexidade computacional	40
4	RESULTADOS	50
4.1	Considerações gerais	50
4.2	Geometria hexagonal	52
4.3	Geometria estocástica	60
5	CONCLUSÕES DA DISSERTAÇÃO	65
5.1	Trabalhos Futuros	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE A – COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL DA HEURÍSTICA PROPOSTA	72

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as comunicações móveis passaram de simples serviços de chamadas de voz totalmente baseada em circuitos analógicos para tecnologias digitais que proporcionam taxas de dados com centenas de megabits por segundo e servem uma grande diversidade de dispositivos móveis inteligentes como *smartphones*, *tablets* e *laptops*. Nesse contexto as funcionalidades das redes móveis têm se diversificado, resultando em um acréscimo exponencial na demanda de tráfego de dados [1]. Segundo as previsões do relatório [2], divulgado pela Ericsson em Junho de 2015, o número de *smartphones* em uso no mundo será mais que o dobro em 2020. Entre os anos de 2014 e 2015 foi constatado um aumento de 55% no tráfego de dados móvel e, segundo as previsões do relatório, em 2020, 80% do tráfego móvel será apenas de *smartphones*. A transmissão de vídeos online é apontada como um fator chave de crescimento, representando 60% do tráfego total da rede móvel em 2020.

Para atender esta crescente demanda, as operadoras devem garantir que suas redes suportem o aumento do tráfego de dados, o que tem se mostrado cada vez mais desafiador. O desenvolvimento de novas estratégias para suprir o aumento da demanda de tráfego de dados estão em consonância com o desenvolvimento das redes móveis 5G.

O aumento da capacidade de uma rede celular pode ser alcançado por três métodos: empregar mais espectro de frequência, melhorar a camada física do sistema ou melhorar a arquitetura da rede celular. O espectro de frequência é escasso, além do fato de que seu aumento pode ser custoso para as operadoras, que devem enfrentar entraves burocráticos para concessão de mais bandas de frequência. Melhorias na camada física, como novos esquemas de codificação e modulação, transmissão e recepção ou mesmo técnicas de múltiplos acesso estão chegando cada vez mais próximos do limite teórico da eficiência espectral. Sendo assim, melhorias na arquitetura da rede se mostram como um dos principais meios para melhorar o desempenho das tecnologias de comunicações para a próxima geração [3].

Um método para aumentar a capacidade e atender grandes volumes de tráfego, tal qual ocorre em regiões muito populosas, consiste em diminuir a distância entre os PAs. Considerando uma densidade de usuários fixa, essa técnica garantirá que os PAs servirão um número menor de terminais móveis e necessitarão de menos recursos de rádio. Neste método há mais recursos de rádio disponíveis por área, ou seja, é possível maior reuso de recursos em toda a rede aumentando sua capacidade de tráfego. A densificação é uma das principais linhas de pesquisa para o 5G (Quinta Geração) [3].

Apesar destas vantagens, a densificação de PAs apresenta desafios envolvendo gerência de interferência e carga de sinalização. Uma rede com distâncias entre PAs reduzidas também implica em efeitos de perda de percurso menores, tornando comum casos em que o sinal de interferência tenha a mesma ordem de grandeza do sinal útil ou

de interesse. Além disso, usuários localizados nas bordas das células, quando comparados a usuários próximos ao centro das células, tendem a receber maior interferência e potência de interesse mais fraca, requisitando assim, uma atenção especial. Portanto, a distribuição de recursos deve ser cuidadosamente planejada e executada de forma a combater os efeitos colaterais de densificação de PAs.

Uma forma de garantir uma boa gestão global de recursos na rede é através de alguma entidade central que, com total conhecimento dos requisitos e recursos do sistema, gereencie a rede baseado nas necessidades dos usuários e recursos disponíveis. Neste cenário esta dissertação aborda aspectos de gerência global de rede móvel em cenários com múltiplas células.

1.1 Fundamentação teórica

1.1.1 Comunicações móveis além de 2020

As comunicações sem fio modernas tiveram início com o trabalho pioneiro Guglielmo Marconi, um físico e inventor italiano que conseguiu transmitir a letra S por mais de três quilômetros usando código Morse e ondas eletromagnéticas [1]. Desde então as comunicações sem fio passaram por diversos aperfeiçoamentos. Mais especificamente a evolução das comunicações móveis até então é subdividida em 4 gerações [1]:

- **1G**: A primeira geração utiliza tecnologia analógica. Apresenta baixa capacidade e problemas de segurança. Anunciada no início dos anos 80, os principais padrões dessa tecnologia foram AMPS (do inglês, *Advanced Mobile Phone System*), NMT (do inglês, *Nordic Mobile Telephone*) e TACS (do inglês, *Total Access Communication System*) [4].
- **2G**: Introduzida nos anos 90 marcou o início do uso de tecnologia digital nas comunicações móveis, fato que possibilitou aumento da longevidade das baterias. Principal serviço continuava sendo as chamadas de voz, porém é possível alcançar taxa de transmissão de dados em torno de 64 Kbps permitindo serviços como SMS (do inglês, *Short Message Service*). O seu primeiro sistema foi o GSM (do inglês, *Global Systems for Mobile communications*). Uma evolução dessa geração conhecida como **2.5G** possui novas funcionalidades como transmissão em pacotes e novas modulações, conseguindo atingir taxas de 144 Kbps. Tais sistemas são GPRS (do inglês, *General Packet Radio Services*), EDGE (do inglês, *Enhanced Data Rate for GSM Evolution*) e CDMA (do inglês, *Code Division Multiple Access*) 2000 [4, 5].
- **3G**: Além de taxa de dados de 2 Mbps e integração de serviços de dados baseados no protocolo IP (do inglês, *Internet Protocol*), também possui melhorias com base em requisitos de QoS. Seu principal sistema é o UMTS (do inglês, *Universal Mobile Telecommunications Systems*). Houve também melhorias para uma geração **3.5G** que resultaram em taxa de dados entre 5 a 30 Mbps [5].

- **4G:** A quarta geração melhorou a capacidade de tráfego e cobertura. Serviços baseados em IP foram aprimorados tornando possível o uso de vídeo conferência e TV em alta definição [6, 7, 8, 9]. Essa geração é representada pelo sistema LTE-A (do inglês, *Long Term Evolution - Advanced*), que é um novo padrão com melhorias tais como mudanças na arquitetura da rede usando redes heterogêneas, retransmissão e sistemas com maior número de antenas de transmissão e recepção.

Até o momento da elaboração deste trabalho não há uma definição sobre quais tecnologias serão utilizadas para 5G. Entretanto, há na literatura um consenso sobre requisitos, cenários e casos de estudos para a próxima geração [10]. O projeto METIS (do inglês, *Mobile and Wireless Communications Enablers For The Twenty-Twenty Information Society*), um consórcio entre 29 parceiros dentre os quais participam entidades da comunidade acadêmica e empresarial lideradas pela Ericsson, elencou alguns requisitos para o 5G [11] comparados ao 4G. Os principais objetivos são:

- Volume de dados 1000x maior.
- Taxa de dados entre 10-100x maior.
- Número de dispositivos conectados a rede entre 10-100x maior.
- Duração da bateria 10x mais eficiente.
- Uma redução da latência entre a fonte da transmissão e o receptor final de 5x.

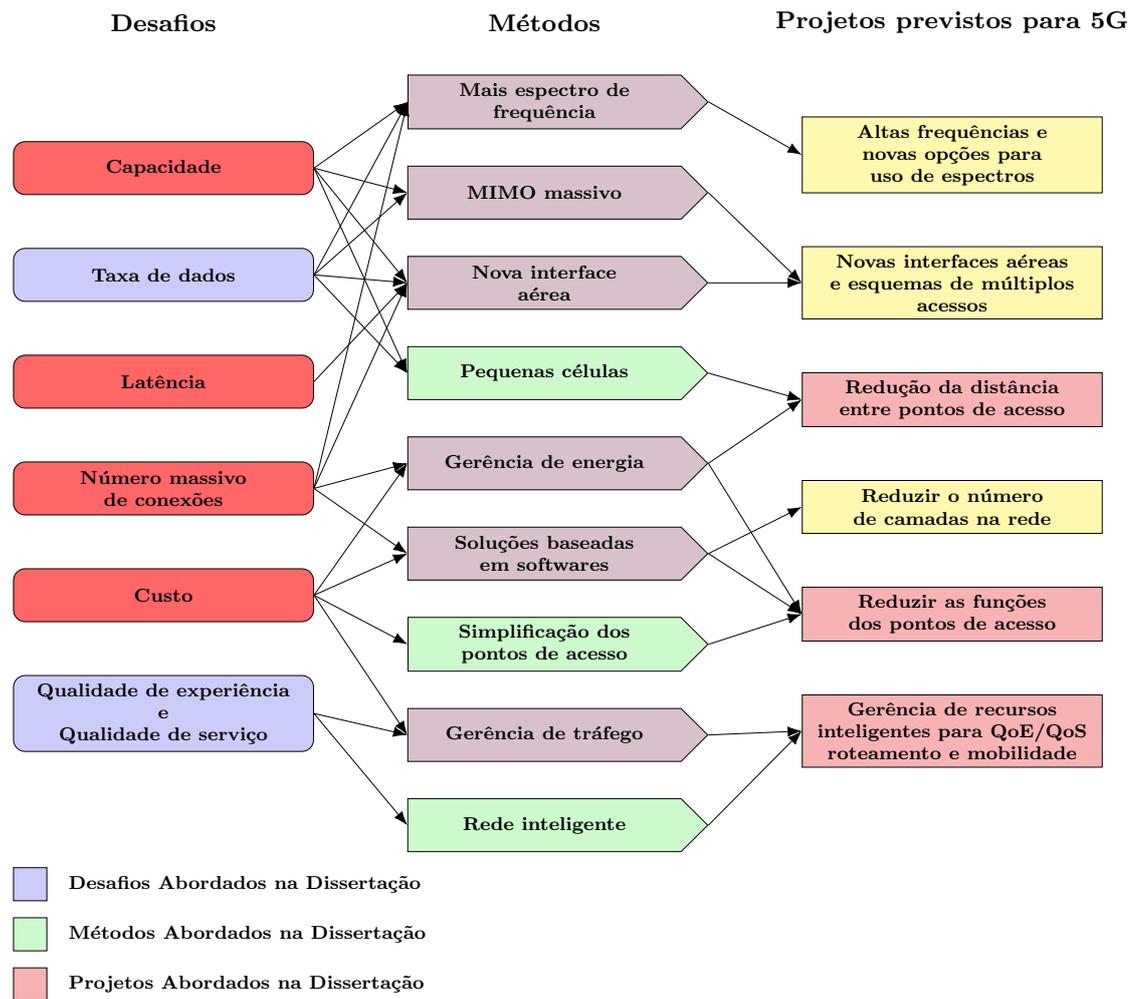
Para atingir esses objetivos há na literatura uma grande variedade de propostas. Um levantamento sobre os requisitos a serem alcançados, métodos facilitadores e esquemas fundamentais e suas relações foi realizado em [12] e é mostrado na Figura 1.

Os principais objetivos das propostas abordadas neste trabalho são: o aumento da taxa de dados garantindo QoS para ambientes com pequenas células, o que se enquadra na coluna de desafios da Figura 1. Os meios de conseguir esses objetivos são a utilização de células pequenas que torna possível maior reuso dos recursos de rádio disponíveis e consequentemente divide os usuários na área de cobertura entre um número maior de PAs. Esse aumento da densidade na rede causa uma redução na carga das células. Esse processo só é possível com a redução da distância entre os PAs e através de uma gerência global da rede. Devido a isto, os PAs podem sofrer simplificações, como será mostrado ao longo dessa dissertação. A redução de custo não é um objetivo fundamental deste trabalho, no entanto as simplificações nos pontos de acesso considerados nesta dissertação podem efetivamente reduzir os custos de implementação e manutenção da rede.

1.1.2 OFDMA

O OFDMA (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) é um esquema de múltiplo acesso baseado em OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) que pode ser utilizado em sistemas de comunicação com ou sem fio. Geralmente o canal de comunicação sem fio é seletivo em frequência, o que causa distorção

Figura 1: Desafios do 5G, métodos e projetos para 5G

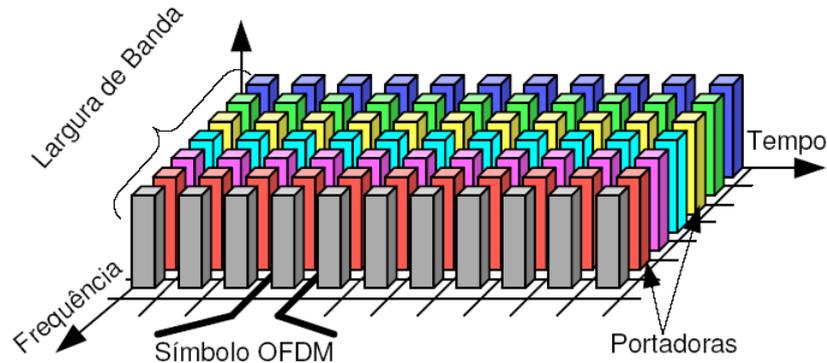


Fonte: Figura adaptada [12].

em um sinal banda larga pois diferentes componentes de frequência terão ganhos de canal distintos. A grande vantagem do OFDM é a capacidade de transformar um canal de banda larga seletivo em frequência em vários subcanais de banda estreita planos. Isso é possível subdividindo toda a banda do canal de comunicação em pequenas subportadoras com banda de frequência menores que a banda de coerência do canal sem fio [13]. Isso simplifica a recepção de um sinal que é transmitido em um meio sem fio e permite a alocação de diferentes subportadoras a usuários distintos. Uma representação gráfica da multiplexação pode ser verificada na Figura 2 [14]. Cada bloco representa um símbolo sendo transmitido em um canal e em um dado instante de tempo. O conjunto de blocos da mesma cor representa uma cadeia de símbolos de apenas uma subportadora. Geralmente uma subportadora é utilizada por diversos usuários em instantes de tempo diferentes, dessa forma o OFDMA é utilizado conjuntamente com o TDMA (do inglês, *Time Division Multiple Access*) [15].

Outra vantagem é a capacidade de alocar recursos como potência nas subportadoras de banda estreita. Comparando com a multiplexação FDM (do inglês, *Frequency*

Figura 2: Ilustração da multiplexação OFDM.



Fonte: Retirado de [14].

Division Multiplexing), o OFDM tem uma maior eficiência espectral, pois além das subportadoras se encontrarem deslocadas na frequência, as mesmas são ortogonais. Esse fato torna essa técnica robusta contra interferência intersimbólica, sendo possível eliminar a banda de guarda entre os canais. Considerando que s_1 e s_2 são os sinais ortogonais e T é o intervalo de tempo, então os sinais devem satisfazer a restrição de ortogonalidade:

$$\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt = 0. \quad (1)$$

No padrão LTE-A o agrupamento de 7 símbolos OFDMA e 12 subportadora é chamado de PRB. O PRB representa o menor bloco de recurso frequência e *time slot* que pode ser alocado, que são sempre alocados em pares no tempo representando um *subframe*.

Para evitar interferência intracelular, neste trabalho é considerado a restrição de exclusividade, em que um PRB só poderá ser alocado para um único usuário dentro da área de cobertura de uma dada célula. Como veremos no próximo capítulo, essa restrição de exclusividade não se aplica em usuários na área de cobertura de célula diferentes, sendo a interferência inter celular não desprezível.

1.1.3 Gerência de recursos de rádio

A GRR (Gerência de Recurso de Rádio) é uma importante funcionalidade de uma rede sem fio, responsável por gerenciar os recursos de rádio que serão utilizados pelos usuários da rede. Dentre os possíveis recursos de rádio podemos destacar a banda de frequência, que são representadas por subportadoras em um sistema OFDMA, *time slot*, potência de transmissão, entre outros. Todos os recursos de rádio são limitados e seu uso deve ser planejado, levando em conta a disponibilidade do recurso e necessidade dos usuários.

O uso dos recursos de rádio pode ser diferente dependendo dos limites do

sistema e dos objetivos que se deseja alcançar. Uma *macro* célula normalmente pode irradiar mais potência que uma *pico* ou *femto* célula, pois é responsável por uma área de cobertura maior. Outro aspecto importante que deve ser levado em conta durante a alocação de rádio é o requisito do serviço utilizado por um determinado usuário. Usuários que usam a rede celular para transferência de arquivos necessitam atingir taxas de dados adequadas, porém a retransmissão ou pequenos atrasos de pacotes são admissíveis e podem ser tolerados para garantir a confiabilidade dos dados transmitidos. No entanto usuários que fazem vídeo conferência, além da necessidade de altas taxas de dados, o atraso de pacotes é crítico comparado com a transferência de dados, pois se trata de um serviço em que o usuário espera uma resposta em tempo real. Essas diferentes necessidades dos usuários podem ser quantificadas como restrições de QoS. Alguns exemplos de requisitos de QoS em redes móveis são uma taxa mínima de dados, um tempo máximo para atraso de pacote, eficiência espectral da rede, critérios de justiça entre usuários, entre outros.

Este trabalho é focado na maximização da taxa de dados total do sistema enquanto que restrições de taxa de dados são adicionadas nos problemas estudados de acordo com o serviço utilizado pelo usuário. Sendo assim cada serviço oferecido pela rede necessitará de diferentes requisitos de QoS.

1.2 Estado da arte

Em geral, problemas de GRR são formulados como problemas de otimização que são compostos de um objetivo, representado na forma de função, e restrições [16] e [17]. Os recursos mais comuns em um sistema de comunicação são a potência de transmissão, banda de frequência e *time slot*, que são administrados de forma a atingir um melhor objetivo como maximização de taxa de transmissão, redução do atraso e baixa taxa de erros de bits.

Há na literatura um grande volume de trabalhos para alocação de recursos com diversos objetivos, porém sua grande maioria aplicada em cenários com uma única célula. Alocação de PRBs em sistemas OFDMA em um cenário multicelular foi estudado no trabalho [18] em que é proposto um problema de alocação de PRB com o objetivo de maximizar a soma da taxa de dados para um sistema que oferece um único serviço com apenas um requisito QoS em termos de taxa de dados. Foi utilizado um conceito de grupos interferentes, que é composto por células que utilizam os mesmos recursos e possuem antenas com padrão de irradiação dominante na direção da área de cobertura. No cenário abordado não há um requisito mínimo do número de usuários que devem ser satisfeitos para o sistema.

Uma análise entre taxa de dados e QoS dado em termos de atraso para um sistema multicelular é proposto em [19]. O problema formulado é não convexo e combinatorial, portando nenhuma solução ótima é apresentada no artigo. O trabalho [20] propõe

uma solução subótima semi distribuída em uma arquitetura hexagonal setorizada para maximização de taxa de dados em que é levada em conta a interferência de dois anéis interferentes. A proposta utiliza o algoritmo Húngaro [21] em cada PA e após este passo uma resolução de conflitos é feita por uma entidade central.

Abordagens que também consideram a associação entre usuários e PAs em conjunto com a alocação de recursos para maximização da mínima taxa do sistema são analisadas em [22] e [23]. Especificamente em [22], os autores propõem a utilização de quatro passos para este objetivo, sendo eles: (1) a associação de usuários com PAs, (2) estimativa da carga de acordo com a taxa exigida pelos usuários, (3) distribuição de recursos entre os PA através de coloração de grafos e (4) alocação dos recursos para os usuários com informações locais. Múltiplos serviços e um número mínimo de usuários a serem satisfeitos não são considerados, além de que o escalonamento de recursos realizado pelos PAs, no quarto passo, não considera a interferência do sistema. A eficiência da solução baseia-se na distribuição dos recursos entre os PAs no terceiro passo, evitando que células vizinhas usem o mesmo recurso. Uma abordagem diferente é estudada em [23], que propôs uma formulação ótima para um problema de maximização da SINR (do inglês, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) mínima do sistema através da associação de usuários, alocação de PRBs e alocação de potência. O algoritmo tenta solucionar de forma ótima um ILP (do inglês, *Integer Linear Program*) dado uma SINR mínima alvo. O maior valor possível da SINR alvo é encontrada através do método da bisseção, sendo necessário resolver o problema ILP para cada iteração, o que pode ser oneroso computacionalmente dado que a solução ótima do ILP é de complexidade exponencial. Toda a formulação é baseada em SINR alvo mínima e não considera restrições de taxa. O método torna possível que o sistema encontre a melhor SINR mínima, porém não há garantias que os recursos alocados garantam taxas de dados necessária para uso de serviços. Ambos os trabalhos [22] e [23] concluem que a associação ótima entre usuários e PAs é similar a uma associação baseada apenas em qualidade de canal.

A redução da interferência em cenário multicelular pode ser alcançada através da minimização da potência de transmissão das células do sistema. O trabalho [24] propõe um problema de otimização ILP com objetivo de minimizar a potência total transmitida no sistema sujeito a requisitos de taxa mínima por usuário. O problema formulado é de alta complexidade e os autores propõem utilizar uma abordagem distribuída, em que o problema é resolvido localmente e de forma independente por cada ERB (Estação Rádio Base). Este método espera que com a redução contínua de potência irradiada no sistema, a interferência seja mitigada levando a uma convergência em que a rede se auto-organize. Os autores não apresentam uma solução ótima e o problema formulado só apresentará a solução ótima se houver apenas uma célula no sistema.

Uma proposta para alocação de PRBs em um cenário com múltiplas macrocélulas e uma única femtocélula foi apresentada no trabalho [25]. Os autores ela-

boraram um problema de otimização baseado em satisfações de QoE (do inglês, *Quality of Experience*) e propuseram uma solução heurística de baixa complexidade com desempenho próximo do ótimo. No entanto, a alocação de recursos é realizada em uma única femtocélula, não considerando múltiplas células nesta camada de cobertura. Os autores propõem em trabalhos futuros o estudo de problemas que considerem critérios de justiça, pois as soluções para o problema estudado podem prejudicar acesso a rede de usuários com más condições de canais.

Até o momento da escrita desta dissertação não foram encontrados na literatura uma proposta de problema de otimização com solução ótima baseada em múltiplos serviços que assegure um percentual mínimo de usuários satisfeitos por serviço em redes multicelulares. Uma solução com essas características foi proposto em [26] em que é formulado um novo problema de GRR para maximização da taxa total do sistema restrito a requisitos de satisfação mínimas por cada serviço oferecido no sistema. É proposto também uma solução heurística de baixa complexidade. Toda a alocação é realizada por uma única célula e a interferência é desconsiderada no problema. Em [27] foi analisado um problema com as mesmas características do trabalho [26], porém considerando a interferência no problema de alocação. No entanto a alocação de recursos é também realizada de forma egoísta por cada célula, não levando em conta o impacto da solução nas demais células. Por conta disto, o presente trabalho de mestrado propõe uma generalização do cenário [26] e [27] para um ambiente multicelular limitado por interferência, otimizando a alocação de recursos para uma satisfação global da rede e adaptando a capacidade de múltiplos serviços para criar um critério de justiça para usuários de borda em cenários com células hexagonais. Uma reformulação do problema proposto e uma análise para um cenário com disposição das PAs modelada por geometria estocástica também será realizada. Teste citação nibia.

1.3 Objetivos da dissertação e contribuições

O principal objetivo deste trabalho é contribuir com o estudo de gerência de interferência para a próxima geração de comunicação móvel. Dessa forma, as principais contribuições deste trabalho são:

- Uma formulação matemática de um problema de otimização para cenário multicelular com múltiplos serviços e células hexagonais. A formulação restringe o espaço de solução para atender requisitos de QoS, em termos de taxa de dados, e número de usuários satisfeitos em cada serviço. A formulação proposta deve restringir também o espaço de solução considerando critérios de justiça para garantir uma experiência uniforme na célula para usuários na borda e centro da célula;
- Reformulação do problema proposto para um cenário com localização de PAs baseado em geometria estocástica, no qual a posição e distância entre PAs é não

- determinísticas. Esse modelo de problema é aplicável em redes sem planejamento;
- Reformulação e linearização do problema em um ILP que possibilita determinar a solução ótima em tempo exponencial;
 - Reformulação dos problemas de otimização propostos para uma forma matricial compacta para uso em *softwares* comerciais;
 - Motivado pela alta complexidade computacional da solução ótima propor uma solução heurística subótima de baixa complexidade;
 - Avaliação de desempenho das propostas e comparação com algoritmo da literatura através de simulações computacionais;

1.3.1 Produções científicas

Durante a elaboração deste trabalho foi submetido e publicado o artigo científico:

COSTA, L. R.; LIMA, F. R. M. ; SILVA, Y. C. B. ; CAVALCANTI, F. R. P., “Solução Ótima para Alocação de Recursos de Rádio com Restrições de QoS em Sistemas Multicelulares com Múltiplos Serviços”, em XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Salvador, 2016.

Durante o curso de mestrado também foi submetido e publicado, no contexto de alocação de recursos de rádio e gerência de interferência os artigos científicos:

COSTA, L. R.; LIMA, F. R. M. ; MACIEL, T. F. ; SILVA, Y. C. B. ; CAVALCANTI, F. R. P., “*SDMA Group Selection for Reduced Computational Complexity on MU MIMO Systems.*”, em XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Salvador, 2016.

COSTA, L. R.; MOREIRA, D. C. ; SANDBERG, S. ; SIMONSSON, A. ; SILVA, Y. C. B. , “*Interference Mitigation based on Precoded SRS.*”, em IEEE *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, Rio de Janeiro, 2016.

Em paralelo ao trabalho desenvolvido durante o curso de mestrado o autor deste trabalho trabalhou em outro projeto de pesquisa também baseado em gerenciamento de interferência em redes 5G, o qual gerou os seguintes relatórios técnicos:

MOREIRA D. C.; **COSTA, L. R.;** STANCANELLI E. M. G.; FREITAS W. C. Jr., SILVA, Y. C. B.; CAVALCANTI, F. R. P., *Interference management for super-dense scenarios – System level aspects*; GTEL-UFC-Ericsson UFC.42; Primeiro Relatório Técnico, Março, 2015.

ARDAH, K.; GUIMARÃES, F. R. V. MOREIRA D. C.; **COSTA, L. R.;** STANCANELLI E. M. G.; FREITAS W. C. Jr., SILVA, Y. C. B.; CAVALCANTI, F. R. P., *Interference management for super-dense scenarios - Coordinated Beamforming*; GTEL-UFC-Ericsson UFC.42; Segundo Relatório Técnico, Outubro, 2015.

ARDAH, K.; GUIMARÃES, F. R. V. MOREIRA D. C.; **COSTA, L. R.;** STAN-

CANELLI E. M. G.; FREITAS W. C. Jr., SILVA, Y. C. B.; CAVALCANTI, F. R. P., *Interference management for super-dense scenarios - Coordinated Beamforming*; GTEL-UFC-Ericsson UFC.42; Terceiro Relatório Técnico, Março, 2016.

1.3.2 Organização da dissertação

Essa dissertação é organizada como descrito a seguir. No Capítulo 2 é apresentado o sistema em que se baseia esta dissertação. Mais especificamente o capítulo descreve os principais aspectos do sistema como o critério de QoS adotado e explicações sobre a interface entre enlace e simulação sistêmica. Por último uma descrição sobre a arquitetura de rede considerada neste trabalho, o posicionamento dos usuários e dos PAs nos cenários analisados.

O Capítulo 3 aborda a gerência dos PRBs no sistema. Neste capítulo é introduzido o conceito de grupos interferentes e são formulados os problemas de otimização para os cenários com células hexagonais e baseadas em geometria estocástica. Também é descrito o processo de linearização dos problemas que torna possível a aplicação de soluções ótimas nos problemas. Também é apresentado neste capítulo a proposta de uma heurística genérica para o cenário hexagonal e estocástico e de baixa complexidade. As considerações para as simulações computacional e as análises de resultados dos algoritmos propostos compõem Capítulo 4.

No Capítulo 5 as principais conclusões obtidas ao longo desta dissertação de mestrado são apresentadas. Alguns direcionamentos para continuidade da pesquisa no contexto deste trabalho são propostos. Por fim, no Apêndice 5.1 é apresentado o cálculo da complexidade computacional no pior caso para a heurística proposta nesta dissertação.

2 METODOLOGIA E MODELAGEM DO SISTEMA

Este capítulo aborda os principais aspectos do sistema estudado nesta dissertação. A seção 2.1 apresenta as principais considerações para os cenários estudados, como disposição dos recursos na rede, cálculo de SINR e o requisito de QoS estudado. Na seção 2.2 a interface entre o nível de enlace e o nível sistêmico é descrito através do mapeamento da SINR em taxa de dados por meio da adaptação de enlace. Por fim, na seção 2.3, a arquitetura da rede adotada neste trabalho é detalhada seguida pela descrição dos dois métodos de posicionamento de células analisados (hexagonal e estocástico).

2.1 Modelagem do sistema de comunicação sem fio

Neste trabalho considera-se um sistema multicelular composto por M células, utilizando antenas omnidirecionais, que servem J usuários. Cada usuário pode utilizar um dos S serviços oferecidos pela operadora. O trabalho é baseado no enlace direto e o

acesso dos usuários é realizado por meio de uma combinação de OFDMA e TDMA. O recurso mínimo a ser alocado durante um TTI (do inglês, *Transmission Time Interval*) é o PRB que é composto por uma combinação de subportadoras e símbolos OFDMA adjacentes. A qualidade de um PRB é medida através de sua SINR, que mede a relação entre a potência do sinal recebido pela soma da potência do sinal interferente adicionado ao ruído térmico do sistema. Para uma modelagem coerente foi considerado que todas as subportadoras de um PRB tenham ganhos de canais correlacionados com a subportadora central.

Seja $\mathcal{J}_m^{\text{PA}}$ o conjunto de usuários que é servido por uma PA m e $\mathcal{J}_n^{\text{PRB}}$ o conjunto de usuários que utilizam o recurso n , pode-se modelar a SINR observada pelo usuário j servido pela PA m no recurso n como:

$$\gamma_{j,n} = \frac{p^{\text{PRB}} h_{j,m} |\alpha_{j,m,n}|^2}{\sigma^2 + \sum_{m' \neq m} p^{\text{PRB}} h_{j,m'} |\alpha_{j,m',n}|^2}, \quad (2)$$

em que $h_{j,m}$ é a perda de percurso com o desvanecimento de longo prazo entre um usuário j e uma PA m , o desvanecimento rápido desse *link* em um dado PRB n é representado por $\alpha_{j,m,n}$. A potência do ruído e de transmissão em um PRB são respectivamente σ^2 e p^{PRB} . Devido a alta complexidade do problema formulado nas próximas seções, adotou-se potência igualitária para todos os PRBs. Esta é uma consideração coerente, pois em geral na literatura é preferido um assinalamento de recursos com potência fixa que soluções com alocações conjuntas de potência devido a alta complexidade dos problemas, tratamento matemático e dificuldades de implementação [24]. Análises prévias feitas em [28] e [29] mostram que a melhora causada pela alocação de canais com potência diferentes é negligenciável quando aplicado em cenários com grande número de usuários e diversos requisitos de QoS.

O sistema considerado neste trabalho oferece múltiplos serviços, tornando possível o usuário utilizar a rede para diferentes fins, como por exemplo: serviços de dados, voz, mensagens de texto, vídeo e áudio conferência e serviços de emergências. Cada serviço possui diferentes necessidades, e como consequência há diversas formas de analisar a qualidade do serviço prestado. Os critérios de QoS mais comuns em redes móveis são taxa de dados, tempo de atraso de pacotes, confiabilidade de dados, etc. Neste contexto, um sistema que oferece diversos serviços deve alocar seus recursos de acordo com as necessidades dos serviços utilizados pelos usuários, evitando desperdícios de recursos e procurando atender critérios da satisfação. Neste trabalho adotou-se apenas requisitos de taxa para múltiplos serviços, em que cada serviço oferecido será associado com uma taxa de dados.

Sendo assim, a única forma de obter ganhos significativos na taxa de transmissão no cenário analisado é através da gestão na distribuição de recursos que depende

Tabela 1: Limiar de SINR para adaptação de enlace.

MCS	Modulação	Taxa de Código [$\times 1024$]	Taxa [Bits/símbolo]	Limiar de SINR [dB]
MCS-1	QPSK	78	0.1523	-5,8
MCS-2	QPSK	120	0.2344	-4,2
MCS-3	QPSK	193	0.3770	-2,5
MCS-4	QPSK	308	0.6016	-0,6
MCS-5	QPSK	449	0.8770	1,3
MCS-6	QPSK	602	1.1758	3,1
MCS-7	16-QAM	378	1.4766	5,0
MCS-8	16-QAM	490	1.9141	6,8
MCS-9	16-QAM	616	2.4062	8,9
MCS-10	64-QAM	466	2.7305	10,7
MCS-11	64-QAM	567	3.3223	12,6
MCS-12	64-QAM	666	3.9023	14,5
MCS-13	64-QAM	772	4.5234	16,3
MCS-14	64-QAM	873	5.1152	18,2
MCS-15	64-QAM	948	5.5547	20,3

Fonte: Adaptado do relatório [30].

unicamente da alocação dos usuários e seus PRBs, levando em conta a interferência e o ganho de canal.

2.2 Interface enlace para sistêmica

Nesta seção descrito a interface entre o nível de enlace para o nível sistêmico das simulações deste trabalho. É mostrado como foi realizado o mapeamento da SINR em taxa de dados, considerando parâmetros do nível de enlace.

A taxa de dados de transmissão em uma comunicação sem fio depende do estado do canal, potências de transmissão, ruído e sinais interferentes. Considere que o mapeamento entre a qualidade de canal e taxa de dados obtida na camada física é dada por uma função de adaptação de enlace $f(\cdot)$. Em geral, muitos trabalhos na literatura adotam a fórmula da capacidade de *Shannon* para o *link adaptativo*, que é dada por:

$$r_{j,n} = w^{\text{PRB}} \log_2(1 + \gamma_{j,n}), \quad (3)$$

em que $r_{j,n}$ é a taxa de dados do usuário j no PRB n e w^{PRB} é a largura de banda de um PRB. Em sistemas mais realísticos a adaptação de enlace leva em conta a MCS (do inglês, *Modulation and Coding Scheme*) que mapeia a taxa de dados de acordo com a SINR e a taxa de erro de bloco, ou BLER (do inglês, *Block Error Rate*). Quanto maior o nível de MCS maior a capacidade de transmitir bits, porém também serão maiores as probabilidades de erro de bloco em função da SINR. Para este trabalho foi considerado o esquema de MCS do LTE (do inglês, *Long Term Evolution*) [30], composta por 15 níveis como mostrada na Tabela 1. Sem perder a generalidade, considerou-se que para um usuário usar um nível de MCS _{v} , será necessário atingir um nível de SINR em que a BLER seja tolerável. Adotou-se um erro de 0.001 como referência para utilização de uma MCS. A SINR limiar para o uso de cada um dos níveis de MCS se encontram na última coluna da Tabela 1.

Sendo assim, quanto maior o nível de MCS mais alta é a SINR necessária para garantir uma taxa de erro mínima aceitável que possibilite o uso do nível de MCS. A taxa de bits é dada por:

$$BR_v = \frac{SR_{\text{OFDM}} \cdot SY_{\text{OFDM}}}{t_{\text{subframe}}} \cdot \text{eff}_v, \quad (4)$$

em que SR_{OFDM} , SY_{OFDM} e t_{subframe} são configurações do sistema e representam respectivamente, o número de subportadoras por PRB, número de símbolos OFDMA em um TTI e o tempo de cada *subframe*. O valor eff_v mede a eficiência do nível v de MCS dado em bits por segundo. Note que na Tabela 1 há a coluna “Taxa” com valores de bits/símbolos. A partir dos valores dessa coluna a eficiência do nível de MCS eff_v depende da taxa de símbolos considerada no sistema. Por exemplo, considere que em uma transmissão a MCS de nível 10 seja utilizada. No sistema simulado cada PRB alocada possui 14 símbolos OFDM, pois são sempre alocados pares de blocos de recursos, e 12 subportadoras. Então a taxa de bits nesta transmissão será $BR_{10} = \frac{12 \cdot 14}{1e^{-3}} \cdot 2,7305 = 458.720$ bps.

Desta forma, o *throughput* de um usuário j , usando um recurso n em um nível de MCS v é dada por:

$$r_{j,n,v} = BR_v \cdot (1 - \text{BLER}(v, \gamma_{j,n})), \quad (5)$$

em que a função BLER mapeia a probabilidade de erro de blocos de bit levando em conta o nível de MCS e a SINR. Tomando novamente como exemplo o caso com transmissão na MCS de nível 10, caso a SINR na transmissão seja exatamente 10,7 dB, a taxa de dados será $458.720 \cdot (1 - 0,001) = 458.260$ bps. Note que a adaptação de enlace na modelagem deste trabalho é uma função discreta.

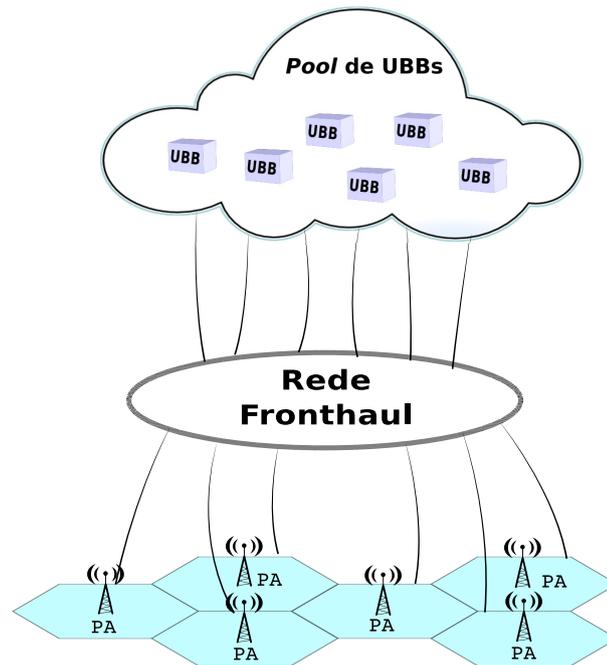
2.3 Cenários com múltiplas células

2.3.1 C-RAN

O crescimento do número de equipamentos que podem se conectar a rede móvel e o crescente aumento da taxa de dados tem tornando as capacidades das atuais tecnologias de acesso de rádio insuficientes. Nesse contexto, há cada vez mais a necessidade de uma estrutura de rede que consiga obter informações de todo o sistema global para um gerenciamento adequado.

Com isso novas arquiteturas de rede tem sido propostas pela comunidade acadêmica. Uma das principais propostas de arquitetura encontrados na literatura é o C-RAN (do inglês, *Cloud-Radio Access Network*). Essa arquitetura foi proposta pela *China Mobile Research Institute* em Abril de 2010 [31]. O C-RAN é uma arquitetura baseada em computação nas nuvens que é capaz de suportar as atuais e futuras padronizações de comunicações sem fio [32].

Figura 3: Arquitetura C-RAN.



Fonte: Próprio autor.

Essa generalização é alcançada pela separação das UBBs (Unidades Banda Base) e os pontos remotos de acesso, neste trabalho chamados de PAs. As UBBs são organizadas em nuvem formando um *pool* de UBBs para processamento centralizado. A centralização da administração da rede é fundamental para este trabalho. A representação desta arquitetura é apresentada na Figura 3. Resumidamente os principais componentes do C-RAN e suas funções são:

- **PA:** Possui antenas que transmitem e recebem sinais de rádio frequência dos usuários da rede, sendo assim, sua composição inclui amplificadores e conversores A/D e D/A. Nessa arquitetura, a função do PA é apenas realizar uma ponte entre as unidades que processarão dados e os usuários. Essa modificação simplifica o hardware, reduzindo o custo da instalação e manutenção de redes densas.
- **Pool de UBBs:** É o conjunto de UBBs que operam como PAs virtuais, ou seja, o processamento do sinal banda base e a otimização dos recursos de rádio são realizados por UBBs. Dependendo das necessidades da rede a alocação de UBBs pode ser realizada de forma centralizada ou distribuída. Uma forma totalmente distribuída seria o assinalamento de cada PA para uma UBB fixa, sendo essa arquitetura semelhante ao funcionamento da rede em todas as gerações antes do 5G. Essa solução proporciona soluções de alocações de recursos com baixa complexidade computacional, porém não explora totalmente os benefícios da arquitetura C-RAN. Uma possibilidade no C-RAN é a conexão de todos os PAs com um dispositivo central que utiliza os UBBs de forma flexível como recursos de processamento. Este método facilita a gerência dos recursos de rádio, pois torna possível o conhecimento global

da rede.

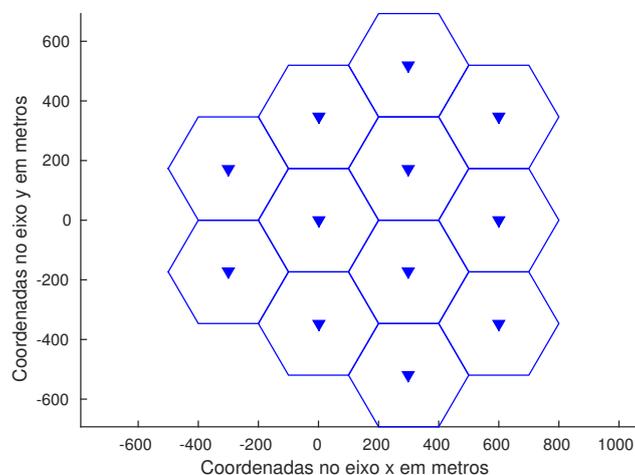
- **Conexão *Fronthaul*:** Faz a conexão entre os PAs e o *pool* de UBBs. Várias tecnologias para estas redes são estudadas na literatura, como por exemplo alternativas utilizando conexões sem fio ou totalmente óptica, como é mostrado em [33, 34].

Neste trabalho considerou-se uma arquitetura C-RAN centralizada, de forma que a gerência da rede será realizada por uma entidade central que possui conhecimento global da rede.

2.3.2 Geometria hexagonal

Um dos cenários considerados nesta dissertação consiste em uma rede celular baseada em células hexagonais onde os PAs são distribuídos de forma determinística e regular em toda área de cobertura. Assumido que os PAs são localizados no centro da célula e por se tratar de uma célula pequena adotou-se antenas omnidirecionais, ou seja, não há setorização. Um exemplo de rede simulada com 12 células com raio de 200 metros é representado graficamente na Figura 4.

Figura 4: 12 PAs servindo células com 200 metros de raio em um grid hexagonal.



Fonte: Próprio autor.

Neste cenário o posicionamento dos usuários é realizado de forma aleatória e uniforme dentro da área de cobertura de cada célula. Sendo assim, caso a simulação adote que para uma célula específica devam ser servidos 5 usuários, estes serão gerados com posições aleatórias na área de cobertura da célula de forma independente. Com isso o posicionamento de um usuário não irá interferir no posicionamento dos demais e esse processo se repetirá para cada célula de forma independente.

2.3.3 Geometria estocástica

Conforme explicado antes, no modelo de rede com células hexagonais, a associação entre usuários e PAs já é pré-definida. Cada PA possui sua área de cobertura e os usuários nela contidos são servidos por este PA. Dessa forma, o reuso de recursos de frequência pode ser cuidadosamente planejado de forma que células vizinhas não usem os mesmos recursos, reduzindo interferência inter celular.

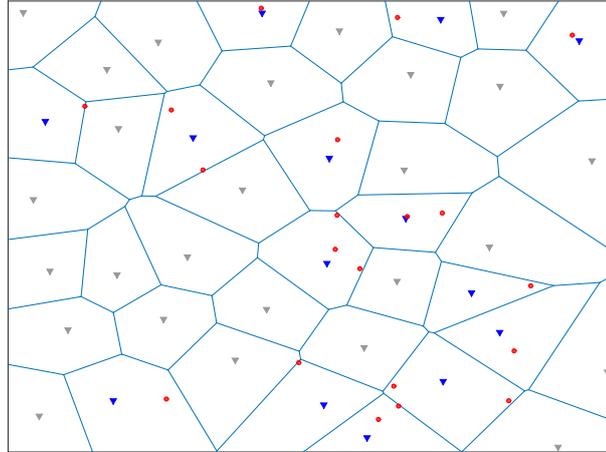
No entanto em uma rede de maior densidade, podem existir PAs instalados sem planejamento. Esses PAs podem ser *pico* ou *femto* células instaladas pelos próprios clientes. Desta forma a arquitetura da rede não pode ser prevista, e este comportamento aleatório da rede pode dificultar o escalonamento de recursos de rádio. Neste contexto, a geometria estocástica é amplamente utilizada na literatura para inferir estatísticas de SINR. No entanto neste trabalho usou-se geometria estocástica apenas para geração da posição de usuários de PAs na rede para aplicação dos algoritmo de escalonamento de recursos analisados.

Para geração da posição dos usuários nas simulações utilizou-se o *Poisson point process* [35], em que o posicionamento das entidades na rede são independentes. Em outras palavras, o posicionamento de uma entidade na rede não afetará o posicionamento das demais. Entretanto, não faz sentido dois PAs de acesso serem posicionados extremamente próximos um do outro, sendo assim há uma interação entre os pontos que devem representar PAs. A geração de PAs deve seguir a propriedade de repulsão, em que os PAs não podem ser posicionados em regiões muito próximas. Uma forma simples de modelar essa repulsão é aplicar a geração de *Poisson point process*, porém desconsiderar PAs que sejam gerados muito próximos até que o número de PAs desejado seja alcançado. Dessa maneira na modelagem do sistema deste trabalho os usuários serão uniformemente distribuídos na área simulada enquanto os PAs também, com exceção das área próxima de um PA já posicionado previamente.

Neste cenário também utilizou-se antenas omnidirecionais e a área de cobertura de uma célula será determinada de acordo com a perda de percurso. Dessa forma, o PA que obtiver a melhor potência média recebida será selecionado para servir o usuário. Um exemplo de configuração de sistema com geometria estocástica é mostrado na Figura 5.

Os círculos vermelhos na Figura 5 representam os usuários no sistema. Os PAs que servem ao menos um usuário são os triângulos azuis. Note que na área de cobertura de cada triângulo azul há ao menos um círculo vermelho. Os triângulos cinzas são PAs que foram posicionados, porém estes PAs não servem nenhum usuário. Caso isto ocorra o PA estará em modo de espera e não irradiará potência na faixa de frequência de nenhum dos PRBs, ou seja, células em modo de espera não causarão interferência no sistema. As divisões entre as células da Figura 5 representam a área de cobertura de cada célula. O critério utilizado foi a distância mínima entre os PAs.

Figura 5: 20 usuários (círculos vermelhos) e 40 PAs (triângulos azuis e cinzas) posicionados aleatoriamente em uma área de 1000 x 1000 metros.



Fonte: Próprio autor.

3 ALOCAÇÃO DE PRB EM SISTEMAS COM MÚLTIPLAS CÉLULAS

Ao longo deste capítulo os métodos para distribuição de PRBs são descritos. A seção 3.1 descreve os problemas de otimização para os cenários com células hexagonais e com geometria estocástica. Meios para garantir justiça no acesso entre usuários localizados no centro e nas bordas das células hexagonais são apresentados através da manipulação das restrições de QoS do problema formulado. Nesta seção também é detalhada a aplicação do método para linearização dos problemas formulados e manipulações algébricas para reformulação dos problemas são aplicadas para elaboração de uma versão matricial e compacta. A heurística proposta neste trabalho para soluções dos problemas de otimização é descrita na seção 3.2.

3.1 Formulação dos problemas

A alocação de PRBs para usuários de uma PA é realizado de forma exclusiva, ou seja, em uma célula no máximo um usuário poderá utilizar um PRB, eliminando assim interferência intracelular. Sendo assim a interferência apenas ocorrerá quando dois usuários de diferentes PAs estiverem utilizando o mesmo PRB simultaneamente.

Para contabilizar toda a interferência no sistema usou-se o conceito de grupos interferentes. Seja \mathcal{G} o conjunto de todos os grupos interferentes que é formado por todas as possíveis combinações entre usuários, incluindo grupos com um único usuário. Por exemplo, considere um sistema com três PAs servindo quatro usuários dispostos na forma de: $\mathcal{J}_1^{\text{PA}} = \{1\}$, $\mathcal{J}_2^{\text{PA}} = \{2, 3\}$ e $\mathcal{J}_3^{\text{PA}} = \{4\}$. Note que não podem haver alocações de um mesmo recurso para os usuários 2 e 3, pois ambos são servidos pela mesma PA. Sendo assim deve-se excluir grupos que contenham estes dois usuários. As possíveis combinações de interferentes serão $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$, $\{4\}$, $\{1, 2\}$, $\{1, 3\}$, $\{1, 4\}$, $\{2, 4\}$, $\{3, 4\}$,

$\{1, 2, 4\}$ e $\{1, 3, 4\}$. O número máximo de usuários que podem compor um grupo que receberá recursos consiste no número de PAs no sistema. O número mínimo de grupos interferentes válidos para um sistema é equivalente a quantidade de usuários que ocorre se considerarmos que há apenas uma PA para todos os usuários. Portanto, quanto mais densa a rede menos grupos interferentes serão formados. O artigo [26] é equivalente a um cenário limite em que todos usuários pertencem a um mesmo AP.

3.1.1 Geometria hexagonal

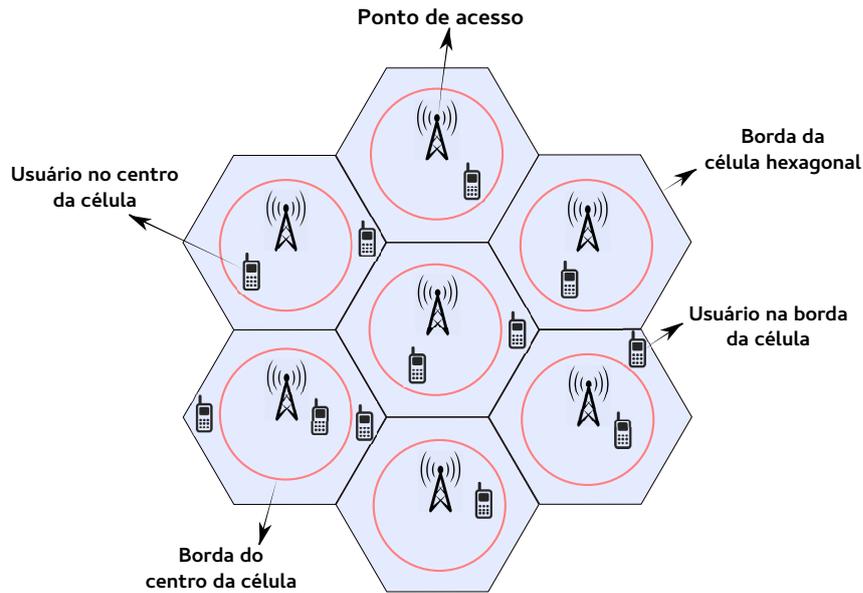
Em um sistema celular com geometria hexagonal é comum que usuários próximos ao centro da célula obtenham canais com melhores qualidade, pois sofrem menos com o efeito da perda de percurso que usuários localizados nas bordas da célula. Regiões próximas do centro da célula também tendem a receber sinais interferentes provenientes de outras células com menor intensidade, dado a distância entre o emissor de interferência e o terminal móvel. Sendo assim, usuários de centro da célula tendem a possuir SINR melhores que terminais de borda. Dessa forma, alocações de recursos que têm como objetivo a maximização da soma da taxa de transmissão do sistema tende alocar recursos de rádio apenas para usuários centrais, pois estes atingirão melhores taxas de dados. Como consequência, é possível que o GRR seja desfavorável para usuários na borda da célula.

Para manter justiça no acesso a rede entre usuários de centro e na borda das células hexagonais considerou-se uma duplicação de cada serviço oferecido. Na formulação matemática do problema cada serviço será representado matematicamente por dois serviços distintos em que serão exclusivamente usados por usuários de borda e centro da célula cada. Por exemplo: considere uma operadora que oferece dois serviços s_1 e s_2 com exigências de taxa r_{obj}^1 e r_{obj}^2 , respectivamente. Na prática deve ser modelado para o problema quatro serviços virtuais s_1, s_2, s_3 e s_4 com requisitos de taxa $r_{\text{obj}}^1, r_{\text{obj}}^2, r_{\text{obj}}^1$ e r_{obj}^2 , respectivamente. Portanto os pares de serviço (s_1, s_3) e (s_2, s_4) são exatamente iguais. A diferença nessa formulação é que os usuários dos serviços s_3 e s_4 serão apenas usuários de borda, enquanto s_1 e s_2 são exclusivos para usuários do centro. A Figura 6 ilustra uma rede hexagonal com 7 células e divisões entre usuários de centro e borda da célula.

Será mostrado na análise de resultados que esta criação de serviços virtuais resultará em ganhos de justiça em termos de número de usuários satisfeitos na borda da célula.

Para formulação do problema de otimização deve-se formalizar variáveis que representem associações entre as entidades no sistema. A associação entre um usuário j e um PA m será representada pelo valor binário $z_{j,m}$ que assumirá valor 1 caso j seja servido pelo PA m e 0 caso contrário. Neste trabalho, a associação entre usuários e PA foi realizada através da qualidade média do canal, ou seja, o usuário será servido pelo

Figura 6: Rede com geometria hexagonal e divisões entre o centro e borda das células.



Fonte: Próprio autor.

PA que apresente em média melhores estados de canais, tornando $z_{j,m}$ um valor fixo na formulação do problema. De forma semelhante a participação de um usuário j em um grupo interferente g será representado binariamente por $o_{g,j}$ e será calculada antes da aplicação da solução do problema. Assim, $o_{g,j}$ assumirá valor 1 quando o usuário j estiver presente no grupo g e 0 caso contrário. A taxa de dados em um único bloco de recurso n de um usuário j que participa de um grupo g será representada por $r_{g,j,n}$. Note que é conhecido quais os usuários fazem parte de um grupo interferente e pode-se estimar os ganhos de canais de interesse e interferentes, permitindo utilizar a Equação (2) para determinar a SINR dos participantes do grupo e mapear sua taxa de dados. Essa arquitetura só é possível se a solução for realizada por uma unidade central que recebe os dados de todos os PAs e define a alocação em todo o sistema, o que é possível utilizando C-RAN descrito no capítulo 2. Seja também a variável $c_{j,s}$ que assumirá valor 1 caso o usuário j esteja utilizando o serviço s e 0 caso contrário. Neste trabalho, considerou-se que cada usuário usará apenas um serviço por vez, mesmo que exista mais de um serviço. A escolha de qual recurso será utilizado por um grupo é a variável binária de otimização $x_{g,n}$ que assume valor 1 para associação entre o grupo g e PRB n , e 0 caso contrário.

O problema é formulado como:

$$\max_{x_{g,n}} \sum_j \sum_n \sum_g x_{g,n} r_{g,j,n} o_{g,j} \quad (6a)$$

sujeito a

$$\sum_g x_{g,n} = 1 \quad \forall n, \quad (6b)$$

$$\sum_j u \left(\sum_g \sum_n x_{g,n} o_{g,j} r_{g,j,n} z_{j,m} c_{j,s}, r_{\text{obj}}^j \right) \geq k_s \quad \forall s \text{ e } \forall m, \quad (6c)$$

$$\sum_j \sum_g x_{g,n} o_{g,j} z_{j,m} \leq 1 \quad \forall m \text{ e } \forall n, \quad (6d)$$

$$x_{g,n} \in \{0, 1\} \quad \forall n \text{ e } \forall g. \quad (6e)$$

A função objetivo (6a) é a soma da taxa de dados de todos os usuários e todos os recursos no sistema. A restrição (6b) garante que um recurso apenas será alocado para um único grupo de interferência. Se todas as possíveis combinações de interferentes estiverem representadas na forma de grupos, essa restrição garante que a escolha da alocação contabilizará toda a interferência possível para um cálculo correto da taxa na função objetivo. A segunda restrição (6c) é o requisito de QoS em que $u(b, d)$ é a função degrau que assumirá valor 1 caso $b \geq d$ e 0 caso contrário. Nesta restrição r_{obj}^j representa a taxa alvo para o usuário j atingir a satisfação. Esta taxa depende do serviço utilizado em que cada serviço tem sua própria taxa mínima necessária. O número mínimo de usuários a serem satisfeitos na cobertura de uma célula e que usam o serviço s é o valor de k_s . A última restrição (6d) garante a exclusividade no uso dos PRBs dentro de cada PA, isto é, nenhum PA pode alocar um mesmo PRB para mais de um usuário dentro de sua área de cobertura, evitando interferência intracelular.

O problema (6) é combinatorial e não linear por causa da função degrau. Por conta da não linearidade do problema, a solução ótima apenas pode ser obtida através da busca exaustiva em que todas as possíveis combinações são testadas. Nas próximas seções será apresentado uma proposta de linearização do problema.

3.1.2 Geometria estocástica

Redes analisadas por meio de geometria estocástica geralmente são redes instaladas sem planejamento e em áreas com grande número de usuários. A posição dos PAs, assim como acontece com os usuários é totalmente imprevisível, sendo inadequado classificar usuários de acordo com posições de centro e borda. Dessa forma, a aplicação de critérios de QoS para usuários na borda ou mesmo em cada célula da forma que foi abordado no cenário hexagonal não são praticáveis. Neste ambiente, considerou-se os requisitos de QoS global para todo o sistema, ou seja, número de usuários a serem

satisfeitos levará em conta os usuários do sistema como um todo e não em cada célula individualmente.

A formulação do problema para a geometria estocástica é:

$$\max_{x_{g,n}} \sum_j \sum_n \sum_g x_{g,n} r_{g,j,n} O_{g,j} \quad (7a)$$

sujeito a

$$\sum_g x_{g,n} = 1 \quad \forall n, \quad (7b)$$

$$\sum_j u \left(\sum_g \sum_n x_{g,n} O_{g,j} r_{g,j,n} c_{j,s}, r_{\text{obj}}^j \right) \geq k_s \quad \forall s \quad (7c)$$

$$\sum_j \sum_g x_{g,n} O_{g,j} z_{j,m} \leq 1 \quad \forall m \text{ e } \forall n, \quad (7d)$$

$$x_{g,n} \in \{0, 1\} \quad \forall n \text{ e } \forall g. \quad (7e)$$

Note que, além da duplicação de serviços que não é aplicado neste problema, a única diferença entre a formulação para o cenário com geometria hexagonal (6) e estocástica (7) é apenas a restrição (7c) em que k_s passa a ser o número de usuários satisfeitos no serviço s em todo a área de cobertura do sistema. Portanto, as mesmas dificuldades descritas anteriormente para obter-se a solução ótima do problema (6) aplica-se neste caso.

3.1.3 Caracterização das soluções ótimas

Os problemas formulados anteriormente têm a função objetivo e todas as restrições lineares, com exceção da restrição (6c) e (7c), pois a função degrau não é linear. A não linearidade torna a solução ótima do problema complexa, sendo necessário o uso de busca exaustiva. Porém, pode-se linearizar os problemas adicionando uma nova variável ρ_j que assume o valor 1 caso o usuário j esteja satisfeito em relação a seu QoS e 0 caso contrário.

3.1.3.1 Geometria hexagonal

O problema para geometria hexagonal pode ser reformulado como:

$$\max_{x_{g,n}, \rho_j} \sum_j \sum_n \sum_g x_{g,n} r_{g,j,n} o_{g,j} \quad (8a)$$

sujeito a

$$\sum_g x_{g,n} = 1 \quad \forall n, \quad (8b)$$

$$\sum_g \sum_n x_{g,n} o_{g,j} r_{g,j,n} \geq \rho_j r_{\text{obj}}^j \quad \forall j, \quad (8c)$$

$$\sum_j \rho_j c_{j,s} z_{j,m} \geq k_s, \quad \forall s \text{ e } \forall m, \quad (8d)$$

$$\sum_j \sum_g x_{g,n} o_{g,j} z_{j,m} \leq 1 \quad \forall m \text{ e } \forall n, \quad (8e)$$

$$x_{g,n} \in \{0, 1\} \quad \forall n \text{ e } \forall g, \quad (8f)$$

$$\rho_j \in \{0, 1\} \quad \forall j. \quad (8g)$$

Note que o novo problema segue a mesma estrutura formulada anteriormente, porém, a restrição (6c) foi substituída pelas restrições (8c) e (8d) em que, respectivamente, é garantido a taxa mínima para satisfação dos usuários selecionados e o número mínimo de terminais satisfeitos por serviço. Agora o problema é combinatorial da classe ILP. A solução ótima agora pode ser encontrada utilizando o algoritmo BB (do inglês, *Branch and Bound*). Apesar deste método ser mais eficiente que a busca exaustiva, a solução ainda tem complexidade computacional exponencial como demonstraremos a seguir.

Para utilização de *softwares* para solução de problemas, como é o caso do CPLEX [36], é necessário transcrever o problema para uma forma mais compacta e baseado em operações matriciais, em que o problema se resume a uma função objetivo e duas restrições: uma de igualdade e outra desigualdade (menor que). Sendo assim, é demonstrado abaixo uma construção de matrizes para o problema (8) em forma compacta com apenas uma restrição de igualdade e uma de desigualdade.

Sendo $(\cdot)^T$ a transposição de uma matriz e agrupando alguns valores do problema em vetores pode-se agrupar as variáveis de otimização na forma de $\mathbf{x}_g = [x_{g,1}, \dots, x_{g,N}]$, $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T, \dots, \mathbf{x}_g^T]^T$. Considere uma nova variável de otimização definida como $\mathbf{y} = [\mathbf{x}^T | \boldsymbol{\rho}^T]$. Para isolar as variáveis originais do problema precisa-se aplicar matrizes de transformação que tornem possível as operações: $\mathbf{x} = \mathbf{A}_1 \mathbf{y}$ e $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{A}_2 \mathbf{y}$. As matrizes que mantêm essa propriedade são $\mathbf{A}_1 = [\mathbf{I}_{GN} | \mathbf{0}_{GN \times J}]$ e $\mathbf{A}_2 = [\mathbf{0}_{J \times GN} | \mathbf{I}_J]$ em que \mathbf{I}_J é uma matriz identidade de dimensão $J \times J$ e $\mathbf{0}_{GN \times J}$ uma matriz de zeros de dimensão $GN \times J$. Considere também os vetores $\mathbf{o}_g = [o_{g,1}, o_{g,2}, \dots, o_{g,J}]^T$, $\mathbf{r}_{g,n} = [r_{g,1,n}, \dots, r_{g,J,n}]^T$ e $\mathbf{a} = [\mathbf{o}_1^T \mathbf{r}_{1,1}, \dots, \mathbf{o}_1^T \mathbf{r}_{1,N} | \dots | \mathbf{o}_G^T \mathbf{r}_{G,1}, \dots, \mathbf{o}_G^T \mathbf{r}_{G,N}]$. Sendo assim a nova função objetivo

será $\mathbf{a} \mathbf{A}_1 \mathbf{y}$.

Para as restrições também precisa-se definir novos vetores. A associação usuário-PA é representada pelo vetor binário $\mathbf{z}'_m = [z_{m,1}, \dots, z_{m,J}]$. Também será necessário definir um vetor binário com a associação entre usuário-PA-serviço que será composta pelo vetor $\mathbf{z}_{m,s} = [z_{m,1,s}, \dots, z_{m,J,s}]^T$ em que $z_{m,j,s}$ assume valor um caso o usuário j esteja sendo servido pela PA m e usando o serviço s . O número de usuários mínimos a serem satisfeitos em cada serviço e em cada PA será dado pelo vetor

$$\mathbf{k} = \left[\underbrace{k_1, \dots, k_S}_{M \text{ vezes}} \mid \dots \mid \underbrace{k_1, \dots, k_S}_{M \text{ vezes}} \right]^T. \quad (9)$$

Como não pode-se alocar recursos para grupos com mais de um usuário na mesma PA precisaremos definir uma função auxiliar que determina se um grupo possui mais de um usuário servido pelo mesmo PA. Matematicamente essa função será:

$$w_g := \begin{cases} 0, & \text{se } \sum_m u(\mathbf{o}_g^T \mathbf{z}'_m, 2) > 0, \\ 1, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (10)$$

Com isso o vetor que usaremos para determinar a validade de um grupo interferente na nossa formulação será:

$$\mathbf{w} = \left[\underbrace{w_1, \dots, w_1}_{N \text{ vezes}} \mid \dots \mid \underbrace{w_G, \dots, w_G}_{N \text{ vezes}} \right]^T. \quad (11)$$

Com todos os vetores formulados acima define-se a partir delas matrizes que serão:

$$\mathbf{B} = \left[\underbrace{\mathbf{I}_N, \dots, \mathbf{I}_N}_{G \text{ vezes}} \right], \quad (12)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} o_{1,1} r_{1,1,1} \cdots o_{1,1} r_{1,1,N} \mid \cdots \mid o_{G,1} r_{G,1,1} \cdots o_{G,1} r_{G,1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{1,J} r_{1,J,1} \cdots o_{1,J} r_{1,J,N} \mid \cdots \mid o_{G,J} r_{G,J,1} \cdots o_{G,J} r_{G,J,N} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{Z} = \left[\mathbf{z}_{1,1} \cdots \mathbf{z}_{1,S} \mid \cdots \mid \mathbf{z}_{M,1} \cdots \mathbf{z}_{M,S} \right]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{E} = \text{diag}(t_1, \dots, t_J), \quad (15)$$

em que $\text{diag}(\cdot)$ é a função que representa uma matriz diagonal em que a diagonal principal

são os valores de entrada.

Baseado nas definições matriciais acima pode-se redefinir a restrição (8b) como $\mathbf{B} \mathbf{A}_1 \mathbf{y} = \mathbf{1}_N$, em quem $\mathbf{1}_N$ é um vetor coluna composto por 1's de dimensão N . A restrição (8c) será reformulada como $\mathbf{C} \mathbf{A}_1 \mathbf{y} \geq \mathbf{E} \mathbf{A}_2 \mathbf{y} \Rightarrow (\mathbf{C} \mathbf{A}_1 \mathbf{y} - \mathbf{E} \mathbf{A}_2 \mathbf{y}) \geq \mathbf{0}_J$. As restrições (8d) e (8e) serão respectivamente $\mathbf{Z} \mathbf{A}_2 \mathbf{y} = \mathbf{k}$ e $\mathbf{A}_1 \mathbf{y} \leq \mathbf{w}$.

Note que há duas restrições de igualdade e duas de desigualdade. Para compactar o problemas deve-se concatená-las em apenas duas restrições, uma de cada classe. Considere as concatenações $\mathbf{U} = [(\mathbf{B} \mathbf{A}_1)^T | (\mathbf{Z} \mathbf{A}_2)^T]^T$, $\mathbf{P} = [-(\mathbf{C} \mathbf{A}_1 - \mathbf{E} \mathbf{A}_2)^T | \mathbf{A}_1^T]^T$, $\mathbf{v} = [\mathbf{1}_N^T | \mathbf{k}^T]^T$ e $\mathbf{q} = [\mathbf{0}_J^T | \mathbf{w}^T]^T$, então pode-se reformular todo o problema como:

$$\max_{\mathbf{y}} \quad \mathbf{a} \mathbf{A}_1 \mathbf{y} \quad (16a)$$

sujeito a

$$\mathbf{U} \mathbf{y} = \mathbf{v}, \quad (16b)$$

$$\mathbf{P} \mathbf{y} \leq \mathbf{q}. \quad (16c)$$

Note que o problema formulado é combinatorial da classe ILP em que a solução ótima pode ser encontrada utilizando métodos como o algoritmo BB (do inglês, *Branch and Bound*) [37]. A complexidade deste algoritmo cresce exponencialmente com número de restrições e variáveis. Caso um problema tenha l variáveis e p restrições o número de subproblemas lineares a serem resolvidos será de $(\sqrt{2})^l$. Cada subproblema necessitará de $2(p + l)$ iterações em que serão executados $(pl - p)$ multiplicações, $(pl - p)$ somas e $(l - p)$ comparações [38, 39]. Na formulação proposta, tem-se $NG + J$ variáveis e $N + J + M(S + N)$ restrições, em que G e N são o número de grupos e PRBs no sistema. Sendo assim o número de operações para solução no pior caso é dado por

$$\sqrt{2}^{NG+J} 2(NG+2J+N+M(S+N))((N+J+M(S+N))(2(NG+J)-3)+NG+J). \quad (17)$$

Considerando o termo de maior ordem a complexidade computacional, no pior caso, a complexidade será $\mathcal{O}(2^{NG})$.

3.1.3.2 Geometria estocástica

O problema de alocação de PRB terá a mesma formulação de (8), porém a restrição (8d) que garante um número mínimo de usuários satisfeitos em cada PA será substituído por uma restrição que considera o número de usuário satisfeitos em cada serviço em toda a rede. O problema de otimização linear para geometria estocástica pode ser formulado como:

$$\max_{x_{g,n}, \rho_j} \sum_j \sum_n \sum_g x_{g,n} r_{g,j,n} o_{g,j} \quad (18a)$$

sujeito a

$$\sum_g x_{g,n} = 1 \quad \forall n, \quad (18b)$$

$$\sum_g \sum_n x_{g,n} o_{g,j} r_{g,j,n} \geq \rho_j r_{\text{obj}}^j \quad \forall j, \quad (18c)$$

$$\sum_j \rho_j \geq k_s, \quad \forall s. \quad (18d)$$

$$\sum_j \sum_g x_{g,n} o_{g,j} z_{j,m} \leq 1 \quad \forall m \text{ e } \forall n, \quad (18e)$$

$$x_{g,n} \in \{0, 1\} \quad \forall n \text{ e } \forall g, \quad (18f)$$

$$\rho_j \in \{0, 1\} \quad \forall j. \quad (18g)$$

A restrição (18d) garante que para um serviço s serão satisfeito no mínimo k_s usuários. Para a versão matricial é definido novas matrizes e vetores correspondentes a esta restrição. Considere um novo vetor como $\mathbf{k}' = [k_1, \dots, k_S]$. E a matriz

$$\mathbf{F} = \text{diag}(\mathbf{1}_{J_1}^T, \dots, \mathbf{1}_{J_S}^T), \quad (19)$$

em que $\mathbf{1}_{J_s}$ é um vetor coluna composto de 1's de um com o tamanho J_s que é o número de usuários utilizando o serviço s .

Seguindo a mesma formulação do problema (16), pode-se modificar as matrizes concatenadas. Considerando que $\mathbf{U}' = [(\mathbf{B} \mathbf{A}_1)^T | (\mathbf{F} \mathbf{A}_2)^T]$ e $\mathbf{v}' = [\mathbf{1}_N^T | \mathbf{k}'^T]^T$ o problema compacto será:

$$\max_{\mathbf{y}} \mathbf{a} \mathbf{A}_1 \mathbf{y} \quad (20a)$$

sujeito a

$$\mathbf{U}' \mathbf{y} = \mathbf{v}', \quad (20b)$$

$$\mathbf{P} \mathbf{y} \leq \mathbf{q}. \quad (20c)$$

Assim, como o problema para cenários com geometria hexagonal a formulação para arquitetura aleatória se enquadra na mesma classe de problemas que pode ser resolvida através do algoritmo BB. A presente formulação também possui $NG + J$, porém o número de restrições agora será $J + S + N(1 + M)$. A complexidade computacional para

esse algoritmo será:

$$\sqrt{2}^{NG+J} 2(J+S+N(1+M))((J+S+N(1+M))(2(NG+J)-3)+NG+J). \quad (21)$$

Dessa forma o pior caso da solução ótima para geometria estocástica também será $\mathcal{O}(2^{NG})$.

3.2 Heurística de baixa complexidade computacional

O algoritmo BB é capaz de encontrar a solução ótima, caso exista, para os problemas de otimização apresentados para o cenários hexagonal e geometria estocástica. No entanto, como foi demonstrado na subseção 3.1.3, a complexidade computacional dessa solução é exponencial, o que torna impraticável a aplicação deste método em cenários realísticos. Com o objetivo de encontrar soluções que satisfaçam os requisitos de QoS com maior rapidez, propomos nesta dissertação um algoritmo.

Heurística é um algoritmo que busca um determinado objetivo sem necessariamente encontrar a melhor solução possível. O método proposto nesta dissertação explora características do problema para encontrar soluções que obedeçam as restrições de QoS através de uma menor complexidade computacional. Neste trabalho é proposto um algoritmo genérico que se adéqua aos problemas de geometria estocástica e hexagonal.

Para elaboração da heurística algumas simplificações na formulação dos problemas foram aplicadas. A primeira delas é a remoção de grupos interferentes que incluem usuários servidos pelo mesmo PA. Se apenas considerarmos grupos interferentes válidos, as restrições de exclusividade (8e) e (18e) podem ser removidas dos problemas, pois qualquer alocação nas variáveis restantes respeitarão essas restrições. Outra simplificação é remover a variável $o_{g,j}$ do problema. Essa é a variável binária que indica se o usuário j faz parte do grupo g . Considerando que um usuário não faz parte de um grupo interferente a sua taxa de dados será zero neste grupo, ou seja, se $o_{g,j}$ é zero, então $r_{g,j,n}$ será também zero para todos n . Sendo assim, o componente $o_{g,j}$ pode ser removido do problema.

Após aplicar essas simplificações o problema de otimização reduzido se adequará matematicamente a formulação que foi proposta em [40]. Neste trabalho também foi formulado um problema de otimização para alocação de PRBs e uma heurística, conhecida como RAISES (do inglês, *Reallocation-based Assignment for Improved Spectral Efficiency and Satisfaction*), de baixa complexidade computacional, porém para um cenário MIMO (do inglês, *Multiple Input Multiple Output*) com múltiplos usuários em uma única célula. Apesar de ser um trabalho focado em um cenário diferente do abordado nesta dissertação, algumas semelhanças entre os problemas de otimização podem ser notados. A primeira delas é a formação de grupos de usuários. Neste trabalho utiliza-se grupos interferentes enquanto o trabalho citado adota grupos de usuários que utilizam o mesmo PRB, porém são multiplexados espacialmente. Outra semelhança são os requisitos de QoS que também

consideram taxa de dados, múltiplos serviços e número mínimo de usuários satisfeitos em cada serviço. Assim, este trabalho segue os mesmos critérios para alocação de PRBs que os trabalhos [26] e [40], porém adaptados para um cenário diferente.

Devido as semelhanças tomou-se como base para a elaboração da heurística deste trabalho o algoritmo RAISES proposto em [40]. Apesar da semelhança matemática entre as formulações, constatou-se que a heurística já proposta é aplicável (com as devidas modificações) aos cenários desta dissertação. No entanto, como será mostrado na seção de resultados, a heurística proposta nesta dissertação obtém resultados mais satisfatórios que os propostos em [40].

A primeira etapa da heurística é a pré-seleção dos usuários que serão satisfeitos, ou seja, antes da aplicação do método para a resolução do problema, os usuários que devem ser satisfeitos serão selecionados e os demais serão removidos do problema. Esta etapa também é aplicada no RAISES. Como critério de redução utiliza-se a seguinte métrica:

$$j^* = \arg \min_{j \in \mathcal{Q}} \frac{\sum_n \sum_g r_{g,j,n}}{G N r_{\text{obj}}^j}, \quad (22)$$

em que \mathcal{Q} é o conjunto de usuários que podem ser removidos do problema. Note que a métrica seleciona o usuário com a menor relação entre a média da taxa de dados em todos os PRBs e grupos interferentes com a taxa de dados exigida pelo serviço. Os usuários que atingem menores taxas, em relação ao que necessitam atingir, serão descartados do problema. Além do conjunto de usuários que podem ser removidos, há o conjunto \mathcal{A} de usuários que serão considerados no problema e podem receber recursos. O algoritmo para redução do número de usuários é apresentado na Figura 7.

A etapa (1) do algoritmo de redução é a criação dos conjuntos \mathcal{Q} e \mathcal{A} , em que conterà todos os usuários. Nessa etapa é considerado que há margem para reduzir o número de usuários em todos os serviços sem ferir as restrições de QoS, ou seja, há um número maior de usuários que k_s para todos o s do sistema.

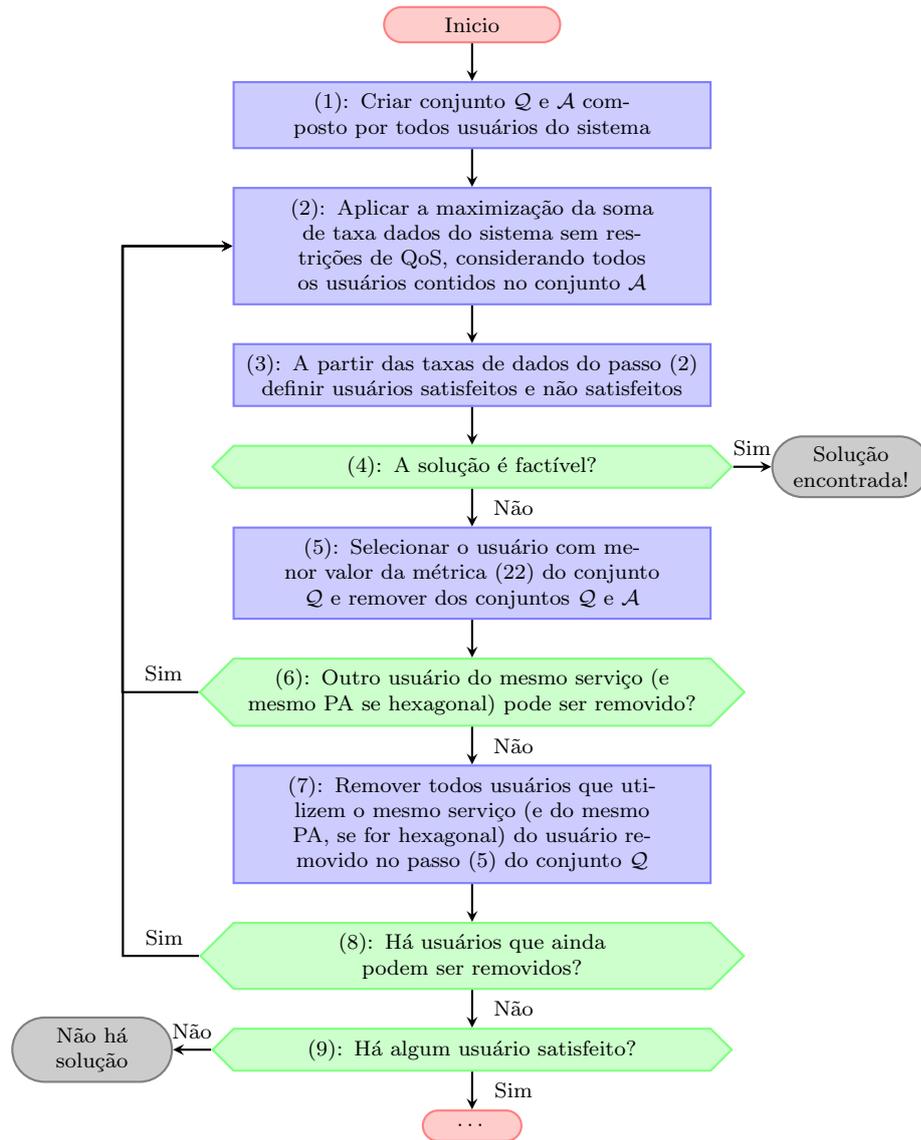
A etapa (2) é a maximização da soma da taxa total do sistema, quando desconsideradas as restrições de QoS. A remoção do QoS torna fácil a solução do problema de otimização de taxa. Note que por conta da restrição de exclusividade, em que um PRB só poderá ser utilizado por um grupo interferente, a solução ótima da maximização será alocar para cada PRB do sistema o grupo interferente com maior soma de taxa, ou seja, aplicando

$$g_n^* = \arg \max_g \sum_j r_{g,j,n} \quad \forall n, \quad (23)$$

em que g_n^* é o grupo selecionado para o PRB n . Dessa forma, todos os PRBs devem ser alocados para um dos grupos interferentes.

Nas etapas (3) e (4) é feita a classificação dos usuários que foram satisfeitos e, respectivamente, a verificação se a solução encontrada no passo (2) satisfaz todas as

Figura 7: Fluxograma do algoritmo de redução usuários.



Fonte: Próprio autor.

restrições de QoS. Note que caso todas as exigências de QoS sejam atendidas é obtida uma solução de alocação para o problema e a heurística já retorna um resultado. Para os casos em que a solução não seja válida, a etapa (5) selecionará um usuário de acordo com a métrica (22) e o removerá do problema. Na etapa (6) é verificado se ainda é possível remover outro usuário que utiliza o mesmo serviço do terminal móvel removido na etapa (5). Note que, caso o algoritmo já tenha atingido o número mínimo de usuários k_s para um serviço s , todos os demais usuários de s devem ser removidos do conjunto \mathcal{Q} . Caso o cenário seja hexagonal a remoção deverá ser aplicada apenas aos usuários servidos pelo mesmo PA do usuário removido. Esta remoção é realizada na etapa (7). A decisão sobre remover outros usuários é feita na etapa (8), caso ainda não se tenha atingido k_s para todo s do sistema, o algoritmo retorna ao passo (2). Caso já se tenha removido todos os possíveis usuários, é verificado na etapa (9) se algum usuário teve sua exigência de taxa

satisfeita. A não satisfação de algum usuário nesta etapa acarreta na impossibilidade de achar qualquer solução para o problema nas próximas etapas da heurística.

Após a redução dos usuários do sistema, o trabalho [40] realiza uma realocação dos PRB em que os usuários satisfeitos do sistema doam os recursos para os insatisfeitos. Neste trabalho é proposto modificações para esta etapa de realocação que serão evidenciadas ao longo da descrição do algoritmo.

Os usuários insatisfeitos na alocação resultante do algoritmo de redução integrarão o conjunto \mathcal{R} , que será o grupo de usuários insatisfeitos com a taxa atual atingida e portanto receberão uma nova alocação de recursos. Os usuários satisfeitos compõem o conjunto \mathcal{D} . Considere que \mathcal{T} consiste no conjunto de todos os pares (g, n) em que n consiste em PRBs que podem ser associados ao grupo de interferente g . Assumimos n pode ser qualquer PRB do sistema, enquanto que g em \mathcal{T} são os grupos interferentes selecionados para a realocação e que contenham ao menos um usuário do conjunto dos receptores \mathcal{R} . A seleção dos grupos g para o conjunto \mathcal{T} é determinado em um processo iterativo descrito mais abaixo. Essa consideração é a primeira diferença do trabalho da literatura do qual considera que os PRBs do grupo \mathcal{T} são apenas os alocados aos usuários já satisfeitos. Ao considerar todos os PRBs mantém-se no espaço de busca as possibilidades de realocar recursos que não são utilizados por usuários satisfeitos. A realocação de recursos é realizada de acordo com a métrica

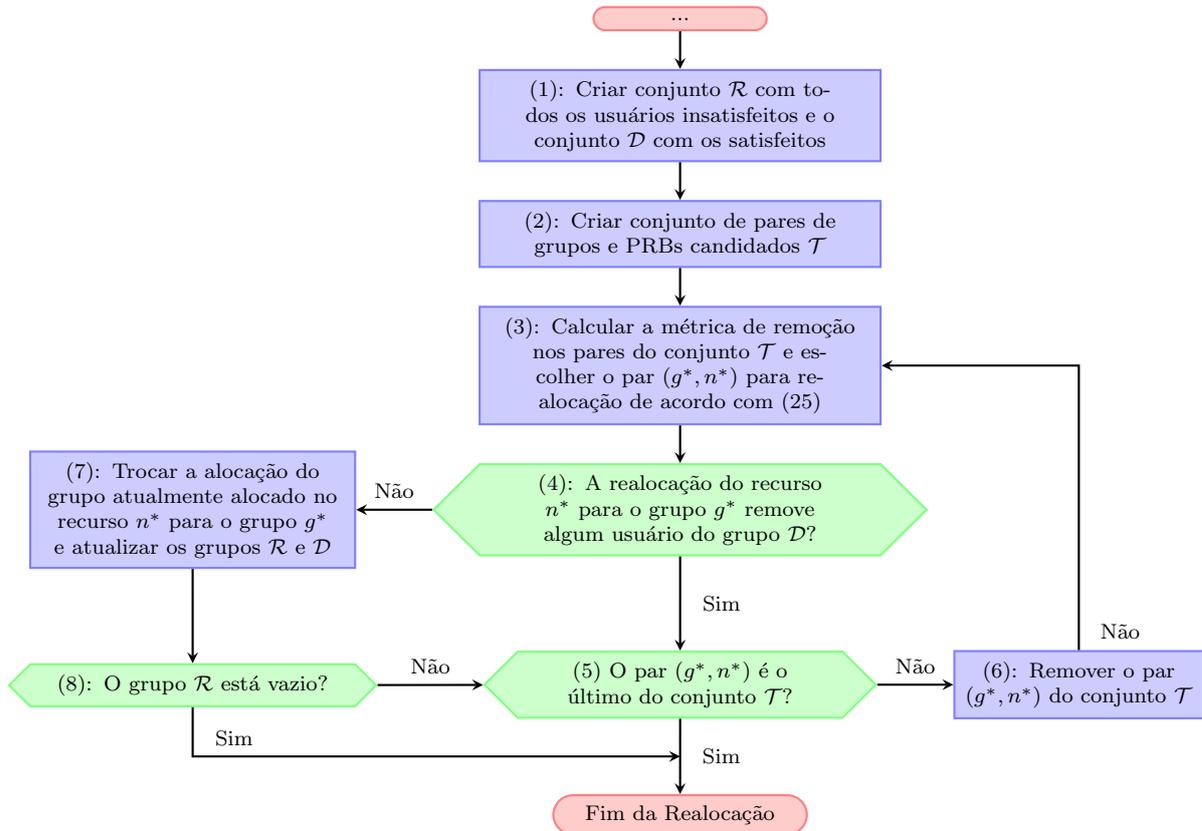
$$\varphi_{g,n} = \frac{\sum_{j \in \mathcal{R}} |r_{\text{obj}}^j - (\tilde{r}_{\text{obj}}^j + r_{g,j,n} - r_{g',j,n})|}{\sum_{j \in \mathcal{R}} |r_{\text{obj}}^j - \tilde{r}_{\text{obj}}^j|} \frac{\Phi^{\text{atual}}}{\Phi_{g,n}^{\text{nov}}}, \quad (24)$$

em que \tilde{r}_{obj}^j e g' são, respectivamente, a taxa de dados do usuário j na atual alocação de recursos e o grupo interferente selecionado para o recurso n , enquanto Φ^{atual} e $\Phi_{g,n}^{\text{nov}}$ são a soma total da taxa de dados do sistema na alocação atual e a soma taxa total se a alocação (g, n) for utilizada, respectivamente. Sendo assim, caso o par (g, n) já esteja alocado, a igualdade $\Phi^{\text{atual}} = \Phi_{g,n}^{\text{nov}}$ será verdadeira. O somatório do numerador da equação (24) considera apenas usuários não satisfeitos e mede a soma das distâncias entre a taxa de dados alcançada e a taxa de dados desejada, quando a alocação do recurso n muda para o grupo interferente g . O somatório do denominador representa a distância entre a taxa de dados dos usuários insatisfeitos na atual alocação de recursos e a taxa de dados alvo. Sendo assim, menores valores da métrica representam realocações em que os usuários insatisfeitos mais se aproximam da satisfação. A realocação será efetuada levando em conta o menor valor da métrica visto que o objetivo é encontrar alocações que a minimizem:

$$(g^*, n^*) = \arg \min_{\forall (g,n) \in \mathcal{T}} \varphi_{g,n}, \quad (25)$$

em que n^* é o PRB que será realocado para o grupo interferente g^* . O algoritmo de realocação modificado para este trabalho é representado no fluxograma da Figura 8.

Figura 8: Fluxograma do algoritmo para realocação de PRBs.



Fonte: Próprio autor.

O primeiro passo do algoritmo de realocação de recursos é a criação dos grupos \mathcal{R} e \mathcal{D} . No trabalho [40] esses grupos são criados a partir da alocação encontrada após a aplicação do algoritmo de remoção de usuários do fluxograma da Figura 7. Na proposta da heurística dessa dissertação é considerado um outro ponto inicial que será abordado a seguir. O passo (2) é a criação do grupo \mathcal{T} contendo todos os pares recursos do sistema e os grupos interferentes contendo usuários do grupo \mathcal{R} e a seleção do par recurso/grupo para realocação, de acordo com (25).

No passo (4) é verificado se a nova alocação retira algum usuário do grupo \mathcal{D} , ou seja, se algum usuário já satisfeito sairá da satisfação com essa nova realocação. Em caso afirmativo, essa alocação não deverá ser realizada e o par (g^*, n^*) deverá ser removido do conjunto \mathcal{T} . Assim o algoritmo segue para o passo (5) que verifica se o par grupo/recurso a ser removido é o último do conjunto \mathcal{T} , nesse caso não há mais realocações possíveis e o processo de realocação termina sem encontrar uma solução factível para o problema. Porém, caso ainda haja outros pares em \mathcal{T} , o algoritmo segue para o passo (6), em que a remoção do par no grupo é efetivada e retorna ao passo (3) para selecionar outro grupo para realocação.

No caso em que o passo (4) verifique que nenhum usuário saiu do estado de satisfação, a realocação deve ser então efetivada no passo (7). Neste passo, o grupo atualmente alocado no recurso n^* deve ser desalocado e a alocação passará para o grupo

g^* . Com essa mudança a composição dos conjuntos \mathcal{D} e \mathcal{R} será atualizada. Assim, no passo (8) é verificado se o conjunto \mathcal{R} está vazio. Isto significa que todos os usuários foram satisfeitos e o algoritmo se encerra com uma solução factível. Caso o conjunto não esteja vazio, o algoritmo segue para o passo (5) onde verificará se o par grupo/recurso é o último disponível para remoção.

A aplicação da remoção de usuários do fluxograma da Figura 7 e uma etapa de realocação de recursos que originou o processo descrito na Figura 8 são todas etapas presentes no algoritmo apresentado em [40]. Resta-nos descrever como ocorre o processo de criação dos conjuntos \mathcal{R} e \mathcal{D} que antecede a aplicação da realocação descrita na Figura 8. Este processo é realizado através da solução de uma versão relaxada do problema original.

Após a remoção dos usuários descrita na Figura 7 e a seleção apenas de grupos interferentes válidos, o problema de otimização removendo algumas restrições e variáveis pode ser reescrito como:

$$\max_{x_{g,n}} \sum_j \sum_n \sum_g x_{g,n} r_{g,j,n} \quad (26a)$$

sujeito a

$$\sum_g x_{g,n} = 1 \quad \forall n, \quad (26b)$$

$$\sum_g \sum_n x_{g,n} r_{g,j,n} \geq r_{\text{obj}}^j \quad \forall j, \quad (26c)$$

$$x_{g,n} \in \{0, 1\} \quad \forall n \text{ e } \forall g. \quad (26d)$$

A partir dessa nova formulação foi proposto relaxar o problema (26) em um LP (do inglês, *Linear Program*) e, a partir dessa solução, realizar um processo iterativo de realocações de PRBs, considerando apenas algumas variáveis do problema, enquanto outras são mantidas fixas com os valores encontrados pelo ILP. Dessa forma, o algoritmo irá analisar um espaço de busca reduzido que irá aumentar a cada iteração.

Inicialmente, considere a variável contínua de otimização da versão relaxada do problema (26) $\hat{x}_{g,n}$ que pode assumir qualquer valor entre 0 e 1. Analisando a restrição (26b) pode-se afirmar que a versão LP do problema permite uma alocação parcial de um PRB para múltiplos grupos, de forma que $\hat{x}_{g,n}$ representa a porcentagem dessas parcelas e a soma de todas as contribuições da alocação de cada grupo resulte em 1. A solução do problema LP relaxado representa o limite superior da solução ótima do ILP, ou seja, considere que $x_{g,n}^o$ seja a solução ótima do problema na versão ILP e que $\hat{x}_{g,n}^o$ seja o ótimo do LP então

$$\sum_j \sum_n \sum_g x_{g,n}^o r_{g,j,n} \leq \sum_j \sum_n \sum_g \hat{x}_{g,n}^o r_{g,j,n}. \quad (27)$$

Há na literatura algoritmos com soluções exatas para problemas LP com complexidade polinomial no pior caso. Um exemplo é o algoritmo Karmarkar que possui complexidade de $\mathcal{O}(n^{3.5})$ [41]. A solução do LP não é o foco desta dissertação, sendo assim não será descrito algoritmos para solução do problema LP neste trabalho. Portanto, qualquer solução ótima para o problema é válida para o algoritmo aqui proposto.

A partir da solução ótima da versão relaxada os valores de $\hat{x}_{g,n}$ podem ser de 0, 1 ou um valor intermediário entre 0 e 1. Variáveis que assumirem valores absolutos de 0 ou 1 são chamadas de variáveis não básicas enquanto que as variáveis que assumirem um valor fracionado entre 0 e 1 de básicas.

Outro conceito importante para a heurística proposta é o custo reduzido das variáveis. A seguir é apresentado uma definição geral deste conceito. Considere um problema LP genérico que possui l restrições e q variáveis:

$$\min_{\mathbf{x}} \quad \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (28a)$$

$$\text{sujeito a} \quad \mathbf{S}\mathbf{x} = \mathbf{b}, \quad (28b)$$

$$\mathbf{x} \geq 0. \quad (28c)$$

em que $\mathbf{c} = [c_1, \dots, c_q]^T$ é um vetor coluna com os coeficientes da função objetivo e $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_q]^T$ é um vetor coluna com as variáveis do problema. A matriz \mathbf{S} , que representa as equações das restrições do problema, possui dimensão $l \times q$. O vetor coluna $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_l]^T$ representa o valor resultante das restrições que limitam o espaço de solução nas l restrições do problema, logo o vetor possui dimensão $l \times 1$. Em uma solução factível, o vetor \mathbf{x} possui l variáveis básicas. Seja $B(1) \dots B(l)$ os índices das l variáveis básicas de uma solução factível, as colunas das variáveis básicas na matriz de restrição são $\mathbf{Q} = [\mathbf{s}_{B(1)}, \dots, \mathbf{s}_{B(l)}]$, em que \mathbf{s}_i é a i -ésima coluna da matriz \mathbf{S} . Devido a restrição (28c), todas as variáveis não básicas em uma solução factível serão zero. Dessa forma pode-se considerar na função objetivo apenas as variáveis básicas. Os coeficientes da função objetivo considerados em uma solução são $\mathbf{c}_B = [c_{B(1)}, \dots, c_{B(l)}]^T$. O custo reduzido de uma variável i do problema a partir de uma solução básica pode ser definido como:

$$\hat{c}_i = c_i - \mathbf{c}_B^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{s}_i. \quad (29)$$

A seguir, explicamos novamente o conceito de custo reduzido em um exemplo utilizando o tableau. Considere o seguinte problema LP:

$$\max_{x_1, x_2} x_1 + x_2 \quad (30a)$$

$$\text{sujeito a } x_1 \leq 2, \quad (30b)$$

$$x_1 + 2x_2 \leq 4, \quad (30c)$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \quad (30d)$$

Para resolução do problema (30) com o algoritmo *simplex* é necessário transformar as restrições em restrições de igualdades. Para isto a adição de variáveis auxiliares é necessária. Por convenção transforma-se o problema de maximização em minimização alterando o sinal dos coeficientes na função objetivo. O problema pode ser reformulado como:

$$\min_{x_1, x_2} -x_1 - x_2 \quad (31a)$$

$$\text{sujeito a } x_1 + x_3 = 2, \quad (31b)$$

$$x_1 + 2x_2 + x_4 = 4, \quad (31c)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0 \quad (31d)$$

A adição das variáveis x_3 e x_4 ajudarão na solução do LP. Seja o vetor de variáveis $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, uma solução factível, também conhecida como solução básica, para este problema é $\mathbf{x} = [0, 0, 2, 4]^T$. Apesar de factível esta não é uma solução ótima. Entretanto, é possível através do método *simplex*, ou outros métodos na literatura, determinar a solução ótima. A partir do problema (31), o *tableau* inicial do problema (31) pode ser montado como:

$$\begin{array}{c|cccc|c} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \\ \hline z & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline x_3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ \hline x_4 & 1 & 2 & 0 & 1 & 4 \end{array} \quad (32)$$

No *tableau* (32) a última coluna representa os valores das variáveis x_3 e x_4 . A variável z é a função objetivo que é igual a zero, de acordo com a última coluna, quando x_1 e x_2 também são zero. Os valores das colunas centrais na mesma linha do z representam os coeficientes das variáveis para o cálculo do valor de z e são conhecidos como o custo reduzido das variáveis nesta solução básica. As demais linhas do *tableau* representam as restrições do problema LP e os valores das colunas centrais são os coeficientes das variáveis nas restrições do problema. Note que o problema (31) possui apenas duas restrições e consequentemente o *tableau* (32) possui apenas duas linhas de restrições.

O *tableau* da solução ótima do problema (31) é:

$$\begin{array}{c|cccc|c}
 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \\
 \hline
 z & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 3 \\
 x_1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \\
 x_2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 1
 \end{array} \tag{33}$$

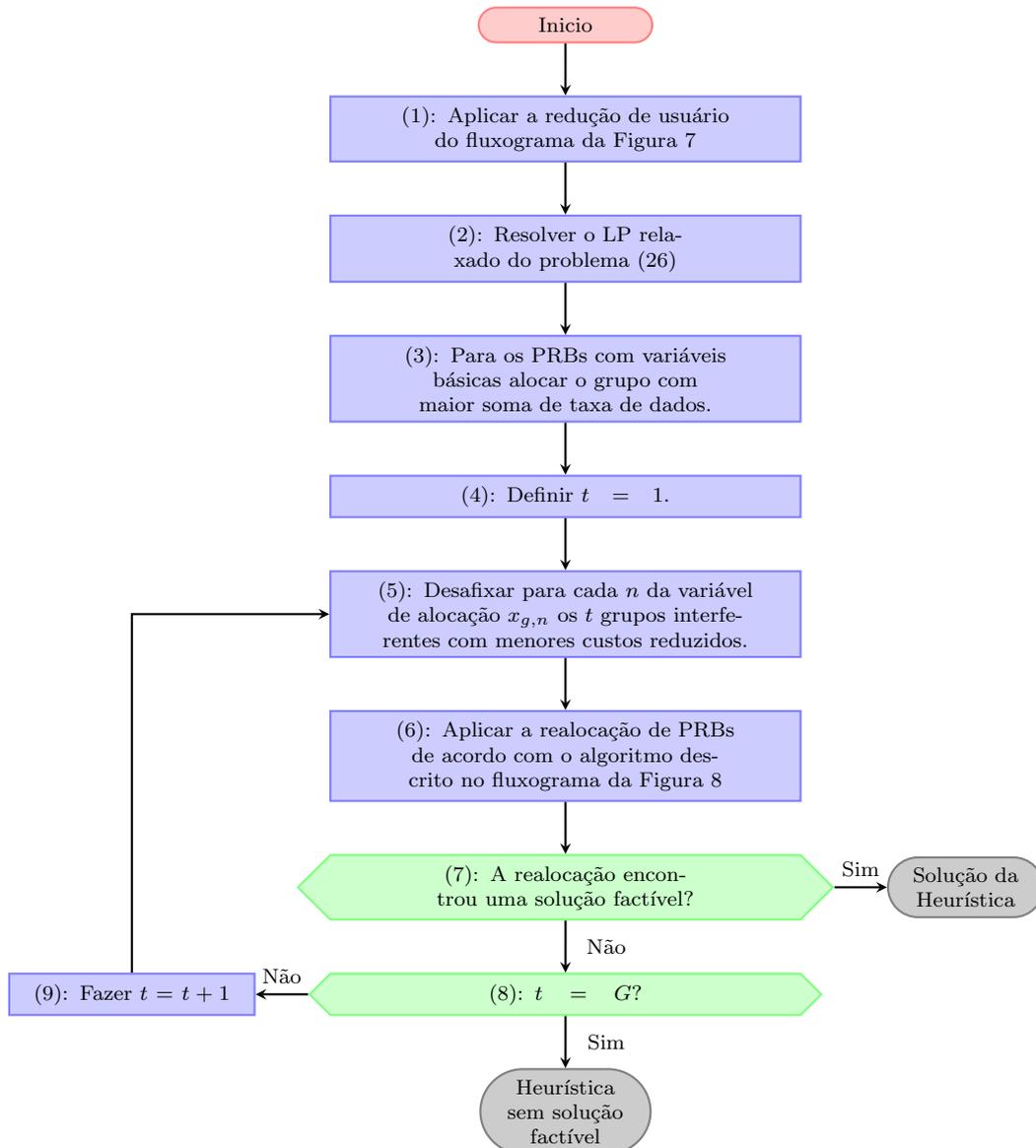
Note que o custo reduzido das variáveis x_1 e x_2 na solução ótima são zero. As variáveis x_3 e x_4 possuem custo reduzido de $\frac{1}{2}$ em relação ao problema (31). Como o problema (31) é a transformação do problema de maximização (30) em problema de minimização. Então para o problema original as variáveis x_3 e x_4 possuem de fato custo reduzido de $-\frac{1}{2}$.

O custo reduzido representa o quanto uma variável impacta na função objetivo em uma solução básica, ou seja, esse valor mede o quanto será a variação na função objetivo quando a variável do problema LP relaxado for igual a 1. Um custo reduzido de valor negativo implica em um valor que reduz a função objetivo do problema, o que é algo indesejado. Sendo assim, em uma solução ótima do LP relaxado, as variáveis que assumem menores valores absoluto do custo reduzido são as que causam menor impacto na função objetivo, que no nosso caso é o limite superior do ILP original. Seguindo esse raciocínio, a heurística tenta aplicar a etapa de realocação de recursos considerando para possíveis realocações apenas as variáveis com menores valores absolutos do custo reduzido. Para isto fixou-se as variáveis com maiores custos reduzidos. Por fixar, denominamos o processo de assinalar o valor fixo de 0 a essa dada variável impossibilitando dela ser escolhida como uma alocação válida. Essa consideração reduz o espaço de busca da etapa de realocação para as variáveis que menos degradarão a soma da taxa de dados. A medida que a realocação não encontra uma solução factível mais variáveis serão desafixadas (tornando possível elas serem escolhidas para alocação), tomando como base os valores absolutos do custo reduzido de cada variável, até o caso que todo o espaço de busca seja considerado ou uma solução factível seja encontrada.

Como método de fixação de variáveis considera um valor t que irá variar de 1 até G . A cada iteração, para cada PRB, todas as variáveis serão fixas, com exceção dos t grupos interferentes com menores valores do custo reduzido e as variáveis não básicas de valor 1. Dessa forma o algoritmo da Figura 8 será aplicado considerando apenas os t melhores grupos de cada PRB. A heurística completa é descrita no fluxograma da Figura 9.

A primeira etapa da heurística é a aplicação da redução de usuários descrita na Figura 7. A etapa (2) é a solução da versão LP relaxada do problema (26). Na etapa (3) é analisada a alocação resultante do LP da etapa (2). Note que alguns PRBs receberão alocações fracionadas em $\hat{x}_{g,n}$. Para resolver esse conflito desconsidera-se essas alocações e aloca-se de fato o grupo interferente que obtiver maior soma de taxa. Essa nova alocação

Figura 9: Fluxograma da heurística completa proposta.



Fonte: Próprio autor.

não leva em conta se o grupo obteve algum valor maior que zero no resultado do LP relaxado. Após isto, na etapa (4), inicia-se o valor de t com valor 1, que indica o número de grupos interferentes que estão disponíveis para uma nova alocação em cada PRB. Dessa forma, na primeira iteração apenas haverá uma opção de grupo em cada PRB para realizar a realocação. No passo (5) é realizada a escolha de quais grupos interferentes, em cada PRB, serão desafixados e considerados no algoritmo de realocação no passo (6). No passo (7) é verificado se a realocação encontrou uma solução factível, em caso positivo o algoritmo termina com uma solução. Caso ainda não se tenha uma solução factível, o algoritmo verifica no passo (8) se $t = G$, ou seja, se a realocação de PRBs considerou todo o espaço de busca e t não poderá ser incrementado para uma nova tentativa de realocação fazendo a heurística terminar sem uma solução factível.

As análises da complexidade computacional no pior caso dos algoritmos descritos nas Figuras 7, 8 e 9 são realizados no Apêndice 5.1. Para o cenário com geometria hexagonal, a complexidade da heurística é $\mathcal{O}(G^4 N^2 M \sum_{s=1}^S k_s + (NG)^{3.5})$ e para o cenário com geometria estocástica $\mathcal{O}(G^4 N^2 \sum_{s=1}^S k_s + (NG)^{3.5})$. O RAISES possui complexidade para os cenários com geometria hexagonal e estocástica a complexidade $\mathcal{O}(GNJ^2 + (M \sum_{s=1}^S k_s)GN^2)$ e $\mathcal{O}(GNJ^2 + (\sum_{s=1}^S k_s)GN^2)$, respectivamente.

Apesar da complexidade maior da heurística proposta em relação ao RAISES, a complexidade computacional é polinomial e inferior a complexidade de $\mathcal{O}(2^{GN})$ das soluções ótimas.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações computacionais dos algoritmos propostos no Capítulo 3, considerando os cenários descritos no Capítulo 2. Considerações gerais sobre as simulações para o cenário com geometria estocástica e hexagonal são apresentados na Seção 4.1. Na Seção 4.2 são realizadas análises das simulações para o cenário com geometria hexagonal. Por fim, na Seção 4.3 as análises do cenário com geometria estocástica são apresentadas.

4.1 Considerações gerais

Para avaliar o desempenho das soluções ótima e sub-ótima propostas, realizou-se simulações em diversos cenários utilizando o *software* matemático MATLAB. Para encontrar as soluções ótimas dos problemas ILPs e LPs utilizou-se o CPLEX [36] como método de resolução. As análises dos resultados neste capítulo foram realizadas considerando que o escalonador de recursos possui o conhecimento perfeito da qualidade dos canais. Os métodos simulados foram aplicados em vários *snapshots*, que são realizações de cenários em que são gerados de forma aleatória a posição dos usuários e os canais. Para o cenário

com geometria estocástica também foram gerados aleatoriamente as posições dos PAs. O tempo de cada *snapshot* adotado foi igual a 1 ms, o que corresponde a um TTI do LTE. Também considerou-se que durante o TTI todos os parâmetros do sistema são estáticos, ou seja, não há variações nos canais e nas posições dos PAs e usuários. Para validação estatística dos métodos, os *snapshots* foram gerados de forma que independente. Os principais algoritmos simulados foram:

- **Baseado na SNR:** Esse método refere-se a solução ótima que foi proposta em [26]. Neste problema a alocação de recursos é realizada por uma única célula considerando apenas a SNR. Replicou-se a formulação do problema ILP proposto e o problema foi resolvido em cada célula sem considerar o conhecimento sobre a interferência. Para comparação justa dos resultados a taxa de transmissão final foi calculada baseada na SINR real experimentada pelo receptor, apesar da alocação ter sido baseada na SNR. A duplicação de serviços para distinguir usuários de centro da célula e da borda não foi adotado em [26] e é uma proposta deste trabalho. No entanto, devido as semelhanças na formulação do problema, a virtualização dos serviços para os critérios de justiça também foi aplicado na simulação desta solução.
- **RAISES:** Heurística proposta em [40] para alocação de recursos no cenário MIMO. Como discutido na seção 3.2, esse algoritmo foi proposto para um cenário diferente, no entanto a formulação matemática se assemelha ao cenário proposto neste trabalho e serviu como base para a heurística proposta. Dado a semelhança matemática dos problemas, o **RAISES** pôde ser simulado também de forma centralizada como um escalonador de recursos global da rede.
- **Ótimo Proposto:** Solução ótima das formulações (8) ou (18), propostas neste trabalho. A solução foi encontrada através do CPLEX.
- **Heurística Proposta:** A heurística proposta neste trabalho considerando a redução de usuários descrita no fluxograma da Figura 7 e a nova proposta de redistribuição de PRBs descrita no fluxograma da Figura 8. O algoritmo completo foi descrito na Figura 9.
- **Sem Duplicação de Serviços:** Método que não distingue os usuários entre centro e borda da célula. Para esta solução a duplicação de serviços para garantir justiça para usuários de borda não é considerada.

As principais métricas adotadas para análise de dados foram a taxa de *outage* e as FDAs (Funções de Densidade Acumulada) da soma da taxa de dados. O *outage* ocorre nos *snapshots* em que o algoritmo não encontra uma solução factível, ou seja, não é encontrado uma solução em que todos os requisitos de QoS são satisfeitos. Sendo assim a taxa de *outage* é a porcentagem de vezes em que o algoritmo não encontrou uma solução nos *snapshots* simulados. A soma da taxa de dados no problema formulado é a função objetivo dos problemas de otimização apresentados e serve como métrica para medir a qualidade da solução encontrada. Em cada simulação será considerado uma carga medida

em taxa de dados. Esta carga representa o requisito de QoS dos serviços oferecidos pelo sistema.

As soluções encontradas pelo método **Sem Duplicação de Serviços** tendem a descartar os usuários de borda, tornando injusta a comparação da taxa de *outage* e a soma da taxa de dados deste método com as demais soluções simulados. Para este caso específico analisou-se a média da satisfação dos usuários de centro e borda em cada cenários com geometria hexagonal.

4.2 Geometria hexagonal

Os principais parâmetros de simulação para o cenário com geometria hexagonal são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros da simulação células hexagonais.

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio da célula	200	m
Raio do centro da célula	150	m
Potência de transmissão por PRBs	8,2607	dBm
Desvio padrão do sombreamento	10	dB
Perda de Percurso	$30,6 + 36,7 \cdot \log_{10}(d)$	dB
Densidade espectral do ruído	$3,16 \cdot 10^{-20}$	W/Hz
Número de <i>Snapshots</i>	1000	-
Número de serviços	2 (1 centro e 1 borda)	-
Número de terminais por serviço	3 $\left(\begin{array}{c} 6 \text{ Sem Duplicação} \\ \text{de Serviços} \end{array} \right)$	-
Número de PRBs	15	-
Número usuários satisfeitos por serviço	2 $\left(\begin{array}{c} 4 \text{ Sem Duplicação} \\ \text{de Serviços} \end{array} \right)$	-
Número de PAs	1, 2 e 3	-
Modelo de Canal	3GPP SCM Micro [42]	-

Fonte: Próprio autor.

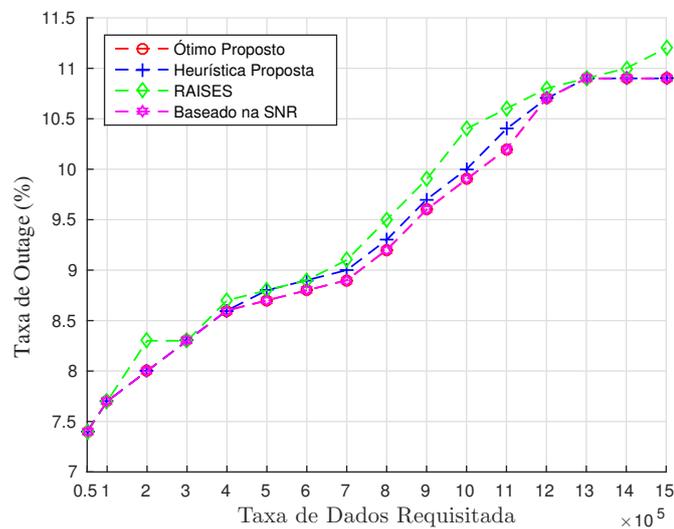
O raio da célula adotado foi de 200 metros. O raio do centro da célula, que separa os usuário na borda e no centro da célula é de 150 m. Os usuários de centro e borda foram gerados geograficamente dentro da área de cobertura correspondente. Note que a perda de percurso é um modelo determinístico e que depende da distância, sendo assim essa consideração será o mesmo que considerar a média do estado de canal entre o PA e o usuários.

Em todas as simulações foram modelados dois serviços considerando a duplicidade, ou seja, um serviço de centro da célula e um de borda. Sendo assim, o cenário possui apenas um único serviço que pode ser utilizado por usuários de centro e de borda. Por causa da alta complexidade computacional das soluções ótimas não simulou-se resultados com um número maior de serviços, no entanto as formulações matemáticas dos problemas preveem casos com um maior número de serviços.

Em ambos os serviços simulados é exigido como mínimo de satisfação um total de 2 usuários em cada célula, o que representa no total 4 usuários satisfeitos em cada célula. Para manter a justiça entre o método **Sem Duplicação de Serviços** e os demais, considerou-se para esse método um único serviço com todos os usuários da célula, sendo que será também exigido a satisfação de 4 usuários em cada célula. Sendo assim, em todos os métodos simulados foi exigida a satisfação do mesmo número de usuários. A única diferença é a distinção entre usuários de centro e borda que não foi aplicada no método **Sem Duplicação de Serviços**.

O primeiro resultado analisado é a taxa de *outage* do sistema. A taxa de *outage* para o caso com uma única célula (não multicelular) é mostrada na Figura 10.

Figura 10: Taxa de *outage* para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com uma célula.



Fonte: Próprio autor.

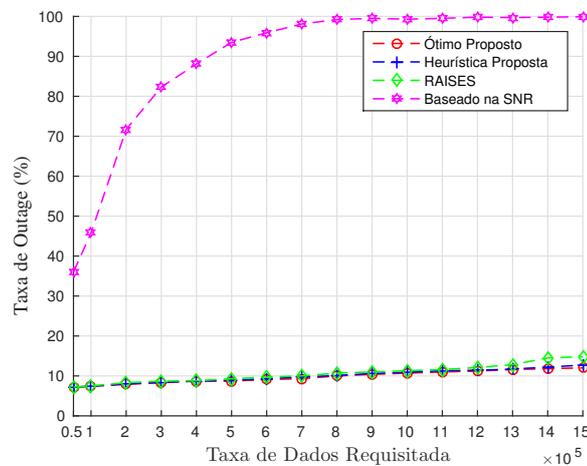
Mesmo considerando uma única célula no sistema, os usuários foram separados entre centro e borda. Note que o **Ótimo Proposto** e **Baseado na SNR** obtiveram a mesma taxa de *outage* em todos os requisitos de QoS. Como na simulação todos os usuários foram servidos por uma única célula e os grupos interferentes válidos para a solução são aqueles que contêm apenas usuários servidos por PAs distintos, os grupos interferentes serão compostos apenas por um único usuário, ou seja, o grupo interferente representa de fato o usuário. Sendo assim, o número total de grupos interferentes será o mesmo que o número de usuários no sistema. Dessa forma, o problema de otimização resolvido no **Ótimo Proposto** é equivalente ao **Baseado na SNR** quando há apenas uma célula no sistema. Com esse resultado pode-se concluir que a proposta deste trabalho é uma generalização do trabalho [26] adequando-se a cenários com múltiplas células ou com uma única célula.

Para o cenário com uma única célula, os algoritmos da **Heurística Proposta** e **RAISES** obtiveram a taxa de *outage* próximo das soluções ótimas. O algoritmo **RAISES**

obteve um desempenho um pouco pior que a **Heurística Proposta** para alguns requisitos de taxa. Como mostra a Figura 10, a maior piora para o **RAISES** ocorreu na carga de 1 Mbps em que obteve um aumento de 0,5% na taxa de *outage* em relação ao ótimo. O pior desempenho da **Heurística Proposta** foi de apenas 0,2% no requisito de 1,2 Mbps.

Para cenário com a presença de interferência é necessário adicionar outras células ao sistema. A taxa de *outage* para o caso com duas células, ambas com 6 usuários, é mostrado na Figura 11. Neste cenário há um total de 12 usuários sendo 6 no centro das células e 6 nas bordas.

Figura 11: Taxa de *outage* para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com duas célula.



Fonte: Próprio autor.

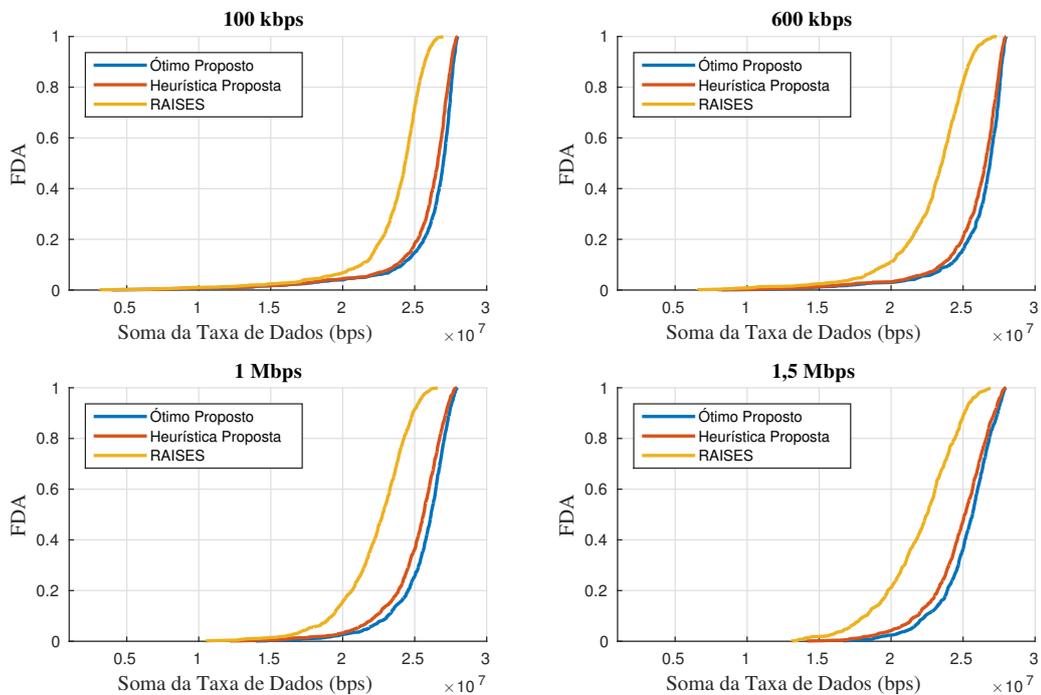
O impacto da interferência pode ser notado pela piora do desempenho no método **Baseado na SNR**, que no caso com uma única célula obteve taxa de *outage* ótima. Para o menor requisito de QoS, este método que desconsidera a interferência obtém a taxa de *outage* em 36%, valor elevado comparado ao **Ótimo Proposto** que obteve apenas 7%. A partir da carga de 800 kbps, o método de alocação **Baseado na SNR** não consegue resolver alocações de recursos satisfatória em praticamente nenhum *snapshot*, tornando o método totalmente impraticável para um cenário realista.

As heurísticas analisadas demonstraram desempenhos próximos ao longo das cargas com uma tendência de divergência na medida em que a exigência da taxa de dados é aumentada. Para o requisito de taxa de dados de 1,5 Mbps, verifica-se um distanciamento entre **RAISES** e a **Heurística Proposta**, em que ambos atingiram uma taxa de *outage* de 14,8% e 12,7% respectivamente. Nessa mesma carga, a solução ótima obteve 12% de *outage*, o que mostra um aumento de 2,8% para o **RAISES** e de 0,7% para a **Heurística Proposta** em relação ao **Ótimo Proposto**.

Análise da satisfação é a principal métrica para avaliar o algoritmo de alocação de recursos, pois representa a capacidade do método em atingir os critérios mínimos de satisfação exigidos pelo problema de otimização. No entanto, também analisou-se

a qualidade destas soluções através da análise da função objetivo alcançada por essas soluções, que neste trabalho é a soma da taxa de dados. Essa análise foi realizada através da FDA considerando os *snapshots* simulados. A capacidade dos métodos encontrarem soluções válidas são analisados através da taxa de outage, dessa forma para uma análise justa da qualidade das soluções encontradas, apenas considerou-se *snapshots* em que todos os métodos analisados não obtiveram *outage*. Como o *outage* da solução **Baseado na SNR** apresentado na Figura 11 foi elevado, esta solução não foi considerada na análise a seguir. A Figura 12 ilustra as FDAs para o cenário com 2 células e exigência de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.

Figura 12: FDAs da soma da taxa de dados dos métodos “ótimo proposto”, “heurística proposta” e RAISES no cenário hexagonal com 2 células e exigências de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.



Fonte: Próprio autor.

Note que nos gráficos da Figura 12, as curvas de FDA do **Ótimo Proposto** sempre são as curvas mais a direita, seguido pela **Heurística Proposta** e o **RAISES** para todas as exigências de QoS. Esse comportamento mostra que a função objetivo da solução ótima proposta é o melhor resultado possível e representa o limitante superior de qualquer método subótimo. A análise da perda percentual para solução ótima do 50º percentil da FDA é sumarizada na Tabela 3.

Tabela 3: Percentual de degradação da soma da taxa de dados no 50º percentil em relação ao ótimo para a “heurística proposta” e RAISES no cenário com duas células.

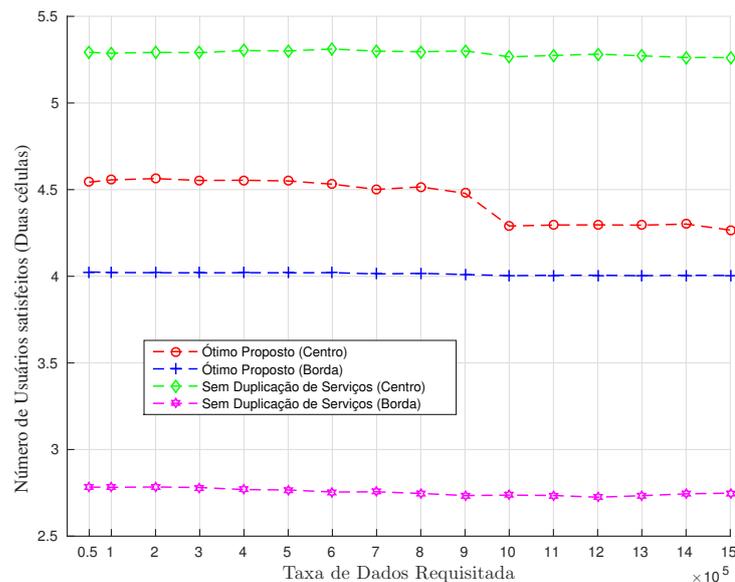
Método	100 kbps	600 kbps	1 Mbps	1,5 Mbps
Heurística Proposta	1,4%	1,2%	1,9%	2%
RAISES	11%	12%	12%	12%

Fonte: Próprio autor.

Note que a solução **RAISES** obteve uma degradação superior a 10% em todas as cargas simuladas, enquanto a **Heurística Proposta** obteve, em seu pior desempenho, uma perda 2% na carga de 1,5 Mbps.

Para verificar a vantagem de utilizar a duplicação de serviços para garantir justiça entre usuários de centro e borda da célula simulou-se o método **Sem Duplicação de Serviços**. Note que para o cenário há no total 3 usuários no centro e 3 usuários na borda por célula e que o número mínimo de usuários que devem ser satisfeitos no centro e borda de cada célula são 2 usuários. Como as soluções devem levar em conta o sistema de forma global, e há duas células no cenário, o sistema no total conta com 6 usuários no centro e 6 na borda das células. A média dos usuários satisfeitos no cenário para o **Ótimo Proposto** e **Sem Duplicação de Serviços** em que ambos não obtiveram *outage* é mostrado na Figura 13. Para este resultado não foram adicionadas as curvas de satisfação da **Heurística Proposta** e do **RAISES**, pois em ambos os casos as soluções sempre obtiveram o número mínimo de satisfação em cada serviço devido a etapa de remoção de usuários aplicada. O método **Baseado na SNR** também não foi incluído no gráfico devido a alta taxa de *outage* do método.

Figura 13: Médias de usuários satisfeitos localizados no centro e na borda das células dos métodos “sem duplicação de serviços” e “ótimo proposto” no cenário com duas células.



Fonte: Próprio autor.

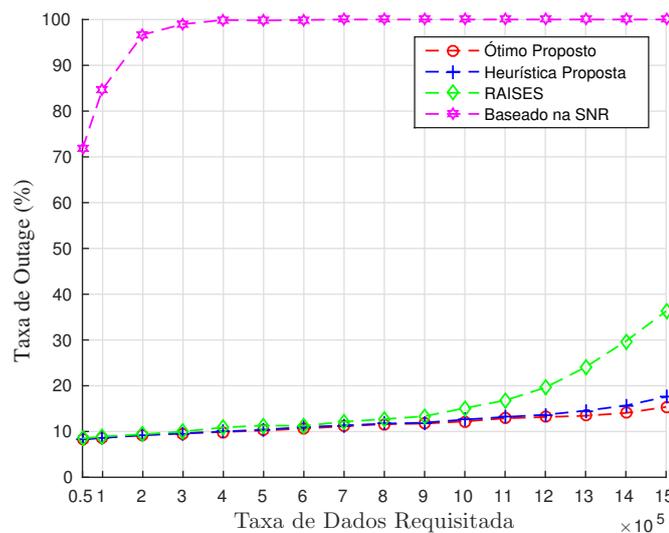
Para o cenário com duas células, o sistema total deve satisfazer no mínimo 4

usuários no centro da célula e 4 usuários na borda da célula, considerando as satisfações das duas células somadas. Note que as médias de usuários satisfeitos do **Ótimo Proposto** são maiores que 4 para os dois serviços simulados. Ainda assim a média de usuários satisfeitos no centro da célula tende a ser um pouco maior que 4, enquanto a média de usuários na borda é exatamente 4, para todos os requisitos de taxa de dados. Esse comportamento pode ser explicado pela facilidade em satisfazer usuários no centro da célula, o que torna possível que em alguns casos seja possível satisfazer o mínimo de usuários na borda e no centro e ainda seja vantajoso para a soma da taxa de dados total satisfazer outros usuários. No entanto, pode-se verificar que essas boas condições para satisfação de usuários não são comuns aos usuários de borda. Este fato é evidenciado pela média fixa de 4 usuários em todas as cargas simuladas, o que mostra a importância da utilização de critérios de QoS específicos para borda da célula.

Pode-se notar também na Figura 13 que o método **Sem Duplicação de Serviços** não atende em média o mínimo de usuários que devem ser satisfeitos na borda da célula e há uma diferença no número de usuários satisfeitos na borda da célula e no centro. Em média 5,3 usuários no centro da célula são satisfeitos enquanto na borda apenas 2,7 são satisfeitos. Este resultado mostra que usuários de borda podem ser prejudicados no acesso a rede por escalonadores de recursos que não façam distinções entre usuários de centro e borda da célula.

Com o objetivo de analisar o impacto da interferência no escalonamento também realizou-se simulações para o caso com três células. A taxa de *outage* alcançada para este cenário é representada na Figura 14.

Figura 14: Taxa de *outage* para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com três células.



Fonte: Próprio autor.

Para este caso, há um total de 18 usuários em todo o sistema, sendo 9 usando o serviço do centro da célula e 9 o serviço de borda. Nota-se o mesmo comportamento para

o caso com duas células. No entanto para a menor exigência de taxa de dados (50 kbps) a solução **Baseado na SNR** inicia com uma taxa de *outage* acima de 70% enquanto o **Ótimo Proposto** se mantém um pouco abaixo dos 10%, ou seja, quase todas as soluções encontradas com a alocação ótima em apenas uma única célula não satisfaz os requisitos de QoS.

As heurísticas simuladas também mostraram um comportamento semelhante ao caso com duas células. O **RAISES** apresentou uma maior divergência da curva de *outage* da solução ótima, obtendo para o pior caso (em 1,5 Mbps) uma taxa de *outage* de 36%, enquanto a solução ótima se manteve em 15%. Nessa mesma carga a **Heurística Proposta** obteve 17,5% de taxa de *outage*, ou seja, na maior carga simulada o **RAISES** apresenta uma piora de 21% em relação ao ótimo enquanto a **Heurística Proposta** tem uma diferença em *outage* para **Ótimo Proposto** de 2,5%.

De forma semelhante ao cenário com duas células também analisou-se a qualidade da função objetivo das soluções no cenário com três células. A Figura 15 contém as FDAs para o cenário com três células e exigência de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.

Figura 15: FDA da soma da taxa de dados dos métodos “ótimo proposto”, “heurística proposta” e RAISES no cenário hexagonal com 3 células e exigências de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.

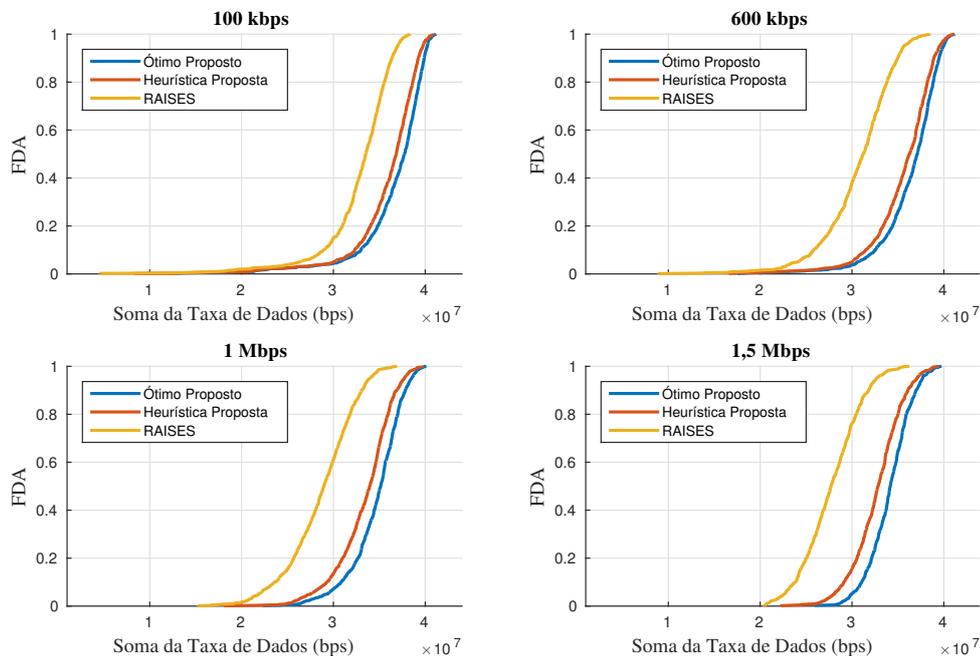


Figura: Próprio autor.

Nota-se na Figura 15 que a distribuição das curvas de FDA segue o mesmo comportamento do cenário com duas células. A análise da degradação do 50^o percentil é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Percentual de degradação da soma da taxa de dados no 50º percentil em relação ao ótimo para a “heurística proposta” e RAISES no cenário com três células.

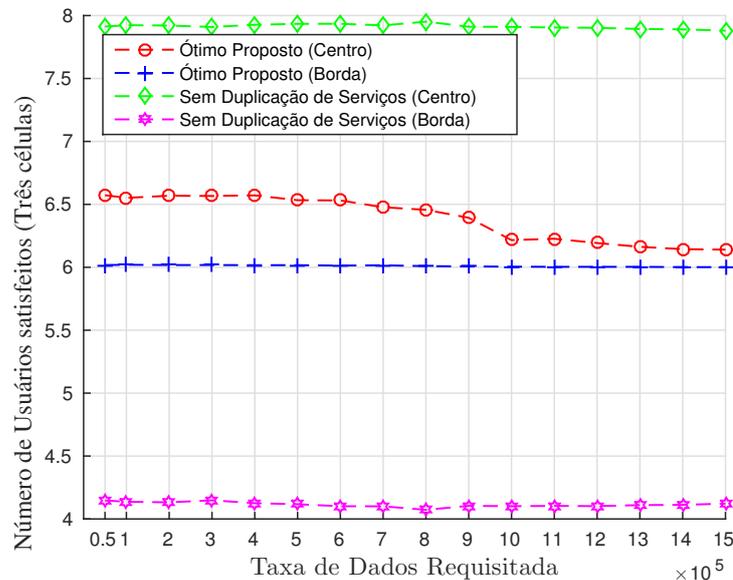
Método	100 kbps	600 kbps	1 Mbps	1.5 Mbps
Heurística Proposta	2,2%	2,2%	3,5%	3,5%
RAISES	11%	16%	17%	18%

Fonte: Próprio autor.

A **Heurística Proposta** obteve uma degradação menor que o método **RAISES**, tendo como pior desempenho a degradação de 3,5% no 50º percentil das cargas **1 Mbps** e **1,5 Mbps**, enquanto o **RAISES** obteve uma degradação superior a 10% em todas as cargas simuladas.

Semelhante ao cenário com duas células também verificou-se a média de usuários de centro e borda satisfeitos no sistema para o cenário com três células. Note-se na Figura 16 que as médias de número de usuários satisfeitos para **Sem Duplicação de Serviços** e **Ótimo Proposto** seguem o mesmo comportamento apresentado do cenário com duas células representado na Figura 13.

Figura 16: Médias de usuários satisfeitos localizados no centro e na borda das células dos métodos “sem duplicação de serviços” e “ótimo proposto” no cenário com três células.



Fonte: Próprio autor.

Note que para três células, as exigências de satisfação são de 6 usuários no centro e na borda da célula, contabilizando todos os usuários de todas as células do sistema. Assim como apresentado no caso para duas células, o **Ótimo Proposto** obteve um número de usuários satisfeitos no centro maior ou igual ao mínimo exigido, enquanto que o número de usuários satisfeitos é exatamente igual ao mínimo exigido.

A dificuldade para acesso a rede dos usuários na borda da célula usando o **Sem Duplicação de Serviços** também é evidenciado na Figura 16. Enquanto uma média de

7,9 usuários no centro das células são satisfeitos, apenas 4,1 nas bordas das células são satisfeitos.

4.3 Geometria estocástica

As simulações no cenário com geometria estocástica se assemelham ao cenário com geometria hexagonal, no entanto, a distinção entre usuários no centro e na borda da célula não são mais adequadas, pois é uma simulação de uma rede sem planejamento como mostrado anteriormente. Nesse contexto, os métodos **Ótimo Proposto** e **Sem Duplicação de Serviços** são na prática a mesma solução, motivo pelo qual não analisou-se o **Sem Duplicação de Serviços** para este cenário. Entretanto, ainda simulou-se duas restrições de serviço, que neste cenário representa dois serviços reais. As principais considerações das simulações para o cenário com geometria estocástica são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros da simulação geometria estocástica.

Parâmetro	Valor	Unidade
Área Simulada	400 x 400	m
Potência de transmissão por PRBs	8,2607	dBm
Desvio padrão do sombreamento	10	dB
Perda de Percurso	$30,6 + 36,7 \cdot \log_{10}(d)$	dB
Densidade espectral do ruído	$3,16 \cdot 10^{-20}$	W/Hz
Número de <i>Snapshots</i>	1000	-
Número de usuários	12	-
Número de células	1 até 5	-
Distância mínima entre células	10	m
Número de serviços	2	-
Número de usuários por serviço	6	-
Número usuários satisfeitos por serviço	4	-
Modelo de Canal	3GPP SCM Micro [42]	-

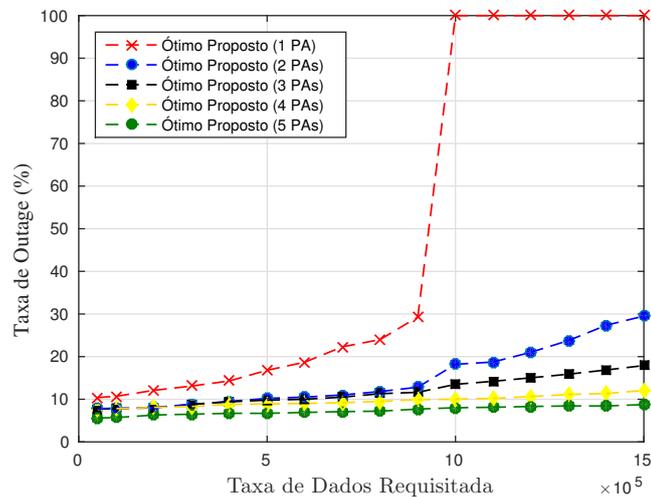
Fonte: Próprio autor.

Note que diferentemente do cenário com células hexagonais em que as células possuíam uma área de cobertura fixa, este cenário possui uma área de 400 x 400 metros em que os PAs foram posicionados de forma aleatória, porém com uma restrição de distância mínima de 10 metros. A associação entre usuários e PA foi realizada levando em conta o PA mais próximo do usuário. Para este cenário pode-se ter células com alta concentração de usuários e células sem usuários na área de cobertura, prejudicando o reuso dos recursos. Assumimos dois serviços de dados no sistema e, por simplicidade, considerou-se que ambos os serviços possuem o mesmo requisito de taxa de dados. Essa consideração não é equivalente a considerar apenas um serviço, pois a restrição no número mínimo de usuários satisfeitos é aplicado para cada serviço, o que restringe a seleção dos usuários que podem não ser atendidos.

Para analisar o impacto da densificação no cenário simulado comparou-se na

Figura 17 as taxas de *outage* para o mesmo cenário, porém variando o número de PAs entre 1 e 5.

Figura 17: Taxa de *outage* do “ótimo proposto” para cenário com geometria estocástica e com 1, 2, 3, 4 e 5 células.



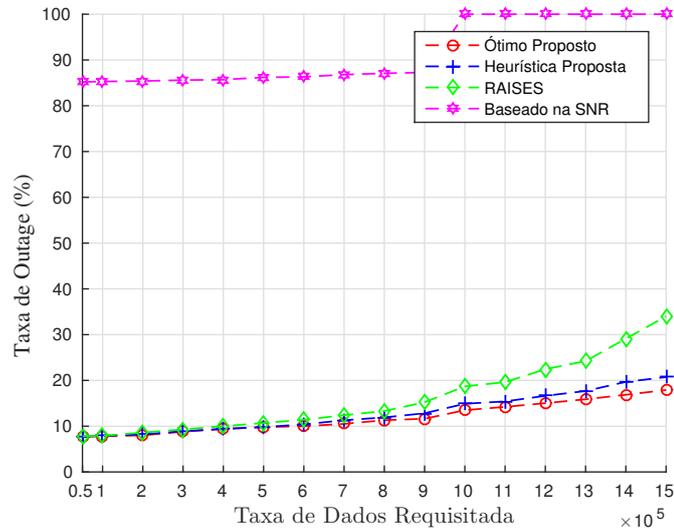
Fonte: Próprio autor.

Pode-se verificar na Figura 17 que a taxa de *outage* tende a aumentar-se a medida em que aumenta a exigência da taxa de dados. Esse resultado é esperado na solução ótima, pois há um maior número de recursos disponíveis para a mesma área de cobertura. Conclui-se também que apesar da interferência, a alocação de PRBs bem planejadas garante ganhos significativos em termos de satisfação dos usuários. A taxa de *outage* para o caso com um único PA mostra que a partir do requisito de 1 Mbps de taxa de dados os recursos não são mais suficientes para atender a rede com 12 usuários, pois a taxa de *outage* atinge 100% nesta carga. Tomando como base 1,5 Mbps, a maior carga simulada, nota-se que o melhor desempenho foi para o caso com 5 PAs com uma taxa de *outage* em 8,75%. Na sequência temos as curvas para 4, 3, 2 e 1 PA com taxa de *outage* em 12,6%, 18%, 29,5% e 100%, respectivamente.

Outro ponto a respeito do aumento da densidade que deve ser destacado é o seu impacto na complexidade computacional dos métodos de soluções. A proporção do número de células tende a impactar significativamente no número de grupos interferentes, pois um grupo interferente apenas pode ser composto por usuários de células diferentes. Sendo assim, cenários com maior número de PAs tendem a gerar problemas de otimização com maior número de grupos interferentes, o que dificulta a obtenção da solução em termos de complexidade.

Isolando o cenário com três células, pode-se realizar um comparativo entre os métodos **Ótimo Proposto**, **Heurística Proposta**, **RAISES** e **Baseado na SNR**. A taxa de *outage* de todos os métodos é apresentada na Figura 18 e novamente verifica-se um comportamento semelhante ao caso com geometria hexagonal.

Figura 18: Taxa de *outage* para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com três células no cenário com geometria estocástica.



Fonte: Próprio autor.

Para este cenário e densidade o método de solução **Baseado na SNR** obteve uma taxa de *outage* de 85% já na primeira carga de 50 kbps e atinge o 100% com 1 Mbps. Sendo assim, todas as alocações de recursos com esse método são impraticáveis para um escalonamento em um sistema realista. As heurísticas simuladas, assim como no cenário hexagonal, tendem a se distanciar da solução ótima a medida em que o requisito de taxa de dados para satisfação é aumentado. No entanto pode-se notar que a taxa de distanciamento do **RAISES** aumenta em uma proporção maior que a **Heurística Proposta**. Tomando como referência a carga de 1,5 Mbps, nota-se que a taxa de *outage* da **Heurística Proposta** é de 20,7%, enquanto o **RAISES** se encontra com 34%. Quando compara-se esses resultados com o **Ótimo Proposto**, que obteve 18%, temos uma perda de 2,7% na **Heurística Proposta** e 16% para o **RAISES**.

As FDAs para este mesmo cenário para as cargas de 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps são apresentadas na Figura 19 e as perdas em valores percentuais no 50º percentil das heurísticas em relação a solução ótima são apresentadas na Tabela 6.

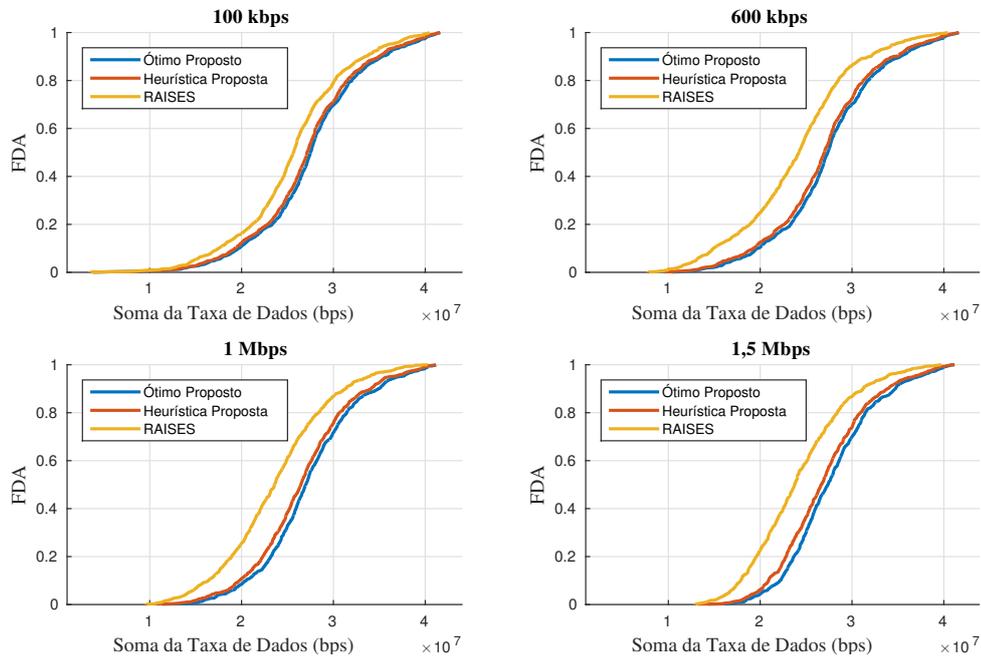
Tabela 6: Percentual de degradação da soma da taxa de dados no 50º percentil em relação ao ótimo para a “heurística proposta” e RAISES no cenário com geometria estocástica e três células.

Método	100 kbps	600 kbps	1 Mbps	1.5 Mbps
Heurística Proposta	0,9%	1,7%	1,9%	2,7%
RAISES	6,6%	11,5%	12,52%	13,3%

Fonte: Próprio autor.

A **Heurística Proposta** na carga com maior perda obteve uma piora de 2,7% em relação a solução ótima enquanto o **RAISES** obteve 13,3%. Isso mostra que mesmo

Figura 19: FDA da soma da taxa de dados dos métodos “ótimo proposto”, “heurística proposta” e RAISES no cenário com 3 células, geometria estocástica e exigências de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.



Fonte: Próprio autor.

em um cenário sem planejamento entre os PAs, a **Heurística Proposta** obtém ganhos em relação ao **RAISES**.

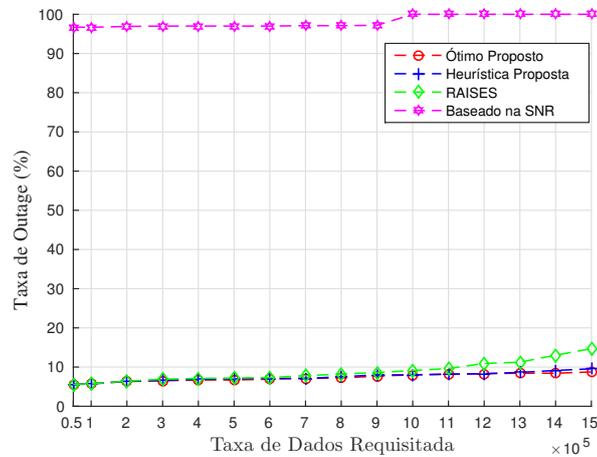
Note na Figura 17 que a medida em que se aumenta o número de PAs no sistema, a frequência em que as soluções encontram *outage* é menor, no entanto, o número de variáveis do problema também aumenta, o que pode dificultar a busca de soluções para os problemas estudados. Para estudar o comportamento das heurísticas em cenários com maior reuso de recursos, analisou-se na Figura 20 a taxa de *outage* para o cenário com o maior número de pontos de acesso simulados.

O que pode-se notar é que a redução do *outage* ocorre não somente para a solução ótima, mas também para as heurísticas simuladas. Esse comportamento mostra que ambos os métodos heurísticos conseguem manter uma boa taxa de *outage*, mesmo para problemas número de variáveis maiores. Analisando a Figura 20 pode-se perceber que o distanciamento entre as curvas de *outage* das heurísticas e do **Ótimo Proposto** diminuiu em relação a Figura 18.

As curvas de FDA para as taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps no cenário com 5 células são apresentadas na Figura 21. O resumo das perdas em termos percentuais para o 50º percentil estão na Tabela 7.

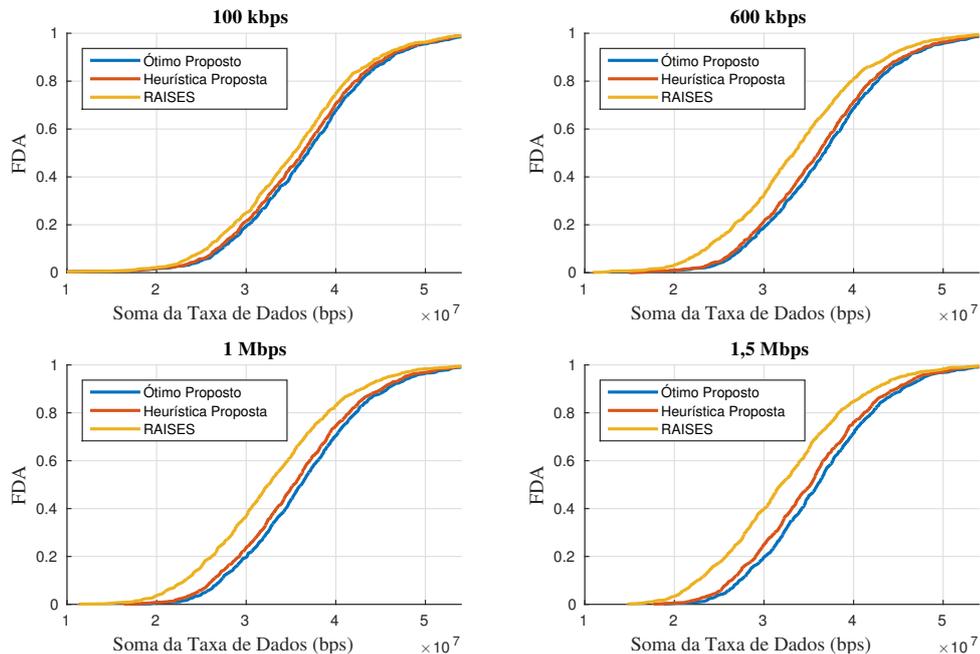
Pode-se verificar na Figura 21 o mesmo comportamento para todas as FDAs até então apresentadas neste trabalho, no entanto, ao comparar a Tabela 7 com a Tabela 6 nota-se valores de perda da **Heurística Proposta**, mostrando uma tendência do método em encontrar soluções piores a medida que a dimensão do problema aumenta. O contrário

Figura 20: Taxa de *outage* para a “ótimo proposto”, “heurística proposta”, RAISES e “baseado na SNR” considerando um sistema com cinco células no cenário com geometria estocástica.



Fonte: Próprio autor.

Figura 21: FDAs da soma da taxa de dados dos métodos “ótimo proposto”, “heurística proposta” e RAISES no cenário com 5 células, geometria estocástica e exigências de taxa de dados em 100 kbps, 600 kbps, 1 Mbps e 1,5 Mbps.



Fonte: Próprio autor.

pode ser verificado para o **RAISES**, que obteve melhores valores que o caso com três células. No entanto, essa variação é pequena para alguma constatação conclusiva e que para todos os casos simulados, a **Heurística Proposta** obteve menores taxas de *outages* e soluções de alocação com recursos com maiores soma de taxas que o **RAISES**.

Tabela 7: Percentual de degradação da soma da taxa de dados no 50º percentil em relação ao ótimo para a “heurística proposta” e RAISES no cenário com geometria estocástica e cinco células.

Método	100 kbps	600 kbps	1 Mbps	1,5 Mbps
Heurística Proposta	1,5%	1,5%	3,5%	3,5%
RAISES	5,5%	9%	17%	18,5%

Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado abordou alocação de recursos de rádio em redes com múltiplas células e com múltiplos serviços. As alocações de recursos basearam-se em requisitos de QoS em termos de taxa de dados. A rede analisada neste trabalho funciona em uma arquitetura C-RAN em que é possível que uma unidade central tenha conhecimento do estado global da rede e gerencie os recursos considerando aspectos gerais da rede. O recurso principal a ser alocado no estudo consiste nos PRBs com potência de transmissão fixa para grupos de usuários.

Dois principais problemas de otimização foram propostos para cenários considerando células hexagonais fixas e cenários em uma rede sem planejamento com o posicionamento dos PAs baseados em geometria estocástica. Especificamente para o cenário com células hexagonais foi proposto também uma estrutura para garantir justiça no acesso a rede entre usuários de borda e centro das células, através da manipulação das restrições de QoS. Os problemas formulados foram linearizados e suas soluções ótimas com complexidade exponencial foram caracterizados. A alta complexidade das soluções ótimas motivou a elaboração de uma nova heurística de baixa complexidade computacional e com solução subótima.

Simulações dos problemas de otimização mostraram, que aumentando a densidade de PAs em uma rede aumenta-se também a capacidade dos métodos simulados de encontrarem soluções. Este resultado evidencia a importância da densificação para aumento da capacidade da rede nos cenários analisados. Os resultados das simulações também mostraram que a aplicação de uma solução ótima para alocação de PRBs encontrada na literatura, com os mesmos requisitos dos problemas formulados neste trabalho, porém formulados para um cenário sem conhecimento da interferência, obteve taxa de *outage* elevada em comparação com a solução ótima proposta no trabalho. Este resultado reforça a importância de considerar a interferência na alocação de recursos para cenários com células pequenas.

Como não foi encontrado na literatura algoritmos de alocação de recursos com as características propostas neste trabalho para um cenário semelhante, confrontamos nossa proposta com a heurística da literatura RAISES [40] para um problema com formulação matemática similar, porém proposta para o cenário de comunicação MIMO com

múltiplos usuários. Notamos pelos resultados que é possível aplicar o RAISES no cenário proposto nesta dissertação, no entanto há uma tendência de divergência entre o RAISES e a solução ótima proposta em termos da taxa de *outage* e soma da taxa de dados no sistema. Estes problemas são notadamente reduzidos na heurística proposta neste trabalho. Em todos os cenários simulados foi mostrado que a nova heurística obteve resultados melhores que o RAISES em todas as métricas analisadas.

Esta dissertação de mestrado procura contribuir com o entendimento sobre processos de alocação de recursos de rádio em cenários multicelulares com alta interferência inter-celular. Notamos que a interferência causa um impacto significativo na distribuição de PRBs.

5.1 Trabalhos Futuros

As possíveis direções para continuidade do estudo de alocação de recursos em cenários com múltiplas células consideradas após a conclusão deste trabalho de mestrado são:

- Estudo de cenários considerando incertezas de canais. As simulações desta dissertação consideraram o conhecimento perfeito dos canais do sistema. No entanto em um sistema realista é necessário utilizar métodos de estimativa de canais para aplicação de alocação de recursos. Uma possível direção é explorar a reciprocidade do canal em um sistema TDD (do inglês, *Time Division Duplexing*). Neste método de duplexação sinais pilotos são enviados pelos usuários durante a transmissão no enlace reverso para estimativa de estado de canal. O SRS (do inglês, *Sounding Reference Signal*) é um sinal enviado pelos usuários em recursos de frequência não escalonados, o que pode ser explorado no cenário estudado nesta dissertação.
- Solução distribuída para alocação de recursos de rádio. Os cenários desta dissertação consideraram um sistema utilizando C-RAN em que é possível centralizar função em uma rede com múltiplas células. No entanto em cenários sem esta arquitetura os métodos proposto se tornam inadequados. Soluções distribuídas que buscam satisfações de QoS na rede são escassos na literatura. Nestes cenários teoria dos jogos e aprendizagem por reforço são ferramentas que podem ser exploradas.
- Alocação de recursos com restrições de QoE. A proposta desta dissertação considera as necessidade dos usuários nos problemas de otimização através de restrições de QoS em termos de taxa de dados. No entanto as restrições de QoS são técnicas e em algumas ocasiões não medem a percepção do usuário sobre a qualidade do serviço oferecido em sua totalidade. Restrições de QoE se baseiam na na percepção dos usuários sobre o serviço oferecido a partir de uma visão de usuário final.
- Extensão do problema formulado para cenários com comunicações MIMO. Os problemas propostos nesta dissertação se basearam em cenários com comunicação com

uma única antena no transmissor e receptor. Comunicações com múltiplas antenas permitem a aplicação de métodos para mitigação de interferência através do projeto de pré codificadores de transmissão, que torna importante sua aplicação em cenários limitados por interferência.

- Problema de otimização considerando alocação de potência. As formulações dos problemas propostos neste trabalho consideraram o emprego de potência igualitária entre os PRBs. No entanto, devido aos diferentes ganhos de canal entre os recursos na frequência, alocar potências diferentes entre os PRBs podem levar a soluções mais eficientes.
- Aplicação da alocação de PRBs em cenários com TDD dinâmico. Em cenários com TDD dinâmico a seleção do *subframe* que fará transmissão no enlace direto ou reverso é adaptativo e feito de acordo com as necessidades da rede, como por exemplo, controle de interferência e variações de tráfego no enlace direto e reverso. No LTE-A, os PRBs seguem regras de alocação distintas entre o caso no enlace direto e reverso de cada célula. Enquanto no enlace direto qualquer conjunto de PRBs podem ser utilizadas por um usuário, no enlace reverso apenas PRBs contíguas na frequência podem ser utilizadas por um único usuário. Caracterizar estas características através de um problema de otimização para alocação de PRBs em cenários com múltiplas células é um problema em aberto.

REFERÊNCIAS

- [1] GUPTA, A. e R. K. JHA: *A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies*. IEEE Access, 3:1206–1232, 2015, ISSN 2169-3536.
- [2] CERWAL, P., P. JONSSON, R. MOLLER, S. BAVERTOFT, S. CARSON, I. GODOR, P. KERSCH, A. KALVEMARK, G. LEMNE e P. LINDBERG. Em *Ericsson Mobility Report: ON THE PULSE OF THE NETWORKED SOCIETY*, junho 2015.
- [3] BHUSHAN, N., J. LI, D. MALLADI, R. GILMORE, D. BRENNER, A. DAMNJANOVIC, R. SUKHAVASI, C. PATEL e S. GEIRHOFER: *Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G*. IEEE Communications Magazine, 52:82–89, 2014, ISSN 0163-6804.
- [4] SANTHI, K. R., V. K. SRIVASTAVA, G. SENTHILKUMARAN e A. BUTARE: *Goals of true broad band's wireless next wave (4G-5G)*. Em *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall.*, volume 4, páginas 2317–2321, outubro 2003.
- [5] HALONEN, T., J. MELERO e J. R. GARCIA. Em *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Toward 3G/UMTS*, New York, NY, USA, 2002. Halsted Press.
- [6] FURHT, B. e S. A. AHSON: *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology*. Internet and Communications. CRC Press, 2009.
- [7] RAPPAPORT, T. S.: *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 2ª edição, 2002.
- [8] SESIA, S., I. TOUFIK e M. BAKER: *LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley Publishing, 2009.
- [9] ANDREWS, J. G., A. GHOSH e R. MUHAMED: *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series)*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2007, ISBN 0132225522.
- [10] PIRINEN, P.: *A brief overview of 5G research activities*. Em *1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU)*, páginas 17–22, setembro 2014.
- [11] METIS: *Deliverable D1.1: Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system*. Relatório Técnico. Disponível em: <https://www.metis-ict-5g.eu/>

[//www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D1.1_v1.pdf](http://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D1.1_v1.pdf).
Acessado em: 05/02/2016, METIS, 2013.

- [12] AGYAPONG, P. K., M. IWAMURA, D. STAEHLE e A. KIESS, W. BENJEBBOUR: *Design considerations for a 5G network architecture*. IEEE Communications Magazine, 52(11):65–75, Novembro 2014, ISSN 0163-6804.
- [13] GOLDSMITH, A.: *Wireless Communications*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2005, ISBN 0521837162.
- [14] CRAVID, A. G., D. R. PIRES e H. K. S. B. SOUSA: *Tv Digital em Portugal*. Disponível em: http://www.img.lx.it.pt/~fp/cav/ano2006_2007/MEEC/Trab_17/artigo_divulgacao_ficheiros/Page1274.html. Acessado em: 29/06/2016, 2016.
- [15] STERNAD, M., T. SVENSSON, T. OTTOSSON, A. AHLEN, A. SVENSSON e A. BRUNSTROM: *Towards Systems Beyond 3G Based on Adaptive OFDMA Transmission*. Proceedings of the IEEE, 95(12):2432–2455, dezembro 2007, ISSN 0018-9219.
- [16] SADR, S., A. ANPALAGAN e K. RAAHEMIFAR: *Radio Resource Allocation Algorithms for the Downlink of Multiuser OFDM Communication Systems*. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 11(3):92–106, 2009, ISSN 1553-877X.
- [17] BOHGE, M.: *Dynamic Resource Allocation in Packet-Oriented Multi-Cell OFDMA Systems*, 2010. Tese de Doutorado – Berlin Technology University.
- [18] RAHMAN, M. e H. YANIKOMEROGLU: *Multicell Downlink OFDM Subchannel Allocations Using Dynamic Intercell Coordination*. Em *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE*, páginas 5220–5225, novembro 2007.
- [19] AKBARI, M.H. e V.T. VAKILI: *Resource Allocation for OFDMA systems with trade-off between throughput and Quality of Service*. Em *2012 Sixth International Symposium on Telecommunications (IST)*, páginas 420–425, novembro 2012.
- [20] RAHMAN, M. e H. YANIKOMEROGLU: *Interference Avoidance through Dynamic Downlink OFDMA Subchannel Allocation using Intercell Coordination*. Em *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, páginas 1630–1635, maio 2008.
- [21] KUHN, H. W.: *The Hungarian Method for the Assignment Problem*. Em *50 Years of Integer Programming 1958-2008*, páginas 29–47, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-68274-5. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0_2.
- [22] SADR, S. e R. S. ADVE: *Partially-Distributed Resource Allocation in Small-Cell*

- Networks*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 13(12):6851–6862, dezembro 2014, ISSN 1536-1276.
- [23] ANTONIS, G. e A. ALEXIOU: *On Coordinating Ultra-Dense Wireless Access Networks: Optimization Modeling, Algorithms and Insights*. CoRR, abs/1312.1577, 2013.
- [24] LOPEZ-PEREZ, D., X. CHU, A.V. VASILAKOS e H. CLAUSSEN: *Power Minimization Based Resource Allocation for Interference Mitigation in OFDMA Femtocell Networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(2):333–344, fevereiro 2014, ISSN 0733-8716.
- [25] LI, M., P. N. TRAN, H. K. TÜTÜNCÜOĞLU e A. TIMM-GIEL: *QoE-based radio resource allocation in LTE femtocell considering transport limitations*. Em *2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, páginas 433–438, julho 2015.
- [26] LIMA, F. R. M., T. F. MACIEL, W. C. FREITAS e F. R. P. CAVALCANTI: *Resource Assignment for Rate Maximization with QoS Guarantees in Multiservice Wireless Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61(3):1318–1332, março 2012, ISSN 0018-9545.
- [27] BEZERRA, N. S.: *Interference Aware Resource Allocation With QoS Guarantees In Multiservice OFDMA/SC-FDMA Systems*, 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- [28] SONG, G. e YE LI: *Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-part I: theoretical framework*. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 4(2):614–624, março 2005, ISSN 1536-1276.
- [29] JANG, JIHO e KWANG BOK LEE: *Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 21(2):171–178, fevereiro 2003, ISSN 0733-8716.
- [30] 3GPP: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) TR 36.213*. Relatório Técnico, março 2009.
- [31] China Mobile Research Institute: *White paper: C-RAN The Road Towards Green RAN*. Relatório Técnico, China Mobile Research Institute, dezembro 2013.
- [32] WANG, R., H. HU e X. YANG: *Potentials and Challenges of C-RAN Supporting Multi-RATs Toward 5G Mobile Networks*. IEEE Access, 2:1187–1195, 2014, ISSN 2169-3536.
- [33] CHANCLOU, P., A. PIZZINAT, F. L. CLECH, T. L. REEDEKER, Y. LAGADEC, F. SALIOU, B. L. GUYADER, L. GUILLO, Q. DENIEL, S. GOSSELIN, S. D. LE,

APÊNDICE A – COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL DA HEURÍSTICA PROPOSTA

Neste apêndice é feita a análise da complexidade computacional do pior caso dos algoritmos do Capítulo 3. As considerações utilizadas para análise de complexidade computacional são apresentadas na Seção 5.1. Na Seção 5.1 é analisada a complexidade do algoritmo de redução de usuários descrita na Figura 7. A análise da complexidade do algoritmo de realocação de PRBs descrito na Figura 8 é feita na Seção 5.1. Por fim a complexidade computacional da heurística completa descrita na Figura 9 é analisada na Seção 5.1.

Considerações gerais para as análises de complexidade

Nas análises deste apêndice serão consideradas as operações de soma, multiplicação e comparação como operações básicas. A complexidade computacional analisada é a de pior caso, o que representa o limitante superior dos recursos computacionais representada pela notação assintótica $\mathcal{O}(\cdot)$. A lista de variáveis consideradas nesta análise são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Descrição dos parâmetros utilizados nos algoritmos.

Variável	Definição
N	Número de PRBs no problema
J	Número de usuários no sistema
J_s	Número de usuários usando o serviço s
M	Número de PAs
S	Número de serviços
G	Número de grupos interferentes
k_s	Número de usuários satisfeitos no serviço s
ζ	Número de usuários removidos do problema
J^\dagger	Número de mínimo de usuários satisfeitos
\mathcal{R}	Conjunto dos usuários insatisfeitos que irão receber novos recursos
\mathcal{D}	Conjunto dos usuários satisfeitos que podem doar recursos
\mathcal{T}	Conjunto de pares (g, n) disponíveis para realocação

Fonte: Próprio autor.

Algumas variáveis da Tabela 8 possuem definição específicas se o problema analisado for no cenário com geometria hexagonal ou estocástica. Este é o caso do número de usuários removidos do sistema ζ . No cenário com geometria hexagonal as restrições de QoS são aplicadas em cada PA, logo neste cenário serão removidos $\zeta = J - M \sum_{s=1}^S k_s$ usuários. O cenário com geometria estocástica formulado o critério de QoS é aplicado na rede

total, então serão removidos $\zeta = J - \sum_{s=1}^S k_s$.

De forma semelhante ao ζ , o número mínimo de usuários satisfeitos J^\dagger também depende do cenário analisado. Para geometria hexagonal há $J^\dagger = M \sum_{s=1}^S k_s$ usuários que devem ser satisfeitos enquanto para geometria estocástica $J^\dagger = \sum_{s=1}^S k_s$.

Nesta análise considerou-se que a soma da taxa de dados de todos os grupos g e PRBs n já foram calculadas no momento da geração de grupos interferentes e mapeamento de taxa de dados. Portanto, sempre que for necessária esta informação nos algoritmos descritos, será realizado apenas uma consulta deste dado que é uma variável de entrada.

Complexidade computacional do algoritmo de redução de usuários

No algoritmo de redução de usuários da Figura 7, o passo (1) cria os conjuntos \mathcal{Q} e \mathcal{A} com todos os usuários do sistema. Nenhuma operação significativa ocorre neste passo. Portanto, não considera-se nenhuma operação. Entre os passos (2) e (8) há um laço que irá repetir-se removendo usuários até que o mínimo de usuários para satisfação das restrições de QoS sejam mantidos. Então no pior caso este laço irá iterar ζ vezes.

Considere i o índice do laço que irá de 1 até ζ . No passo (2) do algoritmo é aplicado a maximização de taxa, desconsiderando as restrições de QoS. Este problema é resolvido assinalando cada PRB n para o grupo que obtiver maior soma de taxa de dados. A seleção do melhor grupo deve levar $(G - 1)$ comparações para cada recurso n , resultando num total de $(G - 1)N$ em cada iteração. Somando as operações no pior caso temos:

$$\sum_i^{\zeta} N(G - 1), \quad (34a)$$

$$NG\zeta - N\zeta. \quad (34b)$$

Considerando o termo de maior impacto na complexidade computacional, o pior caso da complexidade para o passo (2) será $\mathcal{O}(NG\zeta)$.

Para calcular a soma da taxa de dados total de cada usuário no passo (3) será necessário $N - 1$ somas sobre a taxa de dados do usuário nos N grupos alocados no passo (2). Note que no passo (3) o usuário que será removido do problema na iteração i ainda não foi selecionado. Portanto, o total de operações neste passo é $(N - 1)(J - i + 1)$ somas em cada laço i , totalizando:

$$\sum_i^{\zeta} (N - 1)(J - i + 1), \quad (35a)$$

$$\sum_i^{\zeta} NJ - \sum_i^{\zeta} Ni + \sum_i^{\zeta} N - \sum_i^{\zeta} J + \sum_i^{\zeta} i - \sum_i^{\zeta} 1, \quad (35b)$$

$$\zeta NJ - N \frac{\zeta(\zeta + 1)}{2} + \zeta N - \zeta J + \frac{\zeta(\zeta + 1)}{2} - \zeta, \quad (35c)$$

$$\zeta NJ - N \frac{\zeta^2}{2} - N \frac{\zeta}{2} + \zeta N - \zeta J + \frac{\zeta^2}{2} + \frac{\zeta}{2} - \zeta \quad (35d)$$

Considerando os termos de maior complexidade do passo (3) a complexidade computacional no pior caso será $\mathcal{O}(NJ\zeta + \zeta^2(1 - N))$.

O passo (4) do algoritmo é realizada a verificação da satisfação dos usuários e se os requisitos de QoS foram atendidos. Neste caso é necessário somar o número de usuário satisfeitos em cada serviço. A taxa de dados de cada usuário e a satisfação foram calculadas no passo (3), o que resta é verificar a soma do número de usuários satisfeitos e cada serviço. Para isto é necessário em cada iteração S comparações e $(J - S)$ somas, pois no pior caso deste passo todos os usuários foram satisfeitos. O total de operações é:

$$\sum_i^{\zeta} (J - S + S), \quad (36a)$$

$$\zeta J, \quad (36b)$$

A complexidade computacional no pior caso do passo (4) é $\mathcal{O}(\zeta J)$.

No passo (5) a métrica (22) é aplicada para selecionar o usuário que será removido. O

cálculo da métrica para cada usuário necessita de $(G - 1) + (N - 1)$ somas, uma divisão e duas multiplicações. O usuário selecionado será o que tiver menor valor da métrica. No pior caso a escolha do usuário necessitará de $J - i - 1$ comparações. Então para cada iteração será necessário:

$$\sum_i^{\zeta} ((G - 1) + (N - 1) + 3 + J - i - 1), \quad (37a)$$

$$\sum_i^{\zeta} G + \sum_i^{\zeta} N + \sum_i^{\zeta} J - \sum_i^{\zeta} i, \quad (37b)$$

$$\zeta(N + G + J) - \frac{\zeta^2}{2} - \frac{\zeta}{2}. \quad (37c)$$

Logo no passo (5) a complexidade computacional no pior caso é $\mathcal{O}(\zeta(N + G + J) - \zeta^2)$.

No passo (6) é verificado se outro usuário do mesmo serviço pode ser removido do problema. Como no passo (4) foi calculado o número de usuários satisfeitos em cada serviço este passo necessitará apenas de uma comparação. Considerando todas as iterações o passo (6) terá complexidade computacional linear de $\mathcal{O}(\zeta)$.

Os passos (7) e (8) são executados apenas S vezes, quando todos os possíveis usuários de um serviço forem removidos do problema. Não consideraremos remoção de usuários de um grupo como operação significativa. Portanto, o passo (7) não contabiliza nenhuma complexidade computacional para o algoritmo. No passo (8) verifica-se se ainda há usuários a serem removidos. O número de cada usuário em cada serviço foi determinado no passo (4), então essa verificação deve necessitar de apenas S comparações, considerando todos as i iterações. A complexidade computacional para o passo (8) é $\mathcal{O}(\zeta S)$. Por fim o passo (9) verifica se há usuários satisfeitos. Os usuários satisfeitos foram calculados no passo (3). Então o passo (9) não necessitará de operações básicas e não será considerado nenhuma complexidade computacional.

Note que os termos de maior ordem e mais significantes para a complexidade computacional do algoritmo são os passos (2), (3) e os termos quadráticos dos passos (4) e (5). A complexidade computacional deste algoritmo no pior caso é $\mathcal{O}(NG\zeta + NJ\zeta)$.

Tabela 9: Complexidade computacional de cada passo do algoritmo de remoção de usuários descrito na Figura 7.

Passo	Complexidade pior caso
(1)	-
(2)	$\mathcal{O}(NG\zeta)$
(3)	$\mathcal{O}(NJ\zeta + \zeta)$
(4)	$\mathcal{O}(\zeta J)$
(5)	$\mathcal{O}(\zeta(N + G + J) - \zeta^2)$
(6)	$\mathcal{O}(\zeta)$
(7)	-
(8)	$\mathcal{O}(\zeta S)$
(9)	-

Fonte: Próprio autor.

Complexidade computacional do algoritmo de realocação de PRBs

Para a análise do algoritmo da Figura 8 considere que há G^\dagger grupos interferentes disponíveis para realocação em cada um dos N PRBs. A realocação de PRBs é aplicada somente após a redução de usuários aplicando o algoritmo do fluxograma da Figura 7. Nesta etapa o número total de usuários no sistema é J^\dagger .

Analisando o fluxograma nota-se que o passo (1) é a separação dos usuários entre satisfeitos e insatisfeitos. Considerando que o cálculo da taxa de dados de cada usuários foi calculada em outra etapa do algoritmo, este passo apenas realiza J^\dagger comparações para classificação dos usuários entre o conjunto \mathcal{R} e \mathcal{D} . Dessa forma a complexidade computacional deste passo no pior caso é $\mathcal{O}(J^\dagger)$

O passo (2) é a criação do grupo \mathcal{T} que contém os pares (g, n) de grupos interferentes e recursos que podem ser realocados. Como os grupos interferentes de cada PRB não necessariamente são os mesmos, é necessário verificar a presença dos usuários do conjunto \mathcal{R} em cada uma das $G^\dagger N$ possibilidades que é indicado quando o usuário tem taxa de dados no grupo interferente. O pior caso deste passo ocorrerá quando somente um usuário estiver satisfeito, o que faz necessário verificar a presença de todos os demais usuários nos grupos interferentes. Neste caso, é necessário $G^\dagger N$ comparações para cada um dos $J^\dagger - 1$ usuários contabilizando um total de $G^\dagger N J^\dagger - G^\dagger N$ operações. Portanto a complexidade computacional no pior caso do passo (2) é $\mathcal{O}(G^\dagger N J^\dagger)$.

Todos os passos entre (3) e (6) compõem um laço de realocação de recursos. Este laço verifica a possibilidade de realocar recursos a partir da métrica (25), em que no pior caso

todos os NG^\dagger integrantes de \mathcal{T} são analisados. Então considere b o índice da interação do laço que varia entre a iteração 1 até NG^\dagger entre os passos (3) e (6).

No passo (3) é selecionado o par (g^*, n^*) do conjunto \mathcal{T} para realocação. Para isto é aplicado a equação (24) para todos os pares em \mathcal{T} . Em cada iteração será necessário determinar a soma da taxa total do sistema. Portanto é necessário somar a taxa de todos os grupos alocados em cada PRB atualmente Φ^{atual} , necessitando de $(N - 1)$ somas. Em cada par (g, n) do conjunto \mathcal{T} também é necessário calcular a taxa de dados caso este par seja utilizado na realocação $\Phi_{g,n}^{\text{nov}}$. Isto pode ser feito subtraindo a soma da taxa de dados do grupo alocado no PRB n de Φ^{atual} e somando a soma da taxa de todos os usuários no grupo g usando o PRB n . Então, será necessário uma subtração e uma soma. Portanto, o cálculo de $\Phi_{g,n}^{\text{nov}}$ necessita de apenas 2 operações para cada par em cada iteração. O pior caso para cálculo desta métrica ocorre quando há o maior número possível de usuários estará no conjunto \mathcal{R} , o que ocorre quando há apenas um usuário no conjunto \mathcal{D} . Sendo assim as demais operações da métrica (24) serão duas divisões, uma multiplicação e $4(J^\dagger - 2)$ operações de soma e subtração e $2J^\dagger$ operações de módulo que contabilizaremos como duas operações (elevar a potência de dois e uma raiz). Note que para cada iteração b o sistema contará com $(NG^\dagger - i + 1)$ pares no passo (3). Em cada iteração também será necessário a seleção do par (g^*, n^*) para realocação, que necessitará de $(NG^\dagger - i + 1) - 1$ comparações. Somando todas as operações:

$$(N - 1) + \sum_{b=1}^{NG^\dagger} (NG^\dagger - i + 1)(2 + 3 + 4(J^\dagger - 2) + 4J^\dagger) + (NG^\dagger - i + 1) - 1, \quad (38a)$$

$$(N - 1) + \sum_{b=1}^{NG^\dagger} -NG^\dagger + 8NG^\dagger J^\dagger + i - 8J^\dagger i + 8J^\dagger - 2, \quad (38b)$$

$$(N - 1) - N^2(G^\dagger)^2 + 8N^2(G^\dagger)^2 J^\dagger + 8N(G^\dagger)J^\dagger - 2NG + (1 - 8J^\dagger) \sum_{b=1}^{NG^\dagger} i, \quad (38c)$$

isolando apenas os termos de maior ordem no polinômio:

$$8N^2(G^\dagger)^2 J^\dagger - \frac{8}{2}N^2(G^\dagger)^2 J^\dagger = 4N^2(G^\dagger)^2 J^\dagger \quad (39a)$$

Portanto, a complexidade computacional no pior caso do passo (3) é $\mathcal{O}(N^2(G^\dagger)^2 J^\dagger)$.

No passo (4) é verificado se algum usuário é removido do grupo \mathcal{D} com a possível nova

realocação. Esse cálculo deve ser feito em todos os usuários do conjunto \mathcal{D} que no pior caso contará com $J^\dagger - 1$ usuários. Para cada j destes usuários e em cada iteração b é necessário realizar uma subtração removendo a taxa do usuário no grupo atualmente assinalado ao recurso n^* da soma da taxa atual do usuário j . Após essa operação é necessário contabilizar a taxa de dados do usuário no par (g^*, n^*) . Para verificar se o usuário saiu da satisfação é necessário também uma operação de comparação. Portanto, o total de operações em todas as iterações deste passo será:

$$\sum_{b=1}^{NG^\dagger} (J^\dagger - 1)(3) = 3NG^\dagger J^\dagger - 3NG^\dagger, \quad (40a)$$

logo, a complexidade no passo (4) é $\mathcal{O}(NG^\dagger J^\dagger)$.

O passo (5) do algoritmo verifica se o conjunto \mathcal{T} está vazio e em caso negativo o passo (6) remove o (g^*, n^*) do conjunto \mathcal{T} . Ambos os passos não possuem operações básicas e por isto não contabilizaremos complexidade computacional para ambos.

No passo (7) a realocação é realizada para o par (g^*, n^*) é realizada e a atualização dos conjuntos \mathcal{D} e \mathcal{R} . Para isto é necessário atualizar a taxa de dados de todos os usuários. Então para cada um dos J^\dagger , assim como as operações no passo (4), será realizada uma subtração, uma adição e uma comparação em cada iteração. A subtração contabiliza a perda da taxa pela troca de alocação, a soma calcula a contribuição da nova alocação e a comparação determina se o usuário faz parte de \mathcal{D} ou \mathcal{R} . As operações deste passo são:

$$\sum_{b=1}^{NG^\dagger} (J^\dagger)(3) = 3NG^\dagger J^\dagger, \quad (41a)$$

portanto a complexidade computacional no passo (7) é $\mathcal{O}(NG^\dagger J^\dagger)$.

Por fim, o passo (8) verifica se o grupo \mathcal{D} está vazio, o que não caracteriza uma operação básica nesta análise. A complexidade de cada passo do algoritmo de realocação é mostrado na Tabela 10.

Analisando a complexidade de cada passo nota-se que o termo de impacto na complexidade do algoritmo é o do passo (3), que corresponde ao cálculo da métrica utilizada para realocação. A complexidade computacional da etapa de realocação de recursos é $\mathcal{O}(N^2(G^\dagger)^2 J^\dagger)$.

Tabela 10: Complexidade computacional de cada passo do algoritmo de realocação de PRBs descrito na Figura 8.

Passo	Complexidade pior caso
(1)	$\mathcal{O}(J^\dagger)$
(2)	$\mathcal{O}(G^\dagger N J^\dagger)$
(3)	$\mathcal{O}(N^2 (G^\dagger)^2 J^\dagger)$
(4)	$\mathcal{O}(N G^\dagger J^\dagger)$
(5)	-
(6)	-
(7)	$\mathcal{O}(N G^\dagger J^\dagger)$
(8)	-

Fonte: Próprio autor.

Complexidade computacional da heurística proposta

Após determinar a complexidade computacional dos algoritmos utilizados na heurística proposta neste trabalho é possível analisar a complexidade computacional da heurística completa descrita no fluxograma da Figura 9.

O primeiro passo do algoritmo é a redução do problema para o número mínimo de usuários satisfeitos no sistema. A complexidade desta etapa foi calculada na Seção 5.1 e é $\mathcal{O}(NG\zeta + NJ\zeta)$, em que ζ é o número de usuários removidos do problema. O passo (3) é a resolução do LP relaxado do problema original. Esta etapa depende do algoritmo utilizado. No entanto para esta análise consideraremos o algoritmo Karmarkar que possui complexidade $\mathcal{O}(p^{3.5})$, em que p é o número de variáveis no problema LP [41]. No problema resolvido por esta heurística há NG variáveis, então a complexidade computacional do passo (3) é $\mathcal{O}((NG)^{3.5})$.

No passo (4) é realizada a verificação de variáveis não básicas na solução do LP relaxado. Os PRBs que possuem variáveis não básicas terão sua alocação desconsiderada e será selecionando o grupo com maior soma de taxa de dados entre todos os usuários. No pior caso, todas os PRBs receberiam variáveis não básicas. Este caso seria equivalente a resolver o problema de maximização sem restrição de QoS. Esta complexidade foi calculada na Seção 5.1 no passo (3), onde verificou-se que são necessários $(G - 1)N$ operações para esta etapa. Então a complexidade computacional desta etapa é $\mathcal{O}(NG)$.

No passo (4) há apenas a definição da variável t que irá incrementar seu valor a partir de 1 e G em cada iteração do laço que vai do passo (5) até o (9). No passo (4) não é

efetuado nenhuma operação básica. No passo (5) é feita a seleção dos grupos que irão ser utilizados no processo de realocação. Para isto é necessário selecionar os t melhores grupos interferentes em cada PRB. Essa seleção necessita de $G - 1$ comparações em cada recurso, pois independente do valor de t todos os grupos devem ser analisados. O número de operações desta etapa será:

$$\sum_{t=1}^G (G - 1)N = G^2N - GN, \quad (42a)$$

logo a complexidade no passo (5) é $\mathcal{O}(G^2N)$.

O passo (6) aplica a realocação de recursos descrita na Figura 8. A análise da complexidade desta etapa foi realizada na Seção 5.1. A complexidade computacional encontrada na análise foi $\mathcal{O}(N^2(G^\dagger)^2J^\dagger)$, em que G^\dagger é o número de grupos considerados e J^\dagger o número de usuários no sistema após a remoção do passo (1). Na heurística o número de grupos interferentes considerados é igual a iteração t . Então as operações contabilizadas nesta etapa serão:

$$\sum_{t=1}^G N^2(t)^2 J^\dagger = N^2 J^\dagger \left(\frac{G(G+1)(2G+1)}{6} \right) = N^2 J^\dagger \left(\frac{2G^4 + 3G^3 + G^2}{6} \right), \quad (43a)$$

logo, o termo de maior ordem e que representa a complexidade desta etapa é $\mathcal{O}(G^4N^2J^\dagger)$.

A verificação da validade da solução encontrada no passo (6) é verificada no passo (7). O passo (8) do algoritmo de realocação descrito na Figura 8 verifica se o conjunto \mathcal{R} de usuários não satisfeito está vazio. Então a etapa do passo (7) não precisa de nenhuma operação básica, pois essa informação já foi calculada no algoritmo analisado na Seção 5.1.

No passo (8) é feita a verificação se $t = G$, o que caracteriza uma operação básica. No passo (9) é feita uma soma. Dessa forma o número de operações neste dois passos é igual ao número de iterações do laço. Os passos (8) e (9) possuem complexidade computacional linear igual a \mathcal{G} . A complexidade computacional no pior caso dos passos da heurística são mostrados na Tabela 11.

Note que os passos que mais contribuem para a complexidade da heurística são o passo (2), referente a solução do LP relaxado e o passo (6), referente a realocação de recursos.

Tabela 11: Complexidade computacional de cada passo da heurística proposta descrito na Figura 9.

Passo	Complexidade pior caso
(1)	$\mathcal{O}(NG\zeta + NJ\zeta)$
(2)	$\mathcal{O}((NG)^{3.5})$
(3)	$\mathcal{O}(NG)$
(4)	-
(5)	$\mathcal{O}(G^2N)$
(6)	$\mathcal{O}(G^4N^2J^\dagger)$
(7)	$\mathcal{O}(NG^\dagger J^\dagger)$
(8)	$\mathcal{O}(G)$
(9)	$\mathcal{O}(G)$

Fonte: Próprio autor.

A complexidade computacional da heurística proposta é polinomial e pode ser representada por $\mathcal{O}(G^4N^2J^\dagger + (NG)^{3.5})$. Logo, para o cenário com geometria hexagonal a complexidade é $\mathcal{O}(G^4N^2M \sum_{s=1}^S k_s + (NG)^{3.5})$ e para o cenário com geometria estocástica $\mathcal{O}(G^4N^2 \sum_{s=1}^S k_s + (NG)^{3.5})$.