



Ricardo Apolinario Calzada Correa

**Reuso de Frequência Fracionário e Avaliação de
Algoritmos de Agendamento em Femto-Células
LTE**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. José Roberto Boisson De Marca

Rio de Janeiro
Setembro de 2013



Ricardo Apolinario Calzada Correa

Reuso de Frequência Fracionário e Avaliação de Algoritmos de Agendamento em Femto-Células LTE

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Roberto Boisson De Marca

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Gláucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações — PUC-Rio

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Centro de Estudos em Telecomunicações — PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de Setembro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Ricardo Apolinario Calzada Correa

Graduou-se em Engenharia Eletrônica na Universidade Nacional Maior de San Marcos (Lima, Perú), obtendo o primeiro lugar na sua graduação. Trabalhou em International Business Machines (IBM) como foco em tecnologias da informação e posteriormente trabalhou em empresas de telecomunicações orientado a tecnologias móveis

Ficha Catalográfica

Correa, Ricardo Apolinario Calzada

Reuso de Frequência Fracionário e Avaliação de Algoritmos de Agendamento em Femto-Células LTE / Ricardo Apolinario Calzada Correa; orientador: José Roberto Boisson De Marca. — 2013.

80 f. : il. (Color) ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Reuso fracionário. 3. Algoritmos de agendamento. 4. Intervalo de tempo de transmissão. 5. Qualidade do canal. 6. Requisitos de QoS. I. Marca, José Roberto Boisson de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Agradecer a Deus por todas as bênçãos e coisas boas que coloca em meu caminho e da minha família.

Aos meus amados pais, Agustina e Apolinario. Minha mãe fonte inesgotável de amor desmedido e doçura que faz minha vida colorida. Meu pai diretriz da minha personalidade, meu estilo, meu ímpeto no bom sentido e fundador de esta sede implacável de ir sempre para frente ante qualquer cenário. Vocês são a razão das minhas razões.

Às minhas adoradas irmãs, Gisella e Kelly, por suas mostras de amor, ajuda, bons desejos e continua incentivo em minha formação. Que maravilhoso é compartilhar minha vida com vocês.

Aos meus sobrinhos, por acreditar em mim desde o começo e estar sempre atentos as minhas solicitações.

Ao meu professor Orientador, Roberto Boisson, por aceitar-me como orientado e compartilhar sua afinada visão da tecnologia.

Aos meus professores do CETUC, pelo conhecimento outorgado e pela sua amizade, em particular para o professor Jose Mauro.

Aos meus inúmeros amigos que criei nesta etapa acadêmica, em especial a meus amigos e amigas Brasileiras, que fazem minha estadia bom demais e que são os culpáveis que este maravilhoso país, Brasil, fiquei no meu coração. Obrigado me fazem sentir em casa.

À minha secretaria de pos-graduação Alcina Portes, por sua disposição e eficiência para gestionar minha documentação.

Aos meus amigos da graduação em Perú, por seus constantes interesses no desenvolvimento da minha dissertação e incentivos para continuar crescendo.

Resumo

Correa, Ricardo Apolinario Calzada; Marca, José Roberto Boisson de(Orientador). **Reuso de Frequência Fracionário e Avaliação de Algoritmos de Agendamento em Femto-Células LTE**. Rio de Janeiro, 2013. 80p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O desenvolvimento de ambientes femto-celulares traz um considerável aumento geral na capacidade de sistemas heterogêneos, porque a distância entre o transmissor e receptor é pequena em comparação ao clássico desenvolvimento macro-celular. Mas as aplicações e serviços que estão vindo, precisam de ainda mais capacidade. Na procura desse ganho na capacidade, se criam técnicas e procedimentos que trabalham principalmente na camada física e MAC. Entre elas temos o reuso de frequência unitário, o qual não se logra explodir toda a capacidade do sistema, por isso implementamos o reuso de frequência fracionário que encara diretamente os problemas de interferência *co-layer* (entre femto-estações) e *cross-layer* (entre macro e femto estações). Este reuso fracionário de frequência se dá só a nível de femto-estações, deixando à macro-estação que utilize toda a banda de frequência atribuída para a macro-célula. Os claros resultados obtidos no nível do SINR, mostram as melhoras. Tomando como base a plataforma anterior de reuso fracionário, analisamos as estratégias de programação do recurso frente a uma aplicação de vídeo. As estratégias pesquisadas são classificadas em: aquelas que tomam em consideração a qualidade do canal e aquelas que além da qualidade do canal consideram dentro da sua métrica requerimentos QoS, em especial o retardo máximo. Estas últimas são as mais adequadas quando se opera com aplicações de tempo real (vídeo conferência e VoIP). Para contemplar a faixa de funcionamento das melhoras obtidas, todos os cenários de simulação foram submetidos a três intensidades de tráfego (leve,médio e pesado). Medidas feitas da vazão, retardo, perda de pacotes e níveis de justiça na repartição mostram os benefícios do efeito combinado do reuso fracionário como o algoritmo de programação utilizado. Com os resultados obtidos fazemos uma escolha do padrão de reuso mais adequado junto com o algoritmo que proporcionam o melhor rendimento, dependendo do cenário (familiares ou empresariais) e da aplicação a utilizar.

Palavras-chave

Reuso fracionário; Algoritmos de agendamento; Intervalo de tempo de transmissão; Qualidade do canal; Requisitos de QoS;

Abstract

Correa, Ricardo Apolinario Calzada; Marca, José Roberto Boisson de(Adviser). **Fractal Frequency Reuse and Evaluation of Scheduling Algorithms in Femtocells LTE**. Rio de Janeiro, 2013. 80p. MsC Thesis — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The development of femtocells environments brings a considerable increase in the capacity of the heterogeneous systems, because the distance between the transmitter and the receptor is smaller than the classic macrocell development. But the applications and services that are coming need more capacity yet. Looking for that gain of capacity, has been created techniques and methods that work mainly in the physical and MAC layer. Among them, the unitary frequency reuse, that does not achieve to exploit all the system's capacity. Hence we have implemented the fractional frequency reuse that aim directly the problems of co-layer interference (Between femto base stations) and cross-layer interference (Between macro and femto base stations). This fractional reuse of frequency is only among femto-stations, leaving the macro-station that use all the frequency band given for the macro cell. The bright results obtained in the SINR level show the improvements. Based on previous platform of fractional reuse, we analyze the scheduling strategies of the resource with a video application. The studied strategies are classified in: those that consider the quality of the channel and those that beyond the quality of channel consider QoS requirements in its metric, specially the maximum delay time. The last are more adequate when operating with video applications in real time (Video conference, VoIP). To see the operating range of the obtained improvements, all the simulation scenarios were submitted to three intensities of traffic (light, medium and heavy). Measurements of throughput, delay, packet loss ratio and fair levels in the distribution show the benefits of the joint effects of the fractional reuse as the scheduling algorithm used. With the obtained results, we do a selection of the more adequate reuse pattern together with the algorithm that provides the best performance, depending of the scenario (home or business environment) and the applications to use.

Keywords

Fractional reuse; Scheduling algorithms; Transmission time interval; Quality of channel; QoS requirement;

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivo	16
1.2	Contribuições da pesquisa	16
1.3	Organização do Texto	16
2	Visão geral de uma Rede LTE	18
2.1	Arquitetura do Sistema e Rede de acesso de Radio	19
2.2	Administração da Radio portadora e pilha de protocolos	20
2.3	Camada física LTE-A	21
2.4	Administração dos Recursos de Radio	22
3	Ambiente femto-Celular, benefícios e desafios	25
3.1	Benefícios	25
3.2	Desafios	26
4	Reuso de Frequência Fracionário	29
4.1	Cenários de reuso frequência entre a eNB e a HeNB	31
5	Algoritmos de Agendamento em Sistemas LTE	35
5.1	Principais aspectos de projeto	37
5.2	Estratégias de agendamento para o Enlace de descida LTE	39
6	Ambiente de Simulação e resultados	45
6.1	Ambiente de Simulação	45
6.2	Modelo do Canal e resultados da avaliação do SINR	49
6.3	Resultado obtidos para os algoritmos avaliados	56
7	Conclusão e trabalhos futuros	77

Lista de figuras

2.1	Arquitetura de uma rede com HeNB's	19
2.2	Estrutura do quadro LTE-A	22
2.3	Interação das principais características para a administração do recurso de radio	23
2.4	Estrutura do sub-quadro LTE Downlink para o caso de 3 símbolos OFDM dedicados para o canal de controle	24
3.1	Cenários de Interferências	27
4.1	Tipos de reuso de frequência. a) Reuso unitário, b) Reuso fracionário e C) Reuso com perfil de faixa de potência (Figura 2 de (4))	30
4.2	Reuso de frequência de 1 entre a eNB e a HeNB	31
4.3	Divisão da banda de frequência entre a eNB e a HeNB	32
4.4	Frequência de reuso 1 atenuada	32
4.5	Reuso de frequência fracionário entre HeNBs. A) Reuso de frequência de 1. B) Reuso de frequência de 1/2. C) Reuso de frequência de 1/3. C) Reuso de frequência de 1/4.	33
5.1	Modelo simplificado de um agendador de pacotes	37
5.2	Quadro estrutural das estratégias de agendamento	39
5.3	Algoritmo de agendamento de dois níveis	44
6.1	Topologias de edificação para operação de HeNB pela 3GPP. A) Blocos de duas bandas B) Grade de apartamentos 5x5	46
6.2	Ubicação das edificações e da eNB	46
6.3	Cenário com 12 Usuários dentro da edificação	47
6.4	Cenário com 120 usuários dentro da edificação	47
6.5	Nível do SINR quando os 120 femto-Usuários são ligados diretamente à macro estação	51
6.6	Nível do SINR quando os 120 femto-Usuários são ligados diretamente à macro estação	51
6.7	Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1$	52
6.8	Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1$	52
6.9	Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1/2$	53
6.10	Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1$	53
6.11	Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1/3$	54
6.12	Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1$	54
6.13	Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1/4$	55
6.14	Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1$	55
6.15	Comportamento da Vazão agregada para uma carga de tráfego de 1 vídeo por usuário quando se empregam os algoritmos PF, M-LWDF e FLS	57
6.16	Comportamento da Vazão agregada para uma carga de tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	59

6.17	Comportamento da Vazão agregada para uma carga de tráfego de 5 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	60
6.18	Vazão agregada para um tráfego de 5 vídeos por usuário	61
6.19	Comportamento da Vazão média por usuário para uma carga de tráfego de 1 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	62
6.20	Comportamento da Vazão média por usuário para uma carga de tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	63
6.21	Vazão média por usuário para um tráfego de 5 vídeos por usuário	64
6.22	Tempo de retardo para uma carga de tráfego de 1 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	66
6.23	Tempo de retardo para uma carga de tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	67
6.24	Tempo de retardo para uma carga de tráfego de 5 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) Panorâmico (B) Acercamento	68
6.25	Comportamento da Vazão qualificada para uma carga de tráfego de 1 vídeo por usuário quando se empregam os algoritmos PF, M-LWDF e FLS	69
6.26	Comportamento da Vazão qualificada para uma carga de tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	70
6.27	Comportamento da Vazão qualificada para uma carga de tráfego de 5 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	71
6.28	Perda de pacotes quando se tem um tráfego de 1 vídeo por usuário para os algoritmos PF, M-LWDF e FLS	73
6.29	Perda de pacotes quando se tem um tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	74
6.30	Perda de pacotes quando se tem um tráfego de 5 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS	75
6.31	Índice de justiça quando se tem um tráfego de 5 vídeos por usuário	76

Lista de tabelas

2.1	Principais objetivos de rendimento de uma Rede LTE	18
4.1	Configuração da banda de transmissão e número de recursos disponíveis em um sistema LTE	34
4.2	Quantidade de blocos de recurso em função ao padrão de reuso de frequência	34
6.1	Parâmetros da eNB	48
6.2	Parâmetros da HeNB	48

Abreviações

3GPP	The 3rd Generation Partnership Project
ACK	Acknowledgment
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AFFR	Adaptive Fractional frequency reuse
AMC	Adaptive Modulation and Coding
BET	Blind Equal Throughput
BLER	Block Error Rate
CQI	Channel Quality Information
CSG	Closed Subscriber Group
DCI	Downlink Control Information
E-UTRAN	Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network
eNB	E-UTRAN Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
FDD	Frequency Division Duplex
FDPS	Frequency Domain Packet Scheduler
FFR	Fractional Frequency Reuse
FLS	Frame Level Scheduler
GRB	Guaranteed Bit Rate
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HeNB	Home E-UTRAN Node B

LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long term Evolution Advanced
LWDF	Largest Weighted Delay First
M-LWDF	Modified Largest Weighted Delay First
MAC	Media Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MME	Mobility Management Entity
MT	Maximum Throughput
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDN-GW	Packet Data Network Gateway
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
QoS	Quality of Services
RB	Resource Block
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
S-GW	Service Gateway
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment

1

Introdução

A difusão de *smartphones*, *tablets* e a integração da conectividade com objetos da vida diária (TVs, aplicações domésticas e veículos) gerou um rápido crescimento na demanda de banda para aplicações móveis. Embora as emergentes tecnologias (tais como WiMAX e LTE) são capazes de melhorar o rendimento dos sistemas 3G, eles não fazem frente ao aumento esperado de volume de dados.

Como consequência, melhoras tanto na capacidade como na cobertura de sistemas de telecomunicações móveis são requeridos, essas melhoras são atingidas não só trabalhando na camada física ou incrementando o espectro disponível, também na camada MAC, implementando técnicas para uma eficiente administração dos recursos de frequência. Por um lado, de fato, as últimas técnicas inovadoras na camada física trabalham dentro dos limites de Shannon, e de esta forma, elas asseguram a máxima taxa de dados alcançável. Do outro lado, a quantidade de espectro que se espera seja licenciado, é menor do que requerem os operadores móveis. Com esta visão, o desenvolvimento de pequenas células dentro da típica estrutura macro-celular, representa uma inteligente solução para elevar a capacidade do sistema.

Nessa direção, o 3GPP introduziu na especificação da tecnologia *Long-Term evolution-advanced* (LTE-A) a possibilidade de desenvolver redes heterogêneas (HetNet) compostas por células de grande e de pequena cobertura (por exemplo micro, pico e femto células). Micro e pico células podem ser exploradas para melhorar a cobertura e capacidade em algumas regiões dentro da macro-célula. Por sua parte femto-células foram criadas para oferecer serviços de banda larga em cenários *indoor* (ambientes familiares ou empresariais) e *outdoor* com uma cobertura limitada. Entre este tipo de células, a função das femto-células é fundamental, porque já na atualidade 50% das chamadas de voz e 70% das chamadas de dados têm lugar em ambientes *indoor* (9), onde a perda por penetração de *Outdoor* para *Indoor* é até 20 dB (12).

Uma femto-célula pode ser facilmente estabelecida sem uma coordenação centralizada, simplesmente tendo um ponto de acesso a internet e uma estação

base de pequena cobertura, a qual é referida como uma *Home evolved NodeB* (HeNB). Esse dispositivo é conectado ao núcleo da rede móvel através de uma linha ADSL e opera em um espectro licenciado para sistema celulares. A natureza descoordenada do desenvolvimento femto-celular implanta novos e interessantes desafios na administração do recurso de radio. De fato, clássicas propostas adotadas em sistemas 3G para encarar o planejamento de frequência, problemas de interferência, agendamento dos recursos e políticas de acesso podem não ser adequadas para cenários heterogêneos LTE-A.

Uma característica relevante com relação a sistemas 4G OFDMA femto-celulares é o reuso de frequência unitário, que implica que a estação base transmitirá utilizando toda a banda de frequência disponível. Um reuso de um não logra ativar toda a capacidade que o padrão LTE pode oferecer, porque ele não tem um bom desenvolvimento frente as interferências *co-layer* (entre femto-celulas) e *cross-layer* (entre macro e femto-células). Por esses motivos considero fundamental fazer uso de um reuso de frequência fracionário e avaliar seu comportamento.

Um segundo aspecto relevante é a administração eficiente do recurso de radio, para encarar uma ampla gama de serviços multimídia que possuem limites em termos do tempo de retardo, taxa de transmissão e qualidades de serviço (QoS), onde as aplicações de tempo real são as mais críticas (vídeo conferência, VoIP). Nesse sentido o bloco de administração de recursos explode funções na camada física e MAC, tais como indicadores da qualidade do canal (CQI), modulação e codificação adaptativa (AMC) e solicitação de retransmissão automática híbrida (HARQ). Com todas essas funções o agendador distribui as porções de espectro entre os usuários seguindo políticas específicas. Outro fator a ser tomado em consideração pela administração da rede vem da própria natureza *wireless*, onde a qualidade do canal esta sujeito a variações no tempo e na frequência devido a variadas causas, como o efeito de desvanecimento, multi-percurso, Doppler etc. Por isso avaliamos estratégias de agendamento conscientes do canal e conscientes dos requisitos de QoS para analisar seu comportamento frente a aplicações de tempo real. Em soma, primeiro aplicamos um reuso de frequência fracionário para fazer frente aos problemas de interferência e depois sobre o reuso fracionário, avaliamos estratégias de agendamento dos recursos com ênfase na vazão, retardo e justiça na repartição.

1.1

Objetivo

Além de fazer um análise dos ambientes femto-celulares e da forma como é feita a distribuição dos recursos de frequência, nosso objetivo é demonstrar que o reuso fracionário de frequência é a melhor alternativa quando se procura atingir altos níveis de rendimento no sistema. Mostrar como as diversas estratégias de agendamento no enlace de descida (*Downlink*), se vêm beneficiadas com este reuso fracionário. Finalmente fazer uma escolha do algoritmo que apresente o melhor comportamento, dependendo do objetivo que se procura (Vazão, retardo, Justiça etc).

1.2

Contribuições da pesquisa

A principal contribuição desta pesquisa é a proposta de implementação de um reuso de frequência fracionário em ambientes femto-celulares, para incrementar de forma geral o rendimento do sistema LTE-A e também analisar estratégias de agendamento dos recursos que levam em conta a qualidade do canal e os requisitos de retardo máximo permitido especialmente para aplicações de tempo real.

1.3

Organização do Texto

O trabalho esta organizado da seguinte forma:

1. O capítulo 2, faz uma revisão geral de uma rede LTE, começando com uma introdução da arquitetura empregada em sistemas femto-celulares LTE-A. Como o foco da pesquisa é a administração do recurso de radio, se estuda a administração da portadora e a pilha de protocolos existentes, interação entre os protocolos etc.
2. O capítulo 3, revisa-se o ambiente femto-celular, os benefícios e desafios que ele tem, as políticas de acesso e os tipos de interferência que ele enfrenta.
3. O capítulo 4, revisa as principais técnicas de reusos de frequência em femto-células e estabelecemos nossa proposta de reuso fracionário.
4. O capítulo 5, revisa os algoritmos de agendamento dos recursos, as principais informações que são utilizadas para agendar. Se vê o processo da agendamento e as diferentes estratégias de agendamento conscientes do canal e dos requisitos de QoS.

5. No capítulo 6, apresenta-se o cenário de simulação e os resultados obtidos. Com relação aos resultados, primeiro se avalia a resposta da interferência frente ao reuso fracionário e logo se simulam os diferentes algoritmos de agendamento.
6. No capítulo 7, se faz as conclusões gerais e se propõe os trabalhos futuros.

2

Visão geral de uma Rede LTE

O entendimento profundo dos problemas de radio propagação em redes celulares a levado a processos de standardização LTE, a utilizar técnicas avançadas e de alto rendimento. Com a visão de suportar a alta variedade de aplicações que existem na atualidade, uma rede LTE ha sido concebida com ambiciosos requisitos que superam longamente as características de uma rede 3G, que foi principalmente desenhada para suportar serviços de voz clássicos. Como minimo requisito, LTE procura dobrar a eficiência espectral de redes móveis de gerações anteriores a ela e incrementar a cobertura da rede especialmente para os usuários que se encontram na borda da célula. Além disso, novos objetivos se fixaram com relação as outras tecnologias, entre eles o incremento da taxa de dados "vazão" (procura-se uma vazão pico para o enlace de descida e subida de 100 Mbps e 50 Mbps respectivamente) para suportar usuários com alta mobilidade. Do ponto de vista de mercado, procura-se flexibilidade para que a operadora da rede possa escolher a largura da faixa a utilizar, que pode ser entre 1.4 até 20 MHz em LTE e até 100 MHz em LTE-A. Os principais objetivos são sumarizados na tabela .2.1, entre os quais sobressai o suporte a requisitos de qualidade de serviço (QoS) por ser uma técnica nova de administração dos recursos de radio.

Tabela 2.1: Principais objetivos de rendimento de uma Rede LTE

Vazão Pico	- Enlace de descida 100 Mbps - Enlace de subida 50 Mbps
Eficiência Espectral	2 a 4 vezes melhor que um sistema 3G
Taxa de bits na borda	Incrementado, mantendo a mesma localização da rede como é despregado hoje.
Latência de plano de usuário	Menor que 5ms para 5MHz de banda ou mais
Mobilidade	- Otimizado para baixa mobilidade até 15 km/h - Alto rendimento para velocidades de até 120 km/h - Manter conexão até velocidades de 350 km/h
Escalabilidade de banda	De 1.4 até 20 MHz (LTE) e até 100 MHz (LTE-A)
Administração do recurso de radio (RRM)	- Suporte melhorado considerando o parâmetro de qualidade de serviço (QoS) - Eficiência na transmissão e operação de protocolos de camadas superiores
Suporte de Serviço	- Suporte a vários tipos de serviço (web-browsing, FTP, video-Streaming, VoIP) - A VoIP deve ser suportado com pelo menos boa qualidade

Neste capítulo daremos uma visão geral e necessária das principais características de uma rede LTE, começando pela arquitetura incluindo os principais aspectos da pilha de protocolos. Logo uma breve visão da interface OFDMA com particular foco nos problemas relacionados com a agendamento dos recursos de radio e finalmente uma descrição dos procedimentos fundamentais no gerenciamento dos recursos de radio.

2.1

Arquitetura do Sistema e Rede de acesso de Rádio

O sistema LTE é baseado em uma arquitetura de níveis ou camadas, que garantem o suporte a mobilidade e ao envio a alta velocidade de dados de informação e sinalização. Como se mostra na figura .2.1, isto é feito por uma rede núcleo chamada *Evolved Packet Core* (EPC) e uma rede de acesso de radio chamada *Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN).

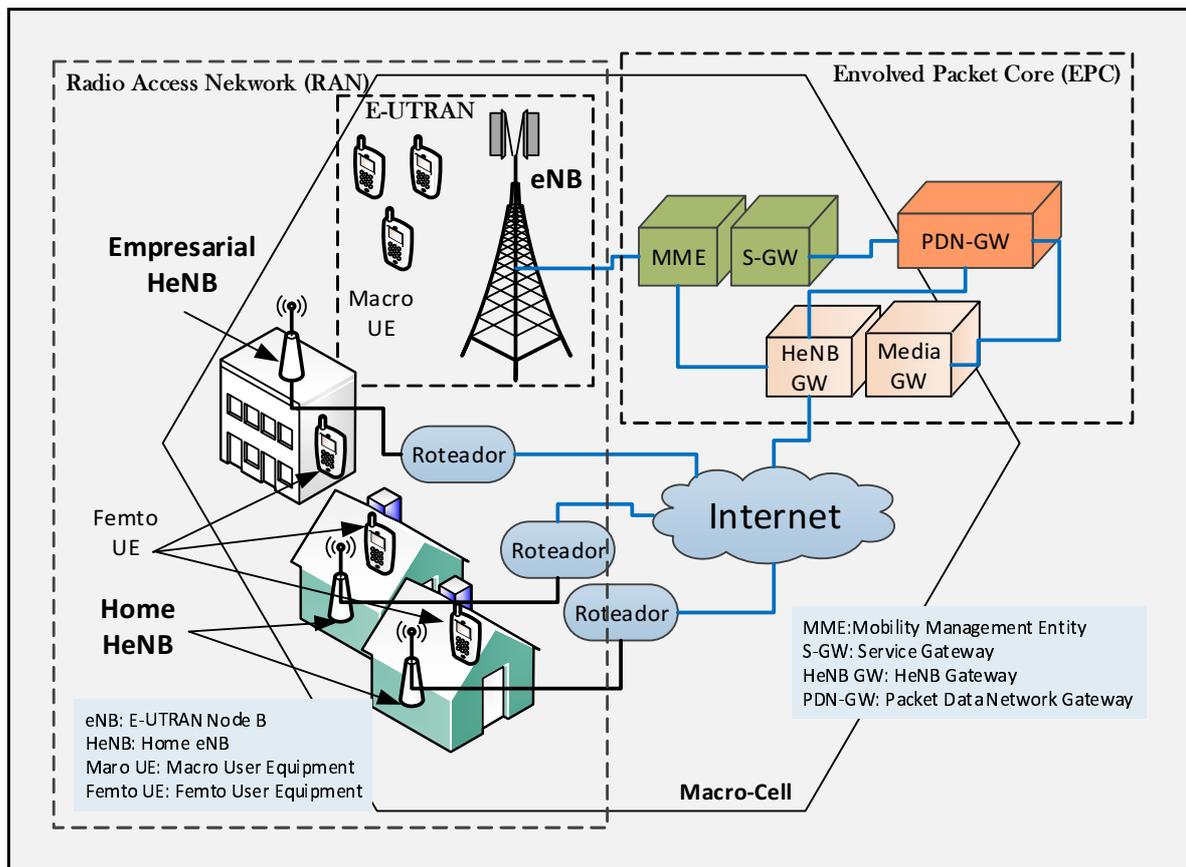


Figura 2.1: Arquitetura de uma rede com HeNB's

O EPC está conformado por a entidade de administração de mobilidade (MME), a porta de serviço (S-GW) e a porta da rede de pacotes de dados (PDN-GW). O MME é o responsável pela mobilidade dos usuários, intra LTE *handover* e procedimentos de roteamento dos usuários logo que a conexão é

feita, entanto que a função da S-GW é rotear e enviar pacotes de dados entre nós LTE e administrar o *handover* entre LTE e outras tecnologias. Por sua parte o PDN-GW interconecta a rede LTE com o resto do mundo, provendo conectividade entre usuários da rede LTE e redes de pacotes de dados externas.

O acesso de radio LTE possui dois tipos de nós: o terminal/aparelho do usuário (*User Equipment (UE)*) e a estação base chamada eNB (*E-UTRAN Node B*). Mas existem variantes da eNB como são as micro-eNB, pico-eNB que operam em ambientes *outdoor*, mas com uma menor potência de transmissão e em consequência menor cobertura. Em (1), o 3GPP introduziu uma nova estação base de baixa potência e pequeno rango de cobertura, chamado HeNB (*Home eNode B*) que proporciona serviço para ambiente *indoor* e *outdoor*. Esses dispositivos são conectados à rede da operadora móvel por meio de uma linha ADSL das casas ou oficinas dos consumidores. A área geográfica que eles cobrem é chamado femto-célula.

Como o interesse desta dissertação é o reuso de frequência fracionário e o análise de algoritmos de agendamento, nos enfocaremos em elementos da arquitetura LTE que estão estritamente relacionados a administração dos recursos de radio.

2.2

Administração da Radio portadora e pilha de protocolos

A radio portadora é um canal lógico entre o usuário e a HeNB, encargada de conduzir os requisitos QoS na interface E-UTRAN. Quando um usuário ingressa à rede, uma portadora por defeito é criada para conectividade básica e intercambio de mensagens de controle. Ela permanece ativa durante todo o tempo de vida da conexão. Portadoras dedicadas por sua parte, são aquelas que são levantadas cada tempo que um novo serviço específico é solicitado. Dependendo dos requisitos de QoS, as portadoras podem ser classificadas em: aquelas que garantem a taxa de bits (GBR) e as que não garantem a taxa de bits (non-GBR). Pelo tanto os requisitos de QoS são traduzidos em variáveis que caracterizam as experiências de rendimento que os usuários deveriam ter. Neste contexto um conjunto de parâmetros QoS é associado a cada portadora, dependendo do tipo de aplicação de dados (Voz, vídeo, dados etc) que planeja enviar, dando lugar a uma diferenciação entre os fluxos. Para este objetivo LTE tem vários tipos de serviços QoS.

O RRM traduz esses parâmetros QoS em parâmetros de agendamento, admissão de políticas, configuração do protocolo da camada de enlace, etc. As especificações LTE introduzem específicas entidades de protocolos:

- O controle do recurso de radio (RRC), o qual dirige o estabelecimento

- e administração das conexões, *broadcast* de informação do sistema, mobilidade, reconfiguração e administração de radio portadoras, etc.
- Protocolo de controle de pacotes de dados, o qual opera na compressão das cabeceiras nas camadas de alto nível, acima da camada MAC.
- Controle de enlace de radio (RLC), que interage entre a radio portadora e a camada MAC
- Controle de acesso médio (MAC), que proporciona todos os mais importantes processos à interface de radio LTE.

2.3

Camada física LTE-A

O LTE foi projetado com um acesso de radio flexível em ordem a suportar diversas configurações de largura de faixa (de 1.4 MHz até 20 MHz), o acesso de radio é baseado no esquema *Orthogonal frequency Division Multiplexing* (OFDM). Em particular *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) e OFDMA são usados para o enlace de subida e o de descida respetivamente. A diferença do clássico OFDM, o OFDMA permite conceder um grupo de portadoras, distribuídas dentro do espectro, a cada usuário, entanto que o SC-FDMA pode conceder só portadoras adjacentes.

Os recursos de radio são distribuídos no domínio do tempo/frequência (Ver Figura 2.2). No domínio do tempo os recursos de radio são distribuídos cada intervalo de tempo de transmissão (TTI) que corresponde ao tempo de um sub-quadro, 1 ms. O tempo é dividido em quadros, que corresponde a 10 TTI consecutivos. Além cada TTI é dividido em duas partes, chamadas *Slots* com uma duração de 0.5 ms. Cada Intervalo de tempo de transmissão esta composto por 14 símbolos OFDM quando se utiliza a configuração habitual chamada prefixo cíclico curto. No domínio da frequência, toda a largura de faixa é dividida em sub-canais de 180 KHz, que corresponde a 12 consecutivas e igualmente espaciadas sub-portadoras, assim a unidade de 12 sub-portadoras com uma duração de um *slot* (0.5ms) é chamada de bloco de recurso (Resource Block (RB)). Como a largura do sub-canal é fixo, para diferentes larguras de faixa se terá diferentes números de sub-canais disponíveis. A razão de esta breve explicação é devido a que como nós vamos implementar o reuso de frequência fracionário, então vamos alterar a quantidade de blocos de recursos atribuídos a uma HeNB em função do fator de reuso de frequência.

A interface de radio LTE suporta dois tipos de estruturas de quadros, que é relacionado a os esquemas de multiplexação. Na divisão na frequência

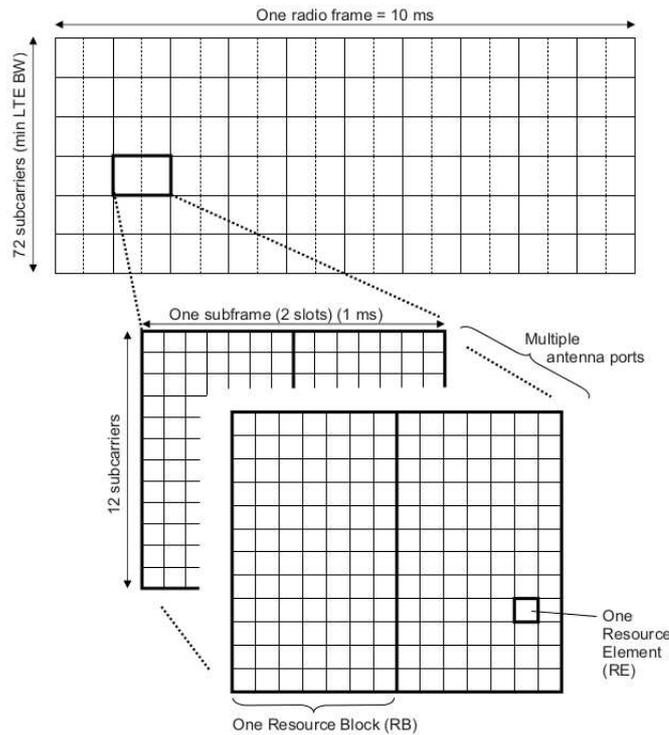


Figura 2.2: Estrutura do quadro LTE-A

duplex (FDD), toda a largura de faixa é dividida em duas partes, uma para o enlace de subida (*Uplink*) e outra para o enlace de descida (*Downlink*), dando lugar a uma comunicação simultânea de duplo sentido. Na divisão no tempo duplex (TDD), o quadro é dividido em duas partes de 5ms. Para este esquema existem diversas configurações de quadro onde se pode dar prioridade ao enlace de descida, concedendo maior quantidade de recursos de radio, ou dando prioridade ao enlace de subida, ou procurando o balance entre os dois enlaces. Para nossa pesquisa empregaremos a divisão na frequência duplex.

2.4

Administração dos Recursos de Radio

O LTE faz uso massivo de procedimentos para a administração dos recursos de radio, tais como adaptação do enlace, petição de repetição automática híbrida (HARQ), controle de potência e informação da qualidade do canal (CQI). Todos esses procedimentos são efetuados na camada física e MAC, e interatuam fortemente para melhorar o uso do recurso de radio disponível. Na figura 2.3 se mostra uma descrição global das principais características e sua interação em termos de intercâmbio de dados e sinalização

1. **Informação da qualidade do canal (CQI):** O procedimento de CQI é uma característica fundamental na rede LTE, pois permite a estimação

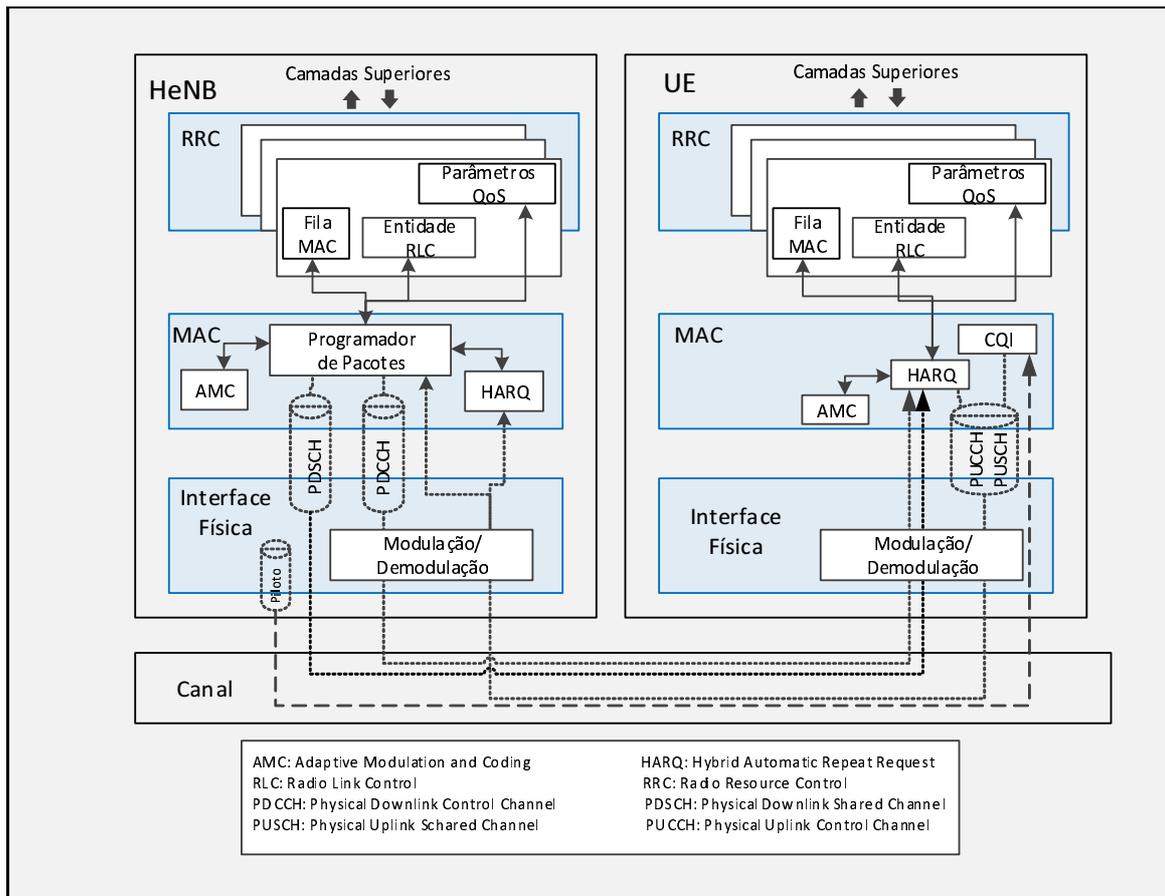


Figura 2.3: Interação das principais características para a administração do recurso de rádio

da qualidade do canal de descida na eNB. Cada CQI é calculada como uma medida escalar e quantizada que se refere à experiência da relação sinal a interferência mais ruído (SINR). O principal problema da CQI é encontrar uma boa relação entre uma estimativa de qualidade precisa e uma reduzida sinalização *overhead*.

- 2. Modulação e Codificação Adaptativa (AMC) e controle de potência:** O procedimento CQI esta fortemente ligado ao modulo AMC, o qual seleciona a modulação e codificação mais adequada procurando a máxima vazão com um objetivo estipulado de não sobrepassar a taxa de blocos errados (BLER). Neste sentido os usuários que experimentem um alto SINR serão servidos com uma alta taxa de bits por bloco, enquanto que para aqueles que experimentem uma baixa experiencia do SINR, devido a más condiciones do canal, serão servidos com uma baixa taxa de bits por bloco. Como o número de esquemas de AMC é limitado, então a vazão do sistema é limitado superiormente, quer dizer que para um certo valor um incremento do SINR não trará um incremento na

vazão. Isto é devido a que a AMC trabalha de forma conjunta com um modulo de controle de energia.

3. **Canal físico:** Os dados de descida são transmitidos pela HeNB sobre o canal físico compartilhado de descida (PDSCH). Em consequência o canal é compartilhado entre todos os usuários da célula. A transmissão de dados propriamente dito é permitido só em uma porção do espectro e em certo intervalo de tempo. Um exemplo da típica estrutura de um sub-quadro LTE de descida se mostra na figura 2.4. Isso define como o recurso de radio será utilizada pelas camadas superiores. Dados de informação e sinalização são multiplexado no tempo dentro de um sub-quadro.
4. **Petição de repetição automática-híbrida(HARQ):** Se refere a um procedimento de retransmissão na camada MAC, baseado no algoritmo *Stop-and-wait*. Este procedimento é executado entre a HeNB e o usuário através do intercambio de mensagens de reconhecimento/não reconhecimento (ACK/NACK). Uma mensagem de não reconhecimento (NACK) é enviado, quando um pacote transmitido pela HeNB não é decodificado com sucesso pelo usuário. Nesse caso a HeNB volta a transmitir uma copia da mensagem, depois o usuário tentará decodificar o pacote combinando a retransmissão e a versão original, caso se tenha sucesso, o usuário enviará uma mensagem de reconhecimento (ACK) para a HeNB.

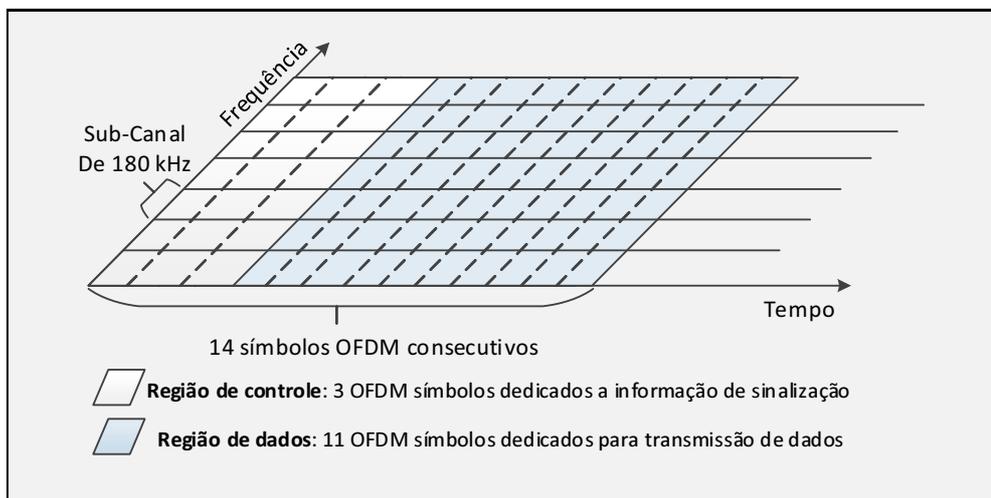


Figura 2.4: Estrutura do sub-quadro LTE Downlink para o caso de 3 símbolos OFDM dedicados para o canal de controle

3

Ambiente femto-Celular, benefícios e desafios

A estação base que atende o ambiente femto-celular, chamada de *Home-eNB*, traz vários benefícios. O primeiro de todos é o aumento na capacidade da rede. O esquema OFDMA, o qual é utilizado em uma rede LTE, assim como limite de *Shannon* delimitam a capacidade do canal. Nesse contexto a única forma de incrementar a capacidade de um enlace *wireless* é diminuindo a distância entre o transmissor(Estação base) e o receptor(usuário). A partir dessa constatação foram criadas as femto-células LTE.

3.1

Benefícios

Em geral uma femto-célula é caracterizada por uma radio-base compacta de baixo custo (HeNB), que proporciona acesso de radio para os usuários, semelhante ao serviço oferecido por uma macro estação comum. As HeNB são colocadas autonomamente pelos assinantes em ambiente familiares ou empresariais de uma maneira "insere e utiliza" (*Plug-and-Play*). Com relação ao tráfego que geram, ele é transportado para a rede do operador móvel, atreves de uma conexão com fio (ADSL,fibra etc) a qual deve ser disponível no ambiente do usuário.

Benefícios para a Operadora móvel

- Uma diminuição no trafego de dados para as macro-estações, pois um porcentagem desse trafego agora é transportado pelas HeNBs. Isso resulta em um incremento na capacidade da rede.
- Do ponto de vista econômico uma redução nos custos de *backhaul* das macro estações.
- Baixo custo da HeNB.

Para o Usuário

- Melhor cobertura *indoor*, resultando em alta velocidade na transmissão de dados.
- Potência de transmissão dos terminais baixa, que aumenta o tempo entre recarga de baterias e também o tempo de vida das mesmas.

3.2

Desafios

Os benefícios anteriormente mencionados trazem um custo no incremento de complexidade na administração do espectro, resultando que um planejamento centralizado seja muito difícil de ser empregado. Com efeito, a administração de interferência converte-se em uns dos principais problemas, sendo vital procurar soluções para essa gerencia entre as quais se encontra nossa proposta de reuso de frequência fracionário.

Há vários problemas interessantes que se levantam quando se tem um alto desenvolvimento de femto-células LTE, as quais devem ser cuidadosamente entendidas para explodir todo o potencial desta tecnologia.

3.2.1

Desenvolvimento descoordenado de femto-células

Uma implantação descoordenada de HeNBs, levada sem tomar em conta a localização das macro estações e sem uma estratégia para a alocação de banda traz um incremento no nível de interferência. Nestas condições, pode ser não fácil para o operador móvel aplicar procedimentos de administração dos recursos de radio. Existem dois tipos de interferências: dentro da mesma camada na arquitetura da rede *co-layer* e através camadas *cross-layer*. A primeira é gerada pela HeNB aos usuários de outras HeNBs, enquanto que a segunda acontece entre femto-células e macro-células que compartilham o mesma porção do espectro. Na figura 3.1 se mostra o cenário de interferências.

3.2.2

Políticas de acesso

Como femto-células são desenvolvidas em vários ambientes (familiar, empresarial, ambientes *outdoor*) tanto pelas operadoras móveis como pelos usuários, então se levanta o problema das políticas de acesso.

Uma configuração típica de HeNBs pela operadora móvel emprega o chamado modo de acesso aberto. Quando a HeNB é configurada em modo de acesso aberto, a HeNB sera capaz de dar serviço a assinantes de qualquer rede

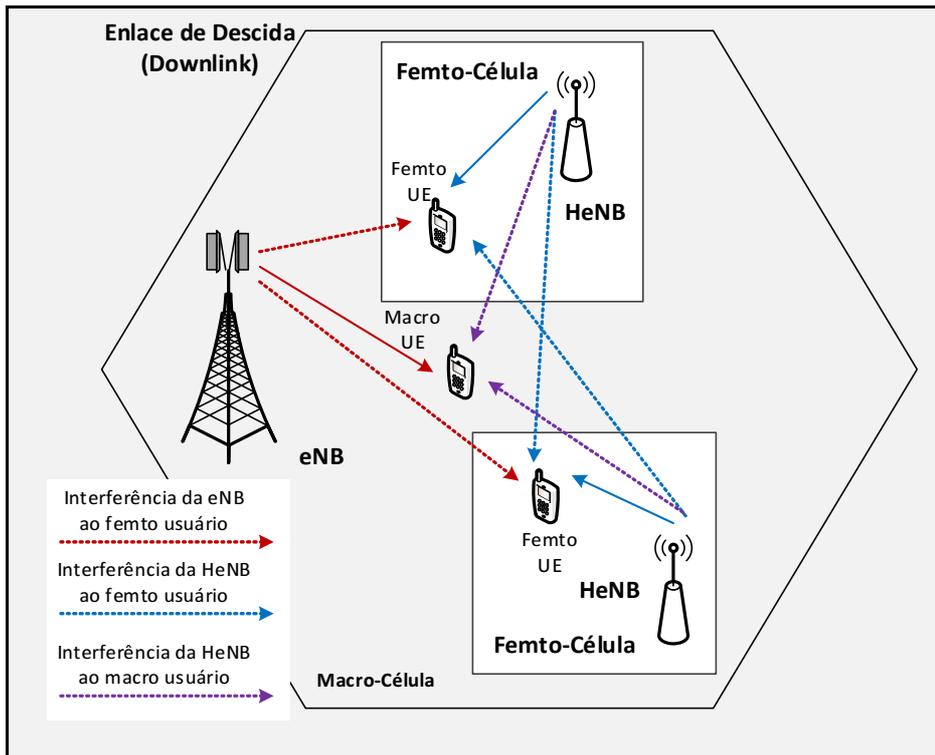


Figura 3.1: Cenários de Interferências

móvel pública, sujeito a um acordo de *roaming*. Nesse sentido qualquer usuário dentro da área de cobertura da HeNB pode beneficiar-se da alta capacidade oferecida pela femto-célula.

De outro lado, quando a HeNB é colocada pelo usuário doméstico ou empresarial, a operação mais comumente encontrada é em modo fechado. Quando a HeNB é configurado em modo de acesso fechado, ela só dará serviço a os membros de sua lista de assinantes. Neste caso usuários não autorizados podem sofrer interferência da HeNB privada.

Uma solução intermediária entre as duas propostas anteriormente mencionadas é o modo de acesso híbrido. Quando a HeNB é configurado em modo híbrido ela será capaz de dar serviço a:

- Aos membros de seu grupo de assinantes (CSG: *Closed Subscriber Group*)
- Assinantes de qualquer rede móvel pública que não pertencem a seu grupo de membros assinantes, mas sujeitos a um acordo de *roaming*

Um exemplo desta política é o modelo *World Wide Spread Fon* (*Fon Wireless Ltd.* /www.fon.com/), que foi concebido para a tecnologia WiFi.

3.2.3

Administração dos Recursos de Radio

No sistema LTE, todos os procedimentos de administração dos recursos de radio é executado pela macro estação. Esse aspecto se torna muito crítico para femto-células, devido à limitada capacidade computacional que devem ter as HeNBs. Por exemplo não é possível garantir que sofisticadas estratégias de agendamento possam ser executadas em femto-células. Em consequência procure-se uma baixa complexidade na administração dos recursos.

3.2.4

Mobilidade do Usuário

Um problema típico no desenvolvimento femto-celular está estritamente relacionado com a mobilidade do usuário: incrementando o número de células dentro da mesma área conduz ao crescimento de operações de *handover*. Esse aspecto é crítico, pois mesmo as macro estações estejam conectadas utilizando um protocolo dedicado (através da interface X2), a tecnologia LTE sempre requer que seja feito *Hard-Handover*, que em general é um procedimento que demanda recursos.

Depois de saber os benefícios e desafios presentes em ambientes femto-celulares. No capítulo seguinte estudaremos os tipos de reusos de frequência empregados e postularei a minha proposta de reuso fracionário de frequência.

4

Reuso de Frequência Fracionário

Um problema fundamental que enfrentam os ambientes femto-celulares são os altos níveis de interferência quando um grande número de HeNBs são instaladas. O problema é fundamental frente aos demais inconvenientes porque a qualidade do sinal recebido tem um impacto direto nos demais desafios a ser enfrentados.

O desafio que enfrenta um sistema OFDM com reuso de frequência de 1, ou seja em um ambiente limitado pela interferência, se verifica quando o sistema celular está com alto carregamento, dando lugar a regiões nas quais os níveis de SINR são negativos. Isto resulta em buracos de cobertura, independente da distância entre células. Em um sistema celular limitado pela interferência a degradação do SINR será altamente dependente do expoente de propagação local que determina as perdas por percurso. Para um cenário celular com distância entre células fixa, um ambiente com alta perdas por percurso, ou seja com um expoente no ordem de 5 ou 6, sofrera menos interferência que um ambiente com baixo expoente de propagação. Em (4) são apresentadas as diferentes técnicas utilizadas para combater os potenciais buracos de cobertura em ambientes macro-celulares, entre eles se menciona o reuso de frequência fracionário (FFR) e o reuso de frequência adaptativo (AFFR). Nesta última técnica é utilizado o conceito de perfil de banda de potência para fazer o planejamento de frequência. É chamado adaptativo porque a eNB pode escolher o tipo de reuso de frequência a utilizar, que pode ser um reuso unitário 4.1a, um reuso fracionário 4.1b ou um reuso unitário com um incremento de potência de uma sub-banda para uma região específica 4.1c, que geralmente é a borda da célula. No entanto como em ambientes femto-celulares a qualidade da sinal é quase homogênea, pela pequena distância entre a HeNB e os usuários, não é necessário fazer um controle em termos de potência, em consequência a técnica escolhida para analisar o comportamento femto-celular é o reuso de frequência fracionário.

Esta técnica geralmente é implementada em macro-eNB, mais nesta investigação será implementada em um ambiente *indoor* femto-celular e analisa-

remos o comportamento do sistema com este mecanismo.

O reuso de frequência fracionário em um ambiente macro-celular, envolve particionar o espectro disponível em um número de sub-bandas e distribuir essas sub-bandas às diferentes macro-células de forma coordenada procurando minimizar a interferência entre células. Por exemplo (4) para $R=1/3$ (R :padrão de reuso), a cada célula se atribui uma sub-banda de largura igual a $1/3$ do total da faixa disponível como é mostrado na figura 4.1b. Para $R=1/3$ se observa-se uma melhoria no valor do SINR devido a que os níveis de interferência são reduzidos, porem com uma menor de faixa a vazão é menor em comparação a um sistema com reuso de frequência 1, para um ambiente macro-celular com $R=1/3$ a vazão é aproximadamente 75-80% do que um sistema com $R=1$. Além disso, por causa da melhoria no nível do SINR, os buracos de cobertura para os usuários na borda da célula podem ser mitigados, embora a eficiência espectral total para os usuários na borda da células não melhora consideravelmente quando comparado com $R=1$.

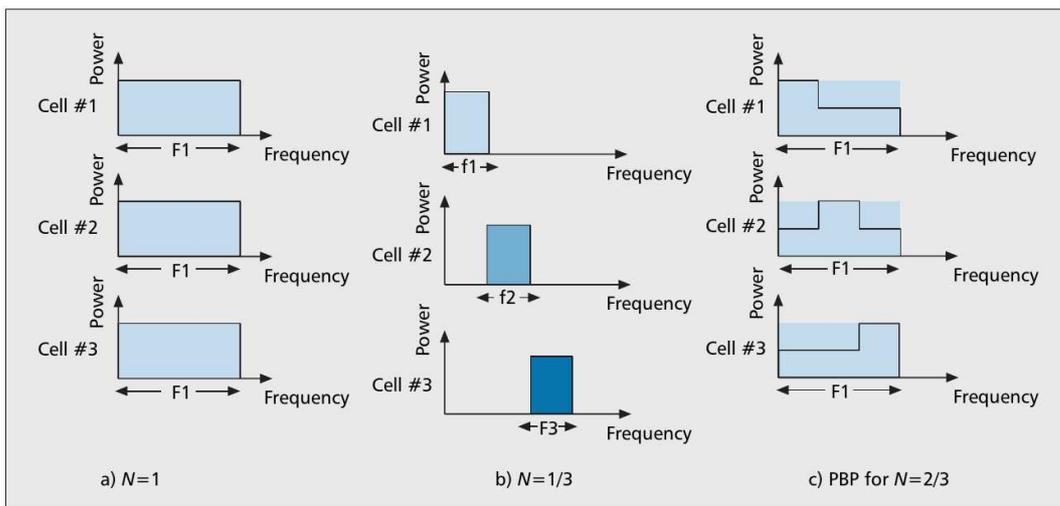


Figura 4.1: Tipos de reuso de frequência. a) Reuso unitário, b) Reuso fracionário e C) Reuso com perfil de faixa de potência (Figura 2 de (4))

Em um sistema LTE OFDM a implementação do reuso de frequência fracionário reduzirá o número de blocos de recurso disponíveis para ser agendados por tanto também gera uma redução na vazão pico , o que potencialmente pode impactar na qualidade do serviço das aplicações que demandam uma largura de faixa maior.

Os requisitos que devem ser satisfeitos quando se implantam HeNBs que utilizam o mesmo espectro que a eNB são:

- Os desempenho dos usuários atendidos pela eNB não deve ser afetados pela presença das HeNBs.

- A cobertura e capacidade da eNB não deve ser afetado pela presença da HeNB.

4.1

Cenários de reuso frequência entre a eNB e a HeNB

A seguir apresentaremos os diferentes cenários que se tem em consideração para a administração da frequência entre a eNB e as HeNBs. Em todos os casos se deve ter presente que, como as femto-células se encontram dentro da cobertura macro-celular, a administração de frequência que se faz é definida uma administração intra-macro-celular. Além disso, ressaltar que a potência de transmissão da eNB é maior que as HeNBs.

4.1.1

Frequência de reuso 1

Neste caso a HeNB utiliza a mesma banda de frequência que a eNB, conforme ilustrado na figura 4.2, com a única diferença é que a potência de transmissão da HeNB é menor do que a da eNB. O ambiente apresenta altos níveis de interferência quando se encontra em um estado de carga saturado.

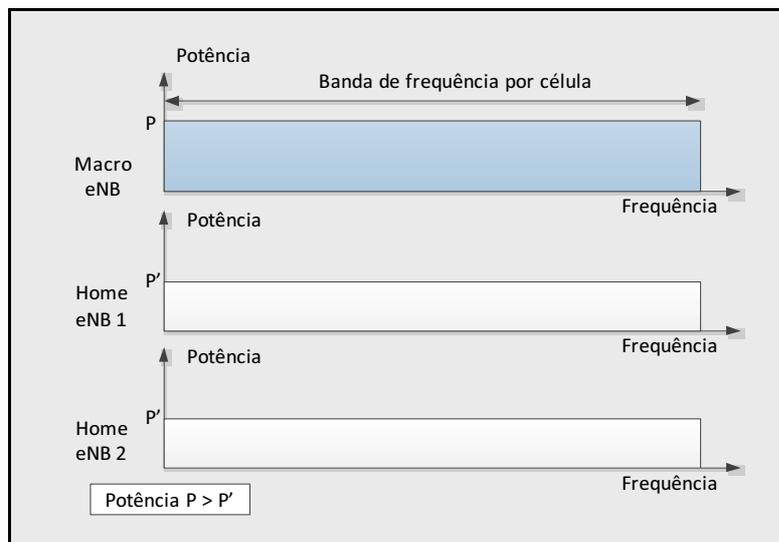


Figura 4.2: Reuso de frequência de 1 entre a eNB e a HeNB

4.1.2

Divisão da banda de frequência

Para este caso, a total banda de frequência disponível para uma macro-célula, que seria utilizada inteiramente pela eNB, é dividida gerando duas bandas onde uma será para uso exclusivo da eNB e a outra para uso exclusivo

da HeNB, ver figura 4.3. Cabe mencionar que no caso que existissem duas HeNBs ou mais, todas utilizaram a mesma sub-banda de frequência.

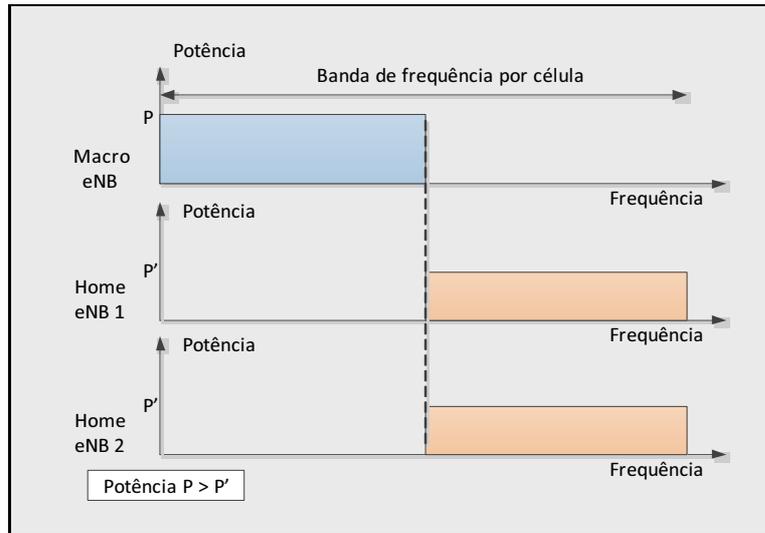


Figura 4.3: Divisão da banda de frequência entre a eNB e a HeNB

4.1.3 Frequência de reuso 1 atenuada

Neste caso a célula da HeNB é dividida em duas regiões, uma região central e uma região de borda. Na região central toda a banda de frequência que utiliza a eNB é reutilizada pela HeNB, mas com uma menor intensidade de potência de transmissão. Na região da borda só uma sub-banda é utilizada pela HeNB, mas com uma maior potência de transmissão em comparação com a região central, procurando deste modo melhorar a razão sinal-ruído, dando lugar a uma maior capacidade de transmissão na borda. Ver figura 4.4

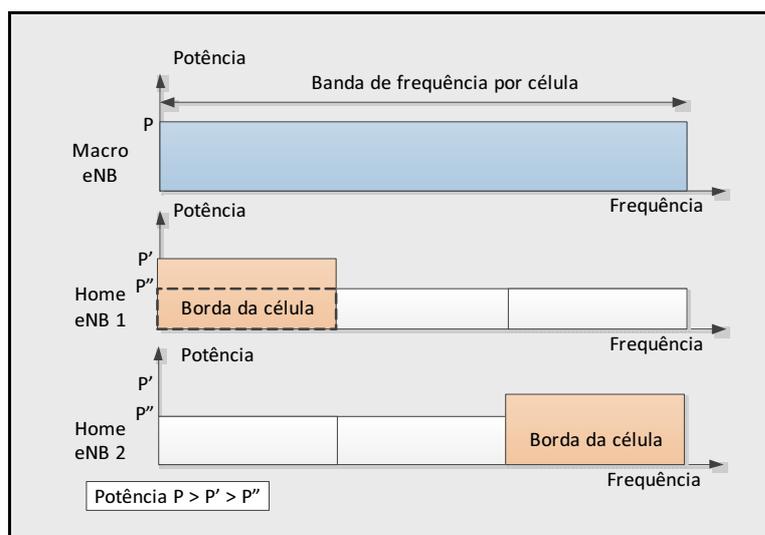


Figura 4.4: Frequência de reuso 1 atenuada

4.1.4 Reuso de Frequência fracionário entre HeNBs

Este é o esquema que foi escolhido para o nosso trabalho e consiste em que a eNB utilizá como de costume toda a banda de frequência atribuída para uma macro-célula, no entanto que para as HeNBs, a banda total será dividida em N sub-bandas, as quais serão distribuídas às diferentes HeNBs, alias femto-células adjacentes utilizarão diferentes sub-bandas de frequência procurando diminuir principalmente a interferência *co-layer* entre HeNBs. Na figura 4.5 se mostra os distintos valores que adotamos para o padrão de reuso, o valor $R=1$ corresponde ao clássico reuso de frequência de 1, já com $R=1/2, 1/3$ e $1/4$ a largura de faixa sera dividida por 2, 3 e 4 respectivamente.

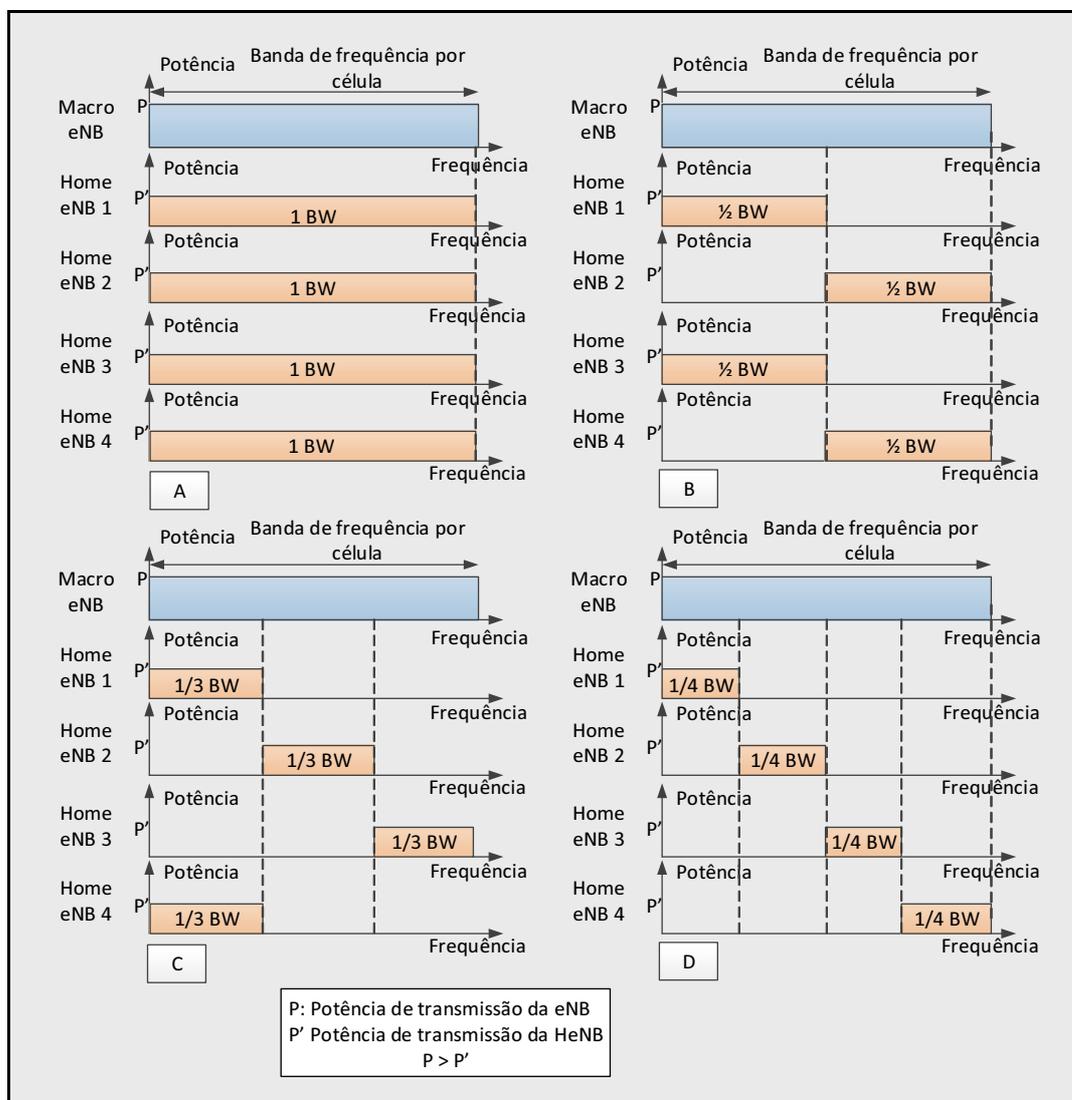


Figura 4.5: Reuso de frequência fracionário entre HeNBs. A) Reuso de frequência de 1. B) Reuso de frequência de 1/2. C) Reuso de frequência de 1/3. D) Reuso de frequência de 1/4.

Para nossas simulações utilizaremos uma banda total de 10 MHz, uma frequência de transmissão de 2 GHz e um modo de operação de divisão de frequência duplex (FDD), com estas características e tomando em conta a tabela 5.6-1 de (14), a quantidade de blocos de recursos disponíveis são 50, como se mostra na tabela 4.1

Tabela 4.1: Configuração da banda de transmissão e número de recursos disponíveis em um sistema LTE

Largura de Faixa (Mhz)	1.4	3	5	10	15	20
# Blocos de Recurso N_{RB}	6	15	25	50	75	100

Tendo como base esses 50 blocos de recursos, realizamos a divisão da banda para os diferentes valores do padrão de reuso. Na tabela 4.2 se mostra a quantidade de blocos de recurso para os diferentes valores do padrão de reuso, assim como também a largura de faixa da banda dividida.

Tabela 4.2: Quantidade de blocos de recurso em função ao padrão de reuso de frequência

	Blocos de recurso	BW (MHz)
Reuso 1	50	10
Reuso 1/2	25	5
Reuso 1/3	17	3.4
Reuso 1/4	13	2.6

Depois de ter mostrados os esquemas mais importantes de reusos de frequência em ambientes femto-celulares e postulado o nosso esquema de trabalho no ponto seguinte a abordaremos os algoritmos de agendamento que serão empregados sobre o reuso fracionário.

5

Algoritmos de Agendamento em Sistemas LTE

O agendamento de múltiplos usuários é um dos principais aspectos em um sistema LTE, porque ele é o encarregado de distribuir os recursos disponíveis entre os usuários ativos procurando satisfazer as necessidades de QoS.

Como mencionado no capítulo 2 o canal de dados é compartilhado entre os usuários, isso quer dizer que porções do espectro é distribuído a cada intervalo de tempo entre eles. O agendamento de pacotes (para o enlace de descida e o de subida) é executada no HeNB ou no eNB, tendo em consideração que o OFDMA idealmente não apresenta interferência entre canal pela ortogonalidade entre portadoras. LTE trabalha com uma granularidade de um TTI (1ms) e um bloco de recurso, no domínio do tempo e no da frequência respectivamente.

A distribuição do recurso para cada usuário é geralmente baseada na comparação de métricas para cada bloco de recurso: o k -ésimo bloco de recurso é alocado ao j -ésimo usuário se sua métrica $m_{j,k}$ é a maior, isto é, se satisfaz a seguinte equação:

$$m_{j,k} = \max_i \{m_{i,k}\} \quad (5-1)$$

Estas métricas podem ser interpretadas como a prioridade de transmissão de cada usuário em um específico bloco de recurso. Baseado nos requisitos desejados de rendimento, seu calculo usualmente começa avaliando informação relacionada a cada fluxo útil para conduzir a alocação do recurso. Entre as informações mais utilizada temos:

- **Status da fila de transmissão:** O status da fila de transmissão de usuários pode ser utilizada para minimizar o retardo de entrega de pacotes (por exemplo a mais longa fila, pode ter a métrica mais alta)
- **Qualidade do canal:** informado através do CQI poder ser utilizado para designar recursos a usuários que experimentam melhores condições de canal(exemplo o valor maior de CQI terá a maior métrica)
- **Histórico da distribuição dos recursos:** informação acerca do rendimento passado alcançado, pode ser usado para melhorar a justiça na

repartição (exemplo o desempenho passado com menor rendimento terá a maior métrica)

- **Estado do Buffer:** As condições do estado da interface receptora poder ser utilizado para evitar vazamentos de fluxo (exemplo aquele que tenha maior espaço disponível na interface receptora terá a maior métrica).
- **Requisitos de Qualidade do Serviço:** Os valores de CQI relacionados a cada fluxo podem ser utilizados para dirigir políticas específicas com o objetivo de atingir os requisitos QoS.

Cada TTI o agendador executa a decisão para a alocação dos recursos disponíveis para o próximo TTI e envia essa informação para os usuários utilizando o canal de controle de descida (PDCCH). As mensagens de informação de controle de descida (DCI) informam ao usuário sobre a alocação dos recursos para a transmissão de dados no canal compartilhado de descida (PDSCH).

Um conceito importante em agendamento do recurso em LTE é conhecido por "Sensibilidade do canal". A ideia é agendar transmissões para usuários que, no tempo atual e em uma dada frequência, estão experimentando boas condições de canal baseados na métrica selecionada. Essa ideia é também conhecida por agendamento oportunista.

Ademais devido à característica que o desvanecimento rápido é independente entre usuários, pode-se explodir mediante procedimentos de alocação, dando lugar ao que normalmente é conhecido como "diversidade Multi-usuários". Os autores em (8) mostram que a capacidade total do sistema cresce com o número de usuários, em consequência podemos definir o ganho da diversidade de multi-usuários como a vantagem, em termos de capacidade e serviço de um sistema. De fato, em um cenário com vários usuários experimentando os efeitos do desvanecimento rápido, a probabilidade de encontrar um usuário com boas condições de canal em um tempo específico é muito alta. Por outro lado um incremento de usuários traz um aumento na informação de controle (*overhead*).

Na figura 5.1 são mostrados os principais módulos para a administração dos recursos de radio (RRM) que interagem com o agendador de pacotes. Todo o processo pode ser dividido em uma sequência de operações que são repetidas cada TTI:

1. Cada Usuário decodifica as sinais de referência, computa o CQI e envia o resultado para a HeNB.
2. A HeNB usa a informação CQI para as decisões de alocação e preencher a máscara de alocação de recurso.

3. O modulo AMC seleciona o melhor esquema de modulação e codificação (MCS) que deve ser utilizada para a transmissão de dados.
4. A informação acerca desses usuários, os blocos de recursos alocados, o MCS selecionado são enviados aos usuários via o canal PDCCH.
5. Cada usuários lê o canal PDCCH e em caso ele tenha sido agendado, acessa ao canal adequado PDSCH para a recepção de dados.

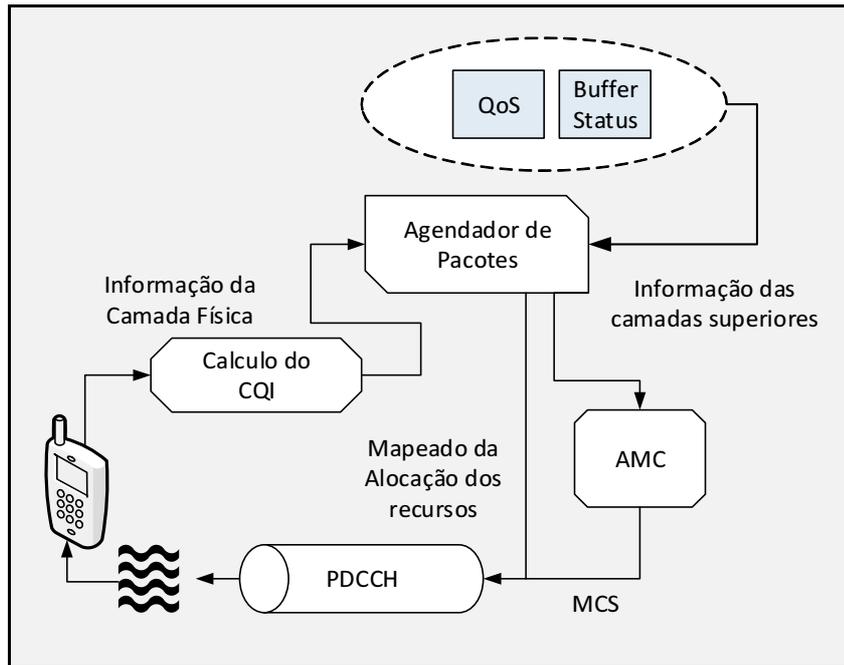


Figura 5.1: Modelo simplificado de um agendador de pacotes

5.1 Principais aspectos de projeto

Diferentes estratégias de alocação de recursos são baseadas na negociação entre uma decisão ótima e o grau de complexidade. Nesta seção, apresentaremos uma lista dos principais fatores que sempre devem ser levados em conta antes de definir uma política de alocação de recurso para LTE.

5.1.1 Complexidade e escalabilidade

O agendador de pacotes LTE trabalha com uma granularidade de 1 ms, quer dizer a que cada TTI ele tem que tomar decisões para alocar os recursos. Baixa complexidade e escalabilidade são requisitos fundamentais na hora do projeto para limitar o tempo de processamento e o uso de memória. Esses

aspectos se tornam mais críticos no caso das HeNBs porque a diferença de uma eNB, ela tem um *hardware* reduzido para o processamento da informação. Em consequência se deve procurar através de técnicas de otimização não tão complexas onde a quantidade de iterações não resulte pesado em termos computacionais e tempo de processamento. Se N e R são a quantidade de usuários ativos no atual TTI e o número de blocos de recursos disponíveis, respectivamente; o agendador de recurso tem que calcular $M=N \times R$ métricas cada a TTI.

5.1.2 Eficiência Espectral

A eficaz utilização do recurso de radio é um dos principais objetivos a alcançar. Para essa meta várias políticas podem ser consideradas, por exemplo uma política pode apontar em maximizar o número de usuários servidos em um intervalo de tempo ou, mais comumente buscar incrementar a eficiência espectral (expressado em bit/s/Hz), mediante sempre servir usuários que experimentem as melhores condições de canal.

5.1.3 Justiça

Uma maximização cega de toda a vazão do sistema permite a utilização eficaz do canal em termos de eficiência espectral, mas também pode trazer uma injustiça grande na compartição dos recursos entre usuários. Justiça é um importante requisito que deve ser tomado em conta para garantir um rendimento mínimo a usuários na borda da célula (em geral para usuários que experimentam más condições de canal).

5.1.4 Requisitos QoS

Os requisitos de QoS são muito importantes em gerações modernas de redes móveis. Em arquiteturas all-IP, garantias de QoS é uma característica importante. Os objetivos QoS podem variar dependendo da aplicação a utilizar e geralmente envolvem conceitos de taxa mínima de bits garantida, máximo retardo de envio e taxa de pacotes perdidos entre outros.

5.2

Estratégias de agendamento para o Enlace de descida LTE

Depois de ter implementado o reuso fracionário para melhorar a razão sinal ruído (SINR), o segundo passo a analisar, em nossa procura por incrementar a qualidade e rendimento de uma rede femto-celular, são as estratégias utilizadas para a alocação dos recursos de tempo-frequência em um sistema LTE. Os algoritmos que se estudarão são amplamente usados na literatura atual e representam as mais interessantes propostas que poder ser usadas para entender os vários aspectos ligados ao projeto de agendamento. Essas estratégias diferem em termos de parâmetros de entrada, finalidade, e objetivos de serviço. Então para dar um ordem, eles são classificados em:

- Estratégias inconscientes do canal (Unaware channel)
- Estratégias conscientes do canal (Aware channel)/inconscientes dos requisitos de QoS (QoS unaware).
- Estratégias conscientes do canal (Aware channel)/conscientes dos requisitos de QoS (QoS aware).

Um quadro estrutural mais detalhado se mostra na figura 5.2.

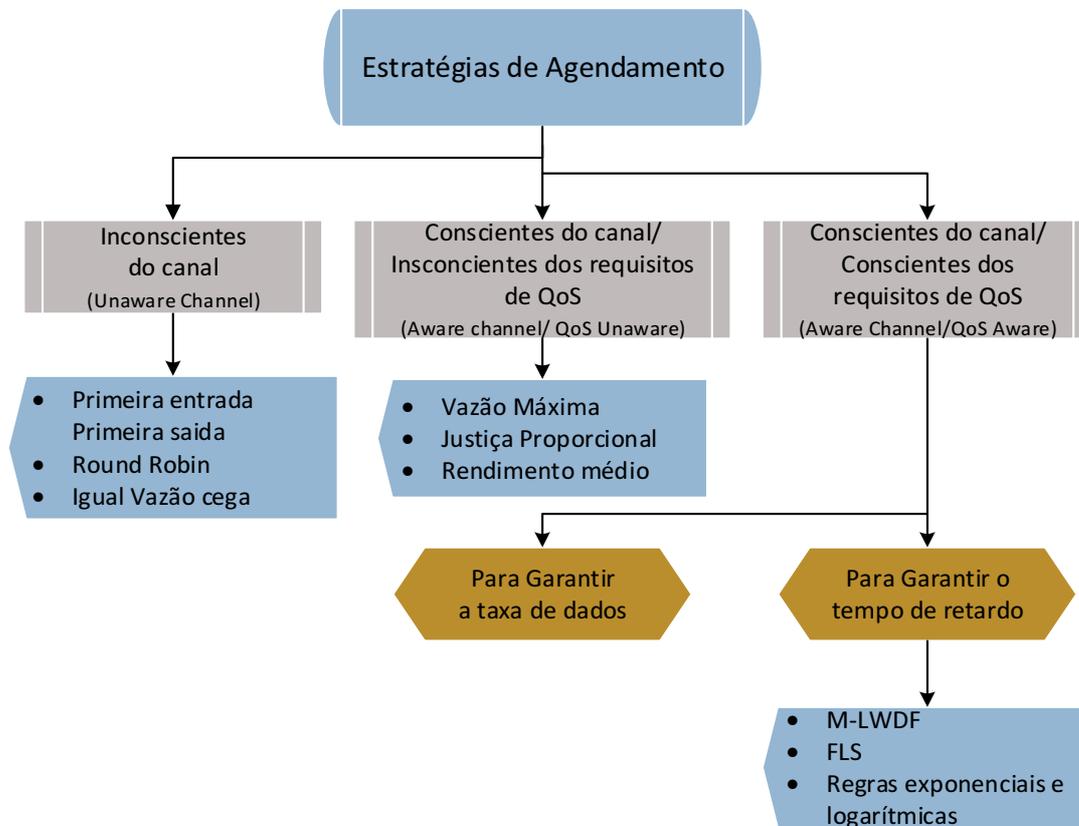


Figura 5.2: Quadro estrutural das estratégias de agendamento

5.2.1

Estratégias inconscientes do canal (Unaware channel)

Inicialmente introduzido para redes com fio (13), as estratégias inconscientes do canal são baseadas sobre a premissa que a transmissão é invariante no tempo e livre de erros. Sua aplicação direta em redes LTE não é realista, elas normalmente são complementadas com propostas que tomam em consideração as condições do canal. Por tanto só nos limitaremos a listar alguns algoritmos que se encontram dentro deste critério, eles são:

- Primeira entrada, primeira saída.
- Round Robin
- Vazão igual cega (BET)

Essas estratégias são conhecidas por sem conhecimento do canal porque trabalham sem tomar em conta as variações do canal, sendo por isso inadequadas para redes celulares.

5.2.2

Estratégias conscientes do canal (Aware Channel)/Inconscientes dos requisitos QoS (QoS Unaware)

Graças à realimentação de mensagens CQI, as quais são enviadas periodicamente (dos usuários para as HeNBs), o agendador pode estimar a qualidade do canal percebida por cada usuário. A partir desta informação a estação pode prever a máxima vazão que cada usuário pode alcançar.

Seja $d^i(t)$ e $d_k^i(t)$ a vazão esperada do i -ésimo usuário no t -ésimo TTI quando toda a banda é empregada e quando usa apenas o k -ésimo bloco de recurso, respectivamente. Os valores mencionados podem ser calculados utilizando o modulo AMC ou por uma aproximação que faz uso da conhecida expressão de Shannon para calcular a capacidade do canal, como:

$$d_k^i(t) = \log[1 + SINR_k^i(t)] \quad (5-2)$$

Esta expressão dá uma explicação numérica da importância de tomar em conta a qualidade do canal, quando nos encontramos em um contexto wireless.

- **Máxima Vazão (MT)**

A estratégia conhecida como máxima vazão (*Maximum Throughput* (MT)), procura maximizar a vazão total, para isso aloca cada bloco de recurso a usuários que podem alcançar a máxima vazão no atual TTI. A métrica é calculada da seguinte forma:

$$m_{i,k}^{MT}(t) = d_k^i(t) \quad (5-3)$$

Esta estratégia é capaz de aumentar a vazão da célula, porem, desde outro ponto de vista faz uma repartição injusta do recurso de frequência, pois aqueles usuários de tenham más condições de canal serão sempre atendidos com uma pequena parcela do recurso.

O agendador deveria procurar um ponto meio entre, o máximo rendimento de célula e uma distribuição da vazão que garanta justiça entre os usuários, desse modo se estaria explodindo tanto as variações do canal como também os graus de justiça em termos de satisfação.

– Justiça Proporcional (PF)

A típica forma em encontrar um equilíbrio entre os requisitos de vazão e justiça espectral é mediante o esquema de justiça proporcional (*Proportional Fair* (PF)). Sua métrica é uma combinação entre MT e BET, expressada da seguinte forma:

$$m_{i,k}^{PF}(t) = \frac{d_k^i(t)}{\bar{R}^i(t-1)} \quad (5-4)$$

Onde $\bar{R}^i(t-1)$ é a vazão média do i -ésimo usuário até o tempo $t-1$. A ideia é que o rendimento passado atue como um fator de peso na taxa de dados esperada, fazendo com que usuários com más condições de canal tenham garantido uma certa quantidade de recursos.

– Vazão Média (TTA)

O esquema de vazão média pode ser considerada um ponto meio entre os esquema MT e PF. Sua métrica é expressada da seguinte forma:

$$m_{i,k}^{TTA}(t) = \frac{d_k^i(t)}{d^i(t)} \quad (5-5)$$

Aqui a vazão alcançável no atual TTI é utilizado como fator normalizante da vazão alcançável no k -ésimo bloco de recurso.

5.2.3

Estratégias conscientes do canal (Aware Channel)/Conscientes dos requisitos de QoS com foco no tempo de retardo

A diferenciação entre os requisitos de QoS é conduzida por um conjunto de parâmetros QoS para cada fluxo. Conhecendo o valor desses parâmetros, o agendador pode tratar os dados para garantir alguns mínimos requerimentos, tanto em termos de taxa de dados como em tempo de retardo.

Dentro da categoria de estratégias conscientes do canal e dos requisitos QoS, aquelas que garantem um tempo definido de retardo são as mais representativas, porque uns dos principais requisitos de pacotes com parâmetros QoS é garantir a entrega dentro de um intervalo de tempo pre-estabelecido ou tempo limite de entrega. As aplicações que dependem desse parâmetro de desempenho são as chamadas de tempo real dentro das quais encontramos o vídeo *streaming* e a voz IP.

– O modificado LWDF (M-LWDF)

Este algoritmo (2) é uma versão modificada do algoritmo que atende primeiro ao fluxo que tem maior retardo ponderado (*Largest Weighted Delay First* (LWDF)). Para poder ter em consideração na métrica o retardo, são necessárias informações do tempo em que o pacote foi gerado e o tempo de expiração o tempo de vida do mesmo. A métrica do algoritmo LWDF é baseada no parâmetro δ_i que representa a probabilidade que um pacote do i -ésimo usuário não seja considerado devido à expiração do retardo permitido. Sua métrica é calculada como:

$$m_{i,k}^{LWDF} = \alpha_i \cdot D_{HOL,i} \quad (5-6)$$

Onde $D_{HOL,i}$ é o retardo do primeiro pacote na fila de transmissão do i -ésimo usuário e α_i é calculado como:

$$\alpha_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} \quad (5-7)$$

Onde τ_i é o retardo máximo permitido do i -ésimo usuário.

Embora o algoritmo M-LWDF não tenha sido projetado para sistemas OFDMA sua métrica pode ser facilmente expressa como na equação 5-8. Além disso, caso existam fluxos que não são considerados de tempo real, eles são tratados de forma diferente. Para eles a métrica da justiça proporcional é empregada.

$$m_{i,k}^{M-LWDF} = \alpha_i \cdot D_{HOL,i} \cdot \frac{d_k^i(t)}{R^i(t-1)} \quad (5-8)$$

Como se pode ver, a diferença entre LWDF e M-LWFD, é que este último utiliza a informação do retardo acumulado para dar forma ao comportamento da métrica da justiça proporcional dando lugar a um bom equilíbrio entre eficiência espectral, justiça de reparto e requisitos QoS.

– **Agendador de nível de quadro (FLS)**

Em (11) se apresenta um enfoque de dois níveis de operação que procura garantir o retardo máximo dos fluxos de tempo real. Os dois níveis trabalham conjuntamente para realizar uma alocação dinâmica do recurso, tendo em consideração o estado do canal, o comportamento da fonte de dados e o máximo retardo tolerável.

No nível superior, um algoritmo chamada de *Frame Level Scheduler* (FLS) define quadro por quadro (cada de 10 ms) a quantidade de dados que cada fonte de tempo real deveria transmitir para satisfazer os limites de retardo. Para resolver o problema utilizando uma solução de baixa complexidade computacional, FLS emprega um laço de controle linear de tempo discreto (3). Logo de ter realizada essa tarefa o procedimento de nível inferior, cada TTI aloca recursos utilizando o algoritmo de justiça proporcional considerando os requerimentos de banda do nível superior FLS. Em outras palavras o procedimento superior determina quantos dados deveriam ser transmitidos por cada fonte, logo a procedimento inferior aloca os blocos de recurso cada TTI tomando em consideração o cálculo inicial do procedimento superior FLS. É importante notar que o FLS não toma em conta o estado do canal. No lado oposto, o nível inferior aloca recursos primeiro para usuários que experimentaram boas condições do canal (Aqueles que conseguiram transmitir a quantidade de dados imposto pelo nível superior FLS) depois são considerado os restantes, Caso se tenha fluxos de tempo não real a métrica empregada para eles é a mesma do que o caso de justiça proporcional. Um análise detalhada deste algoritmo é apresentado em (11). Na figura 5.3 se mostra um diagrama de fluxo do algoritmo.

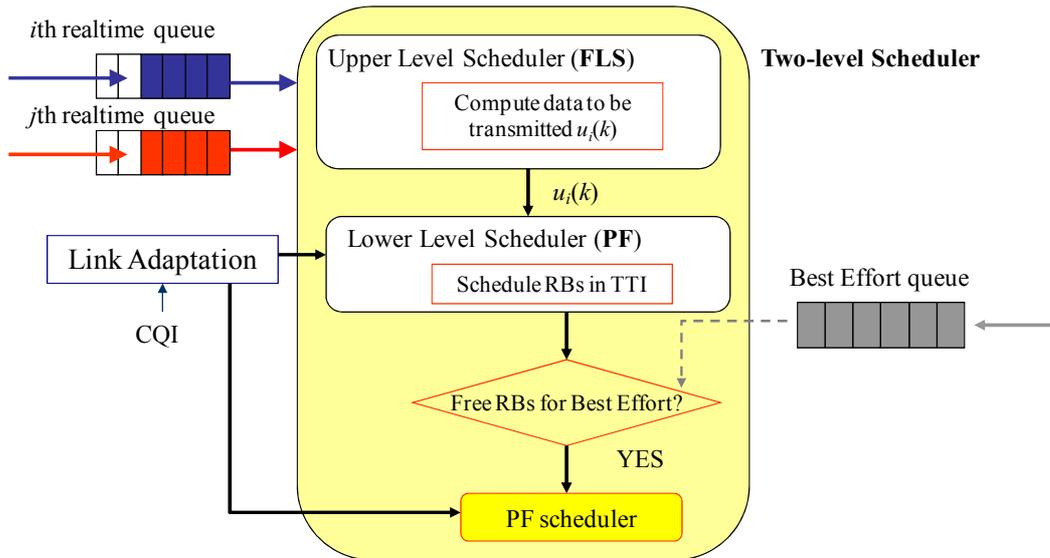


Figura 5.3: Algoritmo de agendamento de dois níveis

6

Ambiente de Simulação e resultados

6.1

Ambiente de Simulação

O ambiente de simulação esta composto por uma célula com um raio de 1Km que contém uma eNB e uma edificação com quatro apartamentos cada um com uma disposição quadrada com lado igual a 10m, ou seja uma área de $100m^2$ por apartamento, que resulta em uma área total construída de $400m^2$. Dentro de cada apartamento existe uma HeNB, dando um total de quatro HeNB dentro da edificação. As topologias definidas pela 3GPP, e apresentadas em (12), são ilustradas na figura 6.1. Para o nosso caso adotamos inicialmente a topologia grade de apartamentos 5x5, mas nesse caso a carga de simulação era demasiado pesada, produzindo tempos de simulação de varias horas. Por isso variamos o código do programa para diminuir a quantidade de apartamentos a 4, obtendo uma carga computacional aceitável para o nosso computador, Corel I5 com 4GB de memoria Ram, sistema operativo Linux-Ubuntu 12.10. O tempo de simulação em todos os cenários foi de 30s.

O simulador utilizado é o "LTE-Sim" apresentado em (10), o qual foi escrito em linguagem C++ utilizando o paradigma de objetos orientados e sendo um simulador dirigido por eventos. O simulador verifica o rendimento de sistemas LTE. LTE-Sim abarca vários aspectos de uma rede LTE, incluindo a tecnologia de acesso de radio (E-UTRAN) e a arquitetura para transmissão de pacotes (EPS).

Em relação à posição do edifício se teve em consideração duas posições, a primeira a uma distância de 511.9 m da macro-estação e a segunda a uma distância de 156,9 m, ver figura 6.2. O motivo destas posições é analisar os rendimentos dos femto-usuários quando são ligados diretamente à eNB tanto uma distância longa quanto a uma pequena, dando lugar a um cenário comum, onde existe só uma eNB e usuários *Indoor*. A quantidade de usuários por apartamento varia de 3 a 30 com um intervalo de crescimento de 3 usuários. Para o valor mínimo de 3 usuários por apartamento, tem-se em total 12 usuários dentro da edificação como mostra a figura 6.3, já para o valor máximo

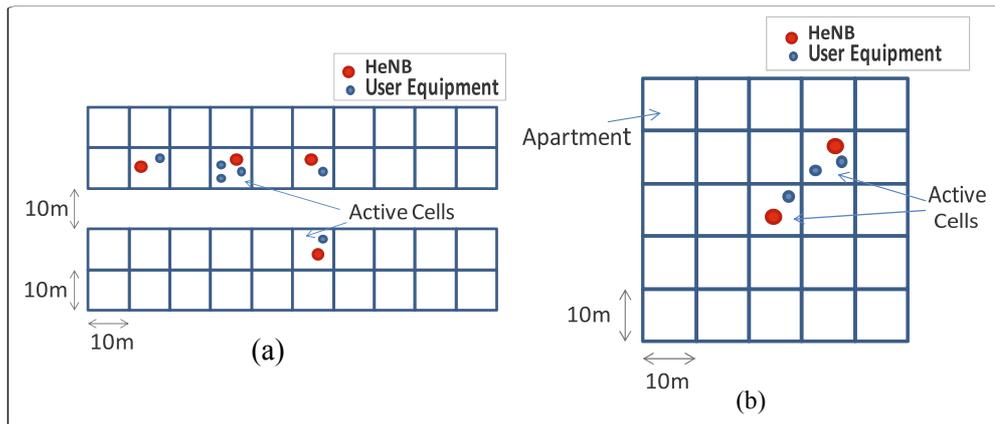


Figura 6.1: Topologias de edificação para operação de HeNB pela 3GPP. A) Blocos de duas bandas B) Grade de apartamentos 5x5

de 30 usuários por apartamento, resulta em um total de 120 usuários dentro da edificação, ver figura 6.4. De acordo ao ambiente de operação existem dois tipos de HeNB, umas instaladas em ambientes familiares que operam com um número máximo de 10 usuários e outras para ambiente empresariais com um número de usuários de até 25 ou 30, por esse motivo escolhemos que a máxima quantidade de usuários por apartamento seja 30.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112792/CA

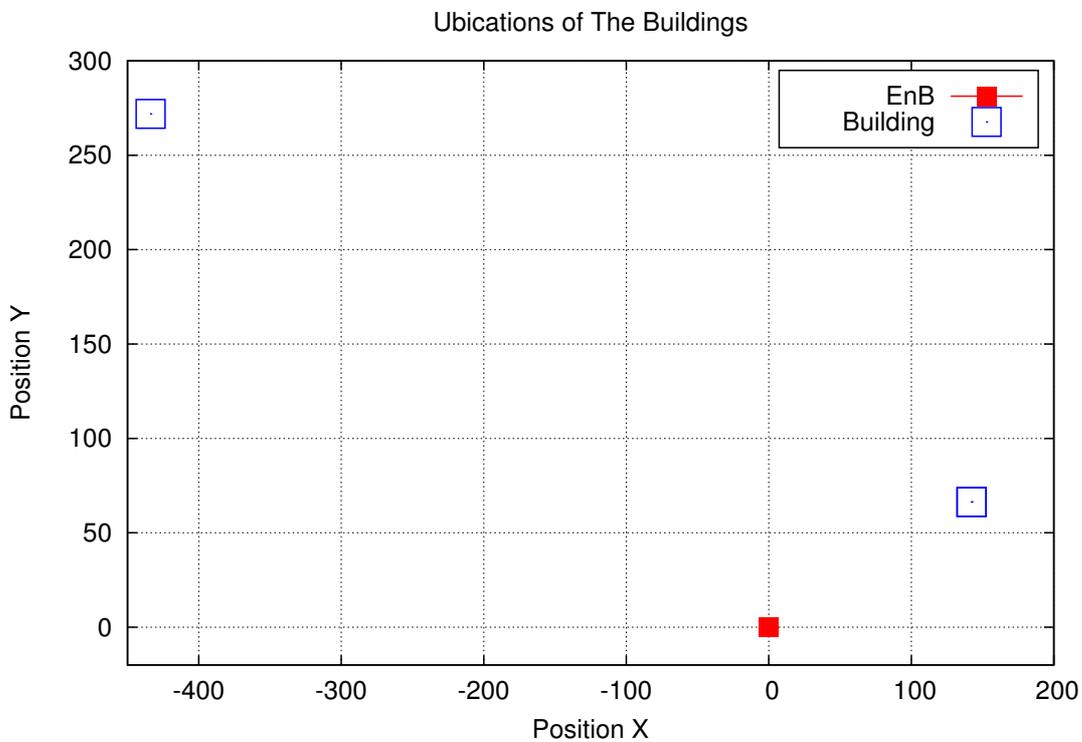


Figura 6.2: Ubicação das edificações e da eNB

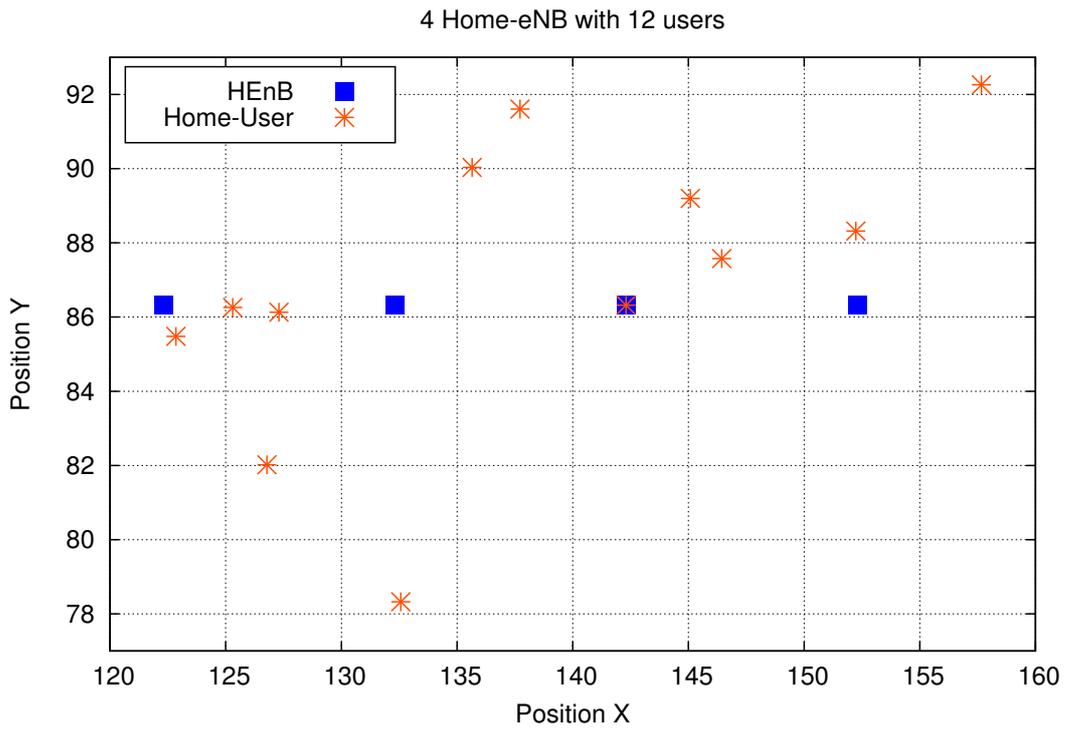


Figura 6.3: Cenário com 12 Usuários dentro da edificação

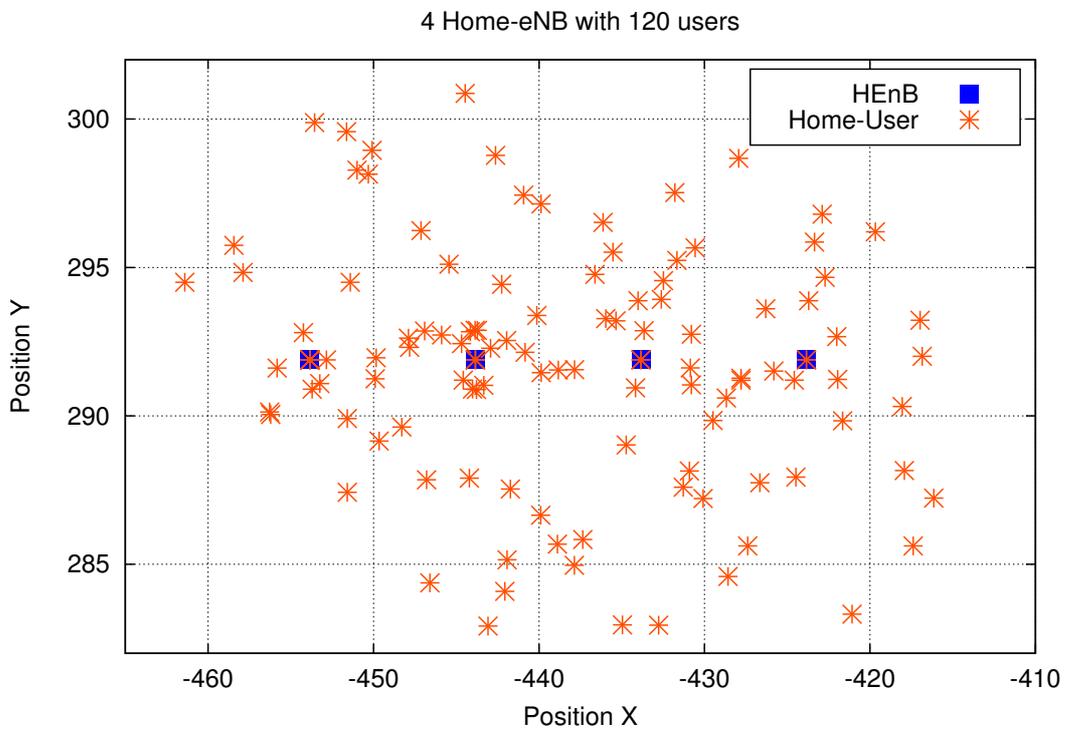


Figura 6.4: Cenário com 120 usuários dentro da edificação

Com relação ao controle de acesso ao ambiente femto-celular, foi empregado o acesso fechado, porque nosso objetivo é analisar o rendimento de um número fixo de femto-usuários para os diferentes valores de padrão de reuso. Caso trabalhássemos com um controle de acesso aberto ou híbrido, não se teria controle sobre o número de usuários atendidos e não se apreciaria com clareza o comportamento dos cenários avaliados.

O tráfego de descida (*Downlink*) empregado é vídeo. O vídeo tem uma sequência de 25 quadros por segundo, uma resolução de 352 x 288 em formato YUV. A taxa de codificação utilizada é 440 kbps. Para ter uma visão detalhada do desempenho do reuso fracionário, avaliou-se o ambiente femto-celular com três diferentes cargas de dados para cada usuário. No primeiro cenário, cada usuário tem que receber um vídeo, no segundo e terceiro 3 e 5 vídeos respectivamente. O que se procura é simular ambientes com baixo, médio e alta carga de tráfego.

Todos os parâmetros de simulação da eNB e da HeNB são mostrados nas tabelas 6.1 e 6.2 respectivamente.

Tabela 6.1: Parâmetros da eNB

Macro-eNB	
Parâmetros	Valores
Raio	1 Km
Largura de faixa	10MB
Frequência de Portadora	2000 MHz
Perdas por penetração (Outdoor)	10 dB
Perdas por percurso	$PL(\text{dB})=I + 37.6\log_{10}(R) / I=128.1$ para 2GHz R separação entre Tx e Rx
Potência de transmissão	43 dBm

Tabela 6.2: Parâmetros da HeNB

Home-eNB	
Parâmetros	Assunção
# Edifícios	1
# Apartamentos por edifício	4
Área	100 m ²
Largura de faixa	10, 5, 3.4, 2.6 MHz
Frequência de Portadora	2000 MHz
Perdas por percurso	$PL(\text{dB}) = 127 + 30\log_{10}(R/1000) +$ $18.3 n ((n+2)/(n+1)-0.46)$ R separação entre Tx e Rx /n=número de paredes penetradas
Frequência fracionário de reuso	Reuso 1, Reuso 1/2, Reuso 1/3, Reuso 1/4
Perdas por penetração de parede	20 dB
Perdas por penetração (Indoor)	0 dB
Potência de transmissão da HeNB	20 dBm
Tráfego	Vídeo de 440 kbps
# Usuários por HeNB	De 3 a 30

6.2

Modelo do Canal e resultados da avaliação do SINR

Para modelo de propagação foram considerados quatro fenômenos conforme sugerido pela 3GPP em (12): (i) perda por percurso, (ii) perdas por penetração, (iii) perdas por sombreamento e (iv) perdas por desvanecimento rápido.

1. **Perda por percurso:** é a redução na densidade da potência quando a onda eletromagnética se propaga no espaço. Esta perda é principalmente influenciada pela distância de separação entre o transmissor e o receptor e o meio de propagação. Para encarar a natureza peculiar femto-celular o modelo de perdas por percurso para usuários *Indoor* é apresentado na formula 6-1, utilizada em ambientes urbanos femto-celulares.

$$PL[dB] = 127 + 30 \cdot \log_{10}(R/1000). \text{ Para } 2 \text{ GHz, } R \text{ em metros.} \quad (6-1)$$

Esta formula avalia a perda considerando só a distância, R , entre o transmissor e o receptor expressado em metros.

No entanto que para um ambiente macro-celulares se emprega a formula 6-2.

$$PL(dB) = 128.1 + 37.6 \log_{10}(R). \text{ Para } 2 \text{ GHz, } R \text{ em Km.} \quad (6-2)$$

2. **Perda por Penetração:** Quando o usuário se encontra em um ambiente que tem construções, estas obstruem o percorrido da sinal, dando lugar a um desvanecimento na potência. Esta perda é considerada de desvanecimento lento porque é contabilizada para longos deslocamentos. Devemos ressaltar que o usuário não se encontra dentro da construção, e sim na rua. Em consequência o valor da perda é diretamente proporcional ao grau na densidade das construções. Para nosso modelo consideramos uma perda de 10 dB.
3. **Perda por sombreamento:** esta perda é devido à variação da sinal recebida quando o receptor se movimenta, por exemplo quando ingressa a um edifício ou se movimenta dentro dele, ou quando se encontra na rua caminhando. Em nosso caso para avaliar essa perda se emprega uma distribuição log-normal com media 0 dB e desviação padrão 8 dB.
4. **Perda por desvanecimento rápido:** gerada por pequenas flutuações da sinal em pequenas áreas. É considerado rápido porque o sinal é posto

a variar em um período de tempo comparável ao tempo de duração de um símbolo do sinal transmitido. Para nosso caso, empregamos o modelo de Jakes para modelar esta perda (7).

Para usuários localizados dentro do edifício (*Indoor user*) e atendidos pela macro-eNB, dentro do cálculo de perdas por percurso considerou-se um fator de atenuação devido à presença de paredes do edifício, o valor por defeito é 20 dB (12).

Logo de essa breve explicação avaliaremos os níveis do SINR percebidos pelos usuários. Para isso a camada física computa para cada sub-canal o nível de SINR da sinal recebida, considerando a potência de recepção, o ruído e a interferência. A fórmula utilizada se mostra em 6-3

$$SINR_{i,j}(dB) = 10\log\left(\frac{P_{RX,i,j}}{FN_0B + I}\right) \quad (6-3)$$

Onde $SINR_{i,j}$ é o SINR do i -ésimo usuário quando utiliza o j -ésimo sub-canal, F , N_0 , B e I são a figura do ruído (valor típico 2,5), densidade espectral do ruído (Valor igual -174 dBm), largura de faixa de um bloco de recurso (180 kHz) e nível interferência respectivamente.

Nas figuras 6.5, 6.7, 6.9, 6.11 e 6.13, são mostrados os níveis do SINR em formato tridimensional para todos os casos avaliados. Enquanto nas figuras 6.6, 6.8, 6.10, 6.12 e 6.14 é mostrada a função de distribuição acumulada dos valores do SINR para os casos de: conexão direta à eNB, e para utilização de HeNBs com padrões de reuso de 1, 1/2, 1/3 e 1/4 respectivamente.

Na primeira figura (6.5) de conexão direta dos femto-usuários à eNB, cerca de 90% de os usuários experimenta valores do SINR menores ou iguais 0 dBs (ver figura 6.6), o que significa que a potência de recepção é menor ou igual à potência do ruído mais a interferência, devido principalmente à distância de separação entre a macro-estação e os femto-usuários (em média 511 m) e pelo fator de perda pelas paredes de 20 dB (User Indoor).

Já para os casos com presença de HeNBs o nível do SINR melhora consideravelmente. Para o caso de reuso de frequência unitário apenas um 18% dos usuários experimenta valores negativos do SINR (ver figura 6.8). Para $R=1/2$ nenhum usuário experimenta valores negativos do SINR (ver figura 6.10), como consequência da divisão do espectro, onde só duas femto-células utilizaram a mesma porção de banda. Para $R=1/3$ estamos frente a um ambiente quase sem reutilização da mesma porção de banda, onde só a primeira e quarta femto-célula operam na mesma banda, dando como resultado altos níveis do SINR, acima de 20 db (ver figura 6.12). Finalmente para $R=1/4$, cada

HeNB utilizada uma banda de frequência que não é reutilizada por nenhuma outra, dando lugar a que todos os usuários percebam 40 dB de SINR (ver figura 6.14).

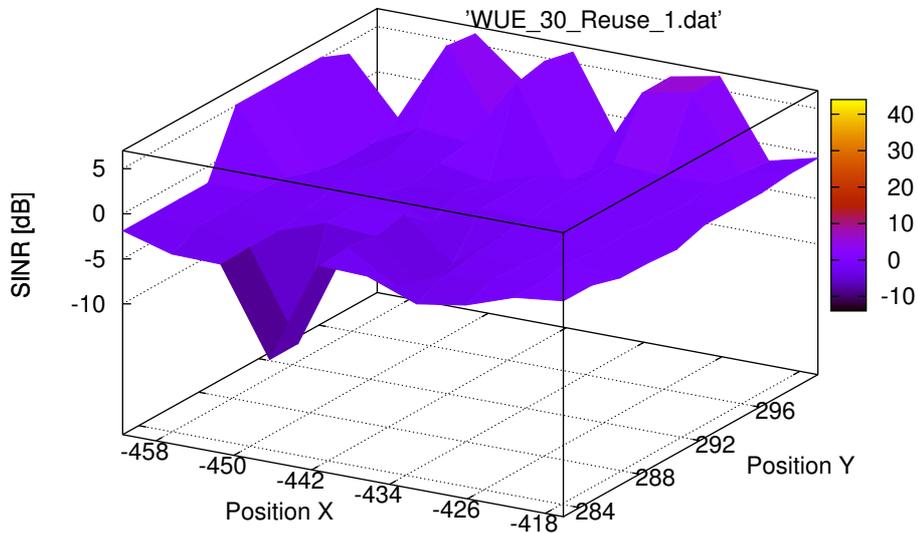


Figura 6.5: Nível do SINR quando os 120 femto-Usuários são ligados diretamente à macro estação

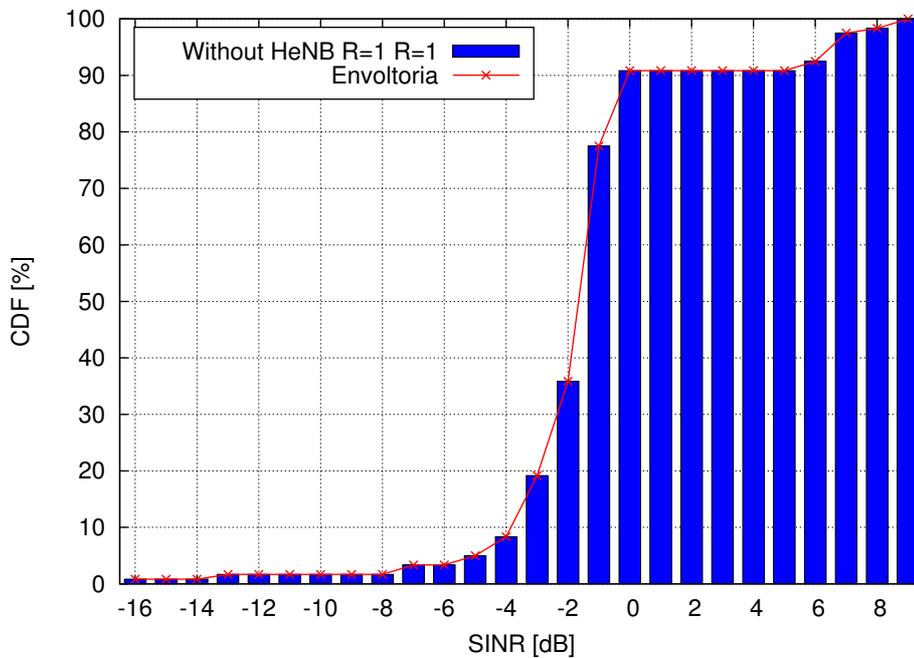


Figura 6.6: Nível do SINR quando os 120 femto-Usuários são ligados diretamente à macro estação

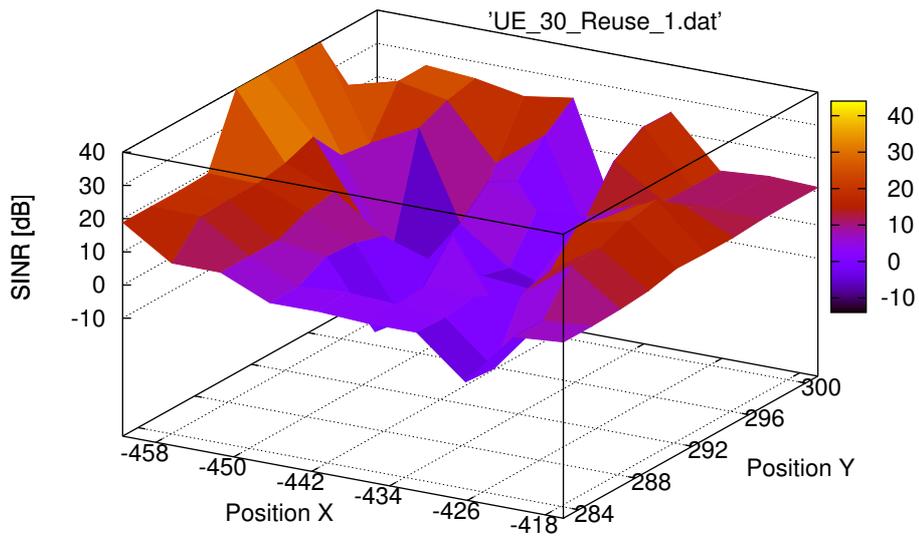


Figura 6.7: Nível do SINR para o padrão de reuso R=1

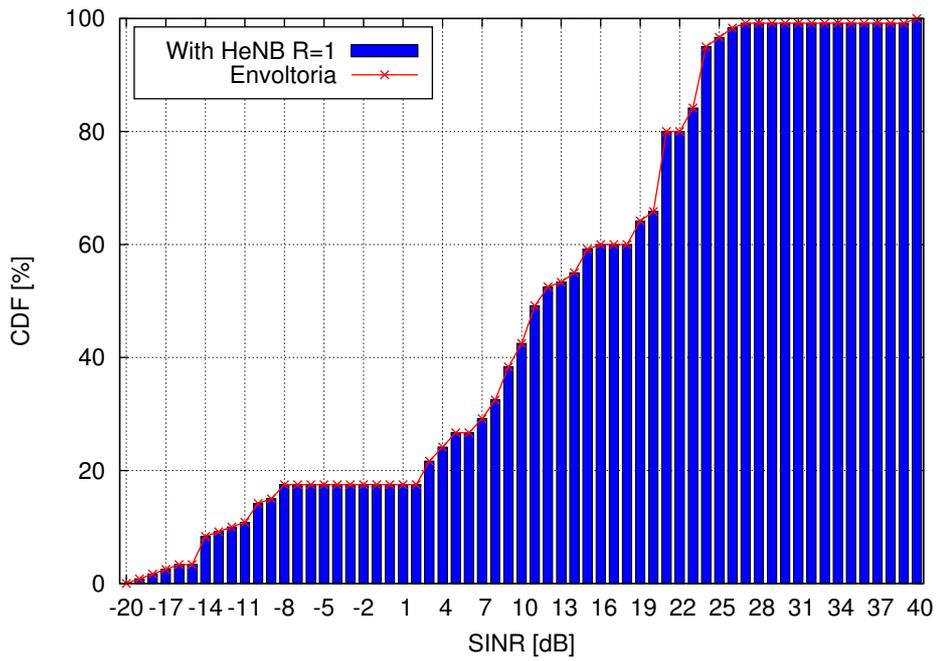


Figura 6.8: Nível do SINR para o padrão de reuso R=1

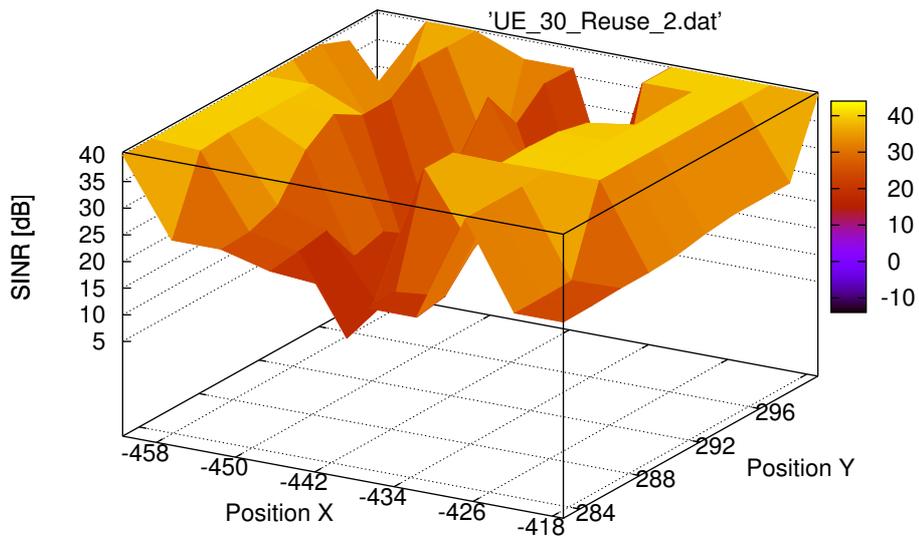


Figura 6.9: Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1/2$

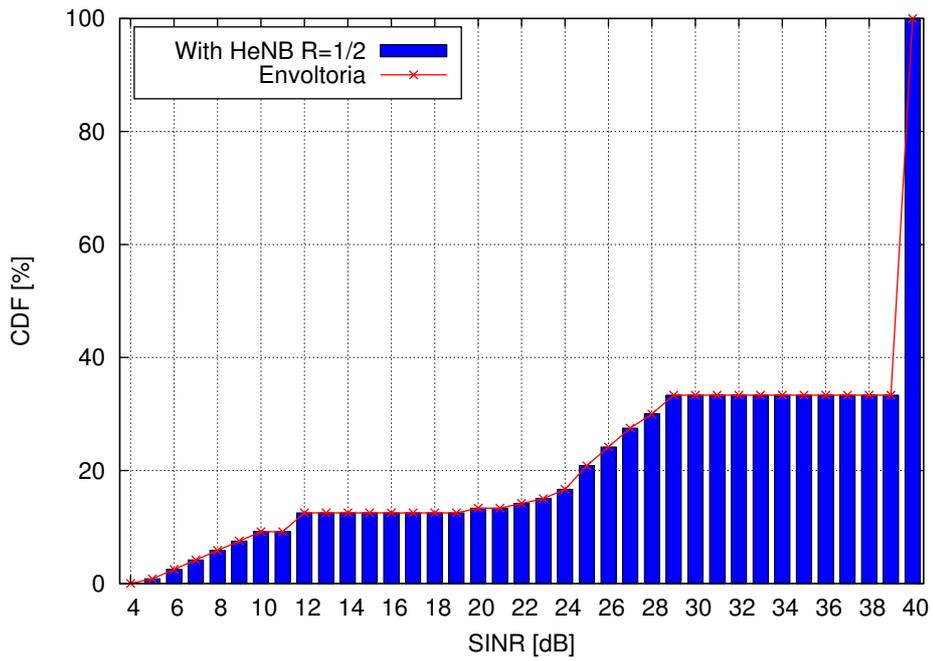


Figura 6.10: Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1$

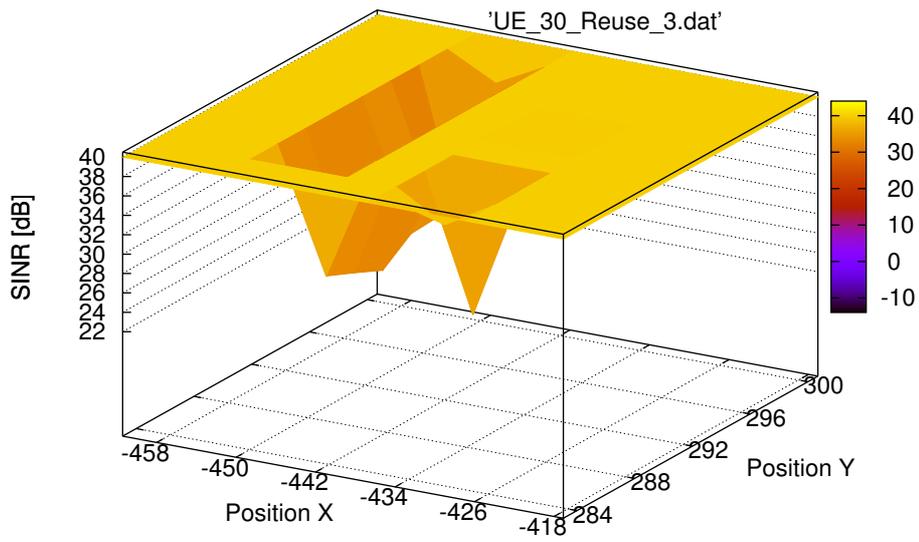


Figura 6.11: Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1/3$

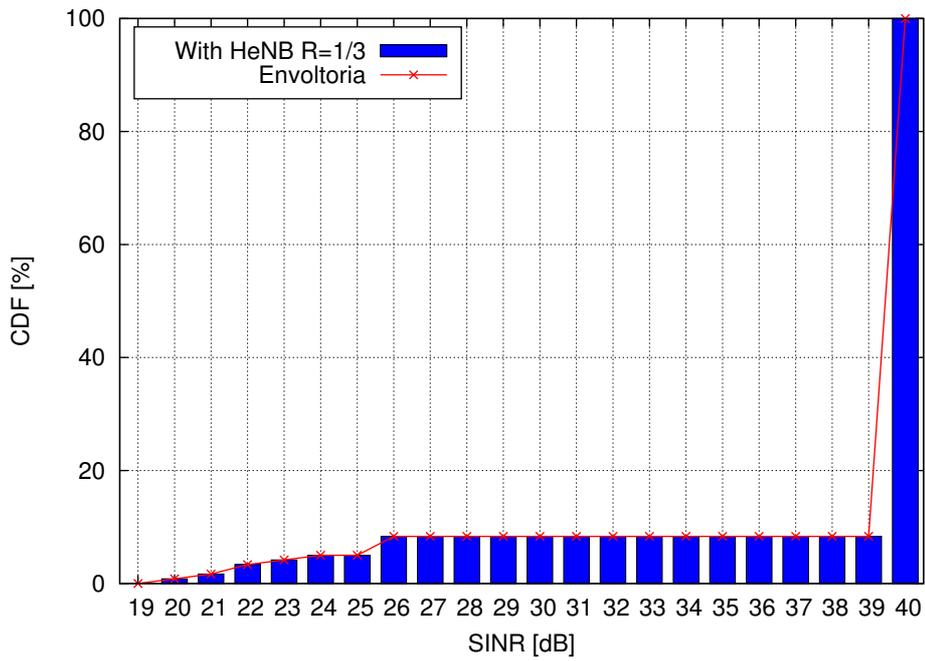


Figura 6.12: Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1$

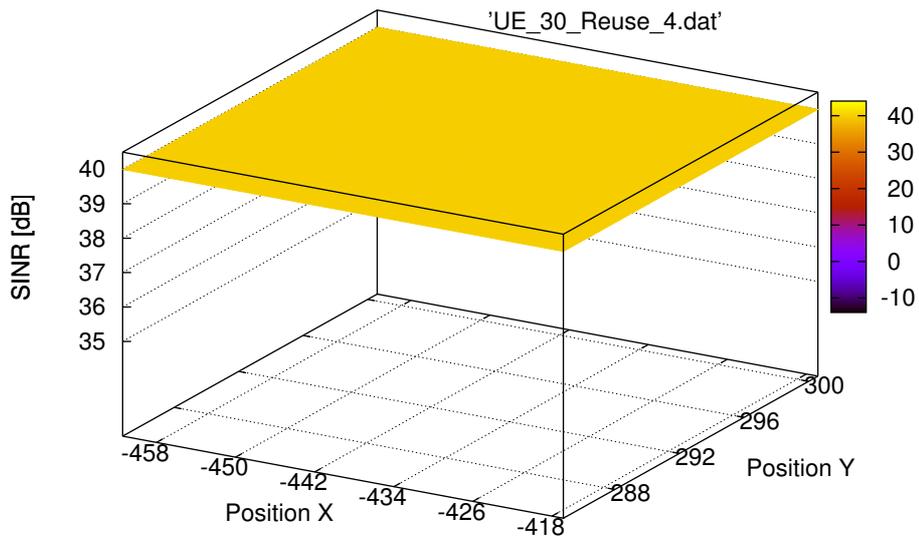


Figura 6.13: Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1/4$

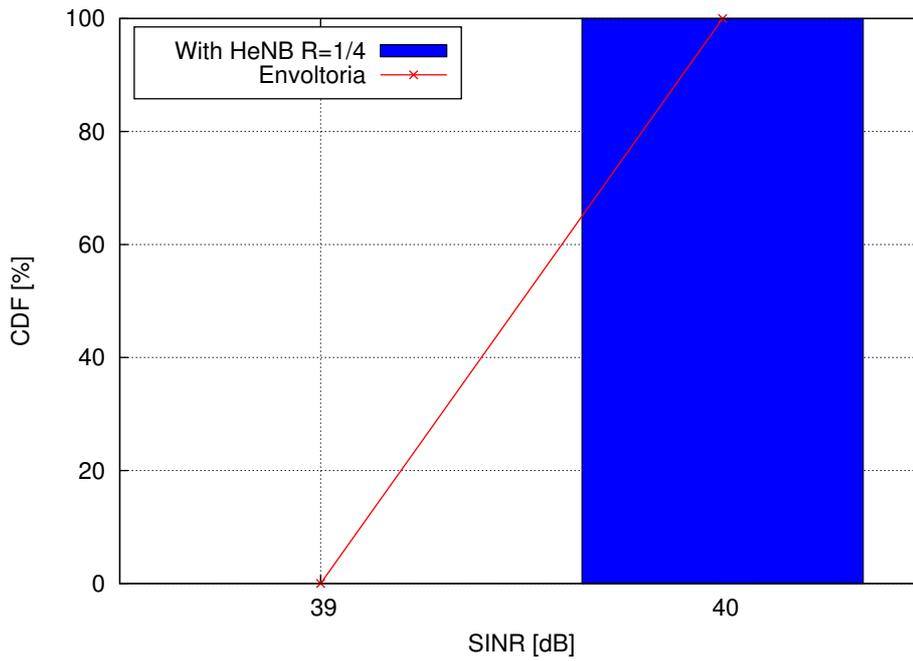


Figura 6.14: Nível do SINR para o padrão de reuso $R=1$

6.3

Resultado obtidos para os algoritmos avaliados

Após ter implementado o reuso de frequência fracionário e observado os benefícios notáveis que se obtêm no valor do SINR, o passo seguinte é colocar acima do reuso os algoritmos de agendamento estudados no capítulo 5 e avaliar o comportamento com relação à vazão agregada, vazão média por usuário, retardo, perda de pacotes e índice de justiça.

Em primeiro lugar avaliaremos o comportamento utilizando o algoritmo de Justiça proporcional (PF), para a seguir considerar o algoritmo M-LWDF e finalizaremos como o algoritmo FLS. O motivo da escolha desses algoritmos é realizar a análise do comportamento para aplicações em tempo real (vídeo conferência, VoIP) com relação a algoritmos que não foram projetados para esse tipo de aplicações e algoritmos criados para trabalhar com essas aplicações. Cada simulação será submetida a três diferentes carga de tráfego. Esta escolha foi feita porque se notou que quando o sistema se encontra com tráfego fraco, os algoritmos apresentam um comportamento muito semelhante, mas quando o tráfego começa a saturar pode-se apreciar a diferença entre um algoritmo e outro. Em resumo a estrutura de nossos cenários de simulação para um particular algoritmo de agendamento é a seguinte:

1. Tráfego de 1 vídeo por usuário.
 - Padrão de reuso fracionário 1.
 - Padrão de reuso fracionário 1/2.
 - Padrão de reuso fracionário 1/3.
 - Padrão de reuso fracionário 1/4.
 - Conexão direta à macro-estação sem intervenção da HeNB.
2. Tráfego de 3 vídeos por usuário.
 - Padrão de reuso fracionário 1.
 - Padrão de reuso fracionário 1/2.
 - Padrão de reuso fracionário 1/3.
 - Padrão de reuso fracionário 1/4.
 - Conexão direta à macro-estação sem intervenção da HeNB.
3. Tráfego de 5 vídeos por usuário.
 - Padrão de reuso fracionário 1.
 - Padrão de reuso fracionário 1/2.
 - Padrão de reuso fracionário 1/3.
 - Padrão de reuso fracionário 1/4.
 - Conexão direta à macro-estação sem intervenção da HeNB.

6.3.1

Vazão Agregada. Algoritmos PF, M-LWDF e FLS

O comportamento da vazão agregada (Vazão total do sistema) para o cenário de transmissão de 1 vídeo por usuário é mostrado na figura 6.15. Esse cenário por ter uma carga de dados leve, os diferentes padrões de reuso fracionários têm quase os mesmos rendimentos de vazão agregada. Mesmo que mesmo os níveis de interferência sejam diferentes para os diferentes padrões de reuso, como o tráfego é leve vão existir recursos de frequência suficientes para garantir um bom desempenho, então para aquele cenário que tenha uma maior interferência, por exemplo para $R=1/2$, utilizara mais banda de frequência para transmitir a mesma quantidade de dados, entanto que para $R=1/3$ empregara menos bandas mas o resultado final da vazão agregada sera igual para os cenários com reuso fracionário. Em termos de percentagem o reuso fracionário obteve uma melhoria de até 33% com relação ao rendimento para $R=1$. O fato de os reusos fracionários oferecem maior vazão é devido ao nível de interferência entre femto-celulas ser menor do que para $R=1$. Já para o cenário de ligação direta à eNB (Sem HeNB) a vazão mantém níveis baixos como consequência de uma maior distância de separação (maiores perdas por percurso), somando a isso o fator de perdas de penetração de paredes que são no ordem de 20 dB para ambiente *Indoor*. Por outro lado, os três algoritmos avaliados apresentam o mesmo rendimento de vazão agregada, como se mostra na Figura 6.15, pelo motivo de, neste caso, o tráfego ser baixo, havendo portanto folga nos recurso, por isso mesmo se utilizem diferentes métricas para o agendamento os quais utilizar diferentes larguras de faixa o resultado final transmitira a mesma quantidade de dados, ou seja igual vazão agregada.

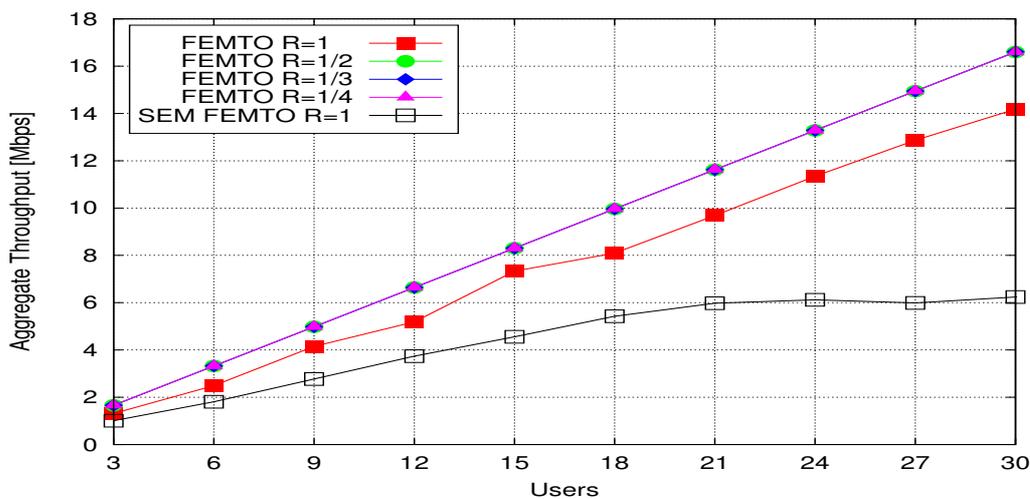


Figura 6.15: Comportamento da Vazão agregada para uma carga de tráfego de 1 vídeo por usuário quando se empregam os algoritmos PF, M-LWDF e FLS

Para o cenário com 3 vídeos por usuário mostrado na figura 6.16 começa a ser notado o efeito da carga de tráfego. No intervalo de 3 a 12 usuários por apartamento os reusos fracionários apresentam os mesmos desempenhos para os três algoritmos, obtendo uma vantagem de 33% frente ao reuso unitário. Já para um número superior de usuários se nota a diferença tanto no reuso fracionário quanto no algoritmo empregado. Em termo de reuso fracionário de frequência os melhores comportamentos são obtidos por $R=1/2$ e $R=1/3$, pois para $R=1/4$ a banda resultante para cada HeNB se torna insuficiente, resultando em uma saturação na sua vazão. Agora considerando o algoritmo empregado, a maior vazão é obtida por o PF para $R=1/3$ (Figura 6.16a) pois sua métrica dá prioridade ao usuário com melhor qualidade do canal. A segunda melhor vazão agregada é obtida pelo algoritmo M-LWDF com $R=1/2$ (Figura 6.16b) por ter uma métrica parecida com o PF com a diferença que utiliza o tempo de retardo como ponderador. Finalmente a menor vazão é obtida pelo algoritmo FLS, pois no seu primeiro nível de operação não considera a qualidade do canal. Cabe notar que os algoritmos M-LWDF e FLS necessitam de uma maior largura de faixa, prova disso, é que seus melhores desempenhos são logrados para $R=1/2$ (banda 5 Mhz).

Para o cenário de 5 vídeos por usuário (figura 6.17), o comportamento de $R=1/3$ começa a ficar saturado em banda mais rapidamente para os algoritmos M-LWDF e FLS. Por isso os melhores rendimento são obtidos para $R=1/2$. No caso particular do algoritmo PF o melhor desempenho é logrado para $R=1/3$ pois ele requer menos banda pois prioriza usuários com melhor qualidade do canal. A nível de algoritmos novamente a maior vazão é conseguida pelo PF seguido do M-LWDF e finalmente o FLS.

Finalmente na figura 6.18 é mostrada a vazão agregada dos três algoritmos empregados com seus diferentes padrões de reuso quando se tem um tráfego de 5 vídeos por usuário. Como era de esperar a maior vazão agregada é obtida para $R=1/2$ e quando se emprega o algoritmo PF. Por outro lado essa figura confirma o conhecido como ganho pela diversidade de multi-usuários do qual se beneficia o algoritmo PF, que se refere a um incremento na vazão agregada quando se aumenta o número de usuários, devido a que à probabilidade de encontrar usuários que estão com boas condições de canal num determinado tempo e frequência incrementa com o crescimento do número de usuários.

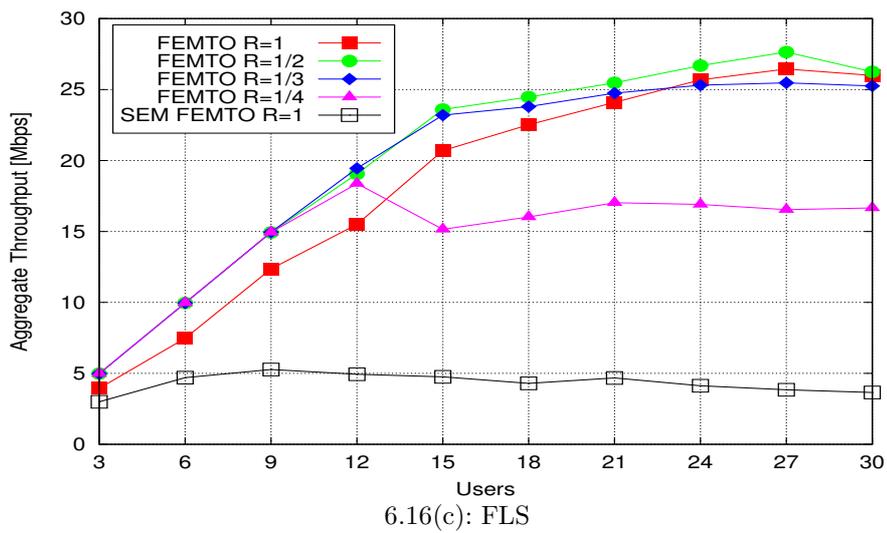
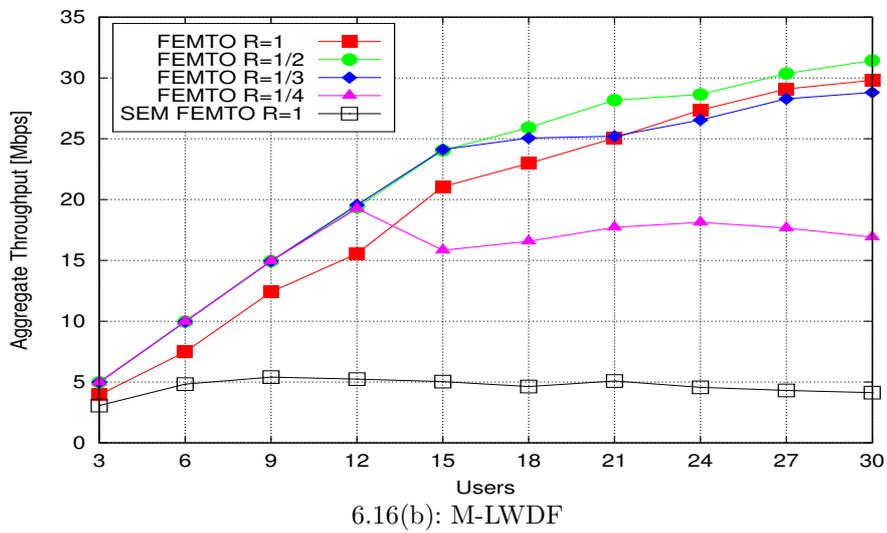
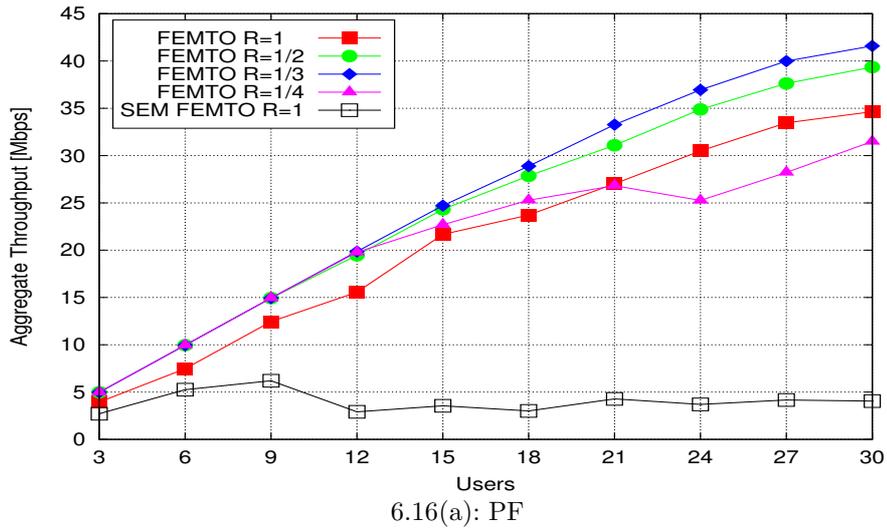


Figura 6.16: Comportamento da Vazão agregada para uma carga de tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

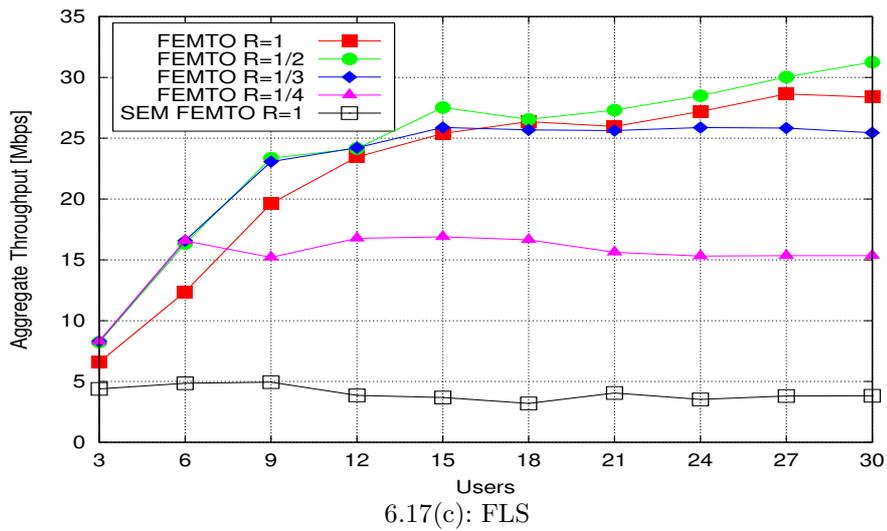
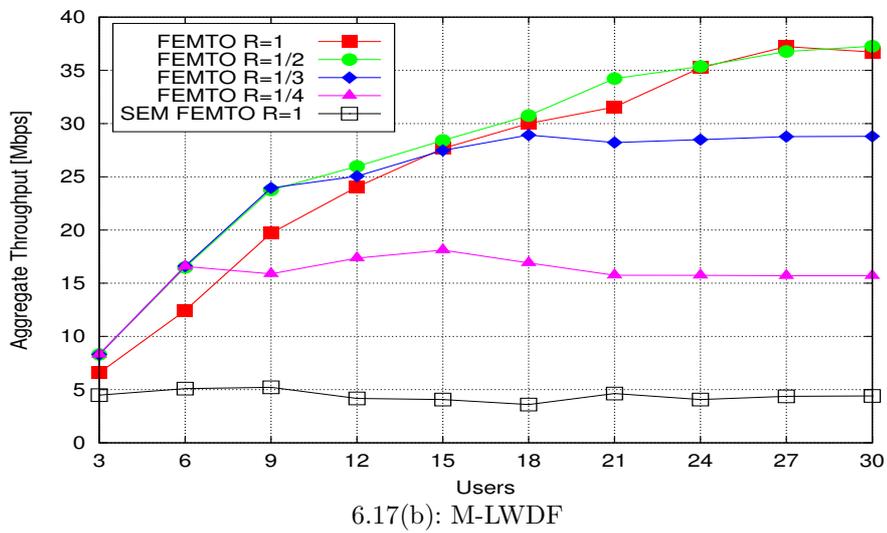
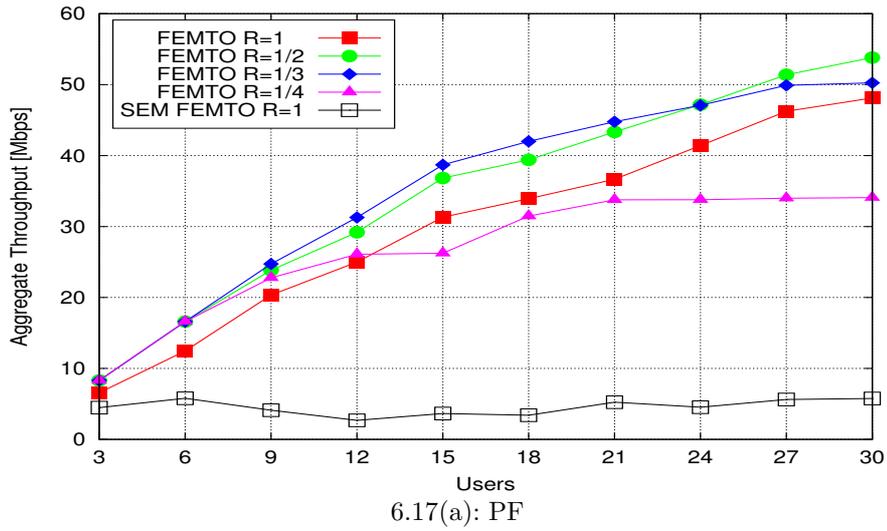


Figura 6.17: Comportamento da Vazão agregada para uma carga de tráfego de 5 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

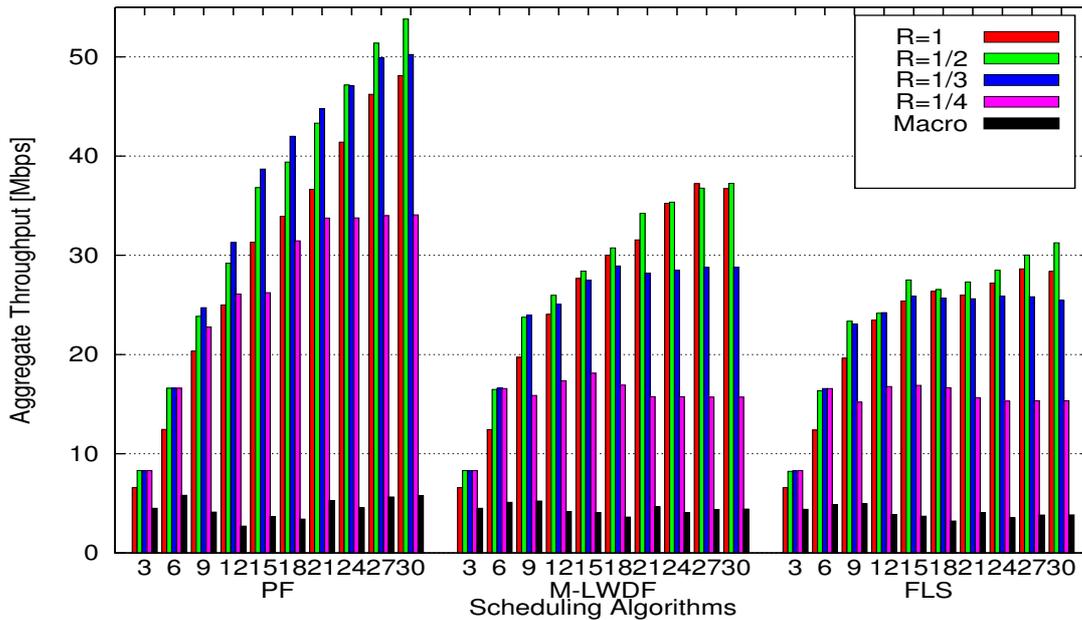


Figura 6.18: Vazão agregada para um tráfego de 5 vídeos por usuário

6.3.2

Vazão média por usuário. Algoritmos PF, M-LWDF e FLS

Agora avaliaremos a quantidade de dados transmitidos por usuário. Para o caso de 1 vídeo por usuário (Figura 6.19) e em conformidade com os resultados obtidas da vazão agregada, os usuários com reuso de frequência fracionário têm maior vazão individual que o usuário com reuso de frequência unitário. Agora por terem todos que transmitir um só vídeo, isso quer dizer que a cada TTI eles necessitam transmitir a mesma quantidade fixa de dados e por ser esta quantidade pequena em termos de utilização de banda, todos têm a mesma vazão individual independente do algoritmo empregado. Embora tenham a mesma vazão individual o percentagem de banda utilizada é diferente tanto em termo de reuso fracionário como em algoritmo empregado.

Para o caso de três vídeos por usuário (Figura 6.20), começa-se a notar o peso do tráfego de dados. Em primeiro lugar ao incrementar o número de usuários a vazão individual diminui pois a mesma banda de frequência é compartilhar entre mais usuários. O fato anterior nos conduz a concluir que se para um número pequeno de usuários uma quantidade de dados "x" é transmitida cada TTI, um incremento de usuários fara com que cada usuário, em iguis condições do canal, transmita em média a cada TTI um valor menor que "x", deixando alguns pacotes de dados para o próximo TTI, aumentando

o tempo de retardo para esses pacotes. Em termos de reuso fracionário os melhores rendimentos são obtidos com $R=1/3$ quando o algoritmo PF é empregado e com $R=1/2$ para os algoritmos M-LWDF e FLS. Em termos do algoritmo empregado o PF lidera frente a os demais.

Para o caso de cinco vídeos por usuário (Figura6.21), existe uma alta demanda de banda de frequência, como consequência o reuso fracionário $R=1/2$ tem o melhor desempenho. Nesta gráfica onde se mostram os três algoritmos se nota o melhor desempenho em ordem descendente do PF, M-LWDF e FLS. Esse melhor desempenho é mais acentuado quando se tem um número de usuários superior a 18.

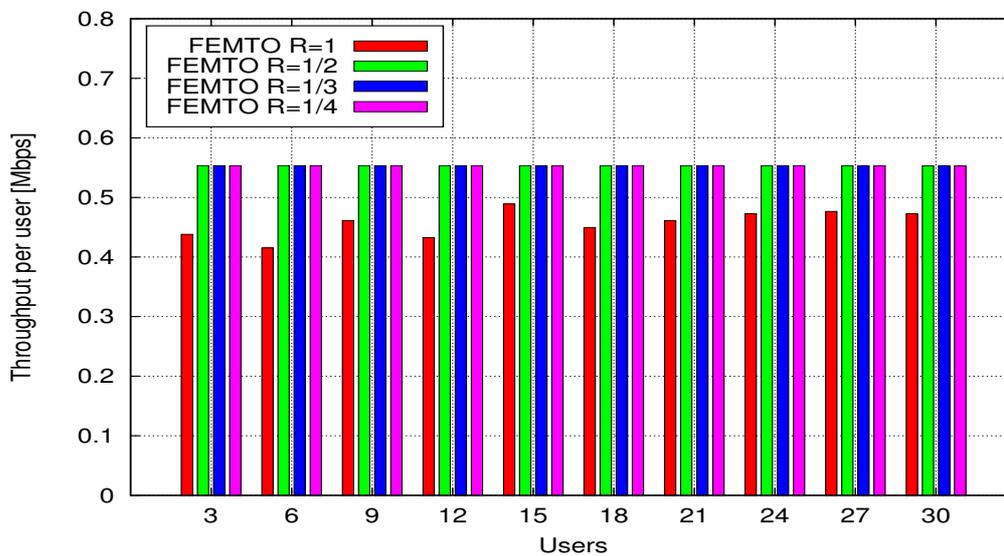


Figura 6.19: Comportamento da Vazão média por usuário para uma carga de tráfego de 1 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

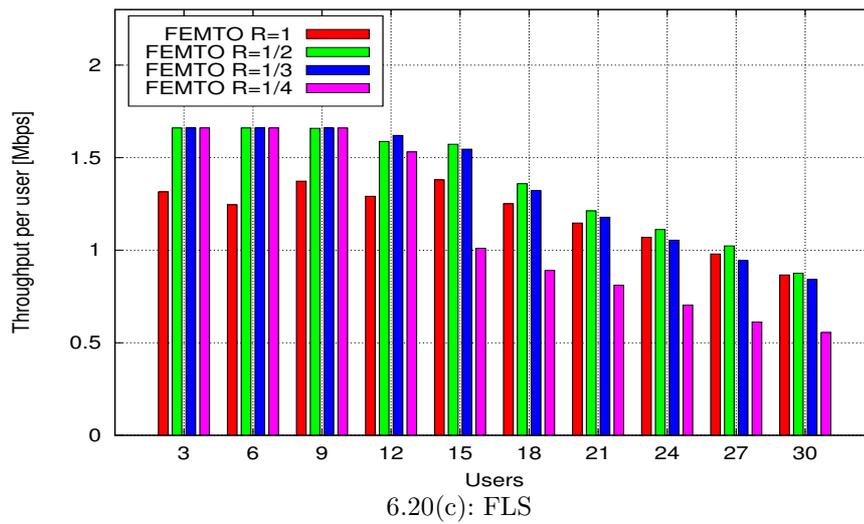
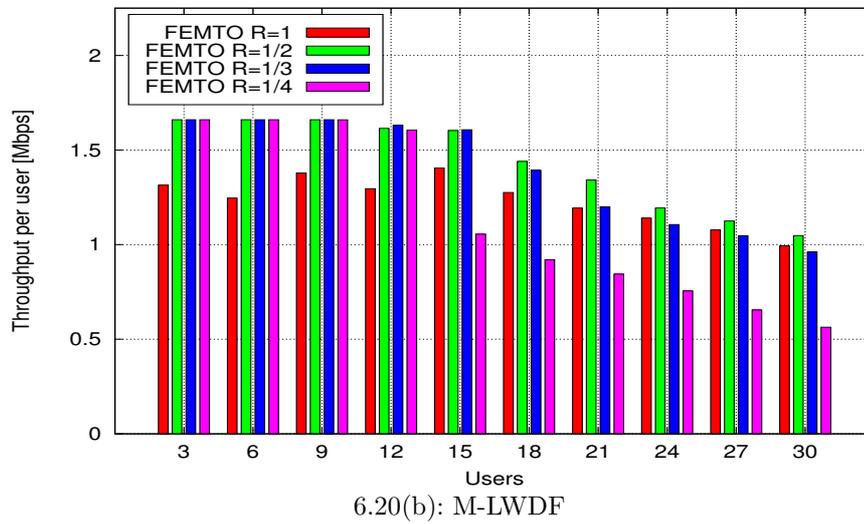
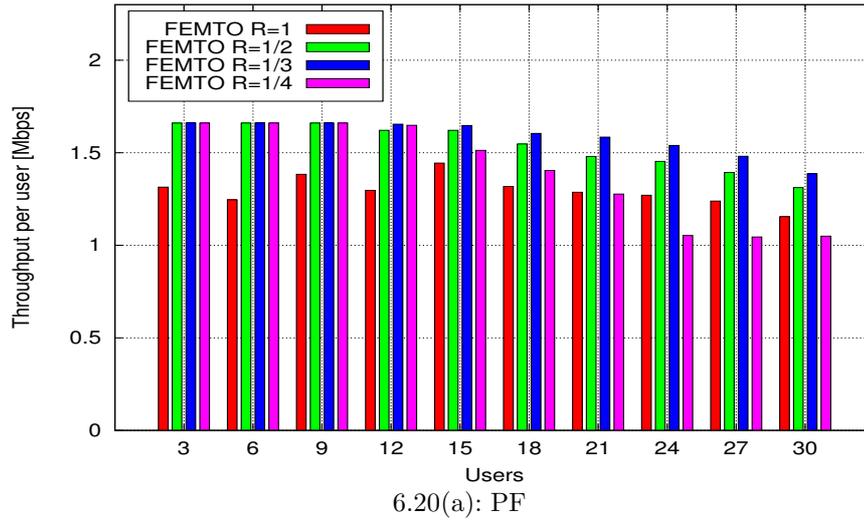


Figura 6.20: Comportamento da Vazão média por usuário para uma carga de tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

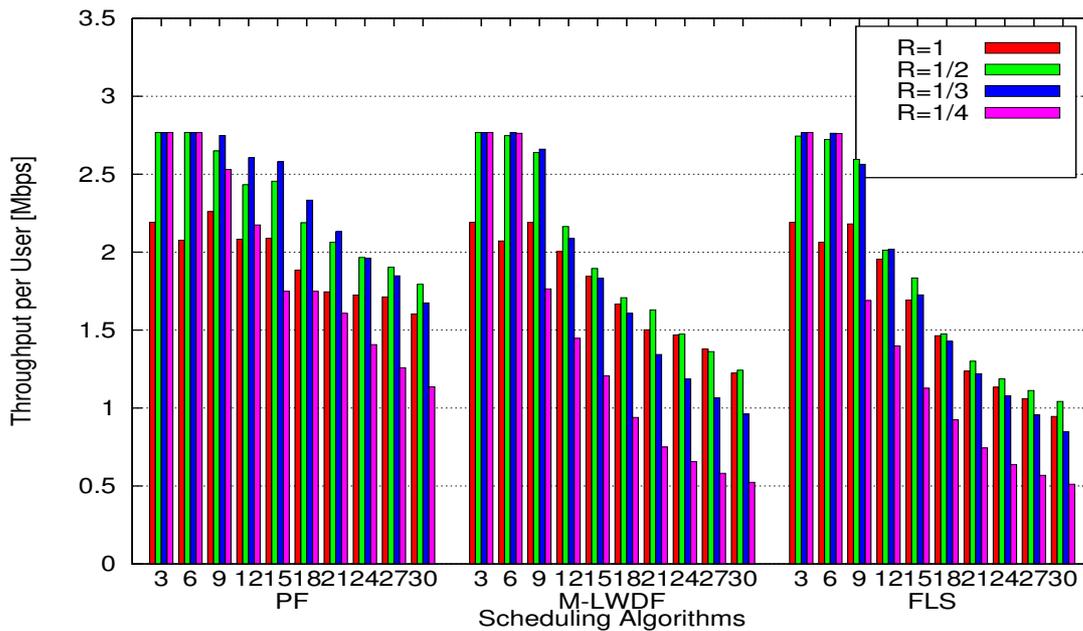


Figura 6.21: Vazão média por usuário para um tráfego de 5 vídeos por usuário

6.3.3

Tempo de retardo. Algoritmos PF, M-LWDF e FLS

O retardo representa o intervalo de tempo entre o instante no qual o pacote é criado na camada de aplicação e o instante no qual o pacote é recebido pelo usuário. O tempo de trânsito entre a camada de aplicação e a camada física é desprezado por ser muito pequeno com relação ao tempo de percurso entre a HeNB e o femto-usuário. O valor do retardo depende, de como os recursos de radio são distribuídos entre os usuários e por tal motivo o algoritmo de agendamento dos recursos e a qualidade do canal afetam seu valor. Quando o tempo de retardo é baixo é possível a reprodução de um conteúdo multimídia no receptor em tempo real, dando a sensação de uma comunicação imediata e simultânea.

Para o cálculo do retardo total, deve-se considerar contribuições para o mesmo de retardo. A primeira é o retardo gerado pelo percurso entre a HeNB e o femto-usuário e o segundo retardo é o tempo que leva a sinal desde o roteador da internet até o núcleo da rede móvel, que pode ser via técnicas ADSL, fibra óptica etc. Para o nosso caso consideramos o meio de transmissão ADSL, porque é a técnica de acesso com maior quantidade de assinantes (58%) comparado com outras tecnologias de acesso como se mostra em (5). O valor desse segundo retardo é de 27 ms para o meio ADSL. Nas figuras seguintes mostra-se o retardo geral, ou seja a soma dessas duas componentes.

Na figura 6.22 são mostrados os resultados de tráfego de 1 vídeo por usuário. Observa-se que o menor tempo de retardo é obtido com $R=1$ porque é a configuração com maior banda disponível (10 Mhz) para ser utilizada. A medida que vamos decrescendo a faixa de frequência, com os fatores de reuso $R=1/2$, $R=1/3$ e $R=1/4$ o retardo se aumenta. Agora por estar frente a um tráfego baixo e em consequência com banda disponível, nenhum dos reusos de frequência e nenhum dos algoritmos empregados supera o máximo valor de retardo permitido de 100 ms. Cabe mencionar que para aplicações de tempo real (VoIP, Vídeo conferência) quando se tem um tempo máximo de retardo de 100 ms, se diz que é uma comunicação com boa qualidade em termos de percepção do usuário; já para o valor de 300 ms, se diz que é uma comunicação com qualidade satisfatória. Com relação ao algoritmo utilizado observa-se uma ligeira melhoria para o PF com o menor tempo de retardo, seguido do M-LWDF e logo o FLS, este comportamento é explicado porque a quantidade de banda necessária para transmitir a mesma carga de dados é menor para o PF, seguido do M-LWDF e logo o FLS.

Para o caso de 3 vídeos por usuário, mostrado na figura 6.23 o crescimento do retardo se faz mais rapidamente para todos os casos. Quando se utiliza o algoritmo PF, figura 6.23a, foram verificadas tempos de retardo superiores ao retardo máximo permitido (100 ms), devido a ele ser um algoritmo que leva em consideração a qualidade do canal, mas não os parâmetros de QoS, portanto não leva em consideração o retardo máximo permitido. Já para os algoritmos M-LWDF e FLS (figuras 6.23 a e b), por considerar eles dentro de suas métricas o retardo máximo, nenhum deles apresenta um retardo maior a 100 ms.

Na figura 6.24a é mostrada uma visão panorâmica para o caso de 5 vídeos por usuário, onde se nota claramente que o algoritmo PF não toma em consideração o retardo máximo permitido, aceitando pacotes com retardos superiores a 6s. Na figura 6.24b se fez uma aproximação à figura anterior para observar melhor o desenvolvimento dos outros dois algoritmos, onde fica corroborado o efeito do parâmetro QoS pois em nenhuma situação os outros dois algoritmos superam os 100 ms e o algoritmo FLS levemente gera mais retardo do que o M-LWDF.

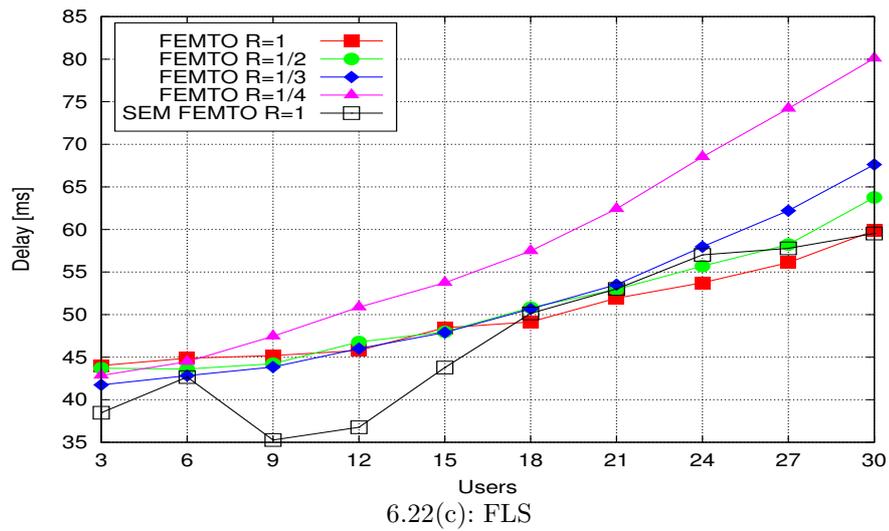
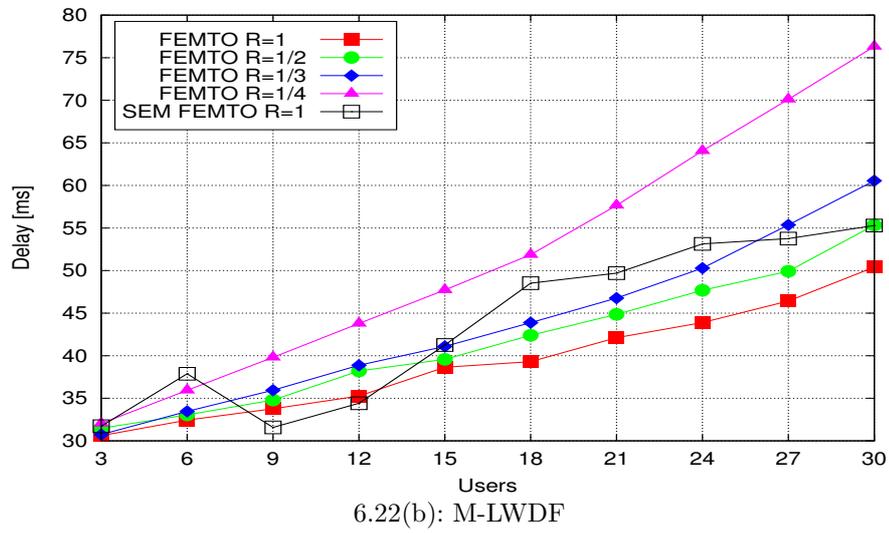
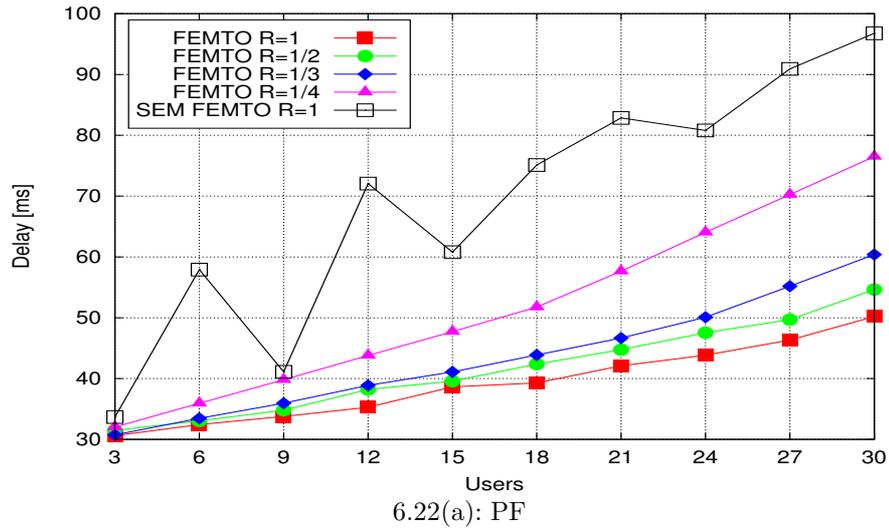


Figura 6.22: Tempo de retardo para uma carga de tráfego de 1 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

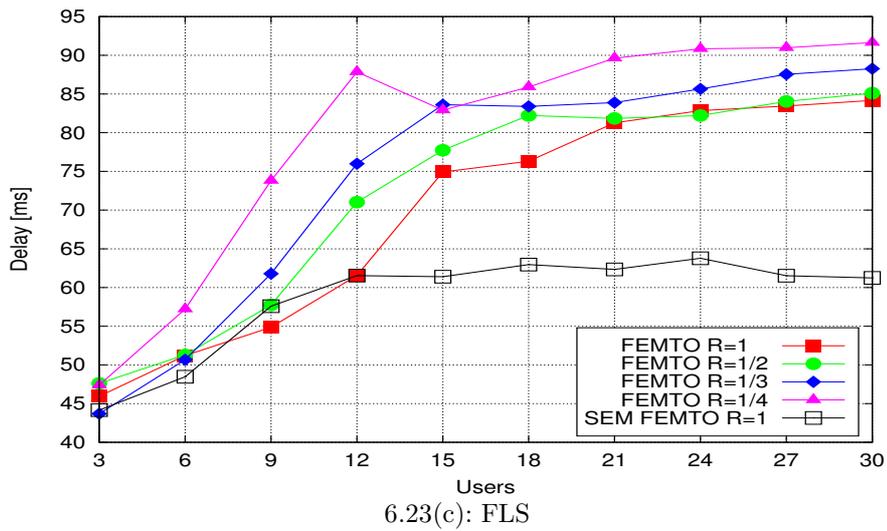
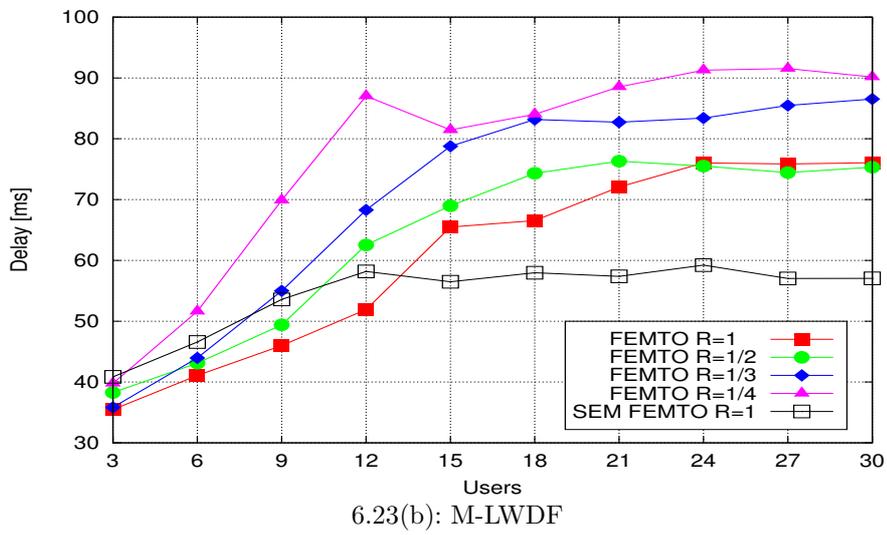
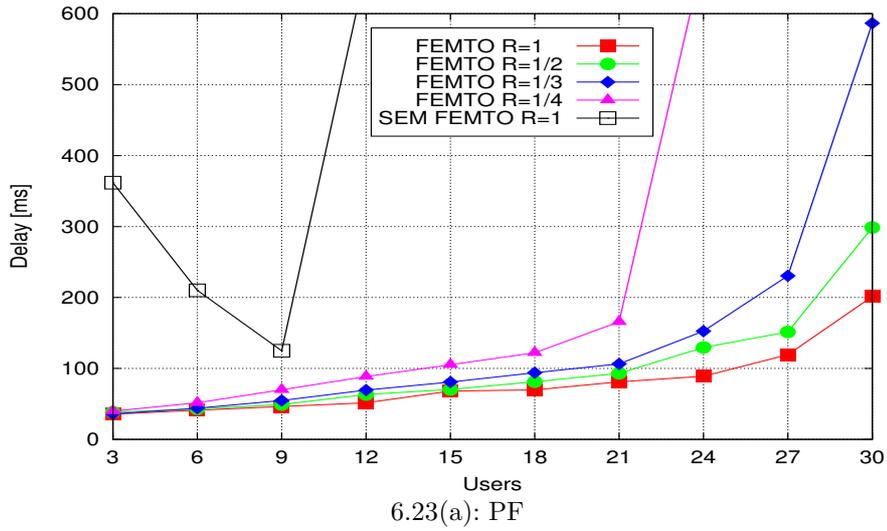


Figura 6.23: Tempo de retardo para uma carga de tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

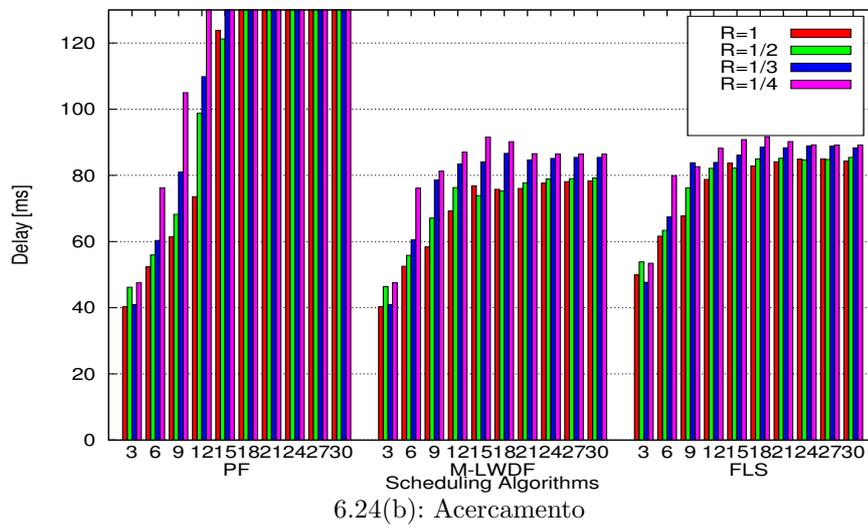
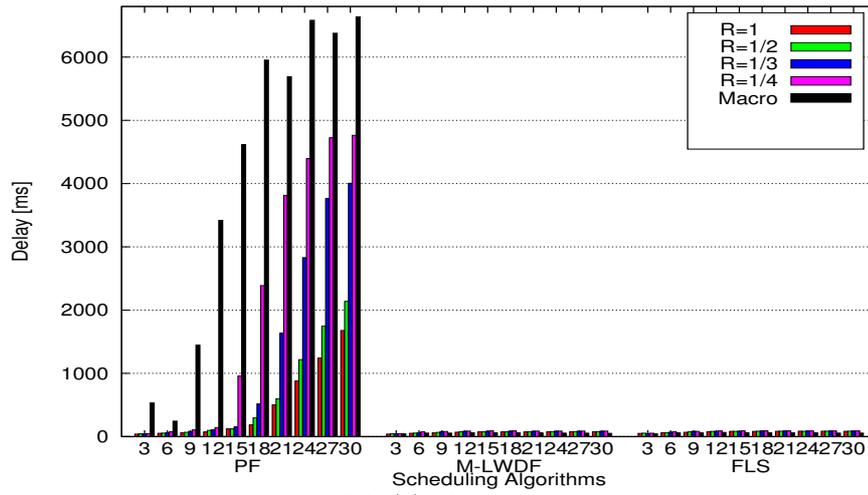


Figura 6.24: Tempo de retardo para uma carga de tráfego de 5 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) Panorâmico (B) Acercamento

6.3.4

Vazão Qualificada. Algoritmos PF, M-LWDF e FLS

Definimos a vazão qualificada, como taxa de dados transmitidos que se encontram dentro do tempo de retardo máximo permitido. Quer dizer, que esta vazão descarta os pacotes que excederam os 100 ms de retardo máximo. A gráfica 6.25 mostra o caso para um tráfego de 1 vídeo por usuário. Onde se nota que a diferença da vazão agregada, a vazão dos reusos fracionários experimentam uma diminuição quando o numero de usuários é maior a 24.

Para o caso de 3 vídeos por usuário mostrado na figura 6.26, se nota claramente que os reusos fracionários para $R=1/3$ e $R=1/4$ tem menor vazão qualificada, porque eles têm pacotes que superam o retardo máximo que não são contabilizados. A nível de algoritmo o melhor desempenho é logrado com o PF.

Para o caso de 5 vídeos por usuário, mostrado na figura 6.27, por ter uma carga de dados elevada os melhores desempenhos são logrados com $R=1$ e $R=1/2$, os demais reusos tem alta quantidade de pacotes que tempos de retardo superiores a 100 ms. O ordem do melhor desempenho é PF, M-LWDF e FLS.

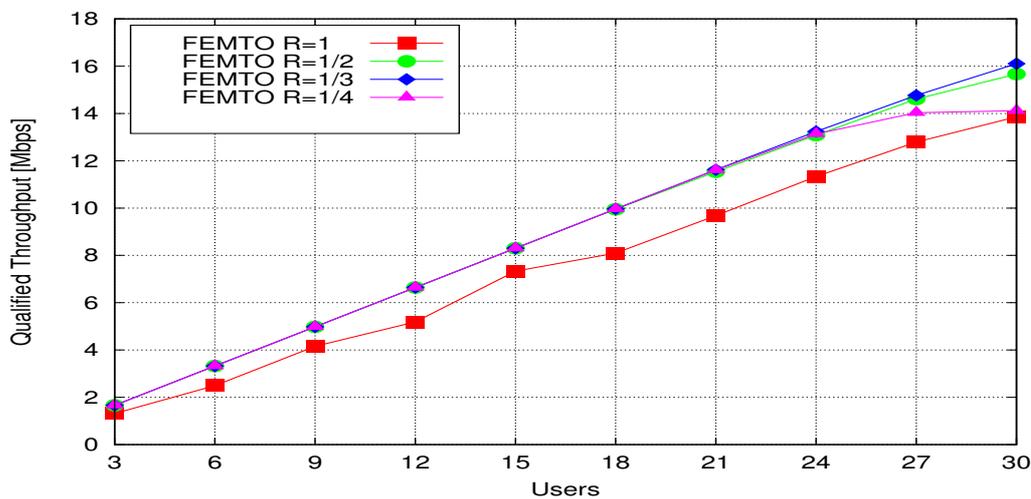


Figura 6.25: Comportamento da Vazão qualificada para uma carga de tráfego de 1 vídeo por usuário quando se empregam os algoritmos PF, M-LWDF e FLS

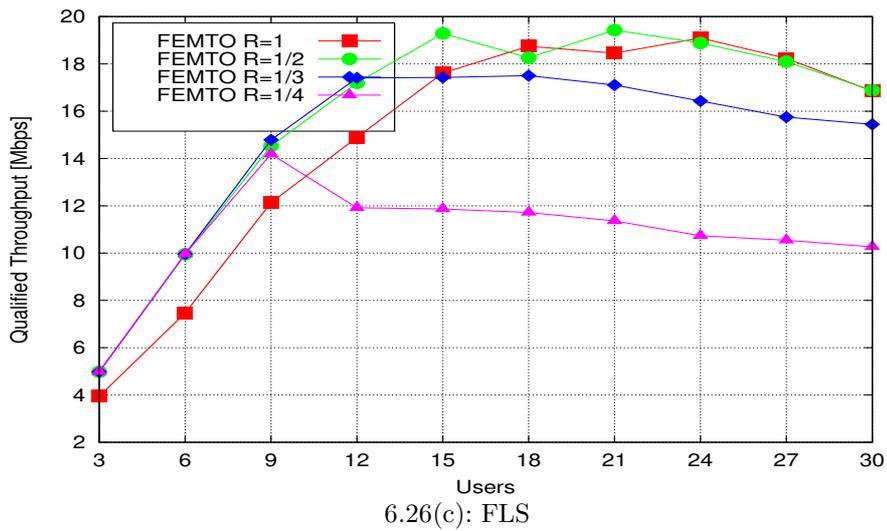
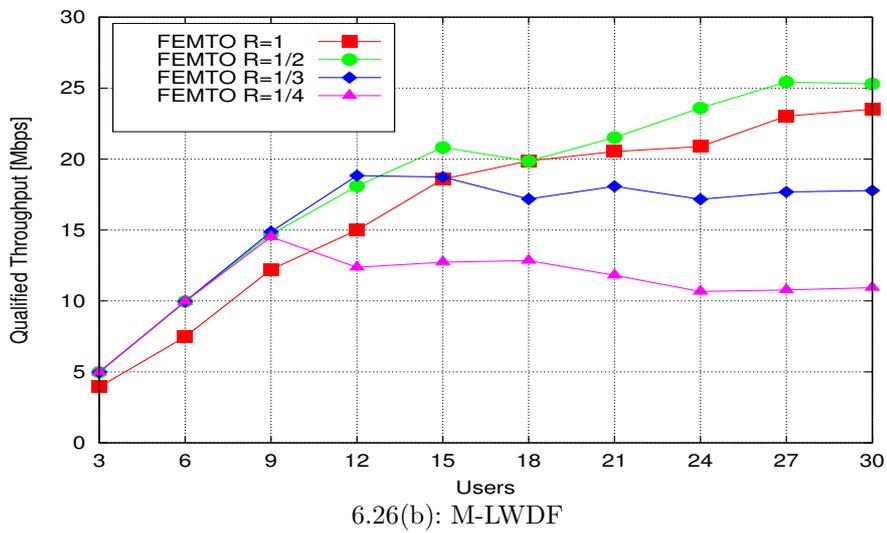
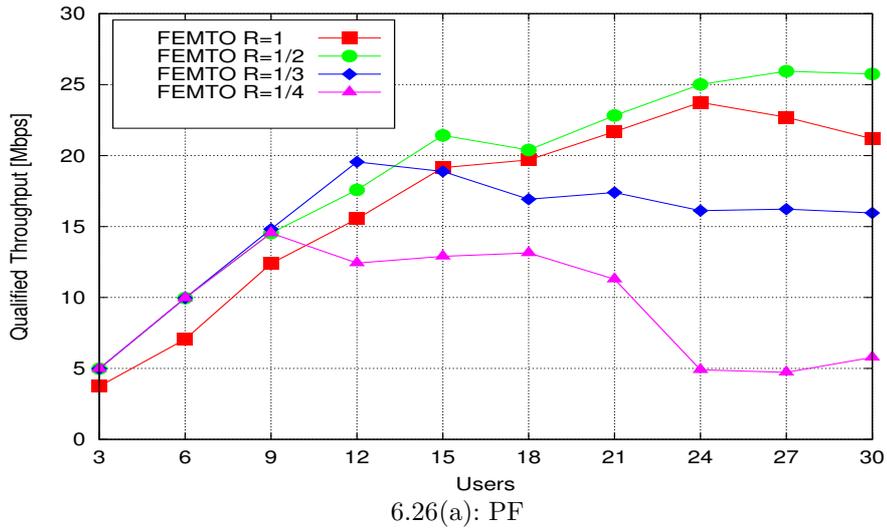


Figura 6.26: Comportamento da Vazão qualificada para uma carga de tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

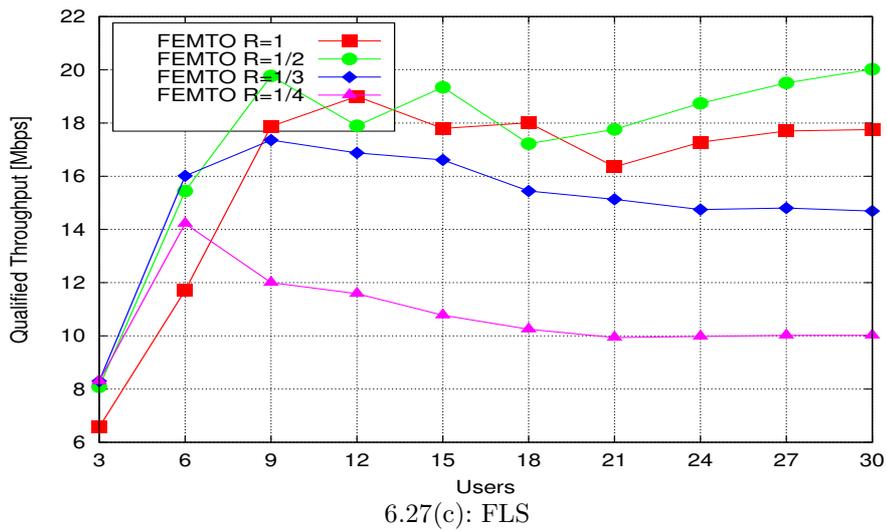
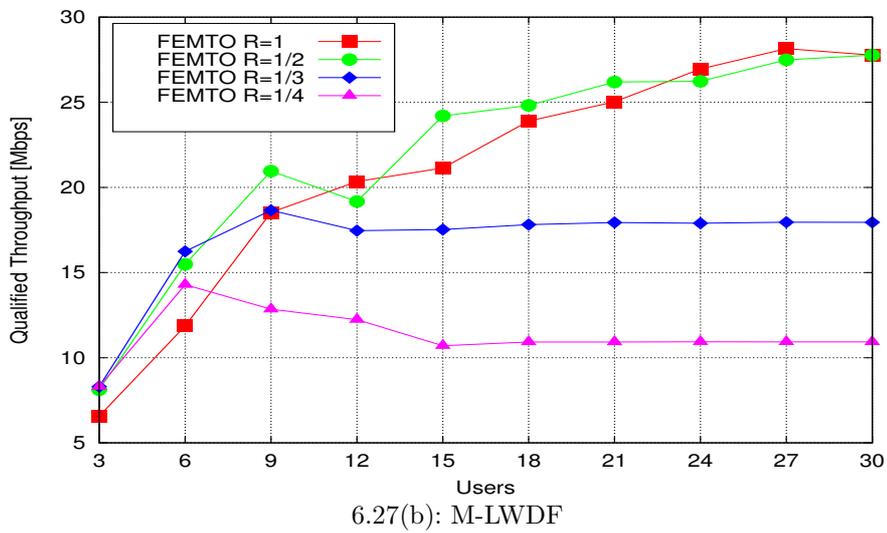
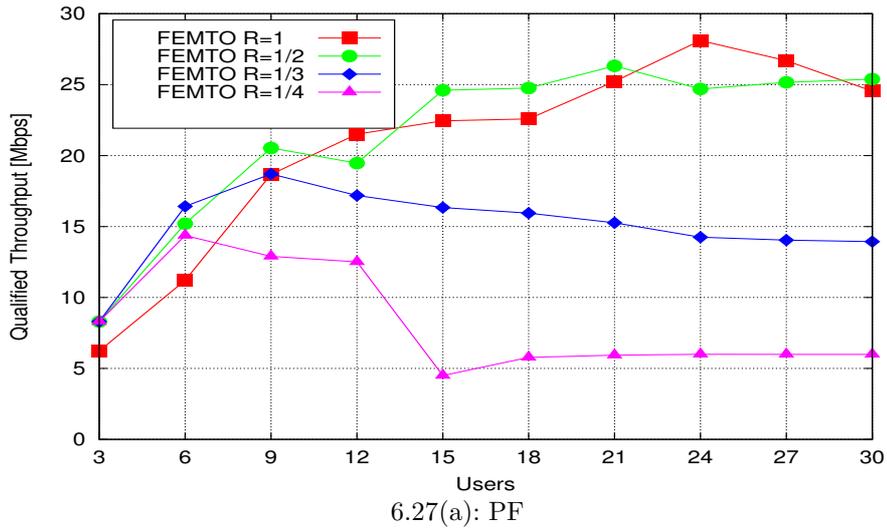


Figura 6.27: Comportamento da Vazão qualificada para uma carga de tráfego de 5 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

6.3.5

Taxa de perda de pacotes. Algoritmos PF, M-LWDF e FLS

A perdas de pacotes, resulta das perdas que ocorrem em vários pontos do sistema. Existem pacotes perdidos na camada física produto de erros provocados pela interferência, perdas pelo percurso e outras distorções. Alguns pacotes são eliminados na camada de controle de acesso médio (MAC) quando o retardo máximo permitido (*Delay*), que para nosso caso é de 100 ms, é excedido ou ainda quando acontece um vazamento de fluxo na interface (*Buffer Overflow*). Acontecem também perdas de pacotes na camada RLC caso se supere o máximo retardo permitido para pacotes que foram retransmitidos. Outro fator importante é o tipo de algoritmo de agendamento de recursos empregado pois de acordo à métrica que utiliza pode ou não garantir o limite de retardo. Essa falha em garantir o desempenho dentro do limite é mais sensível em fluxos multimídia onde a taxa de bits de transmissão é elevada, o qual é nosso caso, pois utilizamos um vídeo de 440 Kbps. O fato de ter uma baixa perda de pacotes facilita a reconstrução do vídeo, limitando o efeito de distorção pela falta de pacotes de vídeo.

Tomando como base o anteriormente mencionado, a figura 6.28 mostra a perda de pacotes quando de tem 1 vídeo por usuário. Como o cenário é leve em termos de tráfego pode-se ver que para todos os reusos de frequência fracionários, não existe perdas de pacotes, isso quer dizer que é baixo o nível de interferência e que em nenhum caso é excedido os 100ms de retardo máximo permitido e não existe *buffer overflow*. Para os três algoritmos avaliados com reuso fracionário se encontrou 0% de pacotes perdidos por isso a figurá 6.28 vale para os três algoritmos.

No cenário de 3 vídeos por usuário se mostra na figura 6.29, a carga de dados a partir de 12 usuários começa a ser perceptível. Para o caso do algoritmo PF (figura 6.29a) a perda de pacotes só é causada por erros na camada física e pelo *buffer overflow* dando lugar a uma menor perda de pacotes em comparação com os outros algoritmos. Para o PF em termos de reuso de frequência fracionário o melhor resultado é obtido para $R=1/3$ pois para este tráfego é o ponto de equilíbrio entre baixo nível de interferência e banda disponível. Já para os outros dois algoritmos a perda é maior pois além dos fatores anteriormente mencionados leva em consideração o retardo máximo, como consequência a perda de pacotes é maior. Como os algoritmos M-LWDF e FLS utilizam maior banda de frequência para a transmissão de dados, a menor perda de pacotes se da para um reuso menor, ou seja $R=1/2$.

No cenário de 5 vídeos por usuário é mostrado na figura 6.30, a perda de pacotes aumenta como consequência do alto trafego de dados para todos os

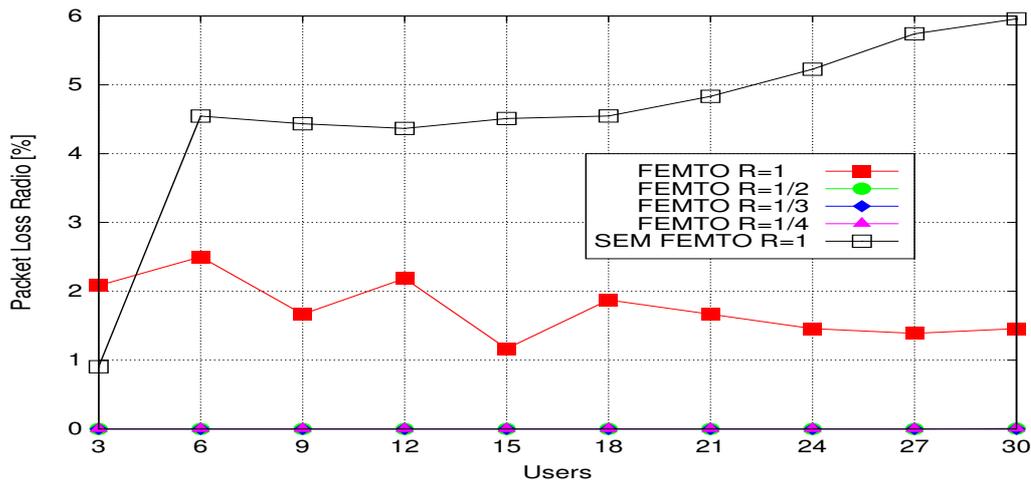
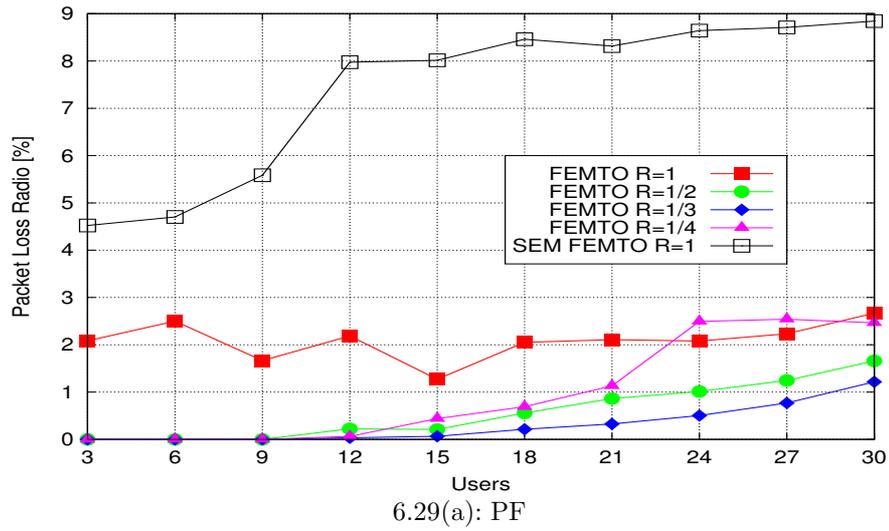
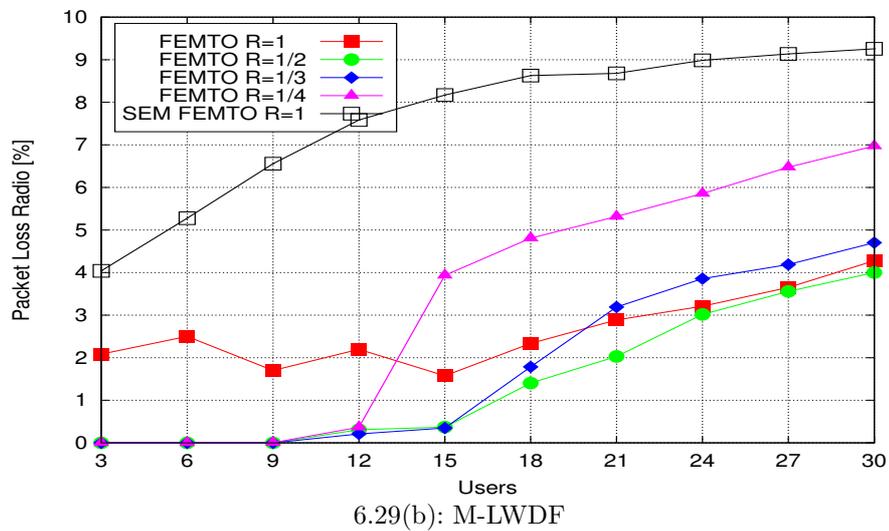


Figura 6.28: Perda de pacotes quando se tem um tráfego de 1 vídeo por usuário para os algoritmos PF, M-LWDF e FLS

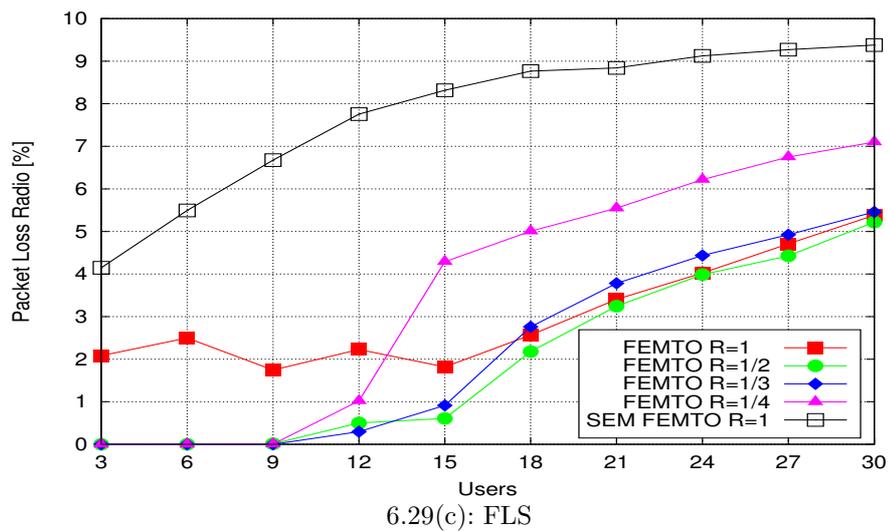
casos. Com relação ao reuso de frequência, o melhor desempenho é obtido para $R=1/2$ para todos os algoritmos. Para o caso dos algoritmos M-LWDF e FLS se nota que o reuso fracionário para $R=1/2$ tem um desempenho semelhante ao reuso unitário. Com relação ao algoritmo empregado, novamente igual que para o caso de três vídeos por usuário, o melhor desempenho é obtido por PF seguido do M-LWDF e finalmente FLS. Entre os dois algoritmos que tomam em conta os requisitos QoS (M-LWDF e FLS), se nota levemente uma maior perda de pacotes com o algoritmo FLS.



6.29(a): PF



6.29(b): M-LWDF



6.29(c): FLS

Figura 6.29: Perda de pacotes quando se tem um tráfego de 3 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

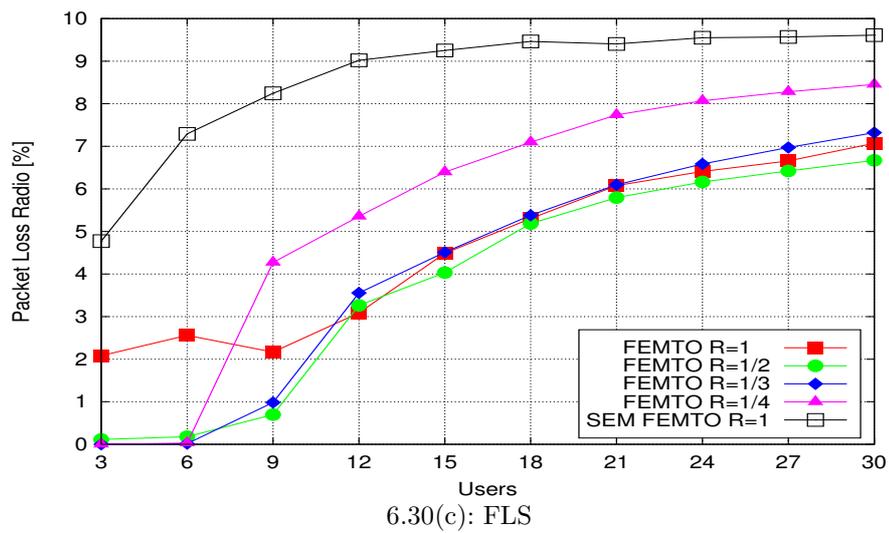
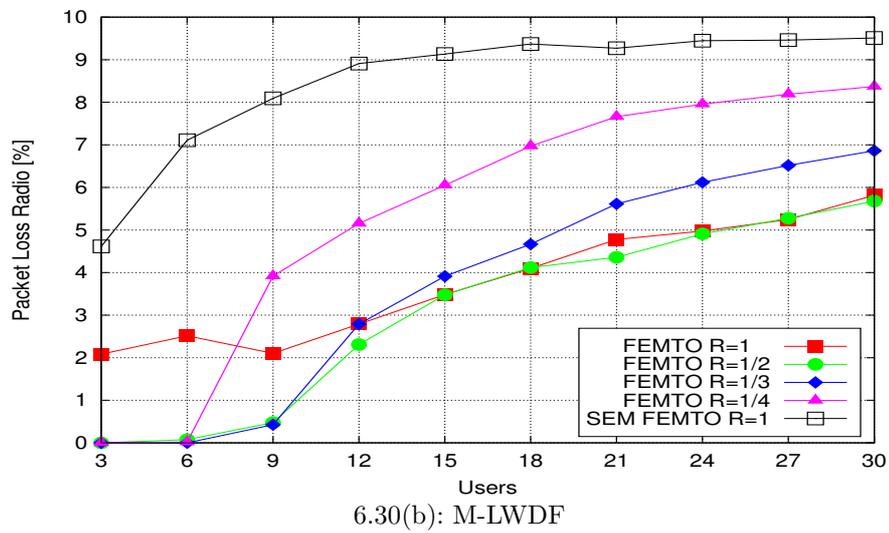
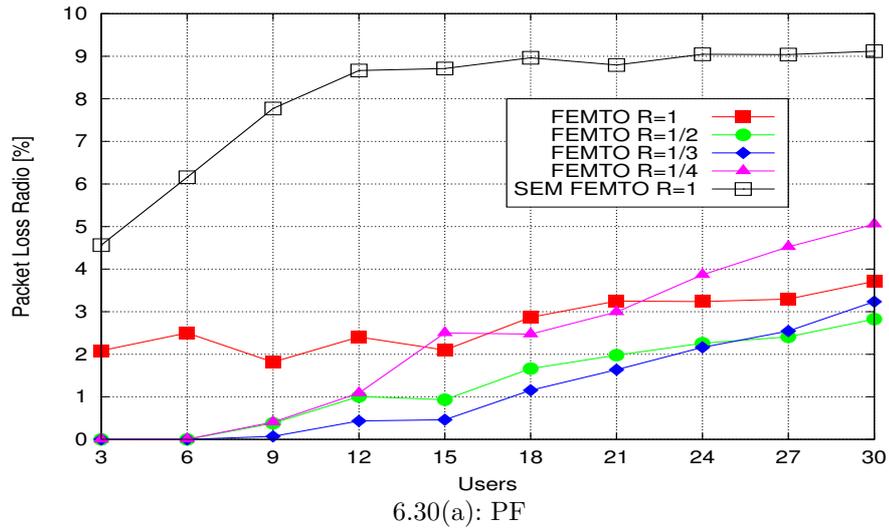


Figura 6.30: Perda de pacotes quando se tem um tráfego de 5 vídeos por usuário. Algoritmos : (a) PF (B) M-LWDF (C) FLS

6.3.6

Índice de Justiça . Algoritmos PF, M-LWDF e FLS

O índice de justiça (6) nos indica o grau de igualdade em que o rendimento do sistema é distribuído entre os usuários. Em geral, em todo sistema celular existem usuários que experimentam más condições de canal por diversos motivos (alto nível de interferência, localizados na borda da célula etc), então por terem essas características sua taxa de bits é menor em comparação de aqueles que possuem boas características de canal. Os algoritmos que dão alta prioridade à qualidade do canal, geralmente fazem uma distribuição injusta do recurso do sistema, então o índice de justiça avalia essa distribuição dando o valor de 1 para um sistema em que todos os usuários têm a mesma quantidade de dados transmitidos. A medida que essa quantidade seja mais desigual o valor do índice de justiça vai tender para 0. A formula aqui empregada para avaliar o grau de justiça é mostrada na equação 6-4.

$$f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (6-4)$$

Na figura 6.31 se mostra o calculo do índice de justiça para os algoritmos avaliados, onde se nota que embora o algoritmo FLS tenha o pior desempenho em termos de vazão agregada, ele faz uma distribuição mais justa do recurso do sistema, garantindo desse modo uma vazão mínima para usuário com condições de canal ruim. Por outro lado, com relação ao reuso fracionário o maior valor de justiça é alcançado com R=1/4, porque para esse reuso o grau de interferência é menor e quase todos os usuários experimentam boas condições de canal.

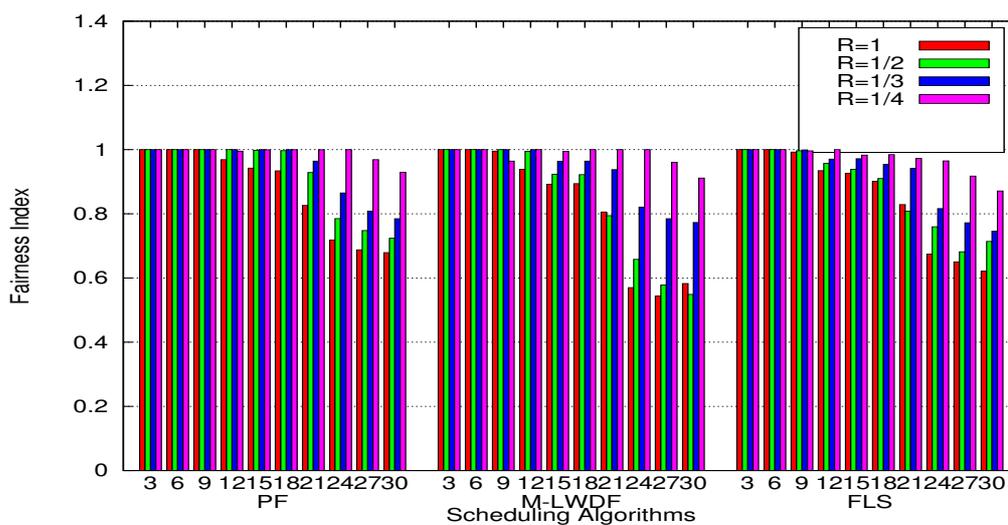


Figura 6.31: Índice de justiça quando se tem um tráfego de 5 vídeos por usuário

7

Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho analisamos o comportamento de um sistema femto-celular procurando melhorar seu rendimento. O desempenho desejado só pode ser atingido implementando uma serie de procedimentos principalmente nas camadas física e MAC. A primeira técnica considerada para melhorar o desempenho foi a utilização de reuso de frequência fracionário, pois o problema da interferência é um problema fundamental que se torna cada vez mais critico a medida que o número de femto-células aumenta. Além disso, diminuir a interferência traz um beneficio geral a todas as técnicas empregadas para obter melhorias nas diferentes camadas de uma rede móvel.

Dos resultados obtidos, se pude ver notoriamente que empregando um reuso de frequência fracionário, os níveis de interferência diminuem e como consequência há um aumento nos valores do SINR a medida que o padrão de reuso fracionário aumenta no seu denominador (de 1/2 para 1/4) porem como banda resultante disponível é menor a vazão do sistema decresce. Por diferentes valores de reuso de frequência devem ser usados para distintos ambientes. Por exemplo, em um ambiente familiar a quantidade de usuários tende a ser menor, até 10 usuários e uma carga de trafego é mais leve. Nesse caso o melhor desempenho do sistema é obtido com $R=1/3$. Já um ambiente empresarial a quantidade de usuários atendido pela mesma femto-estação (HeNB) é bem mair podendo chegar a 30,por exemplo. Sendo assim o reuso fracionário de $R=1/2$ consegue o melhor desempenho entre níveis de interferência e banda disponível. Esses resultado são independentes do tipo de algoritmo empregado para a distribuição dos recursos.

A seguir considerou-se o mecanismo de reuso fracionário, acoplado ao uso de algoritmos de agendamento de pacotes, que são essenciais para o bom desempenho do sistema. Do ponto de vista da eficiência espectral a melhor solução é alocar blocos de recursos para usuários com as melhores condições de canal, para maximizar a vazão da célula. Porem existem outro problemas como justiça na distribuição dos recursos, complexidade computacional, cobertura na borda da célula, requisitos de QoS, economia de energia que devem ser resolvidos para alcançar melhor o desempenho no rendimento geral do sistema.

Quando no agendamento só se toma em consideração as condições do canal em procura de uma alta vazão, se comete injustiça na repartição dos recursos, e portanto deve-se procurar um ponto de equilíbrio entre as duas considerações.

Com relação à vazão por usuário ela diminui quando se aumenta o número de usuários para todas as estratégias. Esse resultado é lógico porque a mesma quantidade de recursos será compartilhada entre um alto número de candidatos. Os resultados mostram que o algoritmo PF sempre é melhor que os outros em termos de vazão, mas seu nível de justiça na distribuição do recurso é menor que o dos outros algoritmos analisados. A razão é que o PF garante uma alta vazão a um número limitado de usuários com boas condições de canal, enquanto que os demais usuários tendem a experimentar um baixo nível de vazão. Outro fator importante no projeto de algoritmos para femto-estações é o grau de complexidade. A femto-estação por ter menor capacidade *hardware* computacional os algoritmos não devem ser complexos em termos de número de iterações ou operações a ser realizadas pois a distribuição do recurso em sistemas LTE deve ser feita a cada TTI (1ms).

No contexto de requisitos QoS e especialmente quanto se trata com demandas de retardo para aplicações em tempo real os algoritmos M-LWDF e FLS são os mais adequados porque garantem a recepção de pacotes dentro do retardo permitido. Em geral esses algoritmos descartam pacotes que superam o tempo de retardo máximo permitido. Isso é feito porque para aplicações de tempo real não é vantajoso receber pacotes com tempo de retardo expirados e transmiti-los pode representar um desperdício de recurso.

A justiça na distribuição do recurso é um indicador importante, porque garante um mínimo de rendimento para usuários com más condições de canal, nesse aspecto o algoritmo FLS resulta o melhor, embora para isso precise utilizar mais banda que não necessariamente se traduz em uma maior vazão do sistema.

Como trabalhos futuros considero importante avaliar o grau computacional dos algoritmos de agendamento, porque na atualidade existem muitos que oferecem melhoras consideráveis, mas pela natureza computacional da HeNB, sua implementação poder resultar inviável.

Um alto desenvolvimento de femto-células, conduz à implementação necessária de *handover* entre femto-células e entre femto e macro estações, indiferente da política de acesso utilizada. Essa implementação de *handover* vai alterar a quantidade de recursos disponíveis pois aumentará os dados de controle de um ambiente femto-celular.

Referências Bibliográficas

- [1] 3GPP. Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNode B (HeNB). *Tech. Specif. Group Radio Access Network*, (3GPP TS 22.220), 2011. 2.1
- [2] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stolyar, P. Whiting, and R. Vijayakumar. Providing quality of service over a shared wireless link. *Communications Magazine, IEEE*, 39(2):150–154, 2001. 5.2.3
- [3] K. J. Astrom and B. Wittenmark. *Computer Controlled Systems: Theory and design*. Prentice–Hall, 1995. 5.2.3
- [4] G. Boudreau, J. Panicker, Ning Guo, Rui Chang, Neng Wang, and S. Vrzic. Interference coordination and cancellation for 4G networks. *Communications Magazine, IEEE*, 47(4):74–81, 2009. (document), 4, 4.1
- [5] Adit Kurniawan H. Hariyanto, R. Wulansari and Hendrawan. Femtocell Performance Over Non-SLA xDSL Access Network, Mobile Networks. Technical report, 2012. 6.3.3
- [6] R. Jain. The art of computer systems performance analysis. *Computer Communications*, 14(4), May 1991. 6.3.6
- [7] William C. Jakes. *Microwave Mobile Communications*. 1975. 4
- [8] Raymond Kwan, Cyril Leung, and Jie Zhang. Multiuser scheduling on the downlink of an lte cellular system. *Rec. Lett. Commun.*, 2008:3:1–3:4, January 2008. 5
- [9] G. Mansfield. Femto cells in the us market business drivers and femto cells in us market business drivers and consumer propositions. FemtoCells Europe, 2008. 1
- [10] G. Piro, L.A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda. Simulating lte cellular systems: An open-source framework. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(2):498–513, 2011. 6.1

- [11] G. Piro, L.A. Grieco, G. Boggia, R. Fortuna, and P. Camarda. Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in lte networks. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 13(5):1052–1065, 2011. 5.2.3
- [12] R4-092042. Simulations assumptions and parameters for FDD HeNB, RF requirements. Technical report, 3GPP TSG RAN WG4 Meeting 51, 2009. 1, 6.1, 6.2, 6.2
- [13] A. S. Tannenbaum. *Modern Operating Systems*. Prentice–Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2007. 5.2.1
- [14] TS 36.101 V9.1.0. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRAN); user equipment (UE) radio transmission and reception. Technical report, 3GPP, (2009-10). 4.1.4