

---

---

Instituto de Computação  
Universidade Estadual de Campinas

---

---

## Planejamento e gerenciamento de recursos para redes IEEE 802.16 baseadas em Rádio sobre Fibra

Pedro Henrique Gomes da Silva

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação devidamente corrigida e defendida por Pedro Henrique Gomes da Silva e aprovada pela Banca Examinadora.

Campinas, 13 de julho de 2011.



Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca  
Instituto de Computação, Unicamp  
(Orientador)

Dissertação apresentada ao Instituto de Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR ANA REGINA MACHADO – CRB8/5467  
BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E  
COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA – UNICAMP

Si38p      Silva, Pedro Henrique Gomes da, 1984-  
                  Planejamento e gerenciamento de recursos para redes  
                  IEEE 802.16 baseadas em rádio sobre fibra / Pedro  
                  Henrique Gomes da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2011.

Orientador: Nelson Luis Saldanha da Fonseca.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Instituto de Computação.

1. Radiofrequênci. 2. Sistemas de comunicação sem  
fio. 3. Sistemas de telecomunicação. 4. Programação  
linear. 5. Métodos de relaxação (Matemática). I. Fonseca,  
Nelson Luis Saldanha da, 1961-. II. Universidade Estadual  
de Campinas. Instituto de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em Inglês:** Resource planning and management for IEEE 802.16  
networks based on radio over fiber

**Palavras-chave em Inglês:**

Radio frequency

Wireless communication systems

Telecommunication systems

Linear programming

Relaxation methods (Mathematics)

**Área de concentração:** Ciéncia da Computação

**Titulação:** Mestre em Ciéncia da Computação

**Banca examinadora:**

Nelson Luis Saldanha da Fonseca [Orientador]

Geraldo Robson Mateus

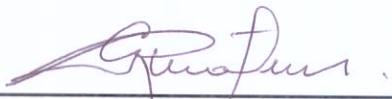
Edmundo Roberto Mauro Madeira

**Data da defesa:** 17-06-2011

**Programa de Pós Graduação:** Ciéncia da Computação

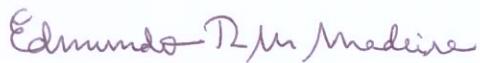
## TERMO DE APROVAÇÃO

Dissertação Defendida e Aprovada em 17 de junho de 2011, pela Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



---

**Prof. Dr. Geraldo Robson Mateus**  
Departamento de Ciência da Computação / UFMG



---

**Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira**  
IC / UNICAMP



---

**Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca**  
IC / UNICAMP



# Planejamento e gerenciamento de recursos para redes IEEE 802.16 baseadas em Rádio sobre Fibra

**Pedro Henrique Gomes da Silva<sup>1</sup>**

Junho de 2011

## **Banca Examinadora:**

- Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca  
Instituto de Computação, Unicamp (Orientador)
- Prof. Dr. Geraldo Robson Mateus  
Departamento de Ciência da Computação, UFMG
- Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira  
Instituto de Computação, Unicamp
- Prof. Dr. Cesar Augusto Viana Melo  
Departamento de Ciência da Computação, UFAM (Suplente)
- Prof. Dr. Flávio Keidi Miyazawa  
Instituto de Computação, Unicamp (Suplente)

---

<sup>1</sup>Supporte financeiro de: Bolsa FAPESP (processo 2008/08779-9)



# Resumo

A tecnologia de Rádio sobre Fibra (*Radio over Fiber - RoF*) possibilita o barateamento da instalação e manutenção de redes de acesso sem fio, dado que a distribuição da utilização dos sinais de radiofrequência (RF) pode ser otimizada, bem como emprega-se, nessas redes, antenas mais simples e baratas.

Dentre as tecnologias de redes sem fio de acesso banda larga (*Broadband Wireless Access - BWA*), o padrão IEEE 802.16, conhecido como WiMAX, vem sendo apresentado como uma solução de baixo custo para o acesso última milha à Internet ou como meio de distribuição *backhaul*. Suas características, muito semelhantes às das redes celulares, tornam interessante o emprego da tecnologia de RoF para a instalação e expansão das redes WiMAX a um baixo custo.

Nesta dissertação, apresenta-se um estudo sobre o dimensionamento da tecnologia RoF para redes WiMAX. Apresentam-se medidas de desempenho que levam em consideração os ajustes dos parâmetros de sincronização das camadas física e de controle de acesso ao meio. O objetivo desse estudo é servir de base para o planejamento e instalação dessas redes, levando em consideração restrições devido à degradação de desempenho que a introdução da fibra óptica impõe.

Esta dissertação estuda, adicionalmente, o problema de otimização do uso dos recursos de rádio da rede, mais especificamente do posicionamento e alocação das estações base. A proposta considera uma arquitetura de rede sem fio com diversas camadas de antenas, cada camada com células de diferentes raios de cobertura. As células são implantadas através de associações entre as antenas e as estações base disponíveis. Para a otimização da rede, propõe-se um modelo baseado em programação linear inteira que distribui, de maneira ótima, os recursos e encontra a melhor configuração de células para minimizar o número de BSs usadas na rede, para maximizar a receita, ou para obter esses dois critérios simultaneamente.

O custo computacional do problema de otimização proposto é bastante alto, o que inviabiliza o seu emprego em redes móveis. Para contornar esse problema, são apresentados também algoritmos rápidos baseados em relaxação linear da programação linear inteira que possibilitam a obtenção de soluções de boa qualidade em tempo reduzido.



# Abstract

The Radio over Fiber technology allows the reduction of the cost of installation and maintenance of wireless access networks, since it can allow an optimized use of radio frequency (RF). Moreover, it employs simplified and inexpensive antennas.

The IEEE 802.16 wireless networks, known as WiMAX, are low cost solutions for the last mile access to the Internet. Its characteristics are very similar to those of cellular networks, which makes attractive the use of RoF technology for the installation and expansion of WiMAX networks at low cost.

This dissertation studies the use of RoF technology for WiMAX networks, which considers the parameters of physical layer and medium access synchronization. Results can be used as guideline for planning of these networks.

This dissertation also studies the optimization of the use of radio resources of the network, specifically the problem of positioning base stations. The proposed architecture considers a wireless network with several layers of antennas, each layer with cells of different radii of coverage. The cells are deployed dynamically by the association between antennas and the available base stations. It is proposed a network optimization model based on integer linear programming that optimally distributes the radio resources and finds the best configuration to either minimize the number of Base Stations used in the network, or to maximize the operator revenue, as well as to try to achieve both criteria simultaneously.

The computational cost of the proposed optimization problem is quite high, which prevents its use in mobile networks. To circumvent this problem, it is also presented fast algorithms based on linear relaxation of the integer linear programming model, which enable the obtainment of good solutions in short time frames.



# Agradecimentos

Agradeço muito a todas as pessoas que compartilharam comigo esses últimos anos e conviveram com os desafios e momentos de alegria do mestrado.

Agradeço a Deus pela força nos momentos difíceis e por ter iluminado meu caminho durante todo o tempo.

Agradeço a toda minha família, Maria Clara, Cleunice e Pedro, pelo apoio e amor dados nesses últimos anos. Mesmo longe, vocês fazem toda diferença!

Agradeço a minha noiva Tatiane pela ajuda nas dificuldades e pelo seu companheirismo. Tudo é mais fácil com você ao meu lado!

Agradeço ao meu orientador, prof. Nelson Fonseca, pelo suporte e ensinamentos. A qualidade da pesquisa, dos artigos e dessa dissertação não seria a mesma sem suas valiosas revisões e sua grande experiência.

Agradeço também o prof. Omar Branquinho, que sempre me trouxe grandes ideias e com o qual sempre pude ter interessantes discussões sobre os problemas dessa dissertação.

Agradeço ainda a todos os amigos que fiz no IC, especialmente aqueles do LRC. César, Flávio, Luciano, Geraldo, André, Daniel, Cláudio, Juliana Borin, Juliana de Santi, Manzato, Carlão, Carlos Senna, Bit, Neumar, Jorge, Tiago, Alisson, Mariana, Milton, Esteban, Christian, e muitos outros que dividiram bons momentos durante as disciplinas e nas conversas de corredor.

Agradeço ao Dzmitry e prof. Fabricio Granelli pelas experiências trocadas e pelo trabalho conjunto realizado durante todo mestrado.

Por fim, agradeço à FAPESP pelo apoio financeiro.



# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Conceitos básicos</b>	<b>7</b>
2.1 Classificação das redes sem fio . . . . .	8
2.2 Padrão IEEE 802.16 e as redes WiMAX . . . . .	10
2.3 Rádio sobre Fibra . . . . .	14
2.4 Gerenciamento de recursos de rádio . . . . .	16
2.5 Considerações finais . . . . .	18
<b>3 Dimensionamento de Rádio Sobre Fibra para Redes IEEE 802.16</b>	<b>21</b>
3.1 Introdução . . . . .	21
3.2 Trabalhos relacionados . . . . .	22
3.3 Detalhamento do problema de desempenho . . . . .	23
3.4 Análise do desempenho da rede . . . . .	27
3.4.1 Ferramenta utilizada para análise de desempenho . . . . .	27
3.4.2 Equação de desempenho na camada física . . . . .	27
3.4.3 Desempenho teórico na camada física . . . . .	29
3.4.4 Desempenho da camada de aplicação . . . . .	31
3.5 Considerações finais . . . . .	36
<b>4 Otimização de recursos para redes baseadas em Rádio sobre Fibra</b>	<b>39</b>
4.1 Introdução . . . . .	39
4.2 Trabalhos relacionados . . . . .	40
4.3 Arquitetura proposta . . . . .	41

4.4	Modelo de otimização baseado em PLI . . . . .	43
4.5	Resultados numéricos . . . . .	48
4.5.1	Cenários utilizados na avaliação . . . . .	48
4.5.2	Minimização do número de BSs . . . . .	50
4.5.3	Maximização da receita . . . . .	51
4.5.4	Minimização do número de BSs e maximização da receita do operador	53
4.6	Conclusão . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Algoritmos aproximados para a otimização de recursos de rádio</b>	<b>59</b>
5.1	Introdução . . . . .	59
5.2	Relaxação do problema inteiro de otimização de recursos de rádio . . . . .	60
5.3	Algoritmos aproximados baseados em relaxação linear . . . . .	62
5.3.1	Algoritmo 1 - Minimização do número de BSs . . . . .	62
5.3.2	Algoritmo 2 - Maximização da receita do operador . . . . .	64
5.3.3	Algoritmo 3 - Bicritério - Minimização do número de BSs e maximização da receita do operador . . . . .	65
5.4	Resultados numéricos . . . . .	66
5.4.1	Minimização do número de BSs . . . . .	66
5.4.2	Maximização da receita . . . . .	68
5.4.3	Minimização do número de BSs e maximização da receita . . . . .	69
5.5	Conclusão . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>79</b>
6.1	Trabalhos futuros . . . . .	80
<b>Bibliografia</b>		<b>82</b>

# **Lista de Tabelas**

2.1	Classificação das Redes Sem Fio . . . . .	10
3.1	Parâmetros do IEEE 802.16-2005 para diferentes larguras de banda . . . . .	31
3.2	Parâmetros utilizados no cálculo da vazão na camada de aplicação . . . . .	33



# Listas de Figuras

2.1	Classificação das redes sem fio - nomenclatura e cobertura . . . . .	8
2.2	Modelo de referência da pilha IEEE 802.16 . . . . .	12
2.3	Portadora única x OFDM no tempo e frequência . . . . .	13
2.4	Representação no domínio da frequência das subportadoras . . . . .	13
2.5	Prefixo cíclico dos símbolos OFDM . . . . .	14
2.6	Diagrama da arquitetura Rádio sobre Fibra (RoF) . . . . .	15
2.7	Layout típico de um enlace bidirecional . . . . .	16
2.8	Exemplo de aplicação da infraestrutura RoF em um ambiente dinâmico . .	18
3.1	Aumento do atraso de propagação com a introdução da fibra . . . . .	24
3.2	Estrutura do quadro OFDMA (IEEE 802.16-2005) . . . . .	25
3.3	Vazão teórica na camada física para 10 MHz de banda . . . . .	30
3.4	Vazão teórica na camada física para 64-QAM 3/4 . . . . .	31
3.5	Vazão na camada de aplicação para 10 MHz e UDP. . . . .	33
3.6	Vazão na camada de aplicação para 64-QAM 3/4. . . . .	35
3.7	Diferença no tempo de propagação em RoF - pior caso . . . . .	35
3.8	Vazão na camada de aplicação para 10 MHz de banda e 10km de fibra . .	36
4.1	Exemplo de arquitetura proposta. . . . .	41
4.2	Estrutura multi-camadas de células utilizada na otimização. . . . .	42
4.3	Exemplo de configuração multi-camadas de células. . . . .	43
4.4	Infraestrutura de Radio sobre Fibra utilizada na avaliação . . . . .	48
4.5	Cenário de ruas utilizadas com o modelo Random Trip Mobility . . . . .	49
4.6	Número de BSs usadas em função do número de MSs . . . . .	51
4.7	Tempo de execução do programa em função do número de MSs - minimização do número de BSs . . . . .	52
4.8	Receita obtida e número de MSs atendidas em função do número de BSs .	53
4.9	Tempo de execução do programa em função do número de BSs utilizadas - maximização da receita . . . . .	54
4.10	Resultados de uma rede com até 500 MSs, usando a <i>Infraestrutura 1</i> . . .	55

4.11	Resultados de uma rede com até 500 MSs, usando a <i>Infraestrutura 2</i> . . . . .	56
4.12	Resultados de uma rede com até 500 MSs, usando a <i>Infraestrutura 3</i> . . . . .	57
4.13	Tempo de execução da otimização bicritério . . . . .	57
5.1	Número de BSs usadas em função do número de MSs - algoritmos inteiros e relaxados . . . . .	66
5.2	Tempo de execução do programa de minimização do número de BSs - algoritmos inteiros e relaxados . . . . .	67
5.3	Receita do operador em função do número de BSs - algoritmos inteiros e relaxados . . . . .	68
5.4	Tempo de execução do programa de maximização da receita do operador - algoritmos inteiros e relaxados . . . . .	70
5.5	Fronteira Pareto de uma rede com até 500 MSs, usando a <i>Infraestrutura 1</i> - algoritmos inteiros e relaxados . . . . .	71
5.6	Fronteira Pareto de uma rede com até 500 MSs, usando a <i>Infraestrutura 2</i> - algoritmos inteiros e relaxados . . . . .	72
5.7	Fronteira Pareto de uma rede com até 500 MSs, usando a <i>Infraestrutura 3</i> - algoritmos inteiros e relaxados . . . . .	73
5.8	Tempo de execução do programa de otimização bicritério - algoritmos inteiros e relaxados . . . . .	77

# Capítulo 1

## Introdução

A grande expansão das redes móveis sem fio e a demanda crescente por aplicações que requerem altas taxas de dados, como o VoIP (*Voice over IP*), IPTV (*Internet Protocol Television*) e P2P (*Peer-To-Peer*) têm incentivado o surgimento de novas tecnologias que tornem as redes sem fio mais eficientes e de baixo custo. A tecnologia de Rádio sobre Fibra (*Radio Over Fiber* - RoF) é considerada uma solução promissora para a expansão das redes sem fio de acesso banda larga (BWA), como o WiMAX [47]. O RoF pode levar à provisão de uma infraestrutura barata e expansível para que as redes sem fio possam aumentar a sua cobertura e, também, oferecer maiores taxas de dados para os usuários, a um baixo custo.

O RoF baseia-se no emprego de enlaces ópticos para a distribuição de sinais de radiofrequência (RF) entre uma ou mais Estações Base de Controle (*Base Station Controller* - BSC) e diversas Unidades de Antena Remota (*Remote Antenna Units* - RAUs). Os sinais de radiofrequência, que nas redes sem fio convencionais são modulados e tratados em cada uma das Estações Base (*Base Stations* - BSs), são convertidos para sinais ópticos nas RAUs e são transportados através de fibras até a BSC, onde, finalmente, são (de)codificados e (de)modulados. Nessa, ocorrem, também, a conversão de banda e todos outros tratamentos necessários para o funcionamento da rede [11]. Assim, quase todos os componentes de RF são centralizados na BSC e as RAUs podem ser extremamente simples e baratas. Os enlaces ópticos funcionam como um meio de transmissão analógico, totalmente transparente para as Estações Móveis (*Mobile Stations* - MSs). O processamento centralizado possibilita o barateamento da instalação e manutenção das antenas, dado que o seu hardware é mais simples e todo o processamento e controle da rede (software) é centralizado na BSC, o que torna possível um conhecimento mais preciso sobre a demanda e posicionamento das MSs presentes em toda área de cobertura da rede.

As RAUs não possuem caros equipamentos de RF e não fazem o processamento de sinais. Diminuem, também, o custo das redes já instaladas e permitem a criação de novas

redes com um maior número de células de pequena cobertura. A evolução das comunicações sem fio tem permitido a obtenção de maiores taxas de dados em redes sem fio com células de pequena cobertura, conhecidas como Picocélulas (*Picocells*), nas quais as condições de atenuação e interferência dos sinais são menos severas e fenômenos de propagação, como o multipercorso (*multipath*), podem ser melhor controlados. O RoF apresenta-se, portanto, como uma tecnologia viável para a expansão das novas redes sem fio de banda larga *Beyond-3G*, dado que reduz o custo das BSs, permitindo a criação de um número maior de células de cobertura reduzida [39].

Dentre os padrões de redes de acesso sem fio banda larga, o IEEE 802.16 (WiMAX) apresenta grandes chances de adoção como padrão das futuras redes 4G, principalmente a sua versão móvel IEEE 802.16e-2005 e futura versão IEEE 802.16m, na qual se basearão as redes WiMAX2 [41]. Os cenários de emprego da tecnologia RoF em redes WiMAX seguem o mesmo padrão de seu emprego nas redes celulares convencionais: ampliação da cobertura em uma área já servida com a implantação de novas células, extensão da cobertura até regiões onde os sinais de RF não chegam, aumento da taxa oferecida aos usuários com o emprego de células de pequena cobertura (picocélulas) e, por fim, otimização de redes já existentes com a diminuição do número de equipamentos de rádio utilizados ou aumento do número de usuários atendidos.

Um dos grandes desafios do emprego da tecnologia RoF em protocolos de redes já estabelecidos, como o IEEE 802.16, diz respeito aos ajustes dos tempos de sincronização das camadas física e de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*). A introdução dos enlaces ópticos de grande extensão na rede provoca um grande aumento no atraso de propagação dos sinais entre as RAUs e a BSC, o que afeta algumas temporizações previstas pelo padrão de rede, degrada o desempenho dos protocolos de alto nível e pode até mesmo causar a interrupção do funcionamento da rede devido aos atrasos. Esses atrasos adicionais devem ser corretamente tratados pelos protocolos, principalmente por aqueles responsáveis pela sincronização e pelas temporizações da rede. Os principais ajustes estão relacionados com o tempo de guarda na transição entre as rajadas de descida (*downlink*) e subida (*uplink*) em redes com duplexação por divisão do tempo (*Time Division Duplexing - TDD*) e também com o valor do prefixo cíclico dos símbolos OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), que previnem os problemas de interferência intersimbólica (*Intersymbol Interference - ISI*).

A grande vantagem da arquitetura RoF encontra-se na centralização dos recursos de rádio da rede em um único ponto, o que torna possível o desenvolvimento de novos algoritmos de alocação de canais, balanceamento de carga, controle de potência, etc. A arquitetura centralizada traz vantagens nos procedimentos de Gerenciamento de Recursos de Rádio (*Radio Resource Management - RRM*) em comparação com as redes sem fio convencionais [21], o que possibilita a otimização de algoritmos pré-existentes e elaboração

de novos algoritmos. Uma das etapas mais importantes do planejamento celular é o posicionamento das BSs na região de cobertura. O objetivo dessa tarefa é configurar a rede para que os recursos de rádio sejam melhor utilizados, de forma a otimizar um determinado critério, como qualidade de serviço ou área de cobertura. O RoF permite que o posicionamento das BSs, e consequente alocação de recursos da rede, seja feito de forma centralizada e dinâmica, o que possibilita uma maior otimização do uso dos recursos e melhor adequação aos requisitos variáveis de demanda e à mobilidade dos usuários. A nova arquitetura baseada nas RAUs permite que o tamanho e localização das células sejam ajustados dinamicamente, de acordo com os critérios desejados pelo operador. Com o conhecimento centralizado da demanda e localização dos usuários é possível estabelecer uma associação entre as RAUs e as BSs, para otimizar o uso dos recursos, minimizando o número de BSs usadas, maximizando o número de usuário atendidos ou otimizando outros critérios de interesse do operador e/ou dos usuários.

O problema de otimização dos recursos de rádio pode ser custoso para as redes sem fio móveis, dado que o rearranjo da topologia da rede (associação entre RAUs e BSs) precisa ser feito em função das mudanças rápidas da rede. Existem diferentes abordagens para a otimização dos recursos, que podem retornar configurações ótimas ou configurações de boa qualidade. Em geral, algoritmos exatos requerem grande custo de processamento e podem ser inviáveis para redes dinâmicas. O problema de associação dos recursos em redes RoF é uma extensão do problema clássico de posicionamento de BSs em redes sem fio, que é um problema conhecidamente NP-difícil [40]; soluções ótimas em tempo real para a otimização das redes RoF são, portanto, inviáveis para cenários complexos. Uma possibilidade para a otimização dos recursos é obter soluções de boa qualidade através de heurísticas ou algoritmos aproximados. Eles apresentam resultados próximos dos ótimos com um custo computacional muito menor, viabilizando o seu emprego em redes dinâmicas.

Nesta dissertação, foram estudados os 3 problemas relacionados com redes sem fio WiMAX e arquitetura RoF previamente descritos. Inicialmente, foi realizado um estudo sobre os impactos causados pela arquitetura de RoF em redes WiMAX no que diz respeito às temporizações dos protocolos do IEEE 802.16. Foram estudados os impactos do RoF nos parâmetros da rede da camada física, de controle de acesso ao meio (MAC) e também no nível de aplicação. O estudo desse primeiro problema resultou em um levantamento de curvas de desempenho que têm como principal objetivo servir de base para o planejamento e implantação de redes WiMAX com RoF. O segundo problema estudado diz respeito à otimização de recursos de rádio em redes sem fio baseadas em RoF. Foi proposta uma arquitetura de RoF baseada em uma hierarquia de RAUs que permite implantar células com diferentes raios de cobertura. A modelagem para a otimização dos recursos (associação entre RAUs e BSs) foi feita utilizando programação linear inteira com 3 funções objetivo diferentes: a primeira para minimizar o número de BSs usadas na rede, a segunda

para maximizar a receita do operador, e a última, que atende a esses dois objetivos simultaneamente. A última parte da dissertação propõe algoritmos para diminuição do tempo de execução do problema de otimização, dado que a grande demanda computacional das soluções ótimas impede o uso dessa técnica em cenários dinâmicos. Os algoritmos aproximados são baseados na técnica de relaxação linear do modelo de programação linear inteira, onde as variáveis binárias passam a ser reais e um processo iterativo de arredondamento converge as soluções não inteiras em soluções inteiras. As últimas duas etapas da dissertação apresentam resultados que podem ser utilizados como base para a otimização de recursos em redes sem fio com RoF e algoritmos rápidos que podem ser implementados em cenários dinâmicos.

As principais contribuições desta dissertação são:

- Estudo do desempenho das redes WiMAX com RoF através da análise do ajuste do prefixo cílico dos símbolos OFDM e dos tempos de guarda do TDD;
- Proposta de uma arquitetura de otimização de recursos de rádio para redes baseadas em RoF e de um modelo de otimização baseado em programação linear inteira para a obtenção de resultados ótimos;
- Proposta de 3 algoritmos de aproximação baseados em relaxação linear do problema de otimização linear inteira para a obtenção de resultados aproximados em tempo reduzido, focando em redes móveis e dinâmicas.

O restante desta dissertação está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 trata dos conceitos básicos referentes à pesquisa, como a descrição do padrão IEEE 802.16 e das redes WiMAX, o conceito de Rádio sobre Fibra e os problemas mais comuns de Gerenciamento de Recursos de Rádio em redes sem fio modernas. O capítulo 3 trata dos problemas de dimensionamento das redes WiMAX para o seu funcionamento com a tecnologia RoF e apresenta os resultados do estudo sobre a degradação do desempenho da rede. O capítulo 4 apresenta o problema de alocação de rádios em redes baseadas em RoF. Apresenta-se uma arquitetura de RoF que permite implantar células de diferentes raios de cobertura a partir de várias camadas de RAUs e o modelo de otimização baseado em programação linear inteira. O capítulo 5 apresenta 3 algoritmos aproximados para a solução rápida do problema de otimização de recursos de rádio em RoF. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões sobre os trabalhos realizados e os futuros trabalhos que podem ser feitos a partir dos resultados desta dissertação.

A partir dos resultados do estudo descrito no capítulo 3 foram publicados os artigos [23] e [25]. Os estudos apresentados no capítulo 4 resultaram na publicação dos artigos [26] e [27] e os estudos do capítulo 5 resultaram na publicação dos artigos [24], [29], [28] e [30], sendo os últimos 3 aceitos para publicação.

Durante o desenvolvimento da dissertação o aluno também esteve envolvido com atividades de pesquisa com pesquisadores da Universidade de Trento, na Itália. Foi desenvolvida uma arquitetura para a implementação de mecanismos de controle ativo de fila para redes IEEE 802.11. Essa arquitetura é baseada na implementação de um canal de retroalimentação entre as estações móveis e o ponto de acesso dessas redes e pode ser aplicada para o tratamento de diferentes problemas de QoS em redes Wi-Fi, como a justiça de RTT e a anomalia da MAC. Como resultados desse estudo foram publicados os artigos [37] e [31].



# Capítulo 2

## Conceitos básicos

A ampla adoção das redes sem fio de dados na última década é um fenômeno de grande importância para a computação, assim como o desenvolvimento e adoção da telefonia celular foi para as telecomunicações no final do século passado. Os primeiros dispositivos de comunicação de dados móveis surgiram com as tecnologias de redes celulares 2,5G, que utilizavam tecnologias como GPRS, EDGE e 1xRTT [5]. A grande expansão das redes sem fio de dados ocorreu, porém, apenas nos últimos 7 anos com o uso das redes Wi-Fi, baseadas na especificação IEEE 802.11. O emprego das redes sem fio locais (Wi-Fi) trouxe a tão desejada mobilidade para os computadores pessoais e conectividade para os *smartphones*, mas com uma série de restrições, principalmente no que se refere à área de cobertura. As redes Wi-Fi atendem ambientes pequenos, normalmente *indoor* e com poucos usuários (poucas dezenas), além de não garantir bons níveis de qualidade de serviço para aplicações de tempo real, como VoIP e vídeo. Características como mobilidade, com cobertura que se estende por uma cidade inteira e com recursos para atender centenas de usuários com qualidade de serviço, só são possíveis com redes sem fio metropolitanas (*Wireless Metropolitan Networks* - WMAN), como as tecnologias de redes 3G e outros padrões como o WiMAX e o LTE, que serão a base para as futuras redes 4G. As tecnologias de redes 4G, como o WiMAX e o LTE, têm atraído grande atenção da indústria e da academia porque são tecnologias robustas que visam prover conectividade em grandes regiões com altas taxas e características interessantes de qualidade de serviço.

As redes sem fio metropolitanas surgiram para complementar, não substituir, as redes sem fio locais e terão grande importância futuramente para que conceitos como a computação ubíqua se tornem realidade [6]. Essas redes, como o WiMAX, apresentam complexidade e custos muito maiores que as rede sem fio locais e, por isso, novos conceitos de infraestrutura têm sido pensados para diminuir os custos desses tipos de rede e melhorar o seu desempenho. A tecnologia de Rádio sobre Fibra surgiu com foco nas redes de telefonia móvel (celular), mas apresenta características interessantes que trazem vantagens

também para as redes de dados, por isso a integração de RoF com diversos padrões de rede sem fio de banda larga tem sido amplamente estudado [22]. A combinação entre RoF e WiMAX é bastante promissora pois permitirá a ampla adoção da tecnologia com baixo custo e grande flexibilidade de implementação tanto em ambientes com grande número de acessos (centro urbanos) - com alta demanda por tráfego - quanto em ambientes com poucos acessos (ambiente rurais) - com exigência de grande cobertura e baixo custo.

Neste capítulo, são analisados os principais conceitos relacionados com as redes sem fio metropolitanas e Rádio sobre Fibra (RoF), os principais temas tratados nesta dissertação. A seção 2.1 resume os tipos de redes sem fio existentes e os classifica quanto à cobertura, taxa de transmissão e custo. A seção 2.2 discute o padrão IEEE 802.16 e as redes WiMAX. A seção 2.3 apresenta os principais conceitos sobre a tecnologia Rádio sobre Fibra (RoF). A seção 2.4 trata de algumas questões de gerenciamento de recursos de rádio em redes sem fio, como o problema de posicionamento de Estações Base. Por fim, a seção 2.5 apresenta as considerações finais sobre o capítulo 2.

## 2.1 Classificação das redes sem fio

As redes sem fio podem ser classificadas, de acordo com a sua cobertura (tamanho das células), padronização e implementação, conforme mostra a figura 2.1.

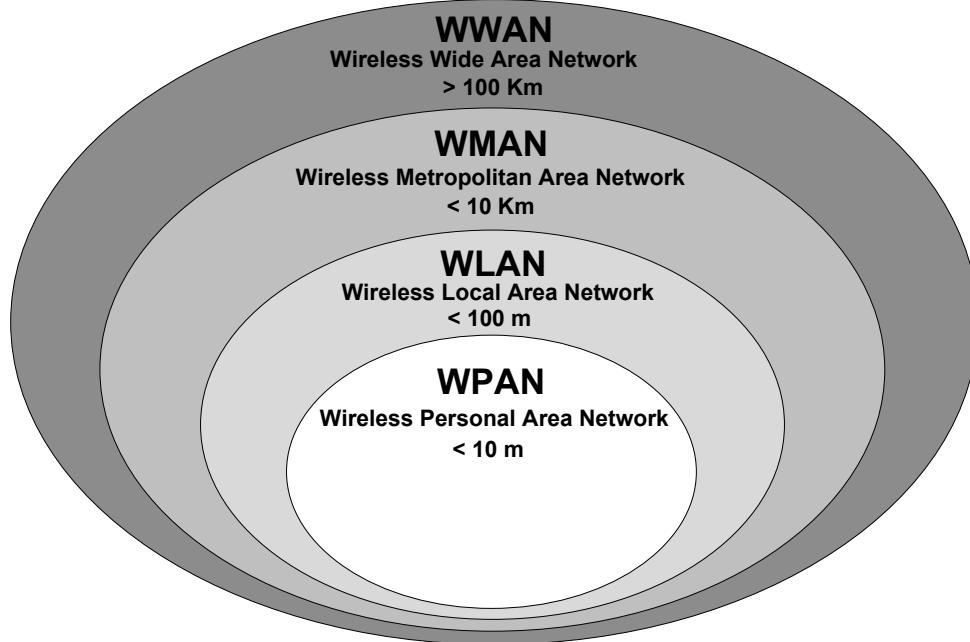


Figura 2.1: Classificação das redes sem fio - nomenclatura e cobertura

As redes WPAN (*Wireless Personal Area Networks*) são redes sem fio pessoais, com

cobertura bastante restrita e aplicações bastante diversificadas. Fazem parte desse grupo o padrão Bluetooth, as redes sem fio de sensores e redes UWB. A capacidade dessas redes se restringe a poucos Mbps com distâncias de até 100 metros ou alguns Gbps para distâncias menores do que 5 metros (UWB). No geral, são redes dinâmicas e autoconfiguráveis, para aplicações específicas como a comunicação entre celular e *headset* ou comunicação máquina-máquina (*Machine-to-Machine* - M2M), como nas redes de sensores sem fio. Os diversos padrões existentes implementam protocolos específicos para as aplicações alvo de cada tipo de rede e, normalmente, essas tecnologias não são utilizadas para fornecer acesso à Internet, dado que esses padrões não suportam a pilha TCP/IP de forma nativa. O emprego de Rádio sobre Fibra em redes WPAN tem sido bastante explorado na área de redes de sensores sem fio [50].

As redes WLAN (*Wireless Local Area Networks*) são redes sem fio locais de abrangência restrita a células menores do que 100 metros. Apresentam altas taxas de dados, chegando a centenas de Mbps, mas não possuem infraestrutura que garanta QoS para um grande número de usuários. O padrão IEEE 802.11, base das redes Wi-Fi, é o grande representante desse tipo de rede. A versão mais difundida do padrão, o IEEE 802.11g, oferece taxa de dados de 54 Mbps, enquanto a mais nova versão do padrão, o IEEE 802.11n, oferece capacidade de até 600 Mbps na camada física com a implementação de canais de 40 MHz e antenas MIMO 4x4. As redes Wi-Fi são a forma mais utilizada como acesso última milha à Internet por estações móveis, principalmente devido ao seu baixíssimo custo. A grande desvantagem do padrão Wi-Fi está na sua restrita cobertura e baixo desempenho em ambientes outdoor e com mobilidade das estações. Algumas empresas têm utilizado o Wi-Fi como meio para distribuição de Internet em redes públicas com relativo sucesso [42]. O grande número de Pontos de Acesso (*Access Points* - APs) exigidos para que a rede ofereça grande cobertura encarece a tecnologia e torna o seu uso restrito a pequenas cidades ou prédios comerciais como shoppings, estádios e centros de eventos. Algumas pesquisas estudam o uso da tecnologia de Rádio sobre Fibra para redes sem fio locais, principalmente, para o barateamento do custo de instalação dos APs e expansão da rede para grandes extensões. O principal problema enfrentado por essas pesquisas é a extensão máxima da fibra suportada pelo Wi-Fi, devido às temporizações pré-determinadas na troca de quadros do controle de acesso ao meio CSMA/CA. Em prédios comerciais, o emprego do Wi-Fi com RoF é promissor, mas em ambientes externos, onde as extensões de fibra podem chegar a centenas de quilômetros, o seu uso é inviável [18].

As redes WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*) são redes metropolitanas, com cobertura suficiente para prover acesso à uma cidade (alguns quilômetros de raio). Apresentam altas taxas de dados, de até algumas centenas de Mbps, e infraestrutura para prover acesso com qualidade de serviço para um grande número de usuários. O padrão IEEE 802.16, que é a base das redes WiMAX, é um dos principais representantes desse tipo

de rede. As redes WiMAX apresentam características importantes que a torna robusta para ambientes *outdoor* e com usuários móveis, como o OFDM, modulação adaptativa, antenas MIMO, etc. O custo do WiMAX, assim como outros padrões de redes metropolitanas, é mais alto do que o custo das redes locais, devido à grande infraestrutura necessária para a implantação da rede, que envolve diversas Estações Base, torres e infraestrutura de *backhaul* interligando as células. As redes metropolitanas são focadas em ambientes externos e grandes coberturas, portanto podem tirar proveito da tecnologia de Rádio sobre Fibra tanto para o barateamento das Estações Base (antenas) quanto para o barateamento da infraestrutura de *backhaul* necessária para interligar as diversas células da rede.

As redes WWAN (*Wireless Wide Areas Networks*) são redes globais, com cobertura que se estende por várias cidades e com mobilidade de altas velocidades. As redes de telefonia celular tradicionais (GSM e CDMA) são exemplos de redes globais. Com a convergência entre as redes de voz e de dados novos padrões têm surgido para disponibilizar acesso à Internet com grandes coberturas. Os padrões de redes 3G são exemplos de redes globais de acesso à Internet, como o UMTS, EV-DO e HSPA. O padrão IEEE 802.16e tem sido também implementado como rede global para acesso à Internet, caracterizando-se como uma rede 3G através da especificação IP-OFDMA do IMT-2000. As futuras redes 4G oferecerão acesso à Internet com alta capacidade (até 1 Gbps com estações estacionárias) e os padrões WiMAX2 (IEEE 802.16m) e o LTE-Advanced são fortes candidatos para servirem de base para essas futuras redes sem fio globais. A tecnologia de Rádio sobre Fibra foi inicialmente vislumbrada para o emprego em redes de longo alcance, como as redes de telefonia [14]; existem, atualmente, pesquisas para o emprego do RoF em redes 3G, assim como nas futuras redes 4G [39].

A tabela 2.1 resume as principais características das categorias de redes sem fio enunciadas anteriormente.

Tabela 2.1: Classificação das Redes Sem Fio

Categoria	Alcance	Padrões	Implementação	Custo
WPAN	< 10 m	IEEE 802.15	Bluetooth, ZigBee e UWB	Baixo
WLAN	< 100 m	IEEE 802.11	Wi-Fi	Médio
WMAN	< 10 km	IEEE 802.16e e LTE	WiMAX e LTE	Alto
WWAN	> 100 Km	IEEE 802.16m e LTE	WiMAX2 e LTE-Advanced	Alto

## 2.2 Padrão IEEE 802.16 e as redes WiMAX

O grupo de trabalho IEEE 802.16 especifica interfaces de redes sem fio de banda larga de cobertura metropolitana (WMAN). Existem, atualmente, dois padrões desse grupo mais

disseminados: o padrão IEEE 802.16-2004, também conhecido como IEEE 802.16d, e o padrão IEEE 802.16-2005, conhecido como IEEE 802.16e. O primeiro padrão especifica interfaces físicas baseadas em portadora única (*Single Carrier - SC*), OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) e OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) para frequências licenciadas e não-licenciadas e para estações fixas ou nômades. O segundo padrão adiciona ao primeiro características para a coexistência de estações fixas e móveis na rede. A exemplo de todos os padrões do grupo IEEE 802, as especificações IEEE 802.16-2004 e IEEE 802.16-2005 abordam exclusivamente as camadas física e de controle de acesso ao meio (MAC) da pilha de protocolos da rede, tratando de problemas de modulação, codificação, largura de banda e potência de transmissão, na camada física, além de duplexação, multiplexação, garantia de acesso, qualidade de serviço e segurança, na camada MAC.

O padrão 802.16 prevê uma arquitetura de rede sem fio de banda larga para aplicações multimídia. A principal topologia de rede especificada é a ponto-multiponto, onde uma Estação Base conecta e controla diversas Estações Assinantes. A camada MAC é especificada de modo a permitir o uso de qualquer uma das 5 camadas físicas disponíveis no padrão (*WirelessMAN-SC*, *WirelessMAN-SCa*, *WirelessMAN-OFDM*, *WirelessMAN-OFDMA* e *WirelessHUMAN*). A opção pela melhor camada física deve ser feita de acordo com a arquitetura da rede a ser implementada e também de acordo com o ambiente de operação.

O modelo de referência da pilha de protocolos IEEE 802.16 pode ser visto na figura 2.2. A camada MAC do padrão é dividida em 3 subcamadas. A subcamada de convergência para serviços específicos (*Service-Specific Convergence Sublayer - CS*) provê serviços de mapeamento de dados de protocolos de alto nível, como ATM e IP. A subcamada de parte comum da MAC (*MAC Common Part Sublayer - CPS*) oferece os serviços do núcleo da camada MAC, como o sistema de acesso ao meio, estabelecimento de conexões, alocação de banda, controle de QoS, etc. Por fim, a subcamada de segurança (*Security Sublayer - SS*) oferece serviços de autenticação e cifragem dos dados [2, 3].

Os padrões da família IEEE 802.16 são orientados a redes sem fio para acesso banda larga (*Broadband Wireless Access - BWA*). O WiMAX Forum é um orgão formado por empresas do setor de telecomunicações que visa difundir o uso, desenvolver a tecnologia e padronizar os produtos para redes BWA, tendo como base os padrões da família IEEE 802.16. É papel do WiMAX Forum estabelecer e executar testes que garantam a interoperabilidade de produtos para redes BWA de diferentes fabricantes. Além disso, o WiMAX Forum promove a divulgação da tecnologia através de fóruns e estudos de mercado. Atualmente, o WiMAX Forum certifica produtos baseados no padrão IEEE 802.16-2005 e futuramente adotará o padrão IEEE 802.16m para a certificação das redes WiMAX2.

As redes WiMAX suportam dois tipos de duplexação da rede na camada MAC: por Divisão de Frequência (*Frequency Division Duplexing - FDD*) e por Divisão de Tempo

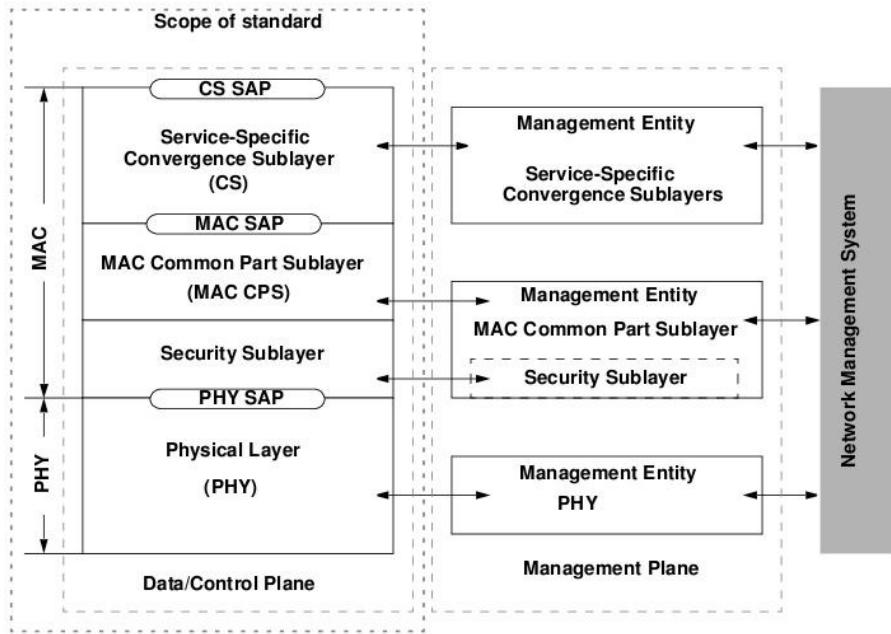


Figura 2.2: Modelo de referência da pilha IEEE 802.16

(*Time Division Duplexing* - TDD). O FDD baseia-se em 2 canais separados no domínio da frequência, o que possibilita o acesso simultâneo ao meio pelos fluxos de *downlink* e de *uplink*. O TDD, por sua vez, baseia-se no uso de um único canal no domínio da frequência, o que faz com que os tráfegos de *downlink* e *uplink* compartilhem o acesso ao meio no domínio do tempo. O TDD apresenta algumas características que o tornam mais atrativo em relação ao FDD, principalmente para redes de banda larga. A primeira vantagem é a simplicidade de hardware, dado que apenas um conjunto de componentes eletrônicos é necessário em sistemas TDD, que são intrinsecamente sistemas *half-duplex*. O TDD torna mais simples a tarefa de estimativa da qualidade do canal, dado que a mesma faixa de frequências é utilizada no sentido *downlink* e no *uplink*. Finalmente, a técnica de TDD é mais recomendada para tráfego assimétrico entre *downlink* e *uplink*, o que é comum em sistemas banda larga.

A camada física dos padrões de redes WiMAX baseia-se na divisão ortogonal de frequência. Essa técnica de transmissão é baseada no princípio de subportadoras ortogonais, que são utilizadas para a transmissão simultânea de dados em bandas estreitas. Os bits são paralelizados e transmitidos simultaneamente em bandas estreitas ortogonais, ao invés de serem transmitidos de forma serial, utilizando uma banda de grande largura. A ortogonalidade das subportadoras assegura que elas, teoricamente, não causem interferência entre si e oferece um melhor aproveitamento espectral.

A figura 2.3 apresenta uma comparação entre as transmissões feitas em portadora única

e com a técnica de OFDM. É possível observar que o primeiro caso utiliza uma banda larga e transmite os símbolos serialmente, enquanto o OFDM paralleliza os símbolos e faz a transmissão com bandas estreitas. A figura 2.4 é uma representação das bandas estreitas no domínio da frequência; a ortogonalidade permite o melhor aproveitamento do espectro, sem o perigo de interferência entre as subportadoras.

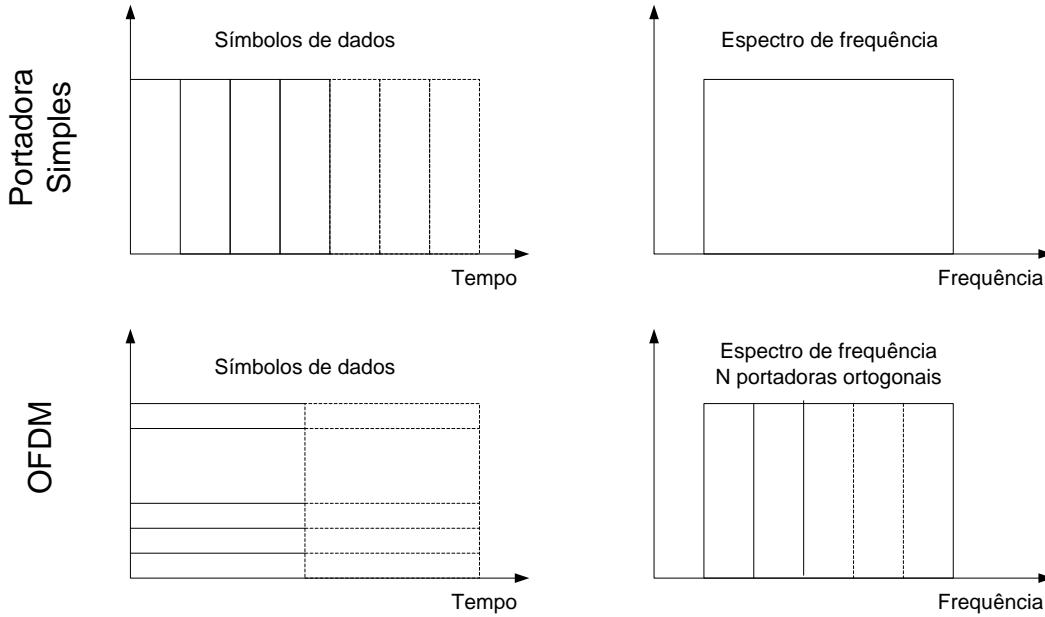


Figura 2.3: Portadora única x OFDM no tempo e frequência

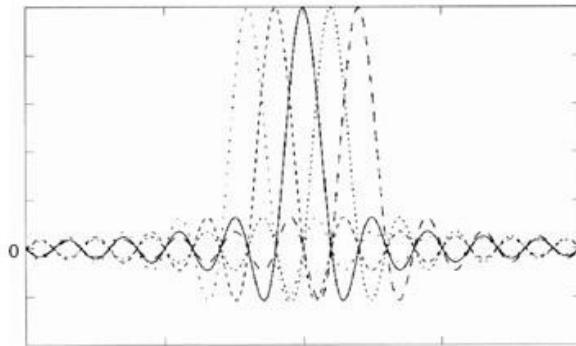


Figura 2.4: Representação no domínio da frequência das subportadoras

O OFDMA baseia-se também no conceito de subportadoras e as utiliza como forma de múltiplo acesso de usuários. Ao invés de designar todas as subportadoras a um único usuário em um determinado instante de tempo, como ocorre com o OFDM, o OFDMA divide o conjunto de subportadoras em subconjuntos e designa diferentes subconjuntos

a diferentes usuários para o acesso simultâneo ao meio. O desempenho da rede melhora com o uso dessa técnica, mas o aumento da complexidade da rede é significativo. Além de melhores hardwares, novos algoritmos de escalonamento devem ser desenvolvidos para melhorar a eficiência do OFDMA.

Um elemento importante do OFDM é o prefixo cíclico. Todo símbolo OFDM possui um intervalo de guarda, denominado Banda de Guarda, adicionado ao seu começo e que é igual à parte final do seu formato de onda. A teoria de sinais do OFDM mostra que essa estrutura cíclica torna o sinal imune aos efeitos de multipercorso (*multipath*) e mantém as subportadoras ortogonais entre si [13]. A figura 2.5 apresenta a estrutura dos símbolos OFDM no tempo. Uma relação importante é a razão entre o tempo de guarda ( $T_G$ ) e o tempo útil ( $T_d$ ) dos símbolos ( $G = T_G/T_d$ ). O padrão IEEE 802.16 define que  $G$  pode assumir os seguintes valores: 1/4, 1/8, 1/16 e 1/32, de acordo com o ambiente de operação da rede.

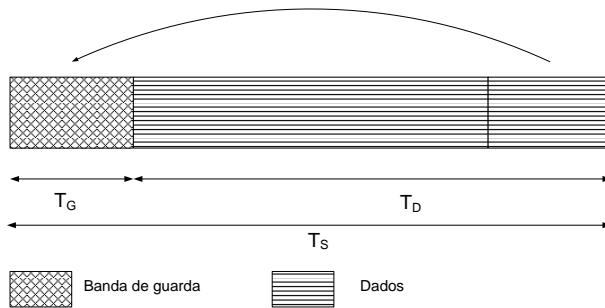


Figura 2.5: Prefixo cíclico dos símbolos OFDM

## 2.3 Rádio sobre Fibra

O uso de Rádio sobre Fibra (*Radio over Fiber* - RoF) em sistemas de telefonia sem fio foi primeiramente proposto e demonstrado em 1990 por Cooper [14]. Desde então, a comunidade científica tem investigado e desenvolvido essa técnica de transmissão, com foco, principalmente, nos sistemas de telefonia celular. Rádio sobre Fibra é, essencialmente, um sistema de transmissão analógico que distribui sinais de radiofrequência (RF) entre uma ou mais Estações Base de Controle (*Base Station Controller* - BSC) e diversas Unidades de Antena Remota (*Remote Antenna Units* - RAUs), utilizando como meio de transmissão fibras ópticas. A figura 2.6 mostra um diagrama simples da arquitetura RoF. Nesse diagrama existe 1 BSC com  $n$  BSs e 7 RAUs espalhadas na área de cobertura. O uso de 5 RAUs é suficiente para fornecer a cobertura necessária, o que permite a desativação das RAUs 1 e 4.

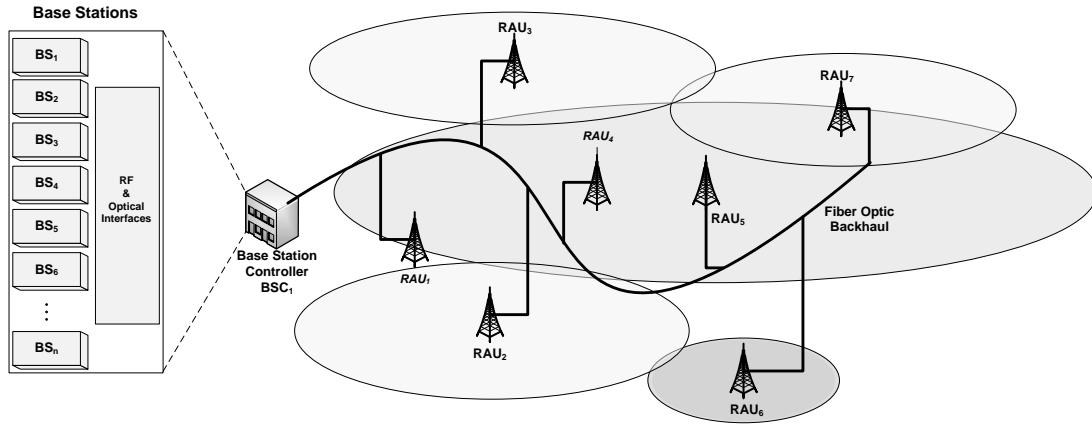


Figura 2.6: Diagrama da arquitetura Rádio sobre Fibra (RoF)

As RAUs são simples, baratas e pequenas, e têm um baixo custo de implantação e expansão das células da rede sem fio. A centralização dos recursos da rede em uma estação central possibilita a alocação dinâmica de seus recursos e melhor gerenciamento da carga da rede. Esses fatores têm tornado a tecnologia de RoF interessante também para redes de dados, como as redes WiMAX, que necessitarão de células pequenas para oferecer altas taxas de dados para os usuários.

A grande vantagem do emprego de fibras ópticas na distribuição de sinais de RF é a baixa atenuação que o sinal sofre (0,2 dB/Km para comprimento de onda de 1.550 nm), além da grande banda disponível no meio óptico (dezenas de THz). As transmissões ocorrem na mesma portadora do sinal RF e os sinais podem ter modulações digitais robustas como QPSK ou 64-QAM.

Um esquema simples de um enlace bidirecional RoF é apresentado na figura 2.7. Nas duas direções, o sinal de RF de entrada é aplicado diretamente em um diodo laser e é utilizado para modular a intensidade de luz de saída. A luz transporta a informação e a converte novamente para o formato de ondas de RF no fotodiodo (lado receptor). Podem ser empregadas fibras ópticas multimodo e monomodo, mas o último tipo é preferido pelas melhores características de atenuação. Os comprimentos de onda normalmente empregados nesse esquema de transmissão são 1300 e 1550 nm; esse enlace óptico é denominado IM-DD (*Intensity Modulated-Direct Detection*) e é utilizado na maioria dos experimentos e aplicações de RoF existentes, principalmente pelo seu baixo custo [11].

Apesar das fibras possuirem ótimas características de atenuação e disponibilidade de banda, a natureza analógica dos sinais impõe problemas de limitações físicas devido ao ruído e distorção do sinal. Outro problema ainda mais grave é o atraso causado pela propagação do sinal na fibra quando esta possui grandes extensões. Esses fatores limitam o emprego da fibra a certas distâncias e podem limitar também a expansão da rede sem

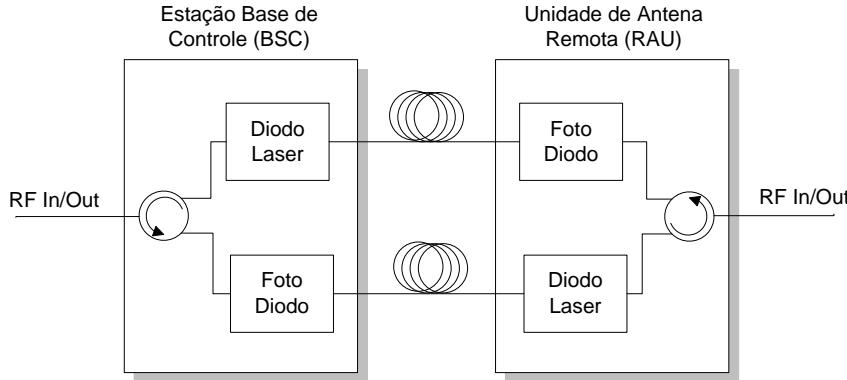


Figura 2.7: Layout típico de um enlace bidirecional

fio baseada em RoF. O atraso exige que as temporizações dos protocolos da rede sejam readequadas e algumas vezes pode degradar o desempenho da comunicação.

## 2.4 Gerenciamento de recursos de rádio

O Gerenciamento de Recursos de Rádio (*Radio Resource Management - RRM*) é o controle de características e configurações de sistemas de comunicação sem fio, como as redes celulares, sistemas de broadcast (TV e rádio) e redes sem fio de dados (Wi-Fi, WiMAX, 3G, etc.). O RRM envolve desde o controle de potência de transmissão, alocação de canais, largura de banda e esquemas de correção de erro, até operações mais complexas como planejamento do reuso de frequências, balanceamento de carga, posicionamento de Estações Base, etc. Os algoritmos de RRM, de uma maneira geral, consideram redes com vários usuários e várias células, cuja solução ótima local pode não corresponder à uma solução ótima global do sistema, portanto as tomadas de decisões devem levar em consideração a complexidade da rede, a fim de maximizar o seu desempenho. O principal objetivo de todos algoritmos de RRM é otimizar a relação *bits/Hz/Estação Base*.

Os algoritmos de RRM podem ser divididos em dois grandes grupos: algoritmos estáticos e dinâmicos. Algumas características da rede sofrem pouca variabilidade e, portanto, conseguem ser facilmente otimizadas com algoritmos estáticos, que são executados poucas vezes e cujos resultados são usados por um longo período. Planejamento de frequências, altura/inclinação de antenas, setorização e os critérios de *handover* são decididos usualmente de forma estática em uma rede. Outros algoritmos devem ser executados com períodos menores devido à maior variabilidade da rede. Exemplo de algoritmos dinâmicos são o controle de potência, algoritmos de adaptação de link (modulação adaptativa), escalonamento do tempo e de frequência, controle de admissão, etc. Os algoritmos dinâmicos controlam características importantes da rede e devem ser adequados à mobilidade e dinamicidade

destas. São, normalmente, executados, de forma centralizada, por agente responsáveis por uma célula, um conjunto de células ou mesmo toda a rede de acesso.

Um algoritmo de RRM muito importante é o algoritmo de posicionamento de Estações Base. Esse processo inicial de implantação da rede resulta na definição das células da rede e na consequente distribuição dos recursos de acesso. A principal restrição ou objetivo que deve ser considerada nesse processo é o custo de instalação das Estações Base, além, é claro, da cobertura da rede. Esse custo envolve o valor da própria Estação Base, os enlaces de interligação com o backbone da rede, além dos custos operacionais como o valor do aluguel ou compra do terreno, infraestrutura de segurança física do local, custos com energia, impostos, etc. Devido ao alto custo de instalação, o processo de posicionamento de Estações Base é normalmente muito bem avaliado e não sofre modificações por longos períodos. Os algoritmos de posicionamento de Estação Bases são, portanto, na sua grande maioria algoritmos estáticos e de grande importância para o custo total da rede.

O posicionamento das BSs deve levar em consideração a demanda dos usuários na localidade de instalação para o correto dimensionamento do número de rádios a serem instalados, raio das células, altura da torre, etc. Como a decisão de posicionamento de BSs é estática, o planejamento deve levar em consideração os picos de demanda e o possível crescimento desta, acarretando em um grande desperdício de recursos. Um problema maior ocorre em grandes centros urbanos onde a demanda e a concentração de usuários sofre grande variação ao longo da área da rede, assim como ao longo do tempo de operação. Nos horários comerciais, por exemplo, grandes shoppings e centros comerciais possuem alta demanda e concentração de pessoas, enquanto parques e espaços residenciais possuem baixa demanda. Fora dos horários comerciais a situação se inverte, dado que a demanda de centros comerciais cai e a densidade de usuários se redistribui nas casas. Fica claro que a distribuição estática dos recursos causa desperdício e pode prejudicar a eficiência da rede. Algoritmos de posicionamento de BSs dinâmicos são possíveis com a arquitetura de Rádio sobre Fibra, dado que os equipamentos de rádio ficam centralizados em pontos únicos, capazes de distribuir os recursos de forma ótima nos locais de maior demanda, com adaptação dinâmica ao longo do tempo. O estudo e implantação de algoritmos de posicionamento de BSs dinâmicos é algo que pode economizar recursos da rede e otimizar o seu desempenho, mas essa tarefa depende de infraestrutura apropriada e algoritmos para otimizar o uso dos recursos de forma rápida.

A figura 2.8 mostra um exemplo da aplicação do RoF na reconfiguração do posicionamento de Estações Base de forma dinâmica. A figura 2.8a representa uma configuração típica de horário de pico, quando as células são concentradas no centro da região, dado que os prédios comerciais concentram grande parte da demanda. Fora do período de pico a demanda dos usuários é distribuída ao redor da área e as células são realocadas (figura 2.8b), causando uma grande economia de recursos. A figura 2.8c representa a

configuração estática de células que seria necessária para comportar a demanda dinâmica dos usuários ao longo de todo o dia. A realocação das células pode ocorrer através de um processo simples de ligamento/desligamento das RAUs, já que esses elementos de rede são instalados em grande número na área de cobertura. É possível claramente observar a economia de recursos que o RoF oferece nesse cenário. Assim, os desafios do posicionamento dinâmico de Estações Base encontram-se na descoberta da configuração ótima dos recursos (algoritmos de otimização) e nos algoritmos de ajuste dinâmico e reconfiguração da rede.

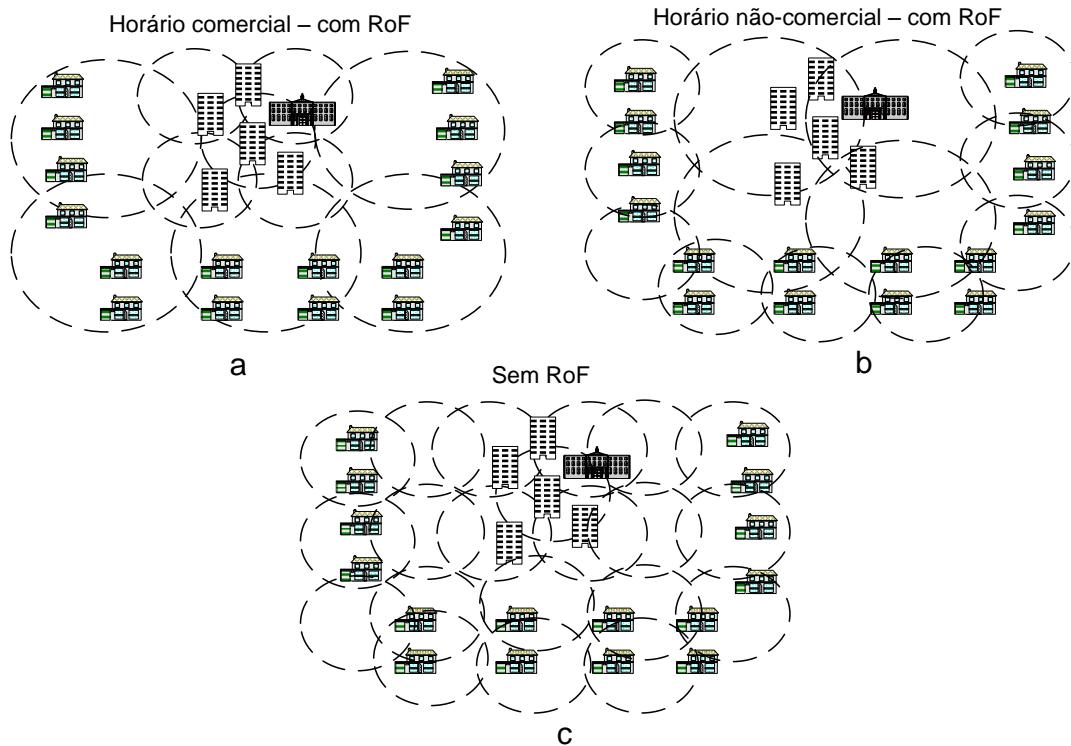


Figura 2.8: Exemplo de aplicação da infraestrutura RoF em um ambiente dinâmico

Nesta dissertação, focou-se no problema de posicionamento das Estações Base da rede, já que esse algoritmo pode ser executado de forma mais eficiente com o uso da infraestrutura de Rádio sobre Fibra. Outros algoritmos de gerenciamento de recursos rádio podem também tirar proveito da infraestrutura centralizada de recursos e podem ser alvo de estudos futuros.

## 2.5 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos que serão aprofundados nesta dissertação. Inicialmente, foram mostrados os diversos tipos de redes sem fio existentes,

com suas vantagens e desvantagens. O acesso à Internet móvel em última milha apresenta maiores vantagens de utilizar redes sem fio metropolitanas de longo alcance, como as redes WiMAX. Neste tipo de rede, o uso da tecnologia de Rádio sobre Fibra é extremamente vantajoso, pois diminui o custo de instalação e manutenção das Estações Base e até mesmo do *backhaul* da rede. Foram apresentadas as principais características do padrão IEEE 802.16 e da rede WiMAX, assim como da tecnologia Rádio sobre Fibra. Por fim, alguns algoritmos de gerenciamento de recursos de rádio em redes sem fio foram explicados, com especial ênfase no algoritmo de posicionamento de Estações Base. Esse último tem grande importância no custo de implantação e no desempenho das redes sem fio e, por isso deve ser muito bem desenvolvido. Um algoritmo de posicionamento de Estações Base dinâmico permite que os recursos da rede sejam redistribuídos na área de cobertura e, com isso, o seu uso seja otimizado em locais de grande demanda e economizado em regiões com baixa densidade de usuários.



# Capítulo 3

## Dimensionamento de Rádio Sobre Fibra para Redes IEEE 802.16

### 3.1 Introdução

Um dos principais efeitos negativos do emprego da arquitetura RoF em redes sem fio é o atraso da propagação adicional dos sinais entre as BSCs e as RAUs. Para grandes extensões de fibra esse atraso pode ultrapassar os limites de temporizações dos protocolos MAC, o que pode degradar o desempenho da rede ou até mesmo interromper a sua operação. Algoritmos de acesso ao meio distribuídos, como o IEEE 802.11, sofrem maiores limitações. Protocolos de controle de acesso ao meio centralizados, normalmente, são mais imunes aos problemas de temporizações, dado que essas redes não implementam métodos de acesso randômico e possuem temporizações mais flexíveis; no entanto, a perfeita sincronização é necessária quando a duplexação por divisão de tempo (TDD) é usada. A inserção do enlace óptico deve ser devidamente acomodada pelos tempos de comutação entre o *downlink* e *uplink*, que no padrão IEEE 802.16 são chamados de TTG e RTG. Os valores mínimo e máximo de TTG e RTG limitam o tamanho máximo de fibra permitido pelas redes WiMAX e impactam o seu desempenho, uma vez que o aumento dos seus valores diminui a carga útil de dados em cada quadro de transmissão.

Neste capítulo, são analisados os impactos dos ajustes das temporizações do IEEE 802.16 no desempenho da rede. Na seção 3.2, são apresentados os principais trabalhos de análise de desempenho de redes sem fio (Wi-Fi e WiMAX) com RoF. A seção 3.3 detalha o problema de desempenho e mostra como os parâmetros TTG e RTG podem ser ajustados para comportar grandes extensões de fibras e como o prefixo cíclico do OFDM pode ser usado para garantir o funcionamento da rede em casos especiais de uso do RoF. A seção 3.4 apresenta os resultados da análise do desempenho das camadas física e de aplicação, além da análise do ajuste do prefixo cíclico. Por fim, a seção 3.5 apresenta as considerações

finais sobre o capítulo 3.

## 3.2 Trabalhos relacionados

As limitações do RoF têm sido muito exploradas, mas a maioria dos trabalhos foram realizados no nível físico dos sistemas, com foco na infraestrutura de telefonia celular e novas redes 3G [48]. Mais recentemente, o RoF vem sendo estudado por pesquisadores de redes sem fio de dados, como uma forma viável para a expansão dos serviços nessas redes. Os problemas que impactam a viabilidade e o desempenho desses protocolos vão além das limitações da camada física. A principal mudança na arquitetura da rede com RoF é a introdução de um atraso adicional de propagação dos sinais devido às grandes extensões das fibras, que pode exceder os limites de temporização do protocolo MAC e impedir o bom funcionamento da rede. Os impactos causados pelo atraso adicionado variam para cada tipo de protocolo MAC; protocolos centralizados, como o IEEE 802.16 e HIPERLAN/2, podem ser facilmente adaptados para suportar os cenários de RoF, considerando limites para a extensão máxima das fibras. Protocolos distribuídos, como o IEEE 802.11, sofrem limitações mais severas devido à necessidade de algoritmos aleatórios e de detecção de portadora para o acesso ao meio.

Em [17, 16], os autores tratam a escassez de largura de banda usando faixas de frequência com comprimento de onda milimétrico (17 GHz e 60 GHz), para a criação de redes locais de ambientes *indoor*. Os trabalhos comparam os protocolos HiperLAN/2 e IEEE 802.11, representando, respectivamente, protocolos de controle de acesso ao meio centralizado e distribuído. Os cenários analisados exploram os efeitos do problema do terminal escondido nas redes locais. Nestes cenários, o desempenho da rede não sofre forte degradação em ambos os protocolos com enlaces de fibra com até 4 km de extensão. É observado, porém, que alguns problemas relativos às fases de acesso aleatório de ambos protocolos causam forte impacto no desempenho e limitam a extensão máxima dos enlaces. O trabalho [33] propõe soluções para o aumento da extensão da fibra com base no emprego do RTS/CTS e da manipulação do seu *timeout*. Os resultados das simulações mostram que fibras de até 8 km são viáveis, mas os impactos podem degradar o desempenho em até 15% da vazão da rede. Em [18, 32], uma extensa análise foi feita através de testes reais em *test beds*, simulações e aproximações analíticas. Os resultados mostram que a inserção da fibra óptica diminui a taxa em pelo menos 15%. No entanto, atrasos na propagação dos sinais nas fibras que excedem o tempo limite definido de reconhecimento de pacotes de dados (ACK) e do mecanismo de RTS/CTS causam a falha de comunicação com fibras maiores que 8,1 km.

Nas arquiteturas de RoF com o padrão IEEE 802.16, os estudos consideram, principalmente, as restrições físicas de propagação dos sinais nas fibras. Os trabalhos [15, 36] são

uns dos poucos que exploram os impactos do RoF nos protocolos de controle de acesso ao meio em redes WiMAX. Em [15], os autores afirmam que o atraso causado pela fibra pode ser acomodado em sistemas TDD aumentando os tempos de guarda TTG e RTG. Eles mostram alguns resultados de simulação para o desempenho e eficiência da MAC para diferentes extensões de fibra e diferentes tamanhos de quadro. O trabalho em [36] propõe um sistema de comunicação baseado em OFDMA e TDD, similar ao padrão IEEE 802.16; além da questão do tempo de guarda esse trabalho analisa o problema de interferência intersimbólica causado pelos multipercursos dos sinais, quando mais de uma RAU espalha o mesmo sinal na rede. Este último trabalho propõe o aumento do prefixo cíclico dos símbolos OFDM ou a utilização de atrasadores ajustáveis para eliminar o problema. Apesar da boa explicação teórica, o trabalho [36] carece de análise teórica e de simulações para medir a degradação do desempenho devido ao aumento das extensões das fibras ópticas e devido aos problemas de multipercorso.

Outros trabalhos [35, 34], apresentam o projeto de protocolos de acesso ao meio específicos para redes que utilizam o RoF em ambiente indoor ou para redes veiculares. Todas as implementações específicas apresentam como principais características os protocolos centralizados, sem períodos de acesso aleatório e com o dimensionamento otimizado dos intervalos de guarda entre os quadros dos usuários. Pode-se concluir, portanto, que o grande responsável pelo impacto nos protocolos de alto nível é o atraso de propagação nas fibras ópticas. Esse problema pode ser resolvido com protocolos MAC centralizados com seus parâmetros de sincronização corretamente ajustados.

Nenhum dos trabalhos citados apresenta uma análise criteriosa dos impactos do aumento da extensão da fibra nos protocolos das redes WiMAX, considerando a camada física e a camada de aplicação. O presente trabalho analisa os impactos através de simulação em ambas camadas e leva em consideração os ajustes da temporização do TDD e os ajustes do prefixo cíclico dos símbolos OFDM.

### 3.3 Detalhamento do problema de desempenho

A arquitetura de RoF leva a atrasos de transmissão significativos entre as BSCs e as RAUs. Em uma transmissão TDD, a ocupação do canal é alternada entre tráfegos de *downlink* e *uplink*. Cada vez que o sentido de fluxo dos dados muda todas as estações envolvidas devem ajustar os seus equipamentos de rádio para a nova situação; a rede deve ser, portanto, bem sincronizada para que a duplexação funcione. A fase de sincronização da rede TDD deve levar em conta o tempo necessário para que o hardware sofra uma mudança de estado (RX para TX e vice-versa) e o tempo de propagação do sinal no meio. Tipicamente, o tempo de propagação do sinal é pequeno e pode ser desconsiderado; com a implantação do RoF, porém, isso não é verdade, pois os sinais podem sofrer atrasos

significativos na fibra.

A figura 3.1a mostra a situação que ocorre em redes sem fio convencionais, quando o atraso de transmissão é desprezível. É possível observar que a RAU recebe o fluxo de *downlink* praticamente no mesmo instante de sua transmissão; assim, a rede deve esperar um intervalo suficiente para que os hardwares das estações se ajustem ao novo fluxo. A figura 3.1b mostra o que ocorre quando se introduz atraso significativo entre a BSC e a RAU. Nessa situação, os sinais sofrem um atraso significativo entre a transmissão e a recepção. Esse aumento do atraso deve estar de acordo com as temporizações previstas pelo padrão IEEE 802.16. Para tal, deve-se aumentar os seus tempos de guarda, porém, esse aumento deve ser tal que não degrade o desempenho da rede.

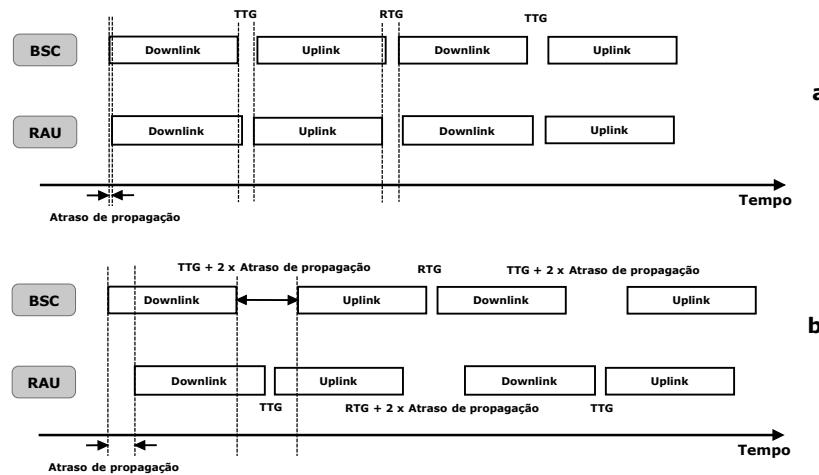


Figura 3.1: Aumento do atraso de propagação com a introdução da fibra

A sincronização da duplexação TDD do IEEE 802.16 é feita baseada, principalmente, em dois intervalos (gaps). O intervalo de espera entre a troca de *downlink* para *uplink* é denominado TTG (*Transmit To Receive Gap*) e o intervalo de troca de *uplink* para *downlink* é denominado RTG (*Receive To Transmit Gap*), conforme mostrado na figura 3.2. O significado desses dois tempos de guarda é explicado a seguir, de acordo com a especificação IEEE 802.16-2005 [3].

**TTG** - O TTG é um intervalo entre a rajada de *downlink* e a subsequente rajada de *uplink*. Esse intervalo permite que exista tempo suficiente para que a BS troque do modo de transmissão para o modo de recepção. Durante esse intervalo, a BS não está transmitindo dados modulados, ela simplesmente permite que a portadora de transmissão diminua, e que a antena troque para o estado de atuação, bem como a parte de recepção seja ativada. Depois do intervalo, o receptor da BS deve procurar pelo primeiro símbolo da rajada de *uplink*. Esse intervalo é um número inteiro de *Physical Slots* (PS) e inicia em uma fronteira de PS.

**RTG** - O RTG é um intervalo entre a rajada de *uplink* e a subsequente rajada de *downlink*. Esse intervalo permite que exista tempo suficiente para que a BS troque do modo de recepção para o modo de transmissão. Durante esse intervalo, a BS não está transmitindo dados modulados, ela simplesmente permite que a portadora de transmissão aumente e que a antena troque para o estado de atuação. Depois do intervalo, o receptor da SS deve procurar pelo primeiro símbolo de dados modulado em QPSK da rajada de *downlink*. Esse intervalo é um número inteiro de *Physical Slots* (PS) e inicia em uma fronteira de PS.

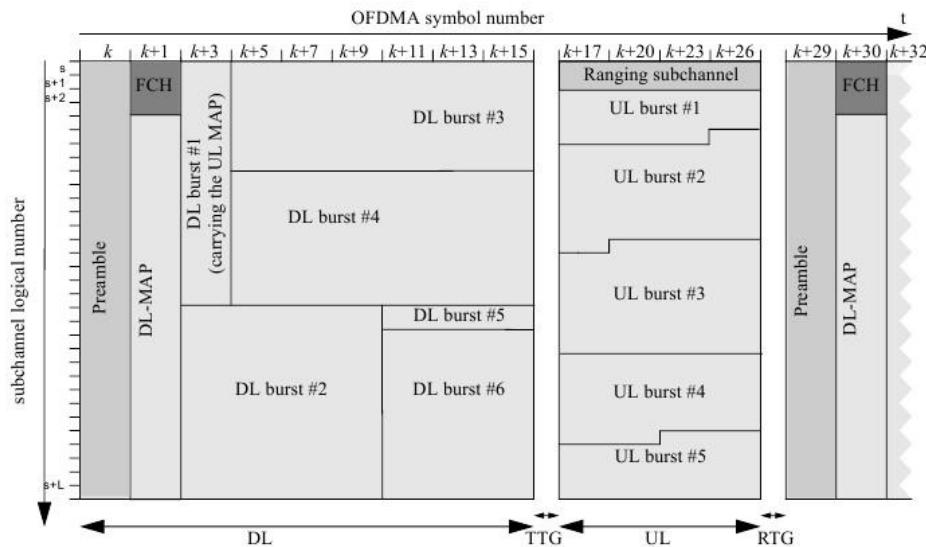


Figura 3.2: Estrutura do quadro OFDMA (IEEE 802.16-2005)

Os intervalos TTG e RTG são geralmente idênticos, mas podem ser ajustados de forma diferente. É possível observar na figura 3.1b que o emprego do RoF exige que eles sejam, de fato, diferentes. As transições de TX para RX de todas as estações passam a exigir um tempo extra de duas vezes o atraso do meio ( $2 \times$  Atraso de propagação). É possível, portanto, ajustar os parâmetros RTG e TTG para a adequação ao maior atraso causado pela fibra na rede. O correto dimensionamento da duplexação TDD é necessário para garantir o funcionamento da rede com a introdução da fibra, sem que isso afete de maneira indesejada o seu desempenho.

Um dos cenários possíveis para a operação do WiMAX com RoF é a extensão da cobertura da rede em áreas de baixa densidade. Esse cenário é possível quando duas ou mais RAUs estão associadas à mesma BS e, portanto, formam uma única célula na rede, transmitindo o mesmo sinal. Essa situação é benéfica porque reduz, substancialmente, o número de handoffs e pode trazer um aumento no desempenho da rede através do uso de

diversidade espacial dos sinais, já que várias cópias do mesmo sinal chegam nas SSs. O principal problema dessa abordagem é que múltiplas cópias do mesmo sinal significa o mesmo que receber um sinal único com efeito de multipercorso, o que causa problemas de desvanecimento seletivo e interferência intersimbólica (*Intersymbol Interference* - ISI).

O OFDM é conhecido por ser imune aos efeitos de interferência intersimbólica porque os seus símbolos são transmitidos com taxas mais baixas utilizando subcanais paralelos estreitos; além disso os símbolos OFDM são formados por um período de guarda chamado prefixo cíclico. O prefixo cíclico é uma estrutura que remove os efeitos de ISI em canais com *delay spread* menor do que um certo período de guarda [13]. Desta forma, a diferença entre o atraso de propagação de cada RAU pertencente à mesma célula deve ser limitada para que o prefixo cíclico consiga combater o efeito de multipercorso criado, caso contrário os efeitos de ISI podem degradar drasticamente o desempenho da rede. Para limitar a diferença entre os atrasos deve-se limitar o tamanho das células (raio), quando várias RAUs transmitem o mesmo sinal.

A BSC pode ajustar o valor do prefixo cíclico de acordo com 4 valores diferentes especificados pelo IEEE 802.16: 1/4, 1/8, 1/16 e 1/32. Esses valores correspondem à porcentagem da duração do período de guarda em relação ao símbolo OFDM. Escolher um valor maior significa que o desempenho da rede será reduzido, no entanto a rede se torna mais robusta a multipercorso natural (criado por obstáculos no ambiente sem fio), bem como robusta ao multipercorso criado por RAUs diferentes espalhando o mesmo sinal. Uma boa opção para resolver o problema de multipercorso óptico é através do uso de módulos atrasadores de tempo variáveis nas BSCs e nas RAUs [36]. Estes módulos seriam dinamicamente calibrado pelo sistema para garantir que os sinais de todas as RAUs pertencentes à mesma célula fossem espalhados no ar ao mesmo tempo, evitando, assim que sinais de um mesmo símbolo chegassem defasados nas MSs. Essa opção aumenta o custo e a complexidade das RAUs e, por isso, deve ser escolhida apenas se o prefixo cíclico não garantir o bom funcionamento da rede.

Foi investigado o impacto que o ajuste dos parâmetros de sincronização do TDD e do prefixo cíclico do OFDM causa nas redes WiMAX. Os resultados são apresentados na seção 3.4. O objetivo do estudo é apresentar curvas de desempenho que possam orientar o projeto de redes WiMAX baseadas em RoF, bem como estimar o impacto no desempenho que a introdução do RoF pode causar nas redes.

## 3.4 Análise do desempenho da rede

### 3.4.1 Ferramenta utilizada para análise de desempenho

Durante a fase de avaliação do desempenho da rede foram feitas análises teóricas (analíticas) e também através de simulações. Nas simulações, foi utilizado o simulador *ns-2* [4] e o módulo para redes IEEE 802.16 desenvolvido pelo NIST [9].

O módulo NIST suporta originalmente apenas tamanho de FFT 256 e considera, de forma estática, o uso de 192 subportadoras com fator de amostragem ( $n$ ) igual a 8/7, conforme especificado no IEEE 802.16-2004. O padrão IEEE 802.16-2005 define tamanhos de FFT iguais a 128, 512, 1024 e 2048. Define também como fator de amostragem os valores 8/7 - para larguras de banda múltiplas de 1,75 MHz - e 28/25, para larguras de banda múltiplas de 1,25 MHz, 1,5 MHz, 2 MHz ou 2,75 MHz. A largura de banda a ser utilizada pelas redes é definida pelo WiMAX Forum, que estabelece parâmetros para as redes WiMAX. Para redes móveis (WiMAX móvel), estabelece-se o uso de faixas de banda iguais a 3,5 MHz, 5 MHz, 7 MHz, 8,75 MHz e 10 MHz [7, 8]. O tamanho de FFT definido para os 2 primeiros valores é 512 e dos 3 últimos é 1024.

O módulo NIST foi adaptado para suportar os diferentes parâmetros do padrão WiMAX. Com as modificações feitas, a camada física passou a verificar a largura de banda configurada pelo usuário no script de simulação e a ajustar o tamanho da FFT a ser utilizada. Utilizando-se a largura de banda, calcula-se o fator de amostragem e os tempos de transmissão e uso de banda. Dessa forma, é possível fazer simulações mais realistas e genéricas, para obter resultados válidos para redes com camadas físicas com diferentes larguras de banda.

### 3.4.2 Equação de desempenho na camada física

Foi estabelecida uma equação para a taxa de dados na camada física que leva em consideração os parâmetros dos símbolos OFDM e os tempos de guarda RTG e TTG.

O padrão IEEE 802.16-2004 define alguns parâmetros dos símbolos OFDM.

$BW$  - Largura de banda nominal;

$N_{used}$  - Número de subportadoras usadas;

$n$  - Fator de amostragem;

$G$  - Razão do prefixo cíclico;

$N_{FFT}$  - Menor potência de 2 maior que  $N_{used}$ ;

$F_s$  - Frequência de amostragem =  $\text{floor}((n \times BW)/8000) \times 8000$ ;

$\Delta f$  - Espaçamento de subportadora =  $F_s/N_{FFT}$ ;

$T_b$  - Tempo útil de símbolo =  $1/\Delta f$ ;

$T_g$  - Tempo do prefixo cíclico =  $G \times T_b$ .

Calcula-se a taxa de dados da seguinte forma, conforme [43]:

$$\text{taxa\_dados\_simbolo} = \frac{\text{bits\_por\_simbolo\_OFDM}}{\text{duracao\_do\_simbolo\_OFDM}}$$

$$\text{bits\_por\_simbolo\_OFDM} = N_{sub} \times N_{mod} \times N_{cod}$$

onde,  $N_{sub}$  é o número de subportadoras de dados utilizadas,  $N_{mod}$  é o número de bits codificados por símbolo OFDM e  $N_{cod}$  é a taxa de código.

$$\text{duracao\_do\_simbolo\_OFDM} = T_b + T_g$$

$$= (1/\Delta f)(1 + G)$$

$$= (1/(f_s/N_{FFT}))(1 + G)$$

$$= [1/((n \times BW)/N_{FFT})](1 + G)$$

$$\text{taxa\_dados\_simbolo} = \frac{N_{sub} \times N_{mod} \times N_{cod}}{[1/((n \times BW)/N_{FFT})](1 + G)} \quad (3.1)$$

A equação 3.1 apresenta a taxa de dados na camada física durante o período de um símbolo, sem levar em consideração os tempos de guarda. Os tempos de guarda TTG e RTG diminuem o desempenho da rede, pois são períodos de inatividade dentro de cada quadro, assim, devem ser desconsiderados no cálculo da quantidade de bits transmitidos em cada quadro.

$$\text{taxa\_dados} = \frac{\text{taxa\_dados\_simbolo} \times t_{tx}}{t_{quadro}}$$

onde  $t_{tx}$  é o tempo efetivo de transmissão dentro de um quadro (tempo de quadro menos os tempos de guarda)

$$t_{tx} = t_{quadro} - (t_{ttg} + t_{rtg})$$

$$= t\_quadro - (4/(n \times BW))(TTG + RTG)$$

$$taxa\_dados = \frac{N_{sub} \times N_{mod} \times N_{cod} \times (t\_quadro - (4/(n \times BW))(TTG + RTG))}{[1/((n \times BW)/N_{FFT})](1 + G) \times t\_quadro} \quad (3.2)$$

### 3.4.3 Desempenho teórico na camada física

A equação 3.2 apresenta o desempenho teórico da camada física levando em consideração os tempos de guarda e todos os parâmetros do OFDM.

Para avaliar o desempenho da camada física em relação ao aumento do valor de TTG deve-se fixar o valor de RTG com o menor valor especificado pelo padrão (correspondente à  $5\mu s$ ) e variar o valor de TTG do mínimo ao máximo valor possível. O padrão especifica que o valor mínimo de TTG deve ser de  $200\mu s$ . O valor máximo deve ser fixado como sendo o máximo valor que pode ser representado em 2 bytes das mensagens DCD, ou seja, 65536.

Deve-se, inicialmente, calcular o valor mínimo de RTG e os limites de TTG. Para isso, deve-se saber o tempo de cada *Physical Slot*. Isso é calculado, fixando-se os valores do OFDM:

$$BW = 10MHz = 10 \cdot 10^6$$

$$N_{FFT} = 1024$$

$$N_{sub} = 768$$

$$n = 28/25$$

$$G = 1/16 = 0.0625$$

$$t\_quadro = 5ms$$

Utilizando-se os valores de  $n$  e  $BW$ , calcula-se o valor do PS:  $0,35714\mu s$ . Para obedecer o padrão IEEE 802.16-2005 deve-se ter o valor de RTG maior do que 14 PS e o valor de TTG maior do que 560 PS. Fixa-se o RTG em 15 PS e varia-se o valor de TTG de 560 até 65536.

Os resultados dos cálculos são mostrados na figura 3.3. A figura 3.3 apresenta diversos resultados que podem ser utilizados no planejamento da infraestrutura RoF. Para uma rede com largura de banda de 10 MHz é possível concluir que a extensão máxima de fibra permitida na estrutura de quadros do TDD é de pouco menos de 500 Km, o que equivale

a um tempo de guarda TTG próximo de 14000 PS. O eixo direito da figura 3.3 mostra o desempenho (taxa de dados) percentual da rede operando com a modulação mais eficiente: 64-QAM 5/6. Esse resultado pode ser utilizado para limitar a perda de desempenho da rede com o aumento da extensão da fibra. Caso se queira, por exemplo, limitar a perda de desempenho em no máximo 20%, deve-se limitar a extensão máxima da fibra a 125 Km. É possível concluir que as limitações do WiMAX na camada física permitem a instalação de uma infraestrutura RoF capaz de cobrir uma região metropolitana com fibras de extensões um pouco maiores que 100 Km com perda de desempenho limitada em cerca de 20% .

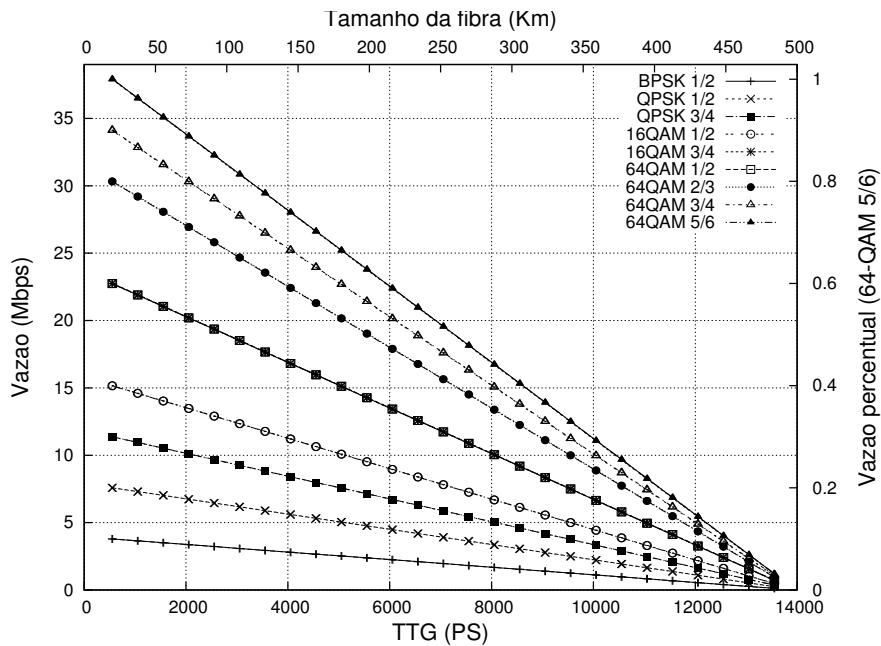


Figura 3.3: Vazão teórica na camada física para 10 MHz de banda

A mesma análise de desempenho na camada física foi feita para redes com outros valores de largura de banda especificados no padrão IEEE 802.16-2005 e que fazem parte do WiMAX Forum Mobile System Profile 1.5 [8] (3,5 MHz, 5 MHz, 7 MHz e 8,75 MHz), modificando os parâmetros do OFDM, de acordo com as especificações (ver tabela 3.1). Considerou-se apenas o desempenho da modulação 64-QAM 3/4 e foi feita uma comparação entre o desempenho de redes com as diferentes larguras de banda. Os resultados são mostrados na figura 3.4.

Ao se analisar a figura 3.4, é possível concluir que a alteração da largura da banda da rede não tem grande impacto no aumento da extensão máxima de fibra. A extensão máxima para as larguras de banda de 3,5 MHz, 5 MHz, 7 MHz, 8,75 MHz e 10 MHz é entre 450 e 500 Km.

Tabela 3.1: Parâmetros do IEEE 802.16-2005 para diferentes larguras de banda

Largura de banda ( $BW$ )	$N_{FFT}$	$N_{sub}$	$n$
3,5 MHz	512	384	8/7
5 MHz	512	384	28/25
7 MHz	1024	768	8/7
8,75 MHz	1024	768	28/25

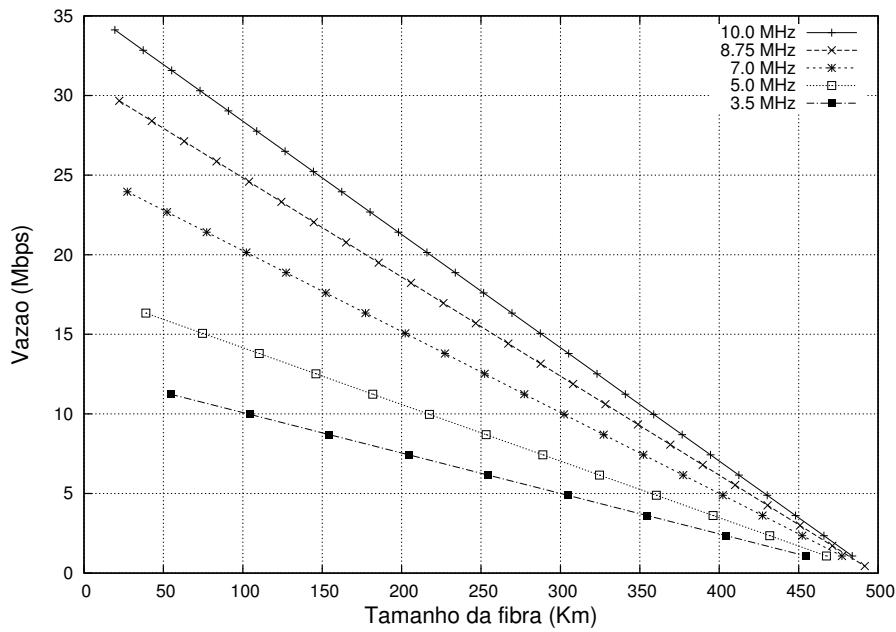


Figura 3.4: Vazão teórica na camada física para 64-QAM 3/4

### 3.4.4 Desempenho da camada de aplicação

Para a avaliação do desempenho na camada de aplicação foi utilizada a ferramenta ns-2 modificada conforme descrito na seção 3.4.1. A simulação tem como objetivo obter o desempenho da rede e a influência da fibra na camada MAC da pilha IEEE 802.16. É importante lembrar que o desempenho avaliado na camada física equivale à vazão teórica, sem levar em consideração as sobrecargas (*overheads*) presentes nos protocolos de alto nível. O desempenho na camada MAC sofre forte degradação em relação ao desempenho da camada física devido aos *slots* reservados para controle, sincronismo da rede e requisição de banda. Esses *slots* são recursos obrigatórios na rede e limitam o quanto os tempos de guarda podem ser aumentados. A seguir, explica-se detalhadamente a estrutura do quadro IEEE 802.16-2005, as temporizações estabelecidas e as suas limitações quanto ao aumento dos tempos de guarda RTG e TTG.

### Estrutura do quadro IEEE 802.16-2005

A estrutura de comunicação do padrão IEEE 802.16-2005 com duplexação TDD é baseada em quadros. Cada quadro começa com um preâmbulo, seguido de um período de transmissão *downlink* e depois por um período de transmissão *uplink*. Em cada quadro, os tempos de guarda TTG e RTG devem ser inseridos entre o subquadro de *downlink* e *uplink* e no final do quadro, respectivamente.

O primeiro símbolo do quadro é utilizado para a transmissão do preâmbulo, que pode ser utilizado para diversas finalidades, como sincronização do tempo e frequência, estimativa inicial do canal, estimativa do ruído e interferência, etc. Ainda no subquadro de *downlink*, depois do preâmbulo, alguns subcanais iniciais são reservados para a transmissão do FCH (*Frame Correction Header*). O FCH carrega informações de controle, como as subportadoras utilizadas, os subcanais de *ranging* e o tamanho da mensagem *DL-MAP*. Essas informações são carregadas na mensagem *DL\_Frame\_Prefix*. Logo depois do FCH, são transmitidas as mensagens *DL-MAP* e *UL-MAP*, que especificam as regiões de dados para os vários usuários, respectivamente, nos subquadros de *downlink* e *uplink* do quadro corrente. “Ouvindo” essas duas mensagens, cada usuário consegue identificar os subcanais e subportadoras nos subquadros de *downlink* e *uplink* que estão alocados a ele. As Base Stations transmitem, periodicamente, uma mensagem DCD (*Downlink Channel Descriptor*) e UCD (*Uplink Channel Descriptor*), logo após a mensagem *UL-MAP*. As mensagens DCD e UCD contém informações adicionais de descrição do canal e dos vários perfis de rajada (*Bursts Profiles*). Essas últimas mensagens não são transmitidas a cada quadro para economizar recursos.

O tamanho do subquadro de *downlink* e do subquadro de *uplink* pode ser variado, de acordo com a razão DL/UL preestabelecida pela BS. Esse parâmetro deve ser ajustado pela própria BS e anunciado para as SSs através das mensagens *DL-MAP* e *UL-MAP*. Com esse recurso o número de símbolos OFDM em cada subquadro pode ser variado. É possível fazer uma alocação simétrica com a relação DL/UL igual a 50% ou uma alocação assimétrica, com valores diferentes de 50%.

### Vazão na camada de Aplicação

Para medir a vazão da camada de aplicação foi utilizada uma rede simples com apenas 3 nós. Um nó fixo, um nó que serve como BS da rede WiMAX e se conecta diretamente ao nó fixo e a um nó móvel. O fluxo de dados é originado do nó móvel com tráfego UDP (CBR) e destinado para o nó fixo, onde existe um agente sorvedouro de pacotes. O fluxo de dados, portanto, é unidirecional. A relação UL/DL foi configurada para 50% em todas as simulações. Foi utilizado apenas um fluxo na rede para a medição da vazão máxima, isolando problemas de interferência entre fluxos e diminuindo a sobrecarga da rede causada

por mensagens de alocação de banda.

A figura 3.5 apresenta o desempenho da rede com largura de banda de 10 MHz e tráfego UDP. Esse último gráfico foi obtido com os parâmetros mostrados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados no cálculo da vazão na camada de aplicação

Parâmetro	Valor
$N_{FFT}$	1024
$N_{sub}$	768
$n$	$28/25$
$G$	$1/16 = 0.0625$
$t\_quadro$	5 ms

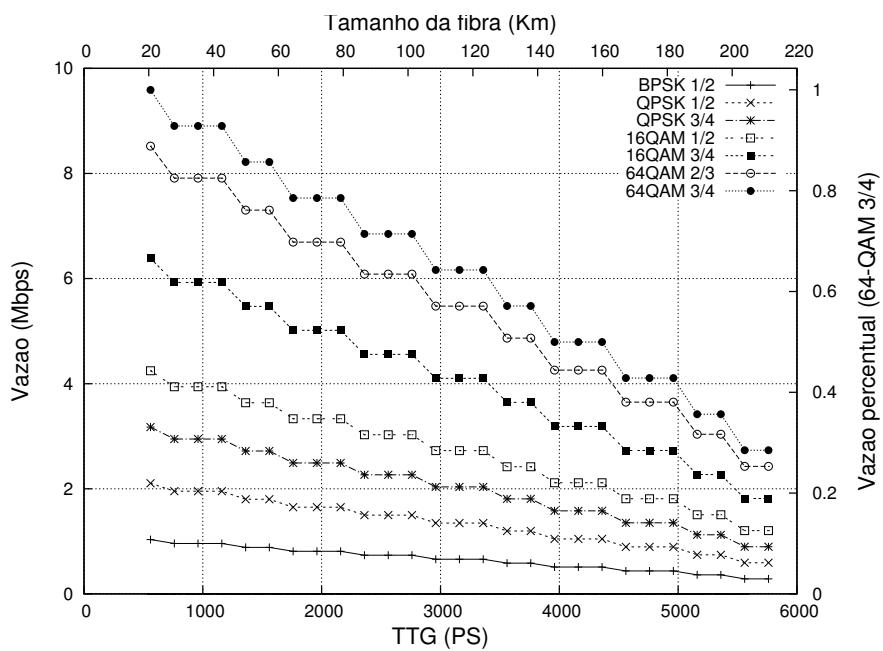


Figura 3.5: Vazão na camada de aplicação para 10 MHz e UDP.

A figura 3.5 mostra que a extensão máxima da fibra deve ser menor do que 220 Km para o correto funcionamento dos protocolos no nível de aplicação. A perda de desempenho da rede chega a 20% para fibras com até 80 Km de extensão. A figura 3.5 apresenta resultados mais restritivos que a figura 3.3 pois considera tanto a divisão do quadro entre *downlink* e *uplink* quanto as sobrecargas da rede provenientes de mensagens de controle, requisição de banda, etc. A vazão da rede apresenta um comportamento de queda em vários níveis pois a estrutura dos quadros do WiMAX é formada por símbolos e cada símbolo é capaz de transmitir muitos bits. O aumento do valor do TTG diminui o número de símbolos úteis a serem utilizados nos quadros WiMAX; o número de símbolos OFDM utilizados deve ser inteiro, o que faz com que a vazão máxima diminua em "degraus".

Os experimentos foram repetidos, variando-se o tamanho do quadro da rede. Os valores de tamanho de quadro recomendados pela especificação [8] são 5, 8, 10, 12,5 e 20 ms. A figura 3.6 apresenta os resultados obtidos pelas simulações. É possível verificar que o aumento do tamanho do quadro possibilita um acréscimo significativo na extensão máxima da fibra, dado que cada quadro passa a ser constituído de mais símbolos OFDM e o impacto dos tempos de guarda no desempenho da rede cai proporcionalmente. Aumentar o tamanho do quadro da rede até 12,5 ms, por exemplo, permite acomodar extensões de fibra de até 1000 Km. Tal ajuste deve ser feito de forma adequada, de acordo com as aplicações da rede, dado que o aumento do tamanho do quadro impacta diretamente o atraso médio dos pacotes da rede. Para aplicações multimídia, como VoIP e *stream* de vídeo, o tamanho do quadro não pode sofrer um grande aumento.

### Desempenho com a variação do prefixo cíclico

Conforme descrito na seção 2.2, os símbolos OFDM possuem uma estrutura cíclica que confere robustez a interferência intersímbólica (ISI) causados pelos atrasos aleatórios das diversas cópias dos sinais transmitidos que chegam no receptor. O problema de ISI é comum em qualquer rede sem fio. A arquitetura de RoF pode causar um aumento da ISI quando mais de uma RAU transmite o mesmo sinal. Essa situação deve ser, adequadamente, tratada pelos símbolos OFDM.

Analisa-se, aqui, um caso específico de como resolver o problema de ISI quando duas ou mais RAUs transmitem o mesmo sinal na rede. Considera-se o cenário na figura 3.7. Nesse cenário, quanto maior o raio das células, maior será a diferença entre o atraso de propagação dos sinais propagados por diferentes RAUs. Nesse caso, a diferença entre os atrasos de propagação dos sinais é igual ao dobro do raio das células; isso pode mudar, porém, com outras configurações de rede. Para que o prefixo cíclico seja robusto aos efeitos de ISI, ele deve ter extensão maior do que o *delay spread* da rede. Deve-se calcular, então, qual é o raio máximo de célula possível em função dos valores de prefixo cíclico (parâmetro G).

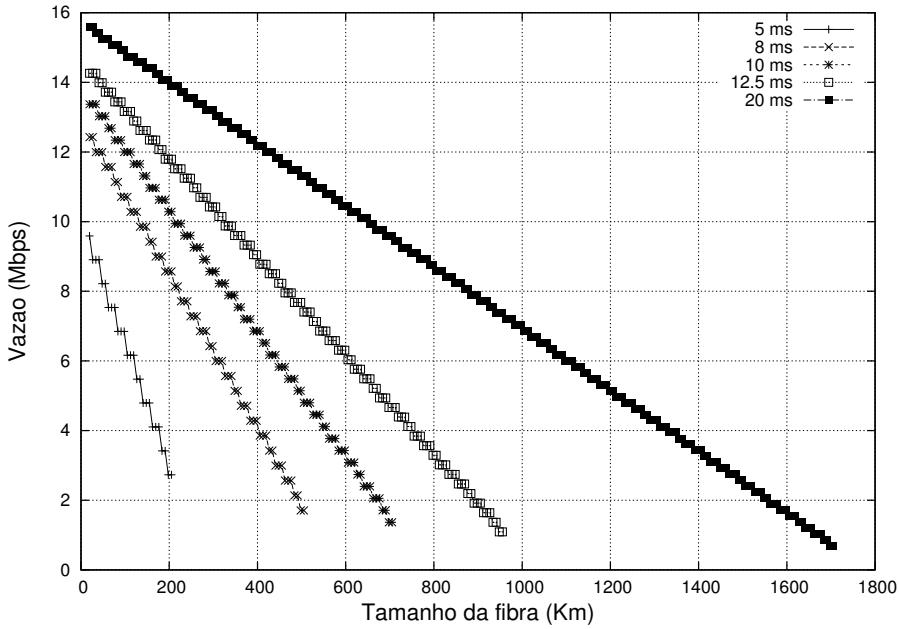


Figura 3.6: Vazão na camada de aplicação para 64-QAM 3/4.

Para análise, considera-se o pior cenário no qual a estação cliente encontra-se na borda das células vizinhas (ver figura 3.7), onde os sinais das células chegam com intensidade média iguais. Considera-se, também, que a diferença de extensão da fibra de todas as RAUs que espalham o mesmo sinal é menor ou igual ao dobro do raio das células, conforme mostrado na figura 3.7. Assim, considerando-se que o *delay spread* da rede é igual à diferença entre os tempos de atraso de propagação das RAUs, calcula-se os raios para cada valor de  $G$ . Esses resultados são apresentados na figura 3.8, conjuntamente com o resultado do desempenho da rede. Nessa análise, utilizou-se o protocolo de transporte UDP e uma rede com 10 MHz de largura de banda, 5 ms de tamanho do quadro e extensão de fibra de 10km.

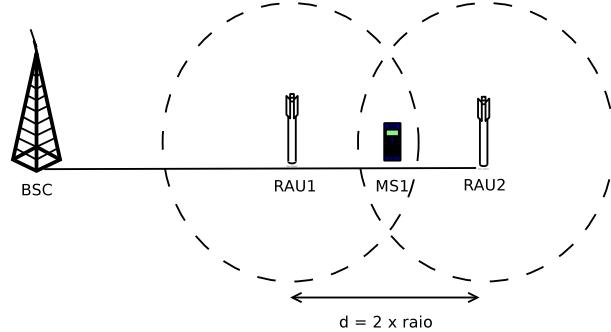


Figura 3.7: Diferença no tempo de propagação em RoF - pior caso

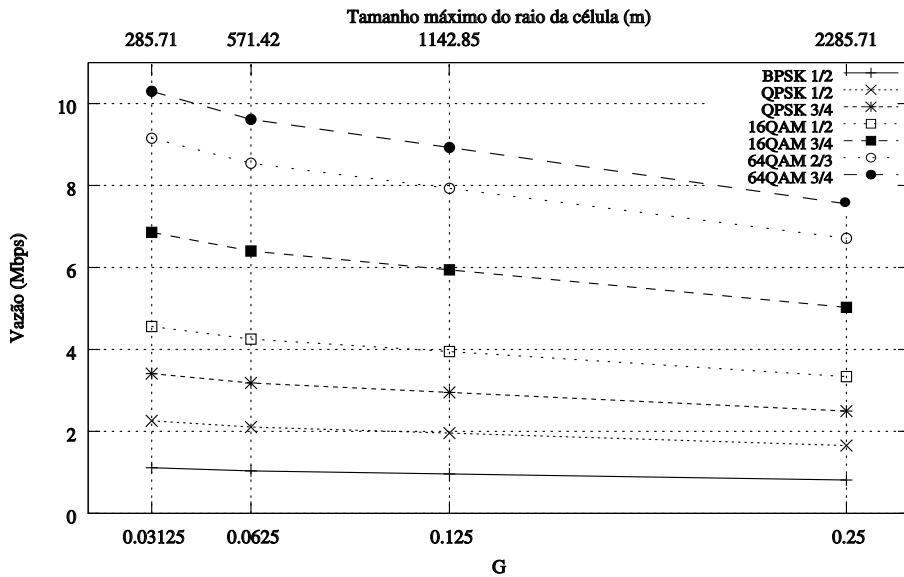


Figura 3.8: Vazão na camada de aplicação para 10 MHz de banda e 10km de fibra

Dado que o prefixo cíclico é uma parte redundante dos símbolos da camada física, o seu aumento acarreta em uma perda de desempenho imediata em todos os símbolos OFDM transmitidos. Por esta razão, a perda de desempenho da rede é no mínimo igual ao valor de G. Como é possível analisar na figura 3.8, o prefixo cíclico é suficiente para tornar a rede robusta contra ISI com raios de células na ordem de 200 m (pico células) até mais do 2 Km (macro células). Essa análise evidencia que o cenário de múltiplas RAUs espalhando o mesmo sinal é viável, desde que o parâmetro G seja corretamente ajustado.

Outra forma de se resolver o mesmo problema é através do uso de atrasadores de tempo reguláveis nas RAUs, de forma que os atrasos de cada célula sejam ajustados para que todos os sinais sejam transmitidos ao mesmo tempo. Essa solução aumenta o custo da rede e exige que haja ajustes dinâmicos desses parâmetros. Outra solução é adotar a topologia de ligação de fibras em estrela e ajustar os tamanhos de fibra de forma que todas as células que irradiam os mesmos sinais tenham a mesma extensão de fibra entre a BSC e a RAU. A adoção de topologia em estrela encarece o *backhaul* porque exige o uso de mais fibras ópticas.

### 3.5 Considerações finais

Um importante aspecto do projeto de redes baseadas em RoF é a medição do impacto sobre o desempenho nos protocolos de alto nível causado pelo atraso de propagação adicional introduzido por fibras de grandes extensões. Este capítulo apresenta uma análise desse impacto quando se utiliza o protocolo IEEE 802.16. Foi avaliado o impacto da extensão

da fibra nas camadas física e de aplicação com a manipulação dos valores dos intervalos de guarda e do prefixo cíclico da rede. Os resultados mostram que, de fato, o RoF impacta o desempenho das redes WiMAX, mas que é possível ajustar os parâmetros das camadas física e MAC para permitir o funcionamento adequado da rede.

Perdas de cerca de 20% de desempenho na camada de aplicação foram obtidas com fibras com extensão de 80 km. Foi, também, evidenciado que os diferentes valores de prefixo cíclico podem ser utilizados para tornar a rede robusta contra ISI com células de diferentes tamanhos quando duas ou mais RAUs irradiam o mesmo sinal.



# Capítulo 4

## Otimização de recursos para redes baseadas em Rádio sobre Fibra

### 4.1 Introdução

A tecnologia de RoF diminui os custos da rede e fornece uma grande flexibilidade para a otimização dos recursos de rádio em redes móveis sem fio. Todos os recursos de rádio, chamados Estações Base (*Base Stations* - BSs), ficam localizados nas BSCs e podem ser dinamicamente distribuídos ao longo da rede, permitindo que diferentes configurações de células possam ser implantadas; proporcionando, dessa forma, uma melhor cobertura com custos reduzidos diante de demandas dinâmicas [11]. Esta arquitetura de rede centralizada exige um algoritmo de otimização global que realize a busca da melhor solução de distribuição dos recursos. A arquitetura de RoF é, especialmente, importante em cenários nos quais existe mobilidade e as demandas de usuários são dinâmicas.

O Gerenciamento de Recursos de Rádio (*Radio Resource Management* - RRM) é uma tarefa desafiadora para as tecnologias sem fio modernas (*beyond-3G*), as quais devem fornecer redes de acesso com boa relação custo-benefício para um número crescente de usuário móveis e aplicações que requerem altas taxas de dados [39]. Os algoritmos RRM para arquiteturas centralizadas é ainda um ponto em aberto nas pesquisas. As redes celulares tradicionais baseiam-se na alocação dos recursos de rádio (BSs) de maneira estática em cada localidade da região de cobertura. Recursos como os canais, os códigos de multiplexação, subcanais e fatias de tempo são alocados primeiramente para as Estações de Base, considerando o custo e a demanda da rede e, em seguida, são atribuídos aos usuários, em uma abordagem de divisão e conquista, e de forma centralizada no sistema (*system-centric*). A alocação estática de recursos não é eficiente, especialmente em redes dinâmicas e móveis, uma vez que as demandas dos usuários podem ser geograficamente concentradas em determinadas regiões da rede [39]. Abordagens centralizadas no usuário (*user-centric*)

para a alocação de recursos em redes móveis sem fio [19] têm sido, recentemente, propostas. Diferentemente da abordagem tradicional, os novos algoritmos de RRM alocam recursos primeiramente com base nos requisitos dos usuários e, em seguida, procuram a melhor Estação Base para fornecer conectividade aos recursos previamente alocados. Esse tipo de abordagem só é possível com infraestruturas centralizadas como o RoF.

Este capítulo apresenta uma solução para a otimização de recursos em RoF baseada nas demandas dos usuários. O modelo de otimização é baseado em programação inteira. A rede considerada é constituída de várias RAUs conectadas por enlaces ópticos a algumas poucas BSCs e um número limitado de equipamentos de rádio (BSs) centralizados. A solução do problema é encontrar uma associação ideal entre os recursos de rádio e as RAUs, de forma que o objetivo de otimização possa ser alcançado. Considera-se três objetivos distintos: i) a minimização do número de BSs utilizadas, ii) a maximização da receita obtida pelo operador da rede, e iii) os dois últimos critérios simultaneamente. Os resultados apresentados podem ser usados como diretrizes para o planejamento de redes sem fio, bem como para a otimização de infraestruturas existentes.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma. A seção 4.2 apresenta os trabalhos relacionados com o tema. A seção 4.3 apresenta a arquitetura de RoF proposta para a otimização dos recursos da rede. A seção 4.4 apresenta a formulação do problema de otimização baseada em programação linear inteira. A seção 4.5 apresenta os resultados numéricos do processo de avaliação do modelo proposto. Por fim, a seção 4.6 conclui o capítulo 4.

## 4.2 Trabalhos relacionados

As técnicas de RRM aplicadas à arquitetura de Rádio sobre Fibra têm sido alvo de pesquisas recentes. Um problema central para otimização de redes sem fio é o posicionamento das Estações Base para uma melhor utilização dos recursos disponíveis na rede e diminuição do seu custo. Soluções para esse problema são baseadas, tradicionalmente, em métodos estáticos e pode levar ao desperdício de recursos em ambientes dinâmicos, o que é comum em cenários de redes sem fio móveis.

Novas técnicas de RRM têm sido propostas para redes sem fio; algumas delas considerando o agrupamento dinâmico dos usuários [20]. Em [19], os autores argumentam que, devido ao fato dos algoritmos RRM usarem uma abordagem de dividir e conquistar, é possível que haja uma grande ineficiência destes em redes móveis. Essas novas propostas adotam uma abordagem centrada no usuário que associa os recursos de rede para os usuários antes de posicioná-los na área de cobertura. Em [39], o controle de potência e de atribuição de Estação Base são realizados com base na maximização da utilidade da rede para os usuários e da receita da rede.

Os algoritmos de RRM no cenário de RoF ainda não foram totalmente explorados. Em [46, 45], o problema de posicionamento da RAU em redes híbridas *Wireless-Optical* é abordado. Um algoritmo guloso para resolver o problema é proposto em [45], que tenta minimizar a distância euclidiana entre as RAUs e os usuários. Em [46], uma solução baseada na heurística de arrefecimento simulado (*simulated annealing*) é proposta; os resultados mostram significativa redução de custos. Estas soluções, no entanto, proporcionam o acesso de última milha para usuários fixos e não são adequados para usuários móveis, dado que o agrupamento dinâmico dos usuários é desconsiderado.

A solução proposta nesta dissertação trata da mobilidade e ainda otimiza os recursos da rede de rádio baseado no agrupamento dos usuários.

### 4.3 Arquitetura proposta

A arquitetura proposta consiste de um número reduzido de recursos de rádio (*Base Stations* - BSs) centralizados em alguns pontos centrais de gerenciamento (*Base Station Controllers* - BSCs). Esses recursos podem ser dinamicamente distribuídos para um grande número de antenas (*Remote Antenna Units* - RAUs) espalhadas por toda área de cobertura. As demandas e as localizações das estações móveis (*Mobile Stations* - MSs) são contabilizadas para a determinação da distribuição ótima dos recursos da rede. A figura 4.1 mostra um exemplo dessa arquitetura, na qual existe uma BSC com número limitado de BSs e algumas RAUs espalhadas por toda a área de cobertura. Na figura a implantação de 5 células, uma macro-célula, três micro-células e uma pico-célula, foi suficiente para fornecer cobertura a todas as MSs. Além disso, alguns recursos puderam ser economizados, já que não foi necessário associar a  $RAU_1$  e a  $RAU_4$  com nenhum recurso de rádio, visto que a  $RAU_5$  implantou uma célula grande suficiente para cobrir todas as MSs daquela região.

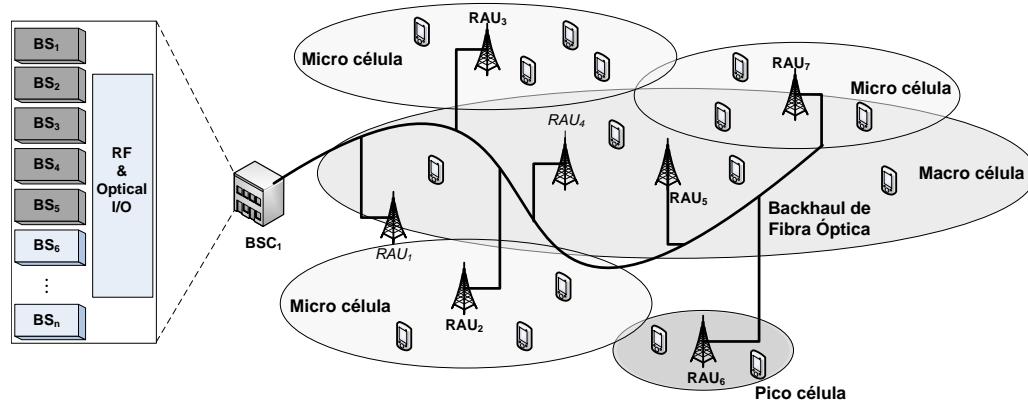


Figura 4.1: Exemplo de arquitetura proposta.

Na arquitetura considerada, as antenas são dispostas em uma estrutura hierárquica que torna possível a implantação de células com diferentes raios de uma forma multi-camadas (figura 4.2). O algoritmo na BS realiza divisão celular (*cell splitting*) e fusão celular (*cell merging*) para otimizar o arranjo das células e seus tamanhos. A divisão celular divide as células grandes em menores, aumentando a capacidade da rede e seu custo. O processo de fusão celular une as células pequenas e contíguas em uma maior, diminuindo o número de BSs necessárias, bem como a capacidade total da rede.

A implantação de células de forma estática, seja com tamanhos fixos ou não, pode levar ao desperdício de recursos, já que a densidade dos usuários varia na área de cobertura da rede e ao longo do tempo de operação. Uma solução para lidar com a variabilidade da densidade de usuários é a implantação de células com tamanhos diferentes para cobrir os usuários com um custo operacional mínimo, adotando pequenas células apenas quando necessário, bem como um processo dinâmico de reorganização celular.

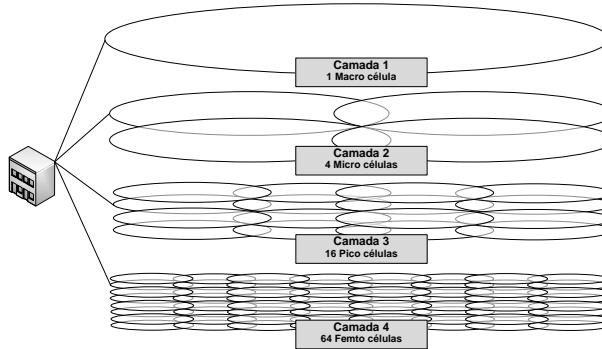


Figura 4.2: Estrutura multi-camadas de células utilizada na otimização.

A solução do problema de otimização deve encontrar as células que otimizam o custo da rede e/ou a receita do operador, dependendo do objetivo de otimização. O processo de divisão pode formar um agrupamento de  $n$  pequenas células na camada  $N$  a partir de células da camada  $N - 1$ , e o processo de fusão pode realizar o oposto. Se a RAU em uma determinada camada é ativada, todas as RAUs localizadas em sua cobertura nos níveis diferentes (superiores e inferiores) devem ser desativadas, o que evita a sobreposição de canais, facilitando o reuso de frequência.

A figura 4.3 apresenta um exemplo de uma configuração de rede obtida com a arquitetura multicamadas proposta. Observa-se que, em algumas regiões, ocorre uma concentração maior de células com raio pequeno, quando existe maior demanda de usuário; enquanto outras regiões são cobertas com células de raios maiores, quando existe baixa demanda pelo acesso à rede. Essa configuração que considera diferentes raios traz economia de recursos e otimiza o desempenho da rede.

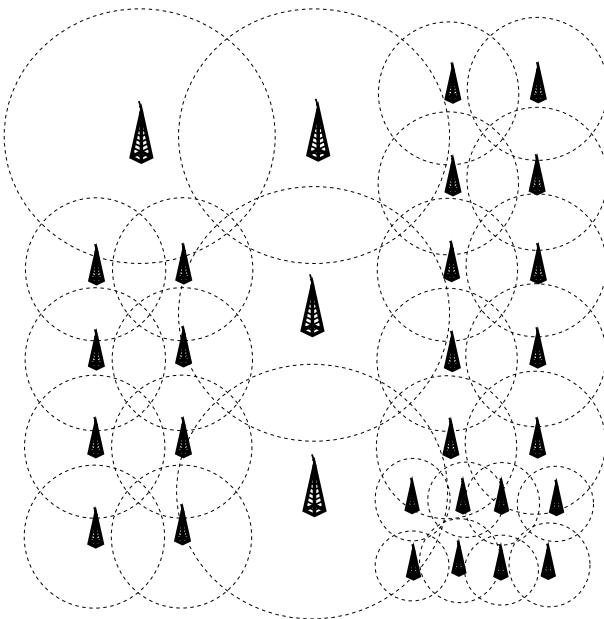


Figura 4.3: Exemplo de configuração multi-camadas de células.

## 4.4 Modelo de otimização baseado em PLI

O modelo de otimização proposto tem o objetivo de implantar pequenas células em áreas congestionadas e células de grande raio em áreas de baixa densidade, de modo que o custo da rede possa ser minimizado e/ou a receita possa ser maximizada. Ele associa os recursos de rede (centralizados na BSC) com as RAUs para configurar dinamicamente a topologia da rede, a fim de lidar com a mobilidade dos usuários. É pressuposto que exista um número suficientemente grande de RAUs instaladas e que estas possam ser dinamicamente associadas ou desassociadas, criando novas células ou dividindo-as quando necessário, e integrando-as, quando estas não forem mais necessárias.

A rede pode ser constituída por uma única tecnologia de rede sem fio ou por diversas tecnologias simultaneamente. Diferentes tecnologias como o Wi-Fi, o WiMAX e redes 3G oferecem cobertura, capacidade e custo diferentes. O modelo analisado, nesta dissertação, baseia-se no uso de uma única tecnologia de rede sem fio, cujos parâmetros, como capacidade das BSs, cobertura e custo, deverão ser ajustados durante a otimização. O modelo pode ser facilmente adaptado para o uso de diferentes tecnologias com a configuração de BSs com diferentes características e diferentes custos.

As BSCs são representadas pelo conjunto  $\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ . As BSs são representadas pelo conjunto  $\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_o\}$  e sua principal característica é a capacidade  $c_i$ . A capacidade das BSs pode expressar o número máximo de canais, a vazão máxima ou o número máximo de usuários suportados pela BS, dependendo da sua tecnologia. As RAUs

são representadas pelo conjunto  $\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ . Suas características principais são a localização geográfica  $(X_{R_i}, Y_{R_i})$  e o seu raio de cobertura  $r_i$ . As MSs são representadas pelo conjunto  $\mathcal{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$  e suas características principais são a localização geográfica  $(X_{M_i}, Y_{M_i})$  (que é alterada com a mobilidade da estação), a demanda  $d_i$ , que pode corresponder ao número de canais necessários ou à vazão mínima exigido por todos os fluxos da MS  $M_i$ , e a classe  $w_i$ , que representa o tipo de serviço que  $M_i$  está contratando e é proporcional à receita da operadora ao servir a MS  $M_i$ .

A solução do problema de otimização determina as seguintes características da rede:

- As BSCs que devem operar;
- As BSs que devem estar ativadas nas BSCs em operação;
- As RAUs associadas às BSs ativas;
- As MSs que devem ser servidas pelas RAUs associadas.

O problema é formulado através de um modelo de programação linear inteira (PLI). A formulação do problema é mostrada a seguir. A seguinte notação é usada:

$\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  : conjunto de BSCs;

$\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_o\}$  : conjunto de BSs;

$\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$  : conjunto de RAUs;

$\mathcal{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$  : conjunto de MSs;

$v$  : porcentagem mínima de MSs;

$t$  : número de camadas de RAUs;

$\mathcal{U}_i$  : conjunto de RAUs na camada  $i$ ,  $i \leq t$ ;

$q$  : número de RAUs por agrupamento;

$a_{i,j}$  : 1 se a BS  $B_i$  está localizada na BSC  $C_j$ ; 0 caso contrário;

$c_i$  : capacidade da BS  $B_i$ ;

$b_{i,j}$  : 1 se a RAU  $R_i$  é ligada à BSC  $C_j$ ; 0 caso contrário;

$r_i$  : raio de cobertura da RAU  $R_i$ ;

$P_{R_i} = (X_{R_i}, Y_{R_i})$  : localização da RAU  $R_i$ ;

$d_i$  : demanda da MS  $M_i$ ;

$P_{M_i} = (X_{M_i}, Y_{M_i})$  : localização da MS  $M_i$ ;

$w_i$  : categoria de serviço da MS  $M_i$ ;

$dist_{i,j} = \sqrt{(X_{M_i} - X_{R_j})^2 + (Y_{M_i} - Y_{R_j})^2}$  : distância entre a MS  $M_i$  e a RAU  $R_j$ .

As variáveis de decisão do problema são as seguintes:

$x_{i,j,k}$  : 1 se a RAU  $R_i$  é associada à BS  $B_j$ , localizada na BSC  $C_k$ ; 0 caso contrário;  
 $y_{i,j}$  : 1 se a MS  $M_i$  for servida pela RAU  $R_j$ ; 0 caso contrário.

As restrições do problema são as seguintes:

$$x_{i,j,k} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{B}, \forall k \in \mathcal{C} \quad (C1)$$

$$y_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{M}, \forall j \in \mathcal{R} \quad (C2)$$

$$x_{i,j,k} \leq b_{i,k} \quad \forall i \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{B}, \forall k \in \mathcal{C} \quad (C3)$$

$$x_{i,j,k} \leq a_{j,k} \quad \forall i \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{B}, \forall k \in \mathcal{C} \quad (C4)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{R} \quad (C5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{R}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall j \in \mathcal{B} \quad (C6)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (C7)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} \geq n.v \quad (C8)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{j,l,k} \geq y_{i,j} \quad \forall i \in \mathcal{M}, \forall j \in \mathcal{R} \quad (C9)$$

$$y_{i,j} \cdot dist_{i,j} \leq r_j \quad \forall i \in \mathcal{M}, \forall j \in \mathcal{R} \quad (C10)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} y_{i,j} \cdot d_i \leq \sum_{l \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{j,l,k} \cdot c_l \quad \forall j \in \mathcal{R} \quad (C11)$$

$$\sum_{f \in \mathcal{R}} \sum_{g \in \mathcal{C}} (x_{k,f,g} + x_{\mathcal{U}_{\lfloor k/q^j-i \rfloor},f,g}) \leq 1 \quad \forall i, j \in N^+ | i < t, i+1 < j \leq t, \forall k \in \mathcal{U}_i \quad (C12)$$

As restrições  $C1$  e  $C2$  garantem que as variáveis de decisão sejam binárias. A restrição  $C3$  garante que uma RAU só pode ser associada à uma BS em uma BSC caso haja um enlace de fibra entre a RAU e a BSC. A restrição  $C4$  garante que uma RAU só pode ser associada à uma BS em uma determinada BSC se a BS estiver, de fato, localizada na BSC. As restrições  $C5$  e  $C6$  estabelecem uma associação um-para-um entre as RAUs e as BSs associadas, o que significa que uma RAU pode ser associada à uma única BS e vice-versa. O problema pode ser resolvido sem as restrições  $C5$  e  $C6$ , permitindo que duas ou mais RAUs sejam associadas a uma mesma BS; nesse caso alguns parâmetros da rede devem ser ajustados para tratar problemas de multipercursos dos sinais de RF (conforme tratado no capítulo 3.3). A restrição  $C7$  garante que cada MS seja servida por uma única

RAU. A restrição  $C8$  garante que um percentual mínimo de MSs seja servido, o que impõe um limite para a redução de custos da rede, já que existe uma cobertura mínima a ser provida. A restrição  $C9$  estabelece que apenas as RAUs associadas a alguma BS podem servir usuários. A restrição  $C10$  estabelece que as RAUs só podem servir MSs na sua área de cobertura. A restrição  $C11$  limita a demanda agregada de uma célula como menor ou igual à capacidade da BS, fornecendo um critério para a carga máxima suportada em uma célula. Finalmente, a restrição  $C12$  impede que RAUs de diferentes níveis operem em uma mesma região.

O algoritmo para encontrar a solução ótima para este problema de otimização envolve programação linear inteira, que pode exigir grande esforço computacional para instâncias grandes.

Considerando o mesmo modelo de otimização baseado em programação linear inteira, foram propostas três diferentes funções objetivo. Cada função objetivo otimiza um determinado aspecto da rede e pode ser escolhida pelo projetista da rede, de acordo com a expectativa de sua operação.

A primeira função objetivo minimiza o número de BSs usadas na rede para atender à porcentagem mínima de usuários. A *Função Objetivo 4.1* é dada por:

$$\text{Minimize} \sum_{i \in \mathcal{R}} \sum_{j \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{i,j,k} \quad (4.1)$$

A segunda função objetivo maximiza a receita da rede, servindo o número máximo possível de MSs e utilizando todos os recursos de rede disponíveis. A receita da rede é proporcional à soma da classe de todas as MSs servidas. A *Função Objetivo 4.2* é dada por:

$$\text{Maximize} \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} \cdot w_i \quad (4.2)$$

A terceira função objetivo tenta alcançar os dois últimos objetivos, a minimização o número de BS usadas e a maximização da receita, simultaneamente. Ela pode ser dividida em dois diferentes objetivos (critérios), dados por:

$$\begin{aligned} f_1 &= \text{Minimize} \sum_{i \in \mathcal{R}} \sum_{j \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{i,j,k} \\ f_2 &= \text{Minimize} \sum_{i \in \mathcal{M}} w_i - \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} \cdot w_i \end{aligned}$$

A função objetivo  $f_1$  representa a minimização do número de BS usadas. A função objetivo  $f_2$  representa a minimização do desperdício de receita. A primeira soma de  $f_2$  ( $\sum_{i \in \mathcal{M}} w_i$ ) contabiliza a receita máxima da rede e a segunda soma contabiliza as receitas dos usuários servidos; a diferença das duas é igual ao desperdício de receita da rede. Em vez de maximizar a receita, o desperdício de receita foi minimizado.

A terceira função objetivo visa minimizar o número de BSs da rede ( $f_1$ ) bem como o desperdício de receita ( $f_2$ ), mas estes dois objetivos são conflitantes, uma vez que a minimização de um leva à maximização do outro. Tal cenário de conflito é comum em problemas de otimização multiobjetivo, onde a melhor solução não é uma única, como acontece com problemas mono-objetivo, mas um conjunto de soluções [49]. Uma solução é considerada Pareto quando a melhoria de uma função objetivo resulta necessariamente na piora de pelo menos uma das outras funções objetivo. O conjunto de todas as soluções Pareto ótimas, chamado fronteira de Pareto, representa o melhor compromisso entre os diferentes objetivos contraditórios.

Existem muitas maneiras de se lidar com problemas de otimização multiobjetivo (*Multiobjective Optimization Problem* - MOP). Algoritmos baseados em heurísticas geralmente resultam em bons resultados e soluções rápidas, mas dependem de conhecimento prévio do problema e podem resultar em soluções muito piores que os ótimos. Outra forma de se resolver um MOP, principalmente com problemas ainda não muito bem investigados, como a otimização de recursos em RoF, é através da junção de todas as funções objetivo, criando-se uma função objetivo agregada (*Aggregated Objective Function* - AOF). A AOF mais comumente utilizada é a soma linear ponderada das funções objetivo:  $F(f_1, f_2, \dots, f_n) = \alpha \times f_1 + \beta \times f_2 + \dots + \gamma \times f_n$ , onde a soma de todos os pesos ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) deve ser igual a 1.

A técnica de otimização utilizada no presente trabalho para a terceira função objetivo baseia-se na agregação das funções objetivo  $f_1$  e  $f_2$ ; e a AOF adotada é a seguinte:

$$\begin{aligned} F(f_1, f_2) &= \alpha f_1 + (1 - \alpha) f_2 = \\ &\alpha \left( \sum_{i \in \mathcal{R}} \sum_{j \in \mathcal{B}} \sum_{k \in \mathcal{C}} x_{i,j,k} \right) + \\ &(1 - \alpha) \left( \sum_{i \in \mathcal{M}} w_i - \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} \cdot w_i \right) \end{aligned}$$

Portanto, a *Função Objetivo 4.3* é dada por:

$$\text{Minimize } F(f_1, f_2) \quad (4.3)$$

## 4.5 Resultados numéricos

Para se analisar a eficácia da abordagem proposta, foram avaliados diferentes cenários de configuração da rede. Os resultados da avaliação são discutidos a seguir.

### 4.5.1 Cenários utilizados na avaliação

A infraestrutura utilizada nos testes consiste de uma BSC e várias RAUs distribuídas uniformemente em uma área de 2 Km x 2 Km. As RAUs são organizadas em 4 camadas e agrupamentos de 4 células. A camada mais alta (camada 1) consiste de uma única RAU que comprehende uma célula com raio de 1420 m. A segunda camada é composta de 4 RAUs com raio de 710 m, dispostas em uma grade 2 x 2. A terceira camada tem 16 RAUs com raio de 360 m. A camada mais baixa (camada 4) envolve 64 RAUs com raio de 180 m. As RAUs de duas camadas diferentes não podem operar simultaneamente para cobrir uma determinada área. No pior caso, a rede irá operar com 64 BSs, o que acontece se todas as RAUs da camada mais baixa estiverem ativas. Portanto, a infraestrutura de rede consiste de 1 BSC, 85 RAUs, um número variável de BSs (de 1 até 64), cada BS com capacidade de 30 MSs, e um número variável de MSs. Todas as BSs podem ser associadas a qualquer uma das 85 RAUs, uma vez que todas elas são conectadas por enlaces de fibra. A figura 4.4 ilustra a infraestrutura.

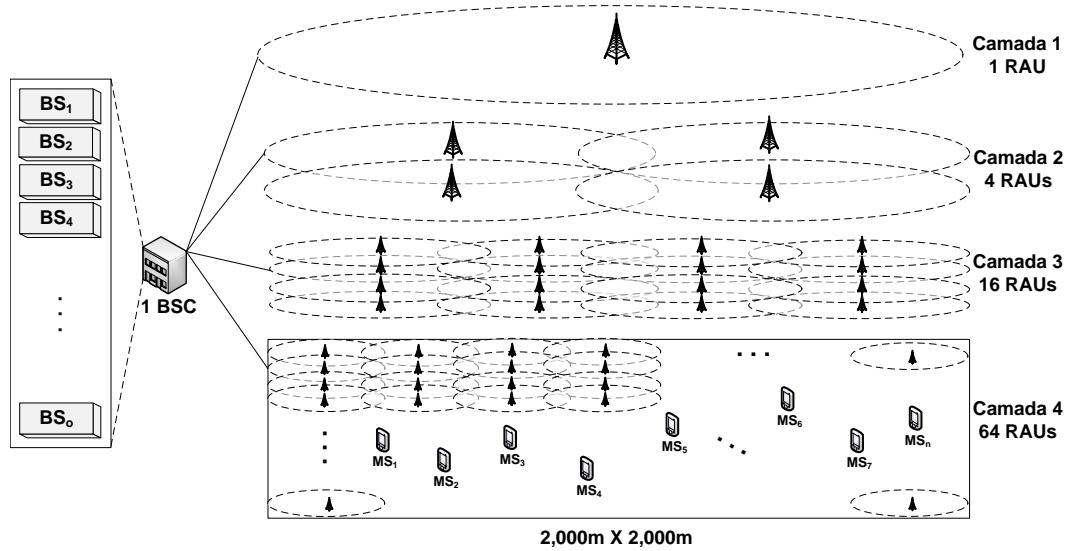


Figura 4.4: Infraestrutura de Radio sobre Fibra utilizada na avaliação

O modelo de otimização foi implementado usando a linguagem de programação C e a biblioteca de otimização FICO Xpress 7.0 [1], que implementa o algoritmo *LP-based Branch*

and Bound para resolver problemas de programação linear inteira. Todos os experimentos foram executados em uma estação de trabalho com processador Intel Quadcore Core 2 de 2,6 GHz, 3 GB de RAM e Debian GNU/Linux kernel 2.6.23.1 como sistema operacional. Para avaliar a rede móvel foi empregado o modelo de mobilidade Random Trip [38] com um cenário urbano com ruas de Houston, Texas/EUA, perto da West University (as ruas podem ser vistas na figura 4.5). O valor de velocidade média foi definido como 2m/s, o tempo de pausa e o delta do tempo de pausa foram estabelecidos como 20s e 50s, respectivamente. Para cada experimento, pelo menos 10 amostras foram tomadas, considerando diferentes configurações da rede com a mesma infraestrutura e demanda, seguindo o modelo de mobilidade. As estatísticas desejadas foram calculadas com intervalos de confiança de 95%.

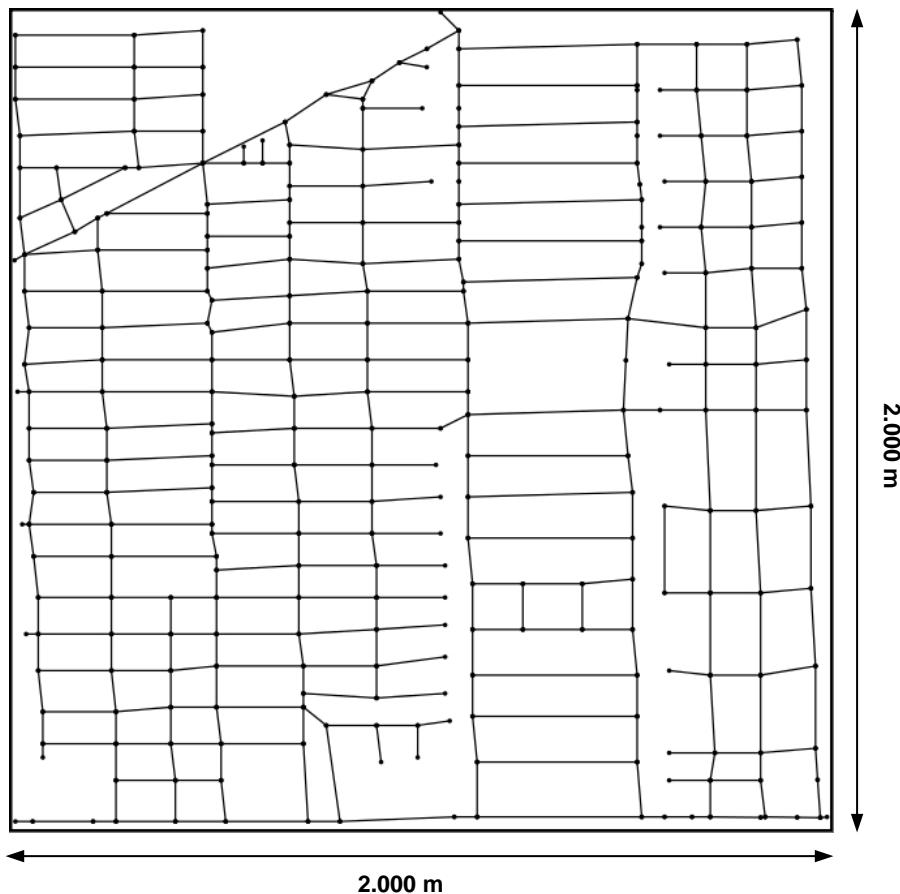


Figura 4.5: Cenário de ruas utilizadas com o modelo Random Trip Mobility

Nos experimentos, quatro infraestruturas de redes diferentes foram consideradas: a *Infraestrutura 1*, envolvendo apenas a camada mais baixa de RAUs (64 RAUs); a *Infraestrutura 2*, composta das duas camadas mais baixas (64 + 16 RAUs); a *Infraestrutura*

*3*, composta pelas três camadas mais inferiores ( $64 + 16 + 4$  RAUs) e a *Infraestrutura 4*, envolvendo todas as quatro camadas ( $64 + 16 + 4 + 1$  RAUs). Ao considerar estas quatro infraestruturas, é possível avaliar os benefícios da estruturação das RAUs de forma hierárquica. Com a ativação de uma RAU em uma camada superior, as RAUs das camadas inferiores deve ser desativadas. Portanto, quanto mais alta a camada, menos BSs serão utilizadas na rede. Infraestruturas que envolvem um maior número de camadas têm mais flexibilidade para reduzir o número de BSs usadas, mas o problema de otimização exige maior esforço computacional.

Os experimentos foram divididos em três grupos, cada grupo considerando uma das três funções objetivo anteriormente especificadas.

#### 4.5.2 Minimização do número de BSs

O primeiro conjunto de experimentos visa a minimização do número de BSs da rede considerando a *Função Objetivo 4.1*. Nestes experimentos, variou-se o número de MSs de 1 a 1000 e o modelo de otimização foi ajustado para atender 100% dos usuários.

A figura 4.6 mostra o número de BSs usadas para um número variável de MSs, considerando todas as 4 infraestruturas. Pode-se notar que o número de BSs exigido pela *Infraestrutura 1* com apenas uma camada de RAUs exige um número muito maior de BSs ativas. Para um número de MSs inferior a 100, enquanto que a *Infraestrutura 1* com uma camada única de RAUs requer mais de 30 BSs, a *Infraestrutura 3* e a *Infraestrutura 4* requerem apenas 5 BSs. Até 400 MSs, a diferença na demanda por BSs entre a *Infraestrutura 1* e as outras é constante e em média igual a 35 BSs. Para um número de usuários inferior a 400, as células são mescladas e algumas RAUs em níveis mais elevados são ativas e um grande número de RAUs em níveis inferiores são desativadas.

Com o aumento do número de MSs mais divisões celulares ocorrem e mais agrupamentos de 4 células pequenas são ativados, substituindo as células de grande raio; este processo de divisão continua com o aumento do número de MS até que poucas RAUs nas camadas superiores sejam usadas, aumentando o número de BSs usadas. Além disso, mesmo para redes altamente congestionadas a infraestrutura com várias camadas ainda reduz o número de BSs ativas, pois em algumas áreas as BSs das camadas superiores ainda são usadas, mostrando o benefício da configuração dinâmica da rede em função de variação da demanda ao longo da área de cobertura.

Nos experimentos, foi definido um limite de 400 segundos para o tempo de execução do programa de otimização. Esse limite resulta em soluções envolvendo a *Infraestrutura 4* longe das soluções ótimas, dado que a demanda computacional para resolver o problema com 4 camadas é muito maior do que a demanda necessária para resolver problemas com menos camadas.

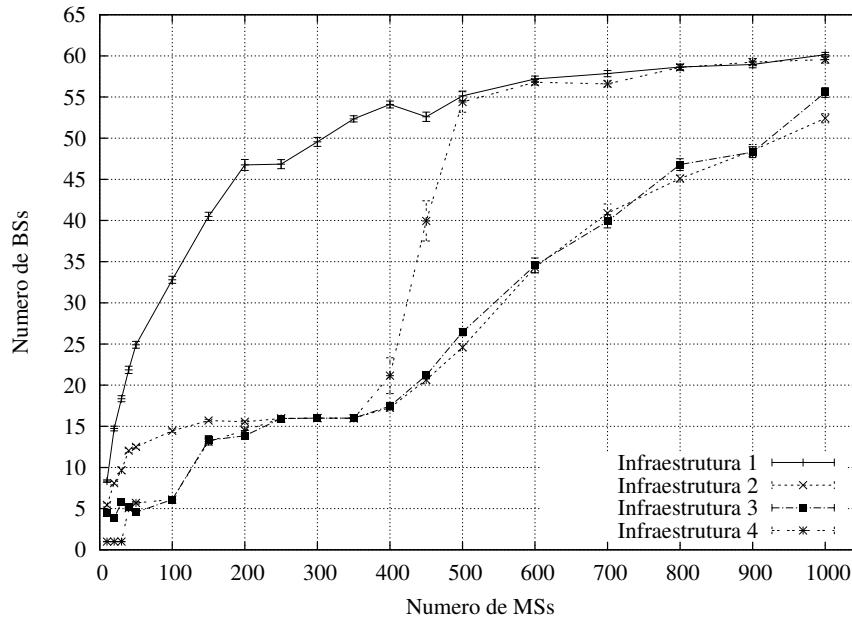


Figura 4.6: Número de BSs usadas em função do número de MSs

A figura 4.7 apresenta o tempo de execução da otimização. É possível verificar que a *Infraestrutura 1* apresenta um tempo computacional insignificante quando comparado ao tempo das outras infraestruturas. O tempo exigido para a otimização da rede é proporcional ao número de camadas de RAUs consideradas na topologia da rede. A *Infraestrutura 4* exigiu em média um tempo 3 vezes maior do que a *Infraestrutura 2* e, com isso, acabou fornecendo resultados piores.

### 4.5.3 Maximização da receita

Nesses experimentos, o otimizador tenta servir o maior número possível de usuários, priorizando-os, de acordo com sua categoria de serviço ( $w$ ). A função objetivo considerada é a *Função Objetivo 4.2*.

Considerou-se quatro classes de serviço ( $w$ ), com valores de 1, 2, 3 e 4, proporcionais à receita que o operador receberá ao servir os usuários dessas classes. A proporção de usuários foi ajustada como 40%, 30%, 20% e 10%, respectivamente, para as classes 1, 2, 3 e 4. Nos experimentos, a rede foi composta por 1.000 MSs e um número de BSs variando de 1 a 64.

A figura 4.8 mostra o número de MSs atendidas e a receita do operador com a variação do número de BSs, considerando as 4 infraestruturas de RAUs. A receita é mostrada nas curvas superiores e o número de MSs nas curvas inferiores do gráfico. A receita

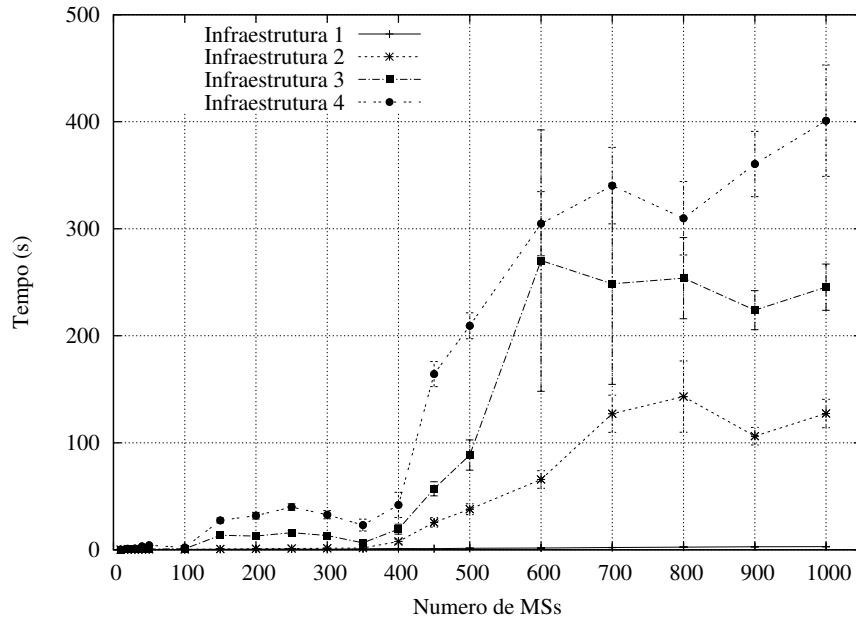


Figura 4.7: Tempo de execução do programa em função do número de MSs - minimização do número de BSs

total aumenta em função do número de BSs disponíveis, dado que a capacidade total da rede aumenta com a maior disponibilidade de BSs. É possível observar que todas 4 infraestruturas fornecem a capacidade de servir a mesma quantidade de usuários, mas as *Infraestruturas 2, 3 e 4* conseguem oferecer maior receita que a *Infraestrutura 1*. Isso ocorre porque com a escassez de recursos (redes com poucas BSs) as infraestruturas com mais camadas conseguem cobrir mais usuários com suas células de maior raio e, assim, “escolher” os usuários de classes que retornam maior receita. Para redes com até 35 BSs a *Infraestrutura 1* fornece receita menor do que as outras infraestruturas, e todas essas últimas oferecem receita bastante similares. Para redes com mais de 35 BSs os resultados da *Infraestrutura 1* são similares e até mesmo melhores do que os resultados das outras infraestruturas.

Para todos os experimentos, o limite máximo de tempo de execução do problema de otimização foi ajustado para 90 s. Buscou-se limitar o tempo máximo de execução para averiguar a validade do uso do modelo inteiro para redes móveis, com fortes restrições de tempo de reconfiguração. Para redes com número de BSs entre 20 e 55 diversas execuções do otimizador alcançaram o tempo máximo e, dessa forma, retornaram resultados de pior qualidade. Consequentemente, os resultados das 3 infraestruturas com mais camadas apresenta valores de receita menores do que o obtido pela *Infraestrutura 1* para redes com número de BSs entre 35 e 55.

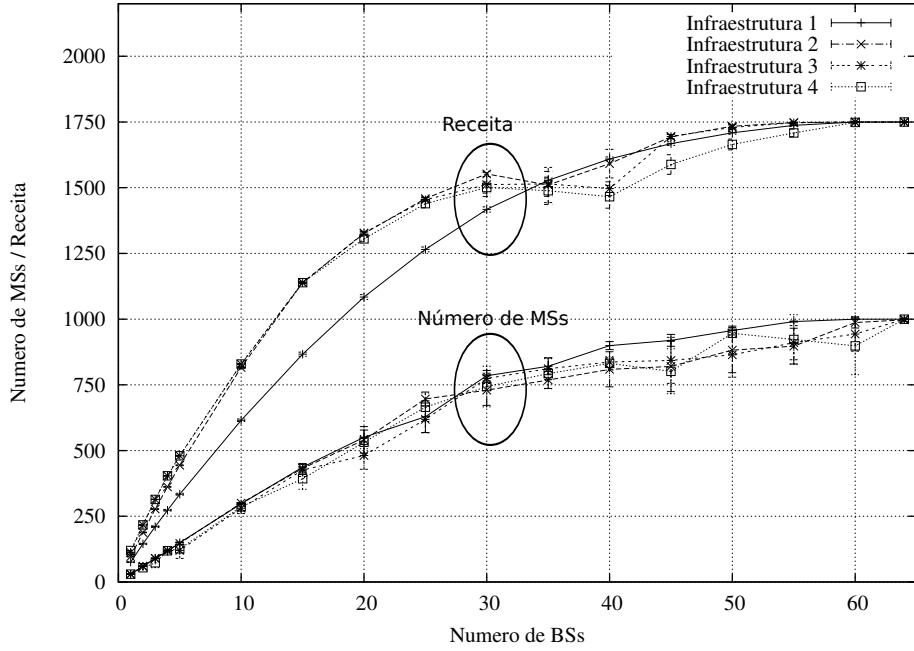


Figura 4.8: Receita obtida e número de MSs atendidas em função do número de BSs

A figura 4.9 mostra o tempo de execução do otimizador para as execuções mostradas na figura 4.8. Conforme discutido anteriormente, o tempo necessário para a otimização de redes com número de BSs entre 20 e 55 é alto, alcançando o limite estabelecido de 90 segundos. De uma forma geral, o otimizador requer menos tempo para a execução em redes com pouca capacidade disponível (pequeno número de BSs - inferior a 20) e com muita capacidade disponível (grande número de BSs - superior a 55).

#### 4.5.4 Minimização do número de BSs e maximização da receita do operador

Nesses experimentos, o otimizador tenta alcançar os dois objetivos anteriores simultaneamente, conforme a *Função Objetivo 4.3*.

As soluções ótimas foram encontradas variando o peso  $\alpha$  da *Função Objetivo 4.3* de 0 a 1 em passos de 0,05. Para normalizar a significância da variação do peso para cada objetivo, a função objetivo final foi alterada para:

$$F'(f_1, f_2) = \alpha \left( \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right)$$

onde,  $f_i^{\min}$  e  $f_i^{\max}$  são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da função objetivo  $f_i$ .

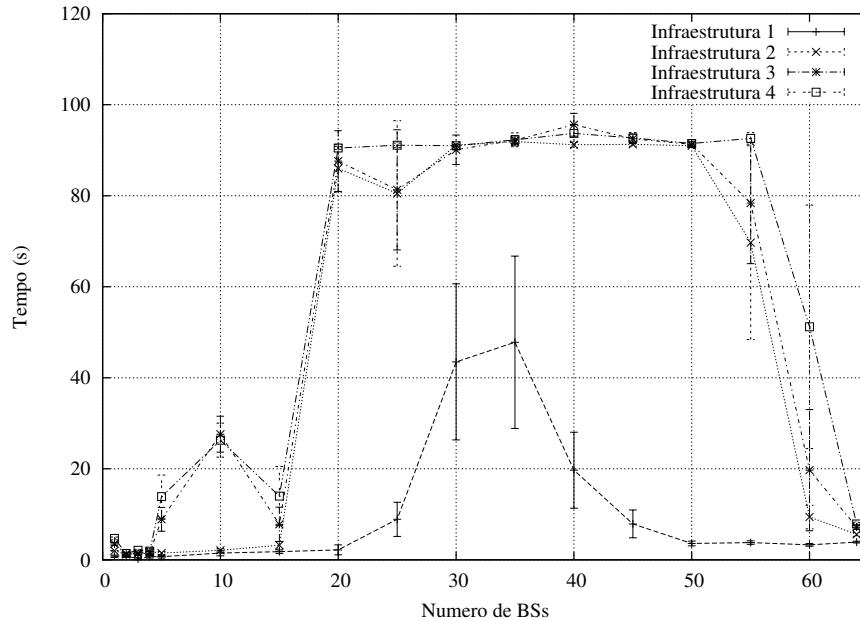


Figura 4.9: Tempo de execução do programa em função do número de BSs utilizadas - maximização da receita

As simulações foram executadas com a função objetivo agregada modificada  $F'(f_1, f_2)$  para redes com até 500 MSs e para os 4 tipos diferentes de infraestruturas. Os resultados apresentam a média dos valores obtidos com o peso  $\alpha$  variando de 0 a 1. Os resultados podem ser observados na figura 4.10, para a *Infraestrutura 1*; na figura 4.11, para a *Infraestrutura 2*; na figura 4.12, para a *Infraestrutura 3*. Os resultados obtidos com a *Infraestrutura 4* foram muito semelhantes ao resultados da *Infraestrutura 3*, já que a camada mais superior da *Infraestrutura 4* é utilizada apenas em redes com número de usuários menor do que 30, que é a capacidade de cada BS.

O custo operacional de rede, quando se considera a *Infraestrutura 1* (figura 4.10), envolve quase 55 BSs para redes com 500 MSs sem desperdício de receita. Ao usar a *Infraestrutura 2* e a *Infraestrutura 3*, é possível obter a mesma receita, mas com apenas 22 BSs (figura 4.11 e figura 4.12). Pode ser notada uma redução de custo superior a 50% para a mesma receita, quando se compara as duas últimas infraestruturas com a *Infraestrutura 1*.

Para redes com até 100 MSs, é possível verificar a maior redução de custos quando se compara as 3 infraestruturas. Comparando os resultados obtidos com rede com 100 MSs, é possível verificar que a *Infraestrutura 1* exige um custo de 36 BSs para atender todos os usuários (figura 4.10), enquanto a *Infraestrutura 2* exige um custo de 14 BSs (figura 4.11) e a *Infraestrutura 3* exige um custo de apenas 6 BSs (figura 4.12).

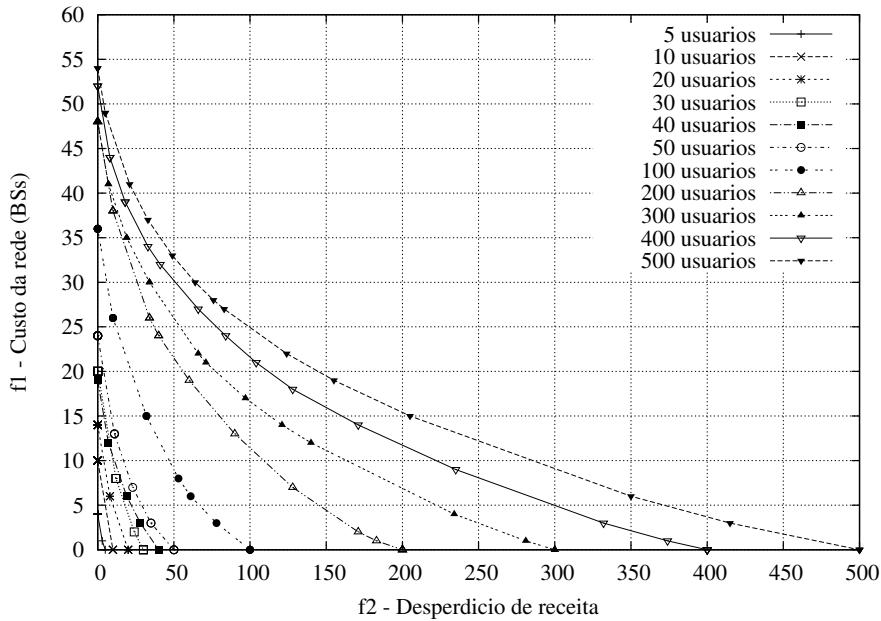


Figura 4.10: Resultados de uma rede com até 500 MSs, usando a *Infraestrutura 1*

A maior redução de custos de rede foi obtida utilizando-se a *Infraestrutura 3*, porém ela demandou maior esforço computacional para encontrar as soluções. O tempo aumenta quando mais MSs são incluídas na rede, conforme pode ser visto na figura 4.13. Para um certo número de MSs, o tempo necessário para obter resultados ótimos depende dos valores do peso  $\alpha$ . Pesos próximos de 0 ou 1 exigiram menos tempo para resolver o problema, já que ocorre o equilíbrio nos parâmetros da função objetivo, enquanto os pesos entre 0,3 e 0,7 exigiram mais tempo, o que justifica os grandes intervalos de confiança das medidas de tempo de execução da figura 4.13.

## 4.6 Conclusão

Nesse capítulo, foi apresentado um modelo de otimização de recursos de rádio, que envolve a divisão e a fusão dinâmica de células, em uma infraestrutura de RoF multicamadas. O problema de otimização foi formulado com programação linear inteira e foi executado com diferentes funções objetivo: de minimização do número de BSs usadas na rede, de maximização das receitas e uma função objetivo que reduz simultaneamente o número de BSs usadas e o desperdício de receita.

Um grande número de recursos puderam ser economizados quando se considerou a primeira função objetivo e a maior parte dos usuários pôde ser servida quando se considerou a segunda função objetivo. Os resultados da otimização que inclui as duas funções objetivo

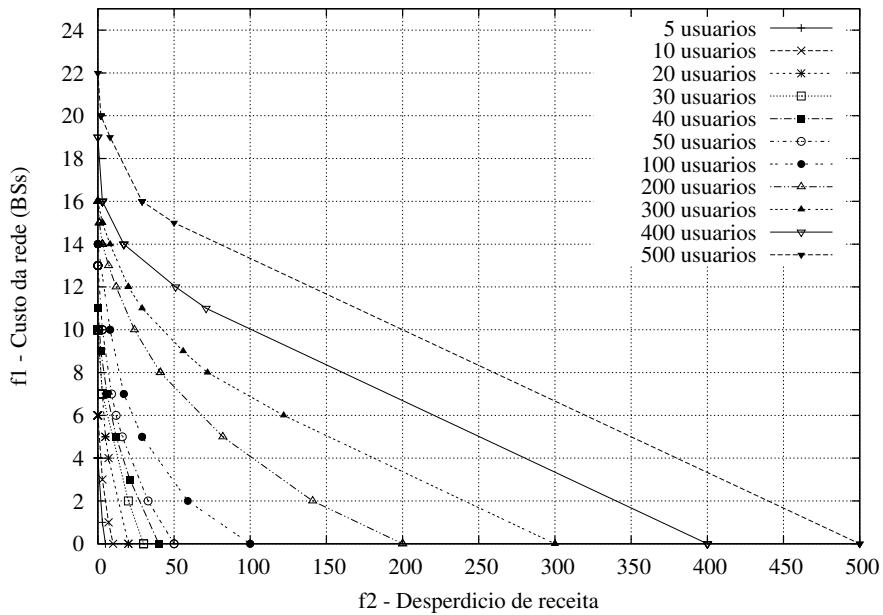


Figura 4.11: Resultados de uma rede com até 500 MSs, usando a *Infraestrutura 2*

apresentaram o melhor compromisso entre as duas últimas funções objetivo.

O modelo apresentado pode ser utilizado na otimização de recursos em redes sem fio de acesso com centralização de recursos, como as redes RoF. Todos os resultados podem ser utilizados como diretrizes pelos operadores destas redes durante o seu planejamento e/ou sua implantação.

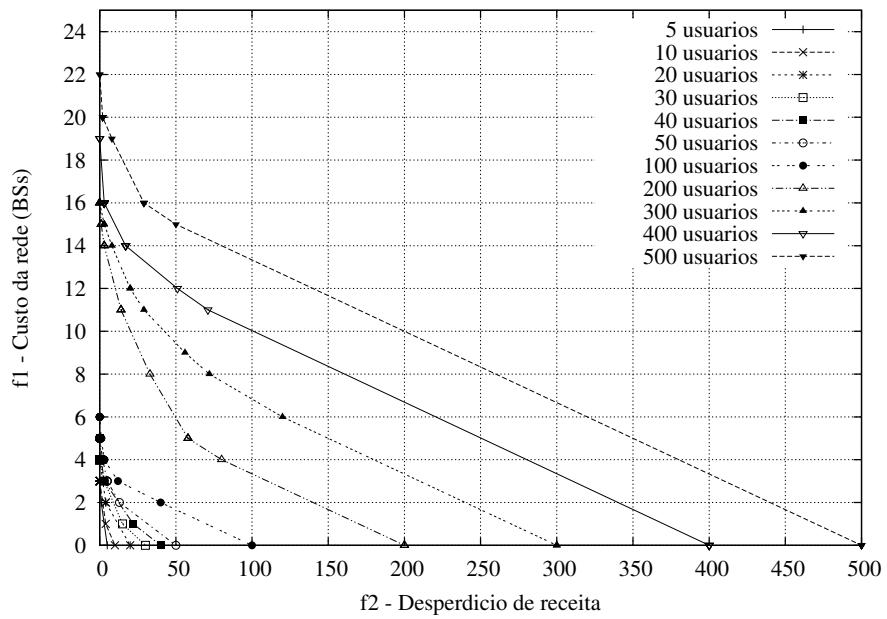


Figura 4.12: Resultados de uma rede com até 500 MSs, usando a *Infraestrutura 3*

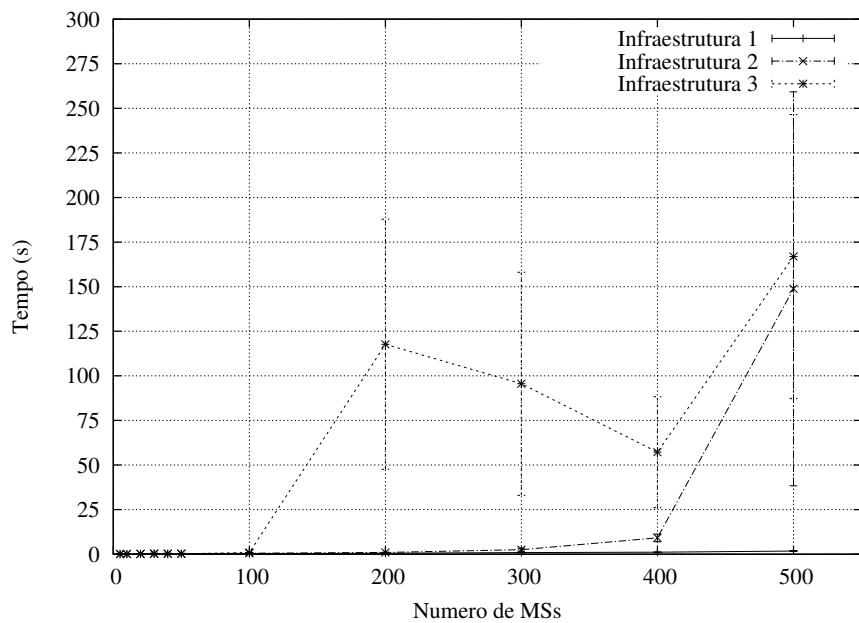


Figura 4.13: Tempo de execução da otimização bicritério



# Capítulo 5

## Algoritmos aproximados para a otimização de recursos de rádio

### 5.1 Introdução

O conceito de Relaxação Linear de problemas de otimização linear inteira consiste na substituição das restrições que impõe valores inteiros (possivelmente binários) às variáveis de decisão por restrições mais fracas que permitem que as variáveis possam assumir valores reais. A Relaxação Linear, assim como outros tipos de relaxação de problemas inteiros, busca minimizar o tempo de execução para instâncias grandes do problema, além de gerar limites para os problemas inteiros. Essa técnica transforma um problema de otimização NP-difícil (programação inteira) em um problema relacionado que pode ser resolvido em tempo polinomial (programação linear) [10, 44, 51]. A solução linear resultante pode ser utilizada para obter mais informações sobre a solução inteira ótima e, com isso, um processo interativo de solução do problema pode ser aplicado para aproximar a solução ótima do problema relaxado à solução inteira ótima. Muitos trabalhos mostram que é possível obter soluções factíveis dos problemas inteiros a partir da relaxação destes e que é possível construir soluções que se aproximam das soluções inteiras a partir das mesmas relaxações.

A solução da Relaxação Linear pode ser feita com qualquer método clássico de resolução de programação linear. As soluções ótimas do problema relaxado podem ter valores inteiros, sendo, portanto, soluções ótimas do problema original inteiro, ou valores reais que devem ser aproximados para valores inteiros que sejam soluções válidas do problema original. Em todos os casos, as soluções ótimas dos problemas relaxados são limites inferiores ou superiores para o problema original, já que toda solução do problema inteiro é uma solução linear válida. Em um problema de maximização, por exemplo, a solução ótima relaxada é maior ou igual à solução ótima inteira; o inverso ocorre para os problemas de

minimização. Dessa forma, os resultados ótimos relaxados podem ser utilizados como limitantes (superiores ou inferiores) para as soluções ótimas inteiras.

Devido às suas características, a técnica de Relaxação Linear é muito utilizada como método para desenvolver algoritmos aproximados de problemas de otimização com soluções difíceis de serem obtidas com técnicas clássicas de otimização inteira. Diversos autores desenvolveram estudos sobre Relaxação Linear e sua aplicação em problemas específicos. Uma técnica muito utilizada para extrair informações de soluções relaxadas e transformá-las em soluções binárias é o Arredondamento Aleatório [44]. Nesse método, as variáveis reais são aproximadas para 0 ou 1 com uma determinada probabilidade. A probabilidade de arredondamento é ditada por um algoritmo que utiliza variáveis aleatórias.

Este capítulo apresenta três algoritmos de aproximação para a otimização de recursos de rádio em RoF. Os algoritmos baseiam-se na técnica de Arredondamento Aleatório e utilizam a Relaxação Linear do problema de programação linear inteira apresentado no capítulo 4. Considera-se os mesmos três objetivos distintos apresentados anteriormente: i) a minimização do número de BSs utilizadas, ii) a maximização da receita obtida pelo operador da rede, e iii) os dois últimos critérios simultaneamente. Para cada objetivo diferente de otimização é apresentado um algoritmo de aproximação. Os resultados mostram que a técnica de aproximação reduz显著mente o tempo de execução do algoritmo e apresenta resultados bastante próximos dos ótimos, mesmo para grandes instâncias do problema.

Este capítulo está organizado da seguinte forma. A seção 5.2 apresenta a formulação do problema relaxado de otimização de recursos de rádio em RoF. A seção 5.3 apresenta os três algoritmos baseados na técnica de Arredondamento Aleatório para a aproximação das soluções relaxadas em soluções inteiras. A seção 5.4 apresenta os resultados obtidos com a execução dos algoritmos propostos. Por fim, a seção 5.5 conclui o capítulo 5.

## 5.2 Relaxação do problema inteiro de otimização de recursos de rádio

O problema da alocação de recursos de rádio em RoF é uma extensão do problema clássico de posicionamento de BSs. O posicionamento de BSs clássico tenta otimizar o local de disponibilização dos recursos de forma estática levantado em consideração um conjunto de pontos (possíveis locais de instalação das Estações Base); esse algoritmo é executado uma única vez ou com períodos longos. O mesmo problema em RoF deve considerar um número muito maior de pontos e levar em conta a dinamicidade da rede, já que a configuração das células é mudada constantemente. O problema de posicionamento de BSs é um problema NP-difícil [40]. Soluções ótimas em tempo real só são possíveis para instâncias pequenas

do problema; grandes instâncias exigem o uso de heurísticas. Uma forma de se resolver problemas de otimização complexos em tempo polinomial é com o emprego da Relaxação Linear e algoritmos de Arredondamento Aleatório.

Embora a formulação baseada em programação linear inteira (PLI) nos dê resultados ótimos para o problema, o tempo necessário para que isso ocorra pode ser inviável para a otimização de redes móveis e dinâmicas. Para contornar essa questão, são propostos alguns algoritmos que empregam Relaxação Linear para encontrar soluções aproximadas em curtos intervalos de tempo. A relaxação linear consiste na obtenção de soluções não necessariamente inteiras, e posterior conversão dessas soluções reais em soluções inteiras. As soluções baseadas em relaxação podem ser atreladas a valores de probabilidade e, usando técnicas de Arredondamento Aleatório, é possível transformá-las em valores inteiros que satisfazem às restrições originais e se aproximam das soluções ótimas.

Os algoritmos de relaxação apresentados substituem as restrições  $C1$  e  $C2$  do problema 4.4 pelas restrições  $C1'$  e  $C2'$  abaixo, transformando o problema linear inteiro (PLI) em um problema linear (PL).

$$\begin{aligned} x_{i,j,k} &\in [0, 1] \quad \forall i \in \mathcal{R}, \forall j \in \mathcal{B}, \forall k \in \mathcal{C} & (C1') \\ y_{i,j} &\in [0, 1] \quad \forall i \in \mathcal{M}, \forall j \in \mathcal{R} & (C2') \end{aligned}$$

O problema relaxado pode ser resolvido com técnicas clássicas de otimização linear, como o *Simplex* ou métodos de Pontos Interiores. Os algoritmos baseados em Relaxação Linear são eficientes devido ao fato de que o tempo necessário para resolver PLs é muito menor que o tempo necessário para resolver PLIs para instâncias grandes.

Os algoritmos de aproximação com arredondamento aleatório recebem como entrada uma solução do problema relaxado (PL). Durante o processo de aproximação algumas variáveis da solução relaxada são arredondadas com o auxílio de variáveis aleatórias (normalmente variáveis uniformes no intervalo  $[0, 1]$ ) e outros PLs são resolvidos em um processo iterativo. Cada nova execução dos PLs inclui as aproximações anteriores obtidas anteriormente; desta forma, os algoritmos refinam as soluções reais, aproximando os resultados obtidos para resultados inteiros.

Durante o processo de aproximação, o problema não-relaxado (inteiro) pode tornar-se infactível, quando as variáveis são arredondadas de forma a não atender todas as restrições do problema. Nesse caso, é possível modificar as soluções intermediárias, de forma a obter uma solução factível. É possível, ainda, que durante o processo de arredondamento as soluções tornem-se inteiras mas aproximadas, resultando em soluções piores do que as obtidas pela formulação inteira original. Uma forma de calcular a qualidade da solução relaxada é através do *gap* de dualidade, que é a máxima relação entre a solução inteira obtida e a solução relaxada. O *gap* de dualidade traduz a qualidade da aproximação linear.

## 5.3 Algoritmos aproximados baseados em relaxação linear

A seguir, são apresentados os 3 algoritmos aproximados para o problema linear inteiro. O *Algoritmo 1* minimiza o número de BSs usadas na rede. O *Algoritmo 2* maximiza a receita, e o *Algoritmo 3* tenta alcançar os dois objetivos, minimizando o número de BSs e o desperdício de receita. Todos os três algoritmos recebem como entrada uma solução do PLI relaxado e um limiar de probabilidade ( $Prob_{thr}$ ), que é utilizado durante o sorteio de variáveis aleatórias. Este limiar de probabilidade deve ser previamente estimado a partir de métodos empíricos, de acordo com a carga e a dinamicidade da rede. Valores pequenos de  $Prob_{thr}$  podem causar resultados piores na otimização, mas garantem maiores chances de factibilidade do problema; valores altos de  $Prob_{thr}$  podem resultar em otimização melhores, mas aumentam as chances de tornar o problema infactível.

A formulação da PLI apresentada em 4.4 envolve  $m(o.p + n)$  variáveis binárias, onde  $m$  é o número de RAUs,  $n$  é o número de MSs,  $o$  é o número de BSs e  $p$  é o número de BSCs. As restrições  $C3$  e  $C4$  envolvem  $m.o.p$  inequações; as restrições  $C5$  e  $C11$  envolvem  $m$  inequações; as restrições  $C9$  e  $C10$  envolvem  $n.m$  inequações; a restrição  $C6$  envolve  $o$  inequações; a restrição  $C7$  envolve  $n$  inequações; a restrição  $C8$  envolve 1 única inequação e a restrição  $C12$  envolve  $O(m^2)$  inequações. Considerando que existam sempre mais RAUs do que BSs disponíveis na rede e que existam menos BSCs do que BSs, temos que  $p < o < m$ . Essa suposição é real pois normalmente encontramos um grande número de antenas (RAUs) e um número pequeno de recursos de rádio (BSs), centralizados em poucos pontos (BSCs). Assim, o problema PLI envolve  $O(m^3 + m.n)$  restrições e  $O(m^3 + m.n)$  variáveis binárias.

A complexidade de tempo para o problema relaxado é definido como  $\alpha_L$ .

### 5.3.1 Algoritmo 1 - Minização do número de BSs

O *Algoritmo 1* pode ser dividido em duas partes. Na primeira parte (linhas 1 a 19), o algoritmo analisa todas as RAUs e, com base nas soluções reais, decide se deve associar ou não as RAUs com as BSs com a maior probabilidade. Da camada mais alta até a mais baixa (linha 1), as RAUs são escolhidas aleatoriamente. Para cada RAU é sorteada uma variável aleatória uniforme  $U[0, 1]$ , que é usada como limiar para a decisão de associar a RAU com a BS que possui o maior valor da variável  $x$  fracionária (linha 4). Se o maior valor de probabilidade encontrado pelo otimizador para a RAU escolhida (linha 3) for maior ou igual à probabilidade sorteada, então a RAU escolhida é associada, caso contrário, ela não é associada. Se a RAU escolhida for associada, uma nova restrição é adicionada ao problema e uma outra execução é realizada (linha 6). Restrições também são adicionadas

se a RAU escolhida não for associada. Neste caso, o problema linear também é executado novamente (linha 12). Na tentativa de contornar possíveis decisões errôneas, o algoritmo verifica se o novo problema linear tornou-se infactível após a adição da última restrição. Se o problema se tornou infactível, a última restrição é removida e uma nova restrição estabelecendo o oposto é adicionada (linhas 7-10 e 13-16). Como todas as RAUs são analisadas e novas restrições definindo as suas associações são adicionadas, no final da primeira parte toda infraestrutura da rede é definida, o que significa que todas as variáveis  $x$  são inteiras.

A segunda parte do *Algoritmo 1*, que corresponde às linhas 20 a 41 termina o arredondamento das variáveis  $y$ . Para todas as MSs que não tenham sido atendidas anteriormente (linha 22), o algoritmo encontra uma RAU aleatória com a qual a MSs tenha uma grande probabilidade de ser servida (linha 23). Se o algoritmo encontra tal RAU ele tenta associar a MSs à RAU encontrada, considerando a demanda necessária e a capacidade da BS associada à RAU. Se a tentativa for bem-sucedida, uma nova restrição é adicionada (linha 27); caso contrário, a MS não é servida por nenhuma RAU (linhas 30 e 33). As tentativas de associação são executadas até que todas as MSs sejam verificadas ou o percentual mínimo de MSs a serem servidas seja atingido (linha 21). Como novas restrições foram adicionadas na segunda parte, o problema linear é executado novamente, a fim de encontrar a solução final.

**Teorema 1.** *A complexidade de tempo do Algoritmo 1 é  $O(m^3 + n^2 + m.n + m.\alpha_L)$ .*

*Demonstração.* O Alogoritmo 1 resolve o problema linear de entrada  $L$  no tempo  $O(\alpha_L)$ . A primeira parte do *Algoritmo 1* corresponde às linhas de 1 a 19. As instruções executadas dentro dos laços das linhas 1 e 2 são executadas  $m$  vezes (para todas as RAUs). A linha 3 executa um algoritmo de busca em  $O(o.p)$ , dado que é necessário encontrar o maior valor de  $x$  dado uma RAU  $r$ , percorrendo todas as  $o$  BSs e todas as  $p$  BSCs. Considera-se que o sorteio aleatório pode ser executado em tempo unitário. Se a condição da linha 5 é verdadeira, a linha 6 é executada em  $O(\alpha_L)$  e as linhas de 7 a 10 são executadas em tempo unitário. Se a condição é falsa, a linha 12 é executada em  $O(\alpha_L)$  e as linhas de 13 a 16 são executadas em tempo unitário. A primeira parte do *Algoritmo 1* (linhas 1 a 19) é, portanto, executada em  $O(m.(\alpha_L + o.p))$ .

Na segunda parte do *Algoritmo 1*, a linha 20 é executada em  $O(n)$  e as instruções dentro dos laços das linhas de 21 a 40 são executadas no máximo  $n$  vezes. Em cada iteração a linha 23 é executada em  $O(m)$  e, se a condição da linha 24 for verdade, a linha 25 é executada em  $O(n)$ . Outras instruções dentro do laço das linhas 21 a 36 são executadas em tempo unitário. Dessa forma, o laço das linhas 21 a 36 é executado em  $O(n.(m + n))$ . O laço das linhas 37 a 40 é executado no máximo  $n$  vezes e suas instruções são executados em tempo unitário. Assim, o laço das linhas 37 a 40 é executado em  $O(n)$ . A linha 41 é executada em  $O(\alpha_L)$ .

O *Algoritmo 1* é, portanto, executado em  $O(m(\alpha_L + o.p) + n.(m+n) + n + \alpha_L)$ . Supondo que  $p < o < m$ , a complexidade é, então,  $O(m^3 + n^2 + m.n + m.\alpha_L)$ .

□

### 5.3.2 Algoritmo 2 - Maximização da receita do operador

O *Algoritmo 2* pode ser dividido em três partes. A primeira parte (linhas 1 e 2) corresponde à inicialização das estruturas de dados auxiliares  $M'$  e  $R'$ . A lista  $M'$  possui todas as MSs em ordem decrescente de classe  $w$ . O conjunto  $R'$  é um conjunto inicialmente vazio e armazenará as RAUs utilizadas na rede na estrutura final. A segunda compreende as linhas 3 até 31. O algoritmo tenta servir cada MS da lista  $M'$ , buscando qualquer RAU que possa servi-la com probabilidade maior ou igual a  $Prob_{thr}$  (linha 4). Se essa probabilidade existir e a RAU já estiver no conjunto  $R'$ , o algoritmo calcula a demanda agregada de todas as MSs já servidas por esta RAU (linha 7) e, se possível, associa a MS a ela. Se a RAU não estiver em  $R'$ , o algoritmo verifica se a demanda da MS pode ser provida pela BS com maior probabilidade de associação com a RAU (linhas 14 e 15); se a MS for suportada pela nova RAU, novas restrições são adicionadas e outra execução do problema linear é realizada (linhas 16-18). É importante notar que uma nova execução do problema linear é realizada somente quando novas RAUs são adicionadas a  $R'$ . A fim de evitar soluções errôneas, o algoritmo pode modificar algumas restrições de associação (linhas 19 a 23) quando o novo problema se tornar infactível. Depois da segunda parte, todas as MSs são analisadas e todas as variáveis  $y$  são inteiras. Na terceira parte, as variáveis  $x$  de todas as RAUs não associadas pelo algoritmo recebe valor 0 (linha 33). No final, um novo problema linear é executado, que garante que todas as variáveis  $x$  também sejam inteiras.

**Teorema 2.** A complexidade de tempo do *Algoritmo 2* é  $O(n.\log(n) + m^2.n + n.\alpha_L)$ .

*Demonstração.* O *Algoritmo 2* resolve o problema linear de entrada  $L$  no tempo  $O(\alpha_L)$ . Na linha 1, o algoritmo de ordenação é executado em  $O(n.\log(n))$ . A linha 2 é executada em tempo unitário. As instruções dentro do laço das linhas 3 a 31 são executadas  $n$  vezes. A linha 4 é executada em  $O(m)$ . Se a condição da linha 5 for verdadeira, o *Algoritmo 2* executa ou as instruções entre as linhas 6 e 12, ou as instruções entre as linhas 13 e 27. As instruções entre as linhas 13 e 27 representam o pior caso e são executadas em  $O(o.p + \alpha_L)$ . Se a condição da linha 5 for falsa, a linha 29 é executada em tempo unitário. Dessa forma, as instruções dentro do laço das linhas 3 a 31 são executadas em  $O(n.(m + o.p + \alpha_L))$ .

O laço das linhas 32 a 34 é executado no máximo  $m$  vezes e a linha 23 é executada em tempo unitário. Finalmente, a linha 35 é executada em  $O(\alpha_L)$ .

O *Algoritmo 2* é executado, dessa forma, em  $O(n.\log(n) + n.(m + o.p + \alpha_L) + m + \alpha_L)$ . Supondo que  $p < o < m$ , a complexidade é, então,  $O(n.\log(n) + m^2.n + n.\alpha_L)$ . □

### 5.3.3 Algoritmo 3 - Bicritério - Minimização do número de BSs e maximização da receita do operador

No *Algoritmo 3*, a linha 1 corresponde à inicialização da estrutura de dados auxiliar  $M'$ , que armazena todas as MSs ordenadas por ordem decrescente de classe ( $w$ ). Da camada mais alta para a mais baixa (linha 2), todas as RAUs em cada camada são escolhidos de forma aleatória (linha 3). Para cada RAU, é sorteada uma variável aleatória uniforme  $U[0, 1]$  (linha 4) que é usada para a decisão de associar ou não a RAU com a BS com maior valor fracionário (linha 5). Se a solução com maior valor fracionário encontrada pelo otimizador para a RAU escolhida (linha 6) for maior ou igual ao valor estabelecido, então a RAU escolhida é associada, caso contrário não é associada. Se a RAU escolhida é associada, uma nova restrição é acrescentada e outra execução é realizada (linha 7). Uma restrição diferente é adicionada se a RAU escolhida não é associada e outra execução também é realizada (linha 13). Como uma tentativa de contornar eventuais decisões errôneas, o algoritmo verifica se o novo problema linear tornou-se infactível após a adição das últimas restrições. Se uma restrição que estabelece que uma determinada RAU deve ser associada a uma BS torna o problema infactível, essa restrição é removida e outra restrição que evita que a RAU seja associada é adicionada (linhas 8-10 e linhas 22-25). Se durante a iteração uma nova RAU é escolhida para ser associada (linha 19), uma nova execução é realizada e o algoritmo tenta servir o máximo possível de usuários com base no limiar de probabilidade  $Pr_{thr}$ . A lista ordenada  $M'$  é verificada para encontrar o maior valor de probabilidade para cada MS e em seguida uma nova restrição (linha 23) é adicionada ao problema se o valor de maior probabilidade encontrada for maior ou igual a  $Pr_{thr}$ . Todas as MSs não servidas são finalmente removidas da lista  $M'$  (linha 24).

**Teorema 3.** A complexidade de tempo do *Algoritmo 3* é  $O(n \log(n) + m^3 + m^2 \cdot n + m \cdot \alpha_L)$ .

*Demonstração.* O *Algoritmo 3* resolve o problema linear de entrada  $L$  no tempo  $O(\alpha_L)$ . Na linha 1, o algoritmo de ordenação é executado em  $O(n \log(n))$ . As instruções dentro do laço das linhas 2 e 3 são executadas  $m$  vezes. A linha 5 executa um algoritmo de busca em  $O(o.p)$ . O sorteio aleatório da linha 4 pode ser executado em tempo unitário. Se a condição da linha 6 é verdadeira, a linha 7 é executada em  $O(\alpha_L)$  e as linhas 9 e 10 são executadas em tempo unitário. Se a condição é falsa, a linha 13 é executada em  $O(\alpha_L)$ . Se a condição da linha 19 é verdadeira, as instruções dentro do laço das linhas 20 a 26 são executadas  $n$  vezes. A linha 21 é executada em  $O(m)$  e as linhas de 22 a 25 são executadas em tempo unitário. O laço das linhas 20 a 26 é executado, dessa forma, em  $O(n \cdot m)$ . O laço das linhas 2 a 29 é, dessa forma, executado em  $O(m \cdot (o.p + \alpha_L + n \cdot m))$ .

O *Algoritmo 3* é executado, dessa forma, em  $O(n \log(n) + m \cdot (o.p + \alpha_L + n \cdot m) + \alpha_L)$ . Supondo que  $p < o < m$ , a complexidade é, então,  $O(n \log(n) + m^3 + m^2 \cdot n + m \cdot \alpha_L)$ .  $\square$

## 5.4 Resultados numéricos

Para avaliar a eficácia dos algoritmos aproximados, foram avaliados os mesmos cenários de configuração de rede apresentados na seção 4.5. A seguir, são comparados os resultados obtidos, bem como o tempo de execução do programa de otimização. Os algoritmos foram implementados utilizando usando a linguagem de programação C e a biblioteca de otimização FICO Xpress 7.0 [1].

### 5.4.1 Minimização do número de BSs

A figura 5.1 mostra o número de BSs usadas na rede considerando todas as 4 infraestruturas e comparando a otimização inteira (apresentada na seção 4.5.2) com a otimização relaxada (*Algoritmo 1*). Para todas as infraestruturas ambos algoritmos apresentaram resultados muito próximos, o que demonstra a eficácia dos algoritmos relaxados.

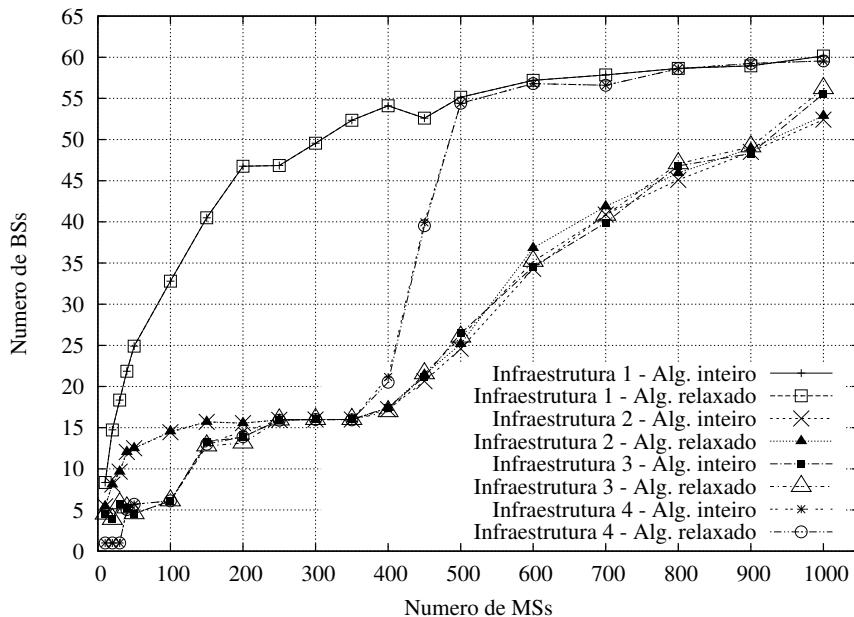


Figura 5.1: Número de BSs usadas em função do número de MSs - algoritmos inteiros e relaxados

A figura 5.2 mostra o tempo de execução de ambos algoritmos de otimização (inteiro e relaxado) para as 4 infraestruturas diferentes. Para todos os experimentos o tempo máximo de execução foi ajustado em 400 segundos.

A figura 5.2(a) apresenta os resultados da *Infraestrutura 1*. É possível verificar que o tempo de execução de ambos algoritmos é bastante semelhante e pequeno, inferiores a 4 segundos. A figura 5.2(b) apresenta os resultados da *Infraestrutura 2*. É possível

verificar que o tempo de execução do algoritmo inteiro é em média 4 vezes maior do que o tempo demandado pelo algoritmo relaxado. A figura 5.2(c) apresenta os resultados da *Infraestrutura 3*. É possível verificar que o tempo de execução do algoritmo inteiro é em média 5 vezes maior do que o tempo do algoritmo relaxado. A figura 5.2(d) apresenta os resultados da *Infraestrutura 4*; o tempo demandado pelo algoritmo inteiro é até 8 vezes maior do que o tempo demandado pelo algoritmo relaxado.

De uma forma geral, é possível verificar que o tempo necessário para a execução do algoritmo relaxado é mantido constante e limitado a no máximo 50 segundos, para as *Infraestruturas 3* e *4*. A otimização linear pode ser resolvida em tempo polinomial, enquanto a otimização linear inteira é um problema NP-difícil. Os resultados apresentados demonstram a grande vantagem de se utilizar a técnica de Relaxação Linear para a otimização dos recursos.

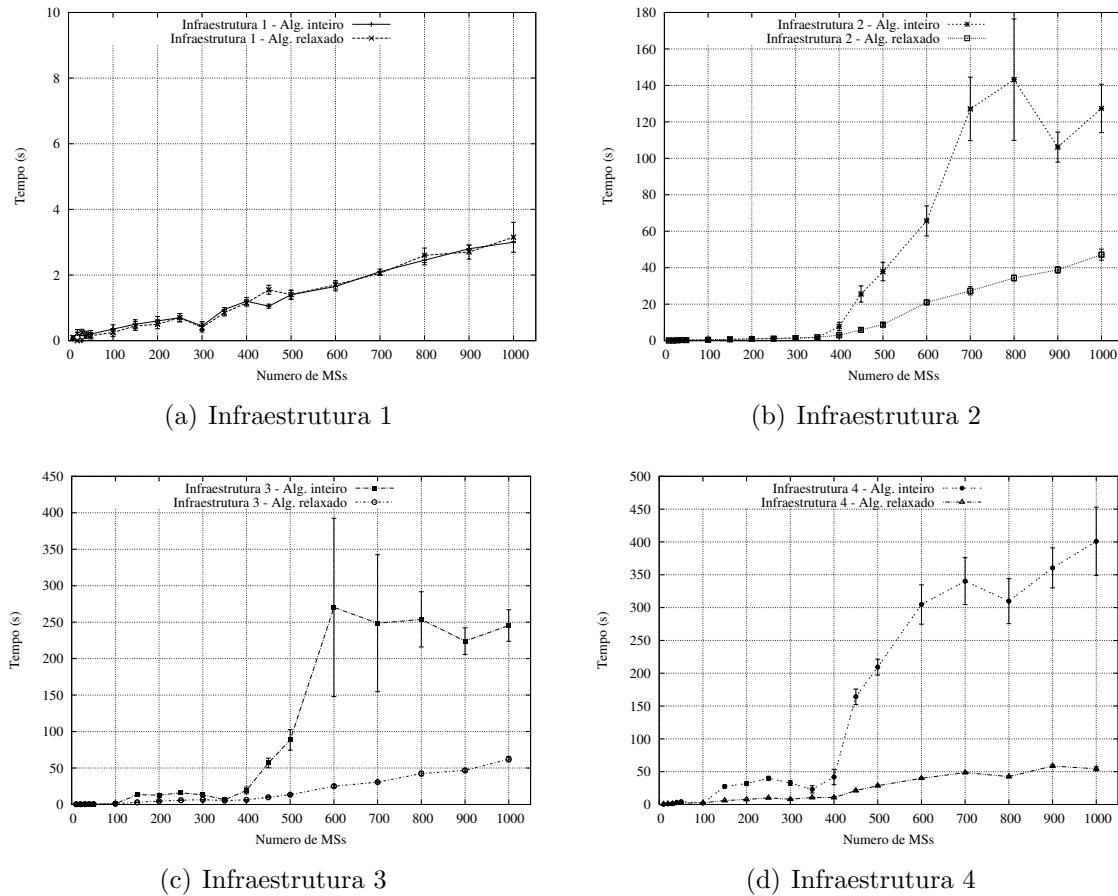


Figura 5.2: Tempo de execução do programa de minimização do número de BSs - algoritmos inteiros e relaxados

### 5.4.2 Maximização da receita

A figura 5.3 mostra a receita obtida pelo operador para os dois tipos de algoritmos (inteiro, apresentado na seção 4.5.3, e relaxado, correspondente ao *Algoritmo 2*). A figura 5.3 mostra os resultados obtidos com as *Infraestruturas 1 e 2*. Os resultados obtidos pelas *Infraestruturas 3 e 4* foram muito parecidas com a *Infraestrutura 2*. É possível, novamente, verificar a grande proximidade dos valores dos resultados obtidos com o algoritmo inteiro e relaxado.

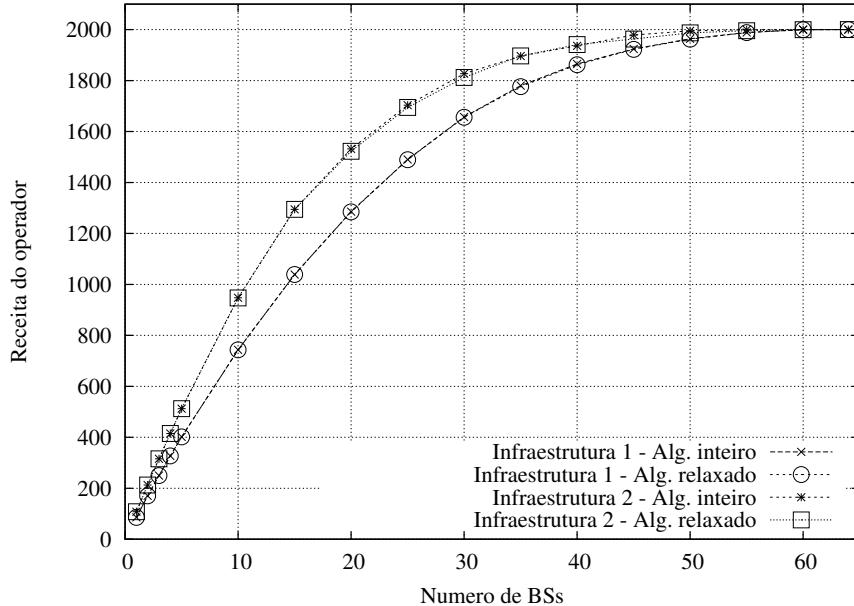


Figura 5.3: Receita do operador em função do número de BSs - algoritmos inteiros e relaxados

A figura 5.4 mostra o tempo de execução dos dois tipos de algoritmos para as 4 infraestruturas diferentes. Para todos os experimentos o tempo máximo de execução foi ajustado para 300 segundos.

A figura 5.4(a) apresenta os resultados da *Infraestrutura 1*. É possível verificar que o tempo de execução do algoritmo relaxado cresce linearmente e é maior do que o algoritmo inteiro para todos os cenários. Para esse tipo de infraestrutura de RAUs os algoritmos relaxados não trazem vantagem, dado que o tempo de execução do algoritmo inteiro é relativamente pequeno. A figura 5.4(b) apresenta os resultados da *Infraestrutura 2*. É possível verificar que o tempo de execução do algoritmo inteiro é maior do que o tempo do algoritmo relaxado para cenários com número de BSs entre 20 e 50. Esses cenários apresentam uma quantidade limitada de recursos de rádio (BSs) e uma grande quantidade de usuários, por isso a escolha da configuração ótima exige o teste de diferentes

configurações de rede. É mais difícil para o algoritmo inteiro atender o número máximo de usuários. Para cenários com grande número de recursos (mais do que 50 BSs) todos os usuários podem ser atendidos e o algoritmo de otimização consegue mais facilmente obter a configuração ótima da rede.

A figura 5.4(c) apresenta os resultados da *Infraestrutura 3*. É possível verificar que o tempo de execução do algoritmo inteiro é até 3 vezes maior do que o tempo do algoritmo relaxado para o cenário com 40 BSs. Para cenários com menos do que 10 BSs e com mais do que 50 BSs, porém, o inverso acontece.

Por fim, a figura 5.4(d) apresenta os resultados da *Infraestrutura 4*; um comportamento semelhante ao visto com a *Infraestrutura 3* pode ser notado. De uma forma geral o algoritmo relaxado exige um tempo de execução que cresce, de forma linearmente proporcional ao número de BSs na rede. Isso ocorre porque o algoritmo relaxado executa um problema de otimização linear para cada BSs existente na rede; assim, quanto mais BSs na infraestrutura, maior o tempo de execução do otimizador. Os algoritmos inteiros alcançam o tempo máximo estabelecido de 300 segundos e retornam soluções subótimas para os cenários em que existe um número limitado de recursos.

### 5.4.3 Minimização do número de BSs e maximização da receita

As figuras 5.5 a 5.7 apresentam os resultados do problema de otimização bicritério considerando os dois tipos de algoritmos (otimização inteira, apresentada no capítulo 4.5.4 e otimização relaxada, considerando o *Algoritmo 3*). Os resultados correspondem às *Infraestruturas 1, 2 e 3*, já que a *Infraestrutura 4* apresentou resultados muito similares aos da *Infraestrutura 3*. Os resultados ótimos são mostrados apenas com as curvas, sem os pontos, e correspondem às Fronteiras de Pareto das otimizações bicritério. Os resultados relaxados são mostrados através de pontos. Foram mostrados os resultados inteiros e relaxados para facilitar a comparação entre estes.

O cenário é o mesmo descrito na seção 4.5.4, com 500 MSs e 64 BSs. Os pesos  $\alpha$  da função objetivo variam entre 0 e 1 com passos de 0,5. Diferentemente dos resultados inteiros ótimos, os resultados obtidos com o algoritmo relaxado não apresentaram uma distribuição uniforme em torno da Fronteira de Pareto e em alguns casos ficaram muito distantes dos resultados ótimos. Todos os pontos acima das curvas não podem ser considerados Pareto-ótimos, pois está claro que é possível otimizar uma função objetivo sem afetar o resultado da outra.

A figura 5.5 mostra os resultados correspondentes à *Infraestrutura 1*. É possível verificar que os resultados relaxados são muito próximos aos resultados ótimos, dado que estão sobre as Fronteiras de Pareto.

A figura 5.6 mostra os resultados correspondentes à *Infraestrutura 2*. É possível verificar

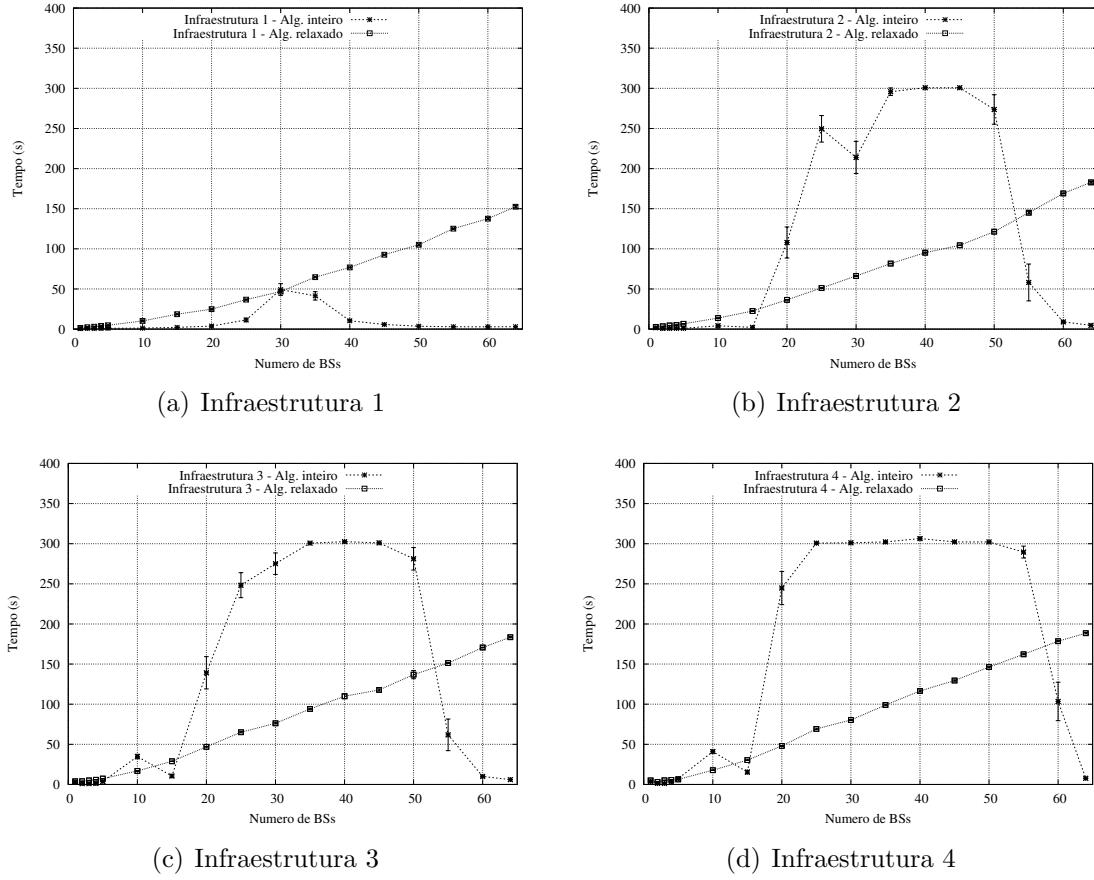


Figura 5.4: Tempo de execução do programa de maximização da receita do operador - algoritmos inteiros e relaxados

que os resultados relaxados também são muito próximos aos resultados ótimos, exceto para cenários com 400 e 500 MSs, onde os resultados relaxados ficaram localizados acima das Fronteiras de Pareto.

A figura 5.7 mostra os resultados correspondentes à *Infraestrutura 3*. É possível verificar que os cenários com mais de 200 MSs apresentam resultados relaxados piores do que os inteiros, mas essa diferença (distância entre os pontos e a Fronteira de Pareto) não é tão grande para a maioria dos casos, o que confirma a eficácia da Relaxação Linear, mesmo para a solução de problemas bicritério.

A figura 5.8 apresenta o tempo de execução da otimização bicritério, considerando os dois tipos de algoritmos. Considerando a *Infraestrutura 1* (figura 5.8(a)), pode-se verificar que o tempo necessário por ambos os tipos de algoritmos é bastante semelhante e muito pequeno.

A figura 5.8(b) mostra os resultados considerando a *Infraestrutura 2*. É possível

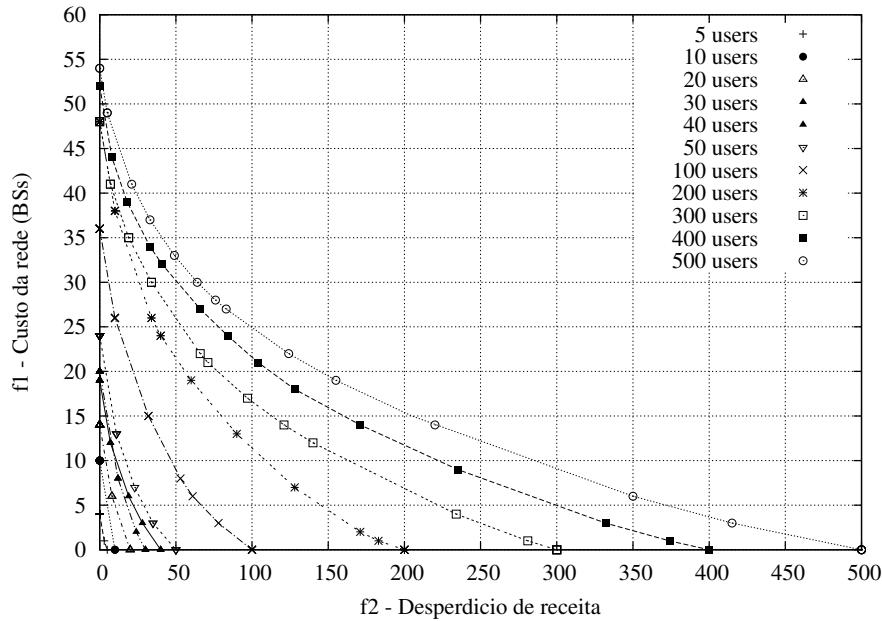


Figura 5.5: Fronteira Pareto de uma rede com até 500 MSs, usando a *Infraestrutura 1* - algoritmos inteiros e relaxados

verificar que para cenários com mais de 400 MSs o tempo requerido pelo algoritmo inteiro é cerca de 10 vezes maior do que o requerido pelo algoritmo relaxado. É fácil notar o grande intervalo de confiança obtido pelo algoritmo inteiro. No cálculo das médias, foram utilizados os tempos de duração da otimização para os diferentes valores de peso  $\alpha$  (entre 0 e 1). Foi possível averiguar que as otimizações com valores de  $\alpha$  próximos de 0 e de 1 demandaram pouquíssimo tempo, ao passo que as otimizações como valores de  $\alpha$  entre 0,3 e 0,7 demandaram grandes intervalos de tempo. Essa grande variação no tempo de execução dependendo do peso dado aos critérios de otimização mostra que a escolha de um critério predominante pode tornar a otimização da rede mais rápida e mais eficiente.

## 5.5 Conclusão

Os resultados obtidos com os algoritmos aleatórios baseados em Relaxação Linear e Arredondamento Aleatório apresentaram boas aproximações dos resultados inteiros ótimos, principalmente em cenários mais complexos. Para a minimização do número de BSs, os algoritmos aproximados apresentaram resultados muito próximos para as 4 infraestruturas diferentes e diminuição de tempo de execução de até 8 vezes. Para o problema de maximização da receita do operador a diminuição no tempo de execução foi de até 3 vezes em alguns cenários. Por fim, os resultados para a otimização bicritério também

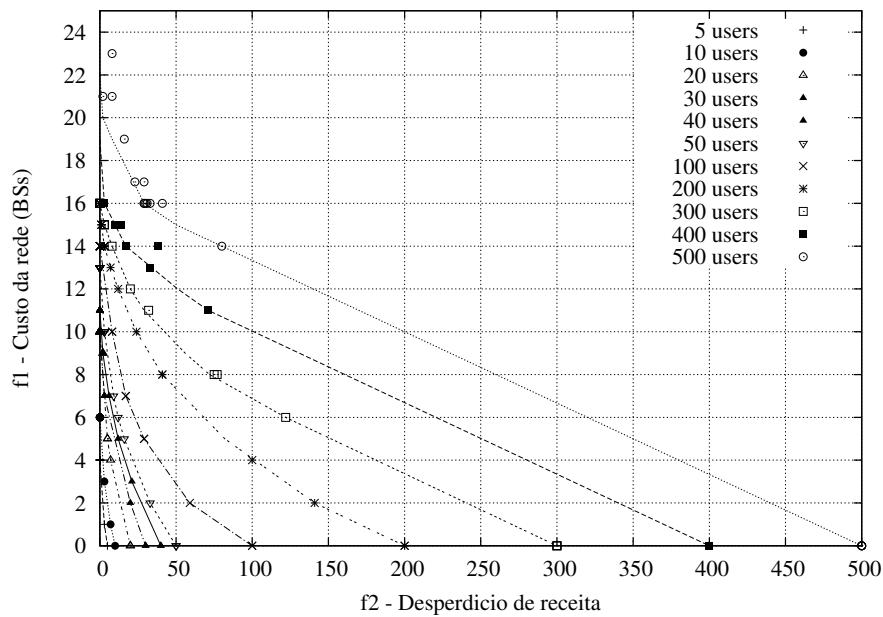


Figura 5.6: Fronteira Pareto de uma rede com até 500 MSs, usando a *Infraestrutura 2* - algoritmos inteiros e relaxados

foram bastante aproximados com os resultados ótimos para as infraestruturas mais simples. Considerando a *Infraestrutura 3* (e também a *Infraestrutura 4*), os resultados aproximados se distanciaram mais da fronteira de Pareto, mas a redução no tempo de execução do problema foi da ordem de até 15 vezes.

Os resultados demonstram que a relaxação do problema inteiro pode ser aplicada na otimização de recursos e, com isso, os resultados podem ser utilizados em redes dinâmicas que requeiram ajustes rápidos.

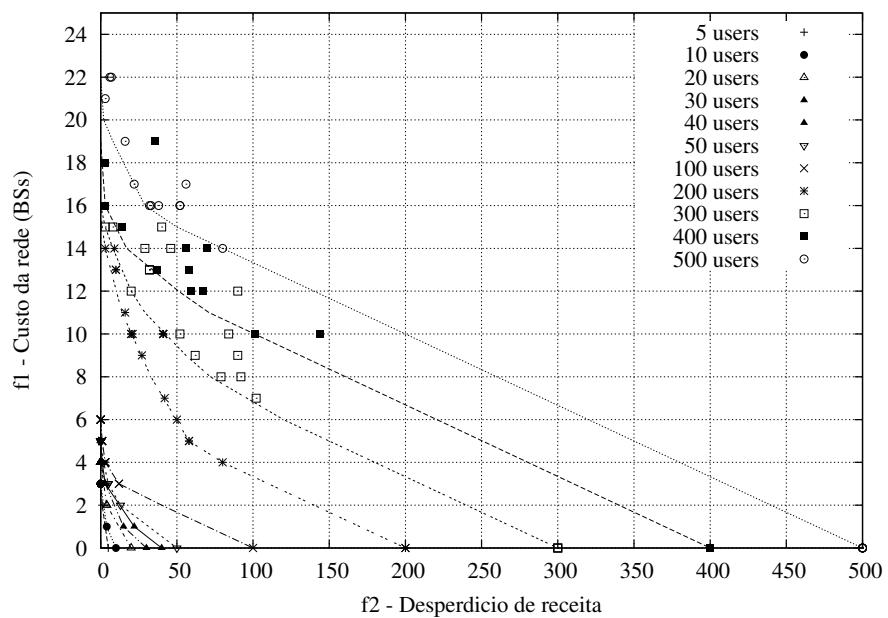


Figura 5.7: Fronteira Pareto de uma rede com até 500 MSs, usando a *Infraestrutura 3* - algoritmos inteiros e relaxados

---

**Algoritmo 1** Relaxação linear para minimização do número de BSs
 

---

**Entrada:**  $L$ : solução da programação linear (PL).

$Prob_{thr}$ : limiar de probabilidade para a escolha das MSs.

**Saída:**  $I$ : solução da programação linear inteira (PLI).

```

1: para cada camada  $l$  em ordem decrescente de raio faça
2:   para cada RAU  $r$  da camada  $l$  em ordem aleatória faça
3:     Encontrar a maior probabilidade  $x_{r,j,k}$ ,  $\forall j \in \mathcal{B}$  e  $\forall k \in \mathcal{C}$ 
4:     Sortear um valor real aleatório entre  $[0, 1]$ 
5:     se maior probabilidade  $(x_{r,j,k}) \geq$  valor sorteado então
6:       Adicionar a restrição  $x_{r,j,k} = 1$  e executar novamente a programação linear (PL)
7:       se novo problema é infactível então
8:         Remover a restrição  $x_{r,j,k} = 1$ 
9:         Adicionar a restrição  $\sum_{\forall p \in \mathcal{C}} \sum_{\forall o \in \mathcal{B}} x_{r,o,p} = 0$ 
10:      fim se
11:    senão
12:      Adicionar a restrição  $\sum_{\forall p \in \mathcal{C}} \sum_{\forall o \in \mathcal{B}} x_{r,o,p} = 0$  e executar novamente a programação linear (PL)
13:      se novo problema é infactível então
14:        Remover a restrição  $\sum_{\forall p \in \mathcal{C}} \sum_{\forall o \in \mathcal{B}} x_{r,o,p} = 0$ 
15:        Adicionar a restrição  $x_{r,j,k} = 1$ 
16:      fim se
17:    fim se
18:  fim para
19: fim para
20:  $sum_y \leftarrow$  quantidade de MSs já servidas pela programação linear (PL)
21: para  $i \leftarrow 0$ ; ( $sum_y < v.n$ ) e ( $i < n$ );  $i++$  faça
22:   se MS  $i$  não foi ainda servida então
23:     Encontrar uma RAU  $j$  aleatória tal que  $y_{i,j} \geq Prob_{thr}$ 
24:     se existe tal RAU  $j$  então
25:       Calcular a demanda agregada de todas as MSs já servidas pela RAU  $j$ 
26:       se capacidade da BS associada à RAU  $j$  suporta a demanda agregada mais  $d_i$  então
27:         Adicionar a restrição  $y_{i,j} = 1$ 
28:          $sum_y \leftarrow sum_y + 1$ 
29:       senão
30:         Adicionar a restrição  $\sum_{\forall l \in \mathcal{R}} y_{i,l} = 0$ 
31:       fim se
32:     senão
33:       Adicionar a restrição  $\sum_{\forall l \in \mathcal{R}} y_{i,l} = 0$ 
34:     fim se
35:   fim se
36: fim para
37: enquanto  $i < n$  faça
38:   Adicionar a restrição  $\sum_{\forall l \in \mathcal{R}} y_{i,l} = 0$ 
39:    $i \leftarrow i + 1$ 
40: fim enquanto
41: Executar novamente a programação linear (PL)
  
```

---

---

**Algoritmo 2** Relaxação linear para maximização da receita do operador
 

---

**Entrada:**  $L$ : solução da programação linear (PL).

$Prob_{thr}$ : limiar de probabilidade para a escolha das MSs.

**Saída:**  $I$ : solução da programação linear inteira (PLI).

```

1: Definir  $M'$  como uma lista de todas as MSs em ordem decrescente de classe de serviço ( $w$ )
2: Definir  $R'$  como um conjunto vazio {Este conjunto armazenará as RAUs já associadas na rede}
3: para cada MS  $i$  na lista  $M'$  faça
4:   Encontrar uma probabilidade  $y_{i,j}$ ,  $\forall j \in \mathcal{R}$  aleatória tal que  $y_{i,j} \geq Prob_{thr}$ 
5:   se probabilidade  $y_{i,j}$  foi encontrada então
6:     se RAU  $j$  já está no conjunto  $R'$  então
7:       Calcular a demanda agregada de todas as MSs já servidas pela RAU  $j$ 
8:       se capacidade da BS associada à RAU  $j$  suporta a demanda agregada mais  $d_i$  então
9:         Adicionar a restrição  $y_{i,j} = 1$ 
10:        senão
11:          Adicionar a restrição  $\sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} = 0$ 
12:        fim se
13:      senão
14:        Encontrar a maior probabilidade  $x_{j,k,l}$ ,  $\forall k \in \mathcal{B}$  e  $\forall l \in \mathcal{C}$ 
15:        se capacidade  $c_k$  suporta  $d_i$  então
16:          Adicionar a restrição  $x_{j,k,l} = 1$ 
17:          Adicionar a restrição  $y_{i,j} = 1$ 
18:          Executar novamente a programação linear (PL)
19:          se novo problema é infactível então
20:            RemoverDefine a restrição  $x_{j,k,l} = 1$ 
21:            Remover a restrição  $y_{i,j} = 1$ 
22:            Adicionar a restrição  $\sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} = 0$ 
23:            senão
24:              Adicionar a RAU  $j$  no conjunto  $R'$ 
25:            fim se
26:          fim se
27:        fim se
28:      senão
29:        Adicionar a restrição  $\sum_{j \in \mathcal{R}} y_{i,j} = 0$ 
30:      fim se
31:    fim para
32:  para todas RAUs  $i$  não incluídas no conjunto  $R'$  faça
33:    Adicionar a restrição  $\sum_{\forall p \in \mathcal{C}} \sum_{\forall o \in \mathcal{B}} x_{i,o,p} = 0$ 
34:  fim para
35: Executar novamente a programação linear (PL)
  
```

---

---

**Algoritmo 3** Relaxação linear para minimização do número de BSs e maximização da receita do operador
 

---

**Entrada:**  $L$ : solução da programação linear (PL).

$Prob_{thr}$ : limiar de probabilidade para a escolha das MSs.

**Saída:**  $I$ : solução da programação linear inteira (PLI).

```

1: Definir  $M'$  como uma lista de todas as MSs em ordem decrescente de classe de serviço ( $w$ )
2: para cada camada  $l$  em ordem decrescente de raio faca
3:   para cada RAU  $r$  da camada  $l$  em ordem aleatória faca
4:     Sortear um valor real aleatório entre  $[0, 1]$ 
5:     Encontrar a maior probabilidade  $x_{r,j,k}$ ,  $\forall j \in \mathcal{B}$  e  $\forall k \in \mathcal{C}$ 
6:     se maior probabilidade  $(x_{r,j,k}) \geq$  valor sorteado então
7:       Adicionar a restrição  $x_{r,j,k} = 1$  e executar novamente a programação linear (PL)
8:       se novo problema é infactível então
9:         Remover a restrição  $x_{r,j,k} = 1$ 
10:        Adicionar a restrição  $\sum_{\forall p \in \mathcal{C}} \sum_{\forall o \in \mathcal{B}} x_{r,o,p} = 0$ 
11:      fim se
12:    senão
13:      Adicionar a restrição  $\sum_{\forall p \in \mathcal{C}} \sum_{\forall o \in \mathcal{B}} x_{r,o,p} = 0$  e executar novamente a programação linear (PL)
14:      se novo problema é infactível então
15:        Remover a restrição  $\sum_{\forall p \in \mathcal{C}} \sum_{\forall o \in \mathcal{B}} x_{r,o,p} = 0$ 
16:        Adicionar a restrição  $x_{r,j,k} = 1$ 
17:      fim se
18:    fim se
19:    se a nova RAU não foi associada na iteração atual então
20:      para todas as MSs na lista  $M'$  faca
21:        Encontrar a maior probabilidade  $y_{i,j}$   $\forall j \in \mathcal{R}$ 
22:        se maior probabilidade  $(y_{i,j}) \geq Prob_{thr}$  então
23:          Adicionar a restrição  $y_{i,j} = 1$ 
24:          Remover a MS  $i$  da lista  $M'$ 
25:        fim se
26:      fim para
27:    fim se
28:  fim para
29: fim para
30: Executar novamente a programação linear (PL)
  
```

---

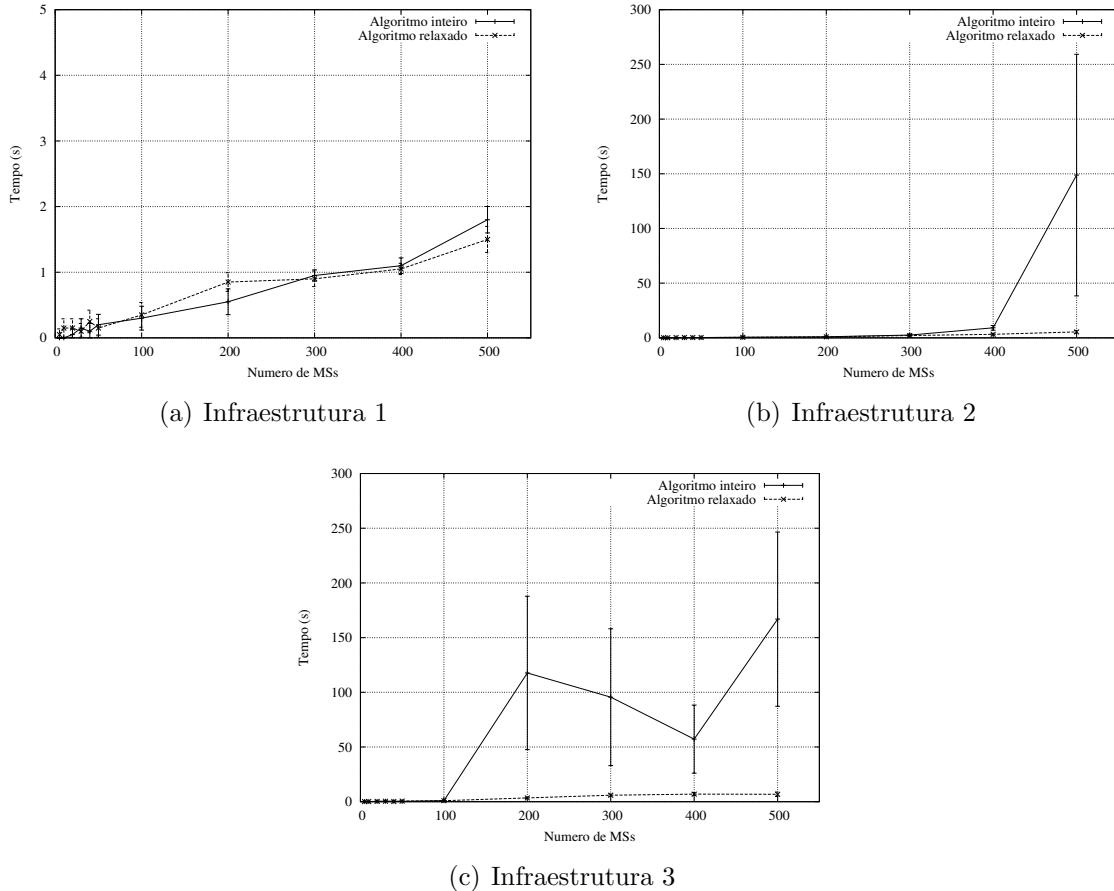


Figura 5.8: Tempo de execução do programa de otimização bicritério - algoritmos inteiros e relaxados



# Capítulo 6

## Conclusões

Esta dissertação estudou o planejamento e otimização de recursos em redes sem fio baseadas em Rádio sobre Fibra. É cada vez mais comum a necessidade de redes de acesso sem fio com alta capacidade e mobilidade. Desenvolver essas redes sem fio de próxima geração com um custo baixo é um dos grandes desafios a serem enfrentados pela indústria e o RoF é uma tecnologia que é uma alternativa viável para a viabilização de infraestrutura eficiente e barata para tais redes. Para utilizar o RoF em conjunto com redes sem fio de banda larga alguns problemas precisam ser estudados, como o correto dimensionamento dos parâmetros dos protocolos de alto níveis para a acomodação da fibra óptica no meio de transmissão dos sinais. Além disso, a oportunidade de otimizar o uso dos recursos rádio com o emprego do RoF torna necessário o estudo de algoritmos para a otimização desses sistemas.

Nesta dissertação, foram explorados 3 problemas específicos relacionados com redes sem fio WiMAX e arquitetura RoF. Foi realizado um estudo sobre os impactos causados pela arquitetura de RoF em redes WiMAX com relação às temporizações dos protocolos do IEEE 802.16, incluindo parâmetros da camada física e de controle de acesso ao meio (MAC). Foi apresentado também um modelo para a otimização de recursos de rádio em redes baseadas em RoF; foi proposta uma arquitetura de RoF baseada em uma hierarquia de RAUs, que permite implantar células com diferentes raios de cobertura. Por fim, foram propostos algoritmos aproximados para a otimização dos sistemas RoF em curtos intervalos de tempo; as propostas foram baseadas em Relaxação Linear e apresentaram resultados promissores com grande diminuição do tempo de otimização.

Com relação às medidas de desempenho das redes WiMAX com o RoF, foi possível observar perdas de cerca de 20% de desempenho na camada de aplicação com extensão de até 80 km de fibra. Foi mostrado também que os diferentes valores de prefixo cíclico podem ser utilizados para tornar a rede robusta contra ISI com células de diferentes tamanhos, quando duas ou mais RAUs irradiam o mesmo sinal, tanto em células de

pequenas dimensões (picocéulas), quanto em células de grandes dimensões (macrocéulas).

Com os resultados obtidos a partir do modelo de otimização de RoF proposto, foi possível concluir que o melhor custo-benefício entre os resultados e o esforço computacional pode ser obtido com duas camadas de RAUs. Um grande número de recursos puderam ser salvos quando se considerou a primeira função objetivo e a maior parte dos usuários pôde ser servida quando se considerou a segunda função objetivo. Os resultados da otimização bicritério (fronteira de Pareto) apresentaram o melhor compromisso entre as duas últimas funções objetivo.

Os resultados obtidos com os algoritmos aproximados baseados em Relaxação Linear e Arredondamento Aleatório apresentaram boas aproximações dos resultados inteiros ótimos. Para a minimização do número de BSs, por exemplo, os resultados obtidos foram muito próximos para as 4 infraestruturas e a diminuição de tempo foi de até 8 vezes. Para o problema de maximização da receita a diminuição no tempo de execução foi de até 3 vezes em alguns cenários. Por fim, os resultados para a minimização do número de BSs juntamente com a maximização da receita também foram bastante aproximados com os resultados ótimos para a maioria das infraestruturas.

## 6.1 Trabalhos futuros

Pode-se sugerir a modificação do modelo de otimização proposto para levar em consideração mais características da rede e alcançar outros objetivos de otimização não explorados nessa dissertação. É possível, por exemplo, incluir o custo da infraestrutura óptica da rede, que no modelo atual não é incluído. O custo com instalação de fibras de longa extensão e equipamentos repetidores pode modificar as configurações ótimas da rede, ou até mesmo inviabilizar o projeto do RoF. Esses aspectos são importantes de serem modelados e tratados. É possível ainda incluir a questão de múltiplas modulações no uso do WiMAX e, com isso, otimizar a distribuição dos usuários móveis nos diferentes círculos de cobertura das células. Outras questões importantes são a adoção de uma tecnologia real e a adaptação do modelo de otimização para o funcionamento desta.

Uma questão que, atualmente, é muito importante e tem sido tratada cada vez mais na academia é a Comunicação Verde (*Green Communication*) [12]. As redes de telefonia celular e de dados 3G apresentam um grande consumo de energia e podem produzir grande quantidade de poluentes, já que algumas destas possuem Estações Base com geradores movidos a diesel. A eficiência energética das redes sem fio vem sendo estudada cada vez mais e a arquitetura de RoF pode auxiliar nessa tarefa, já que reduz o número de células das redes e consegue de forma dinâmica otimizar o uso dos recursos. Um ponto muito interessante que pode ser tratado com base nessa dissertação é a implantação do modelo de otimização com outras restrições e com funções objetivo que maximizem a eficiência

energética da rede, considerando o custo de operação e o consumo de energia das BSs.

É interessante, também, o desenvolvimento de outros algoritmos baseados em heurísticas ou metaheurísticas que otimizem o tempo de execução da otimização e que foquem na solução de redes móveis. Os princípios dos algoritmos genéticos podem ser aplicados na otimização para que as tomadas de decisões levem em consideração a dinamicidade da rede e para que os algoritmos aprendam o padrão de mobilidade dos usuários.



# Referências Bibliográficas

- [1] FICO XPress Optimization Suite 7 - <http://www.fico.com/en/Products/DMTools/Pages/FICO-Xpress-Optimization-Suite.aspx>.
- [2] IEEE 802.16-2004 - Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.
- [3] IEEE 802.16e-2005 - Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems - Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands.
- [4] The Network Simulator - ns-2 - <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [5] Wikipedia, the free encyclopedia - 2.5G - <http://en.wikipedia.org/wiki/2.5G>.
- [6] Wikipedia, the free encyclopedia - Ubiquitous Computing - [http://en.wikipedia.org/wiki/Ubiquitous\\_computing](http://en.wikipedia.org/wiki/Ubiquitous_computing).
- [7] WiMAX Forum Mobile System Profile - Release 1.0 Approved Specification (Revision 1.7.1: 2008-11-07).
- [8] WiMAX Forum Mobile System Profile Specification: Release 1.5 Common Part (Revision 0.2.1: 2009-02-02).
- [9] The Network Simulator ns-2 NIST add-on - IEEE 802.16 model (MAC+PHY) - [www.nist.gov/itl/antd/emntg/upload/wimax\\_module.pdf](http://www.nist.gov/itl/antd/emntg/upload/wimax_module.pdf), 2009.
- [10] R Aharoni, P Erdős, and N Linial. Dual integer linear programs and the relationship between their optima. In *Proceedings of the seventeenth annual ACM symposium on Theory of computing - STOC '85*, pages 476–483, New York, New York, USA, 1985. ACM Press.
- [11] H. Al-Raweshidy and S. Komaki. *Radio Over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks*. Artech House, 2002.

- [12] Ashwin Amanna. Green Communications- Annotated Literature Review and Research Vision. Technical report, Virginia Tech, 2009.
- [13] J. G. Andrews. *Fundamentals of WiMAX : understanding broadband wireless networking*. Pearson Education, 2007.
- [14] A.J. Cooper. Fibre/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network. *Electronics Letters*, 26:2054, 1990.
- [15] Bao Linh Dang, M. Garcia Larrode, R. Prasad, Ignas Niemegeers, and A Koonen. Radio-over-fiber based architecture for seamless wireless indoor communication in the 60ghz band. *Computer Communications*, 30:3598–3613, December 2007.
- [16] Bao Linh Dang and Ignas Niemegeers. Analysis of IEEE 802.11 in Radio over Fiber Home Networks. In *The IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary (LCN'05)*, pages 744–747. IEEE, 2005.
- [17] Bao Linh Dang, R. Venkatesha Prasad, and Ignas Niemegeers. On the MAC protocols for Radio over Fiber indoor networks. In *2006 First International Conference on Communications and Electronics*, pages 112–117. IEEE, October 2006.
- [18] Anjali Das, Majlinda Mjeku, Anthony Nkansah, and Nathan J Gomes. Effects on IEEE 802.11 MAC Throughput in Wireless LAN Over Fiber Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 25:3321–3328, 2007.
- [19] Petar Djukic, Halim Yanikomeroglu, and Jietao Zhang. User-centric RRM and Optimizable Protocol Design for beyond-4G RANs. In *Proceedings of Wireless World Research Forum Meeting 22 (WWRF22)*, pages 1–5, Paris - France, 2009. Carleton University - Canada.
- [20] N. Feng, S.-C. Mau, and N.B. Mandayam. Joint Network-Centric and User-Centric Radio Resource Management in a Multicell System. *IEEE Transactions on Communications*, 53(7):1114–1118, July 2005.
- [21] István Frigyes. Radio over fiber: application, basic design and impact on resource management. In *Budapest University of Technology and Economics*.
- [22] Nathan J. Gomes, Maria Morant, Arokiaswami Alphones, Béatrice Cabon, John E. Mitchell, Christophe Lethien, Mark Csörnyei, Andreas Stöhr, and Stavros Iezekiel. Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services [Invited]. *Journal of Optical Networking*, 8(2):156, 2009.

- [23] Pedro Henrique Gomes, Nelson L. S. da Fonseca, and Omar C. Branquinho. Analysis of performance degradation in Radio-over-Fiber systems based on IEEE 802.16 protocol. In *2009 IEEE Latin-American Conference on Communications*, pages 1–6. IEEE, September 2009.
- [24] Pedro Henrique Gomes, Nelson L. S. da Fonseca, and Omar C. Branquinho. Fast Algorithms for Resource Allocation in Radio-Over-Fiber Access Networks. In *2010 IEEE Latin-American Conference on Communications*, pages 1–6. IEEE, sep 2010.
- [25] Pedro Henrique Gomes, Nelson L. S. da Fonseca, and Omar C. Branquinho. Latin-Con04 - Analysis of Performance Degradation in Radio-Over-Fiber Systems Based on IEEE 802.16 Protocol. *IEEE Latin America Transactions*, 8(4):377–384, aug 2010.
- [26] Pedro Henrique Gomes, Nelson L. S. da Fonseca, and Omar C. Branquinho. Optimization of the use of Radio Resource of Radio-Over-Fiber Access Networks. In *IEEE Global Communications Conference 2010*, pages 1–5, Miami, 2010.
- [27] Pedro Henrique Gomes, Nelson L. S. da Fonseca, and Omar C. Branquinho. Otimização de Recursos Rádio para Redes de Acesso Sem Fio baseadas em Rádio sobre Fibra. In *WPerformance 2010 - IX Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*, pages 1–14, Belo Horizonte, 2010.
- [28] Pedro Henrique Gomes, Nelson L. S. da Fonseca, and Omar C. Branquinho. Bi-criteria Optimization of Radio Resources for Radio-Over-Fiber Access Networks (aceito para publicação). In *ICC 2011 - 2011 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, jun 2011.
- [29] Pedro Henrique Gomes, Nelson L. S. da Fonseca, and Omar C. Branquinho. Fast Algorithms for Resource Allocation in Radio-Over-Fiber Access Networks (aceito para publicação). *IEEE Latin America Transactions*, 2011.
- [30] Pedro Henrique Gomes, Nelson L. S. da Fonseca, and Omar C. Branquinho. Otimização Bicritério de Recursos para Redes Sem Fio de Acesso e Rádio sobre Fibra (aceito para publicação). In *SBRC 2011 - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Campo Grande, 2011.
- [31] Pedro Henrique Gomes, Dzmitry Kliazovich, Fabrizio Granelli, and Nelson L. S. da Fonseca. A Novel Queue Management Architecture for Improving TCP fairness in Wireless Access Networks. In *SBRC 2010 - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 1–14, Gramado, 2010.

- [32] B Kalantari-sabet, M Mjeku, N J Gomes, and J E Mitchell. Performance Impairments in Single-Mode Radio-Over-Fiber Systems Due to MAC Constraints. *Journal of Lightwave Technology*, 26:2540–2548, 2008.
- [33] B Kalantarisabet and J. Mitchell. MAC Constraints on the Distribution of 802.11 using Optical Fibre. pages 238–240. IEEE, September 2006.
- [34] Hong Bong Kim, M. Emmelmann, B. Rathke, and A. Wolisz. A Radio over Fiber Network Architecture for Road Vehicle Communication Systems. *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, pages 2920–2924, 2005.
- [35] Hong Bong Kim, Hagen Woesner, and Adam Wolisz. A Medium Access Control Protocol for Radio over Fiber Wireless LAN operating in the 60-GHz Band. *Computer Engineering*, pages 204–208, 2003.
- [36] Hoon Kim, Jae Hun Cho, Sangho Kim, Ki uk Song, Hanlim Lee, Jaehoon Lee, Byungjik Kim, Yunje Oh, Jaekon Lee, and Seongtaek Hwang. Radio-Over-Fiber System for TDD-Based OFDMA Wireless Communication Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 25:3419–3427, 2007.
- [37] Dzmitry Kliazovich, Pedro Henrique Gomes, Fabrizio Granelli, and Nelson L. S. da Fonseca. Receiver-Driven Queue Management for analisados Achieving RTT-Fairness in Wi-Fi Networks. In *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1–6. IEEE, nov 2009.
- [38] J.-Y. Le Boudec and M. Vojnovic. Perfect simulation and stationarity of a class of mobility models. In *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pages 2743–2754. IEEE, 2005.
- [39] Kwansoo Lee. Radio over Fiber for Beyond 3G. In *Proceedings of the International Topical Meeting on Microwave Photonics*, pages 9–10, 2005.
- [40] Rudolf Mathar and Thomas Niessen. Optimum positioning of base stations for cellular radio networks. *Wirel. Netw.*, 6(6):421–428, 2000.
- [41] Alain Mourad and Ismael Gutierrez. System level evaluation for WiMAX IEEE 802.16m. In *2009 IEEE 28th International Performance Computing and Communications Conference*, pages 418–424. IEEE, dec 2009.
- [42] T. Niiho, M. Nakaso, K. Masuda, H. Sasai, K. Utsumi, and M. Fuse. Transmission performance of multichannel wireless LAN system based on radio-over-fiber techniques. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(2):980–989, feb 2006.

- [43] L. Nuaymi. *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*. John Wiley & Sons, 2007.
- [44] Prabhakar Raghavan and Clark D. Tompson. Randomized rounding: A technique for provably good algorithms and algorithmic proofs. *Combinatorica*, 7(4):365–374, dec 1987.
- [45] Suman Sarkar, Biswanath Mukherjee, and Sudhir Dixit. Optimum Placement of Multiple Optical Network Units (ONUs) in Optical-Wireless Hybrid Access Networks. In *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, 2006.
- [46] Suman Sarkar, Biswanath Mukherjee, and Sudhir Dixit. Towards Global Optimization of Multiple ONU Placement in Hybrid Optical-Wireless Broadband Access Networks. In *Proceedings of the Joint International Conference on Optical Internet and Next Generation Network*, pages 65–67. IEEE, 2006.
- [47] Gangxiang Shen and Rodney Tucker. Fixed mobile convergence (FMC) architectures for broadband access: integration of EPON and WiMax. Number August, pages 678403–678403–13. SPIE, 2007.
- [48] P P Smyth. Optical radio - a review of a radical new technology for wireless access infrastructure. *BT Technology Journal*, 21, 2003.
- [49] El-Ghazali Talbi. *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons, 2009.
- [50] Jun Tang, Xinyu Jin, Yu Zhang, Xianmin Zhang, and Wenyu Cai. A Hybrid Radio Over Fiber Wireless Sensor Network Architecture. In *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pages 2675–2678. IEEE, sep 2007.
- [51] Neal E. Young. Randomized rounding without solving the linear program. In *Proceedings of the sixth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, SODA '95, pages 170–178, Philadelphia, PA, USA, 1995. Society for Industrial and Applied Mathematics.