

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

FEEC - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

DT- Departamento de Telemática

TESE DE MESTRADO

**Estudo de Desempenho do Sistema 1xEV-DO
com Prioridades de Serviços na Interface Aérea**

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

FEEC - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

DT- Departamento de Telemática

TESE DE MESTRADO

**Estudo de Desempenho do Sistema 1xEV-DO
com Prioridades de Serviços na Interface Aérea**

Aluno: **Hugo Swart**

Orientador: **Prof. Shusaburo Motoyama**

Banca Examinadora:

Prof. Shusaburo Motoyama – FEEC/UNICAMP

Dr. Eduardo Esteves – Qualcomm

Prof. Ivanil Sebastião Bonatti – FEEC/UNICAMP

Prof. Paulo Cardieri – FEEC/UNICAMP

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Swart, Hugo

Sw25e Estudo de desempenho do sistema 1xEV-DO com prioridades de serviços na interface aérea / Hugo Swart.-Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Shusaburo Motoyama

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Desempenho. 2. Internet (Redes de computação). 3. Sistemas de comunicação sem fio. 4. Telefonia celular. 5. Telefonia celular – Simulação (Computadores). I. Motoyama, Shusaburo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo de desempenho do sistema 1xEV-DO com prioridades de serviços na interface aérea. Através da introdução de um escalonador de prioridades simples, estuda-se o sistema 1xEV-DO por simulação em relação à vazão de saída, ao atraso de espera dos pacotes e à utilização do enlace. É analisado o desempenho para cada prioridade, variando-se a ocupação do sistema. É feita, também, a comparação com o sistema sem prioridades implementado em redes existentes hoje.

Para validar o modelo de simulação, é proposto modelo analítico e são comparados os resultados.

Os resultados mostraram que o sistema 1xEV-DO é capaz de prover altas taxas de dados. Porém, caso não haja tratamento preferencial para aplicações consideradas prioritárias, dependendo da intensidade de tráfego poderá frustrar os usuários com necessidades de QoS, devido a um longo atraso dos pacotes em instantes de alta ocupação do sistema.

Abstract

In this study a performance analysis of the 1xEV-DO system considering service priority at the air interface is presented. Through the introduction of a simple priority scheduler, the 1xEV-DO system is studied by simulation in relation to the output throughput, packet delay and link utilization. The performance is analyzed for each priority queue, by varying the system load. A comparison to the system without priority is also carried out.

To validate the simulation model, a model based on queuing theory is proposed and compared the results.

The results showed that the 1xEV-DO system is capable of providing high data rates. However, if differentiated treatment of applications is not provided, depending on traffic load, it could disappoint users with QoS requirements due to a long packet delay in cases of high system utilization.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Motoyama pela orientação deste trabalho, acreditando que, mesmo tendo emprego fixo em paralelo com o mestrado, conseguiria finalizá-lo. Seu direcionamento na definição do escopo e em como dar prosseguimento ao estudo foi fundamental para a realização desta dissertação de mestrado. Uma pessoa que teve grande importância na decisão de fazer o mestrado foi o Dr. Leandro Maciel, diretor da Lucent Technologies, que ajudou na avaliação de se fazer um mestrado em telecomunicações versus um MBA em administração e sempre incentivou o término do curso, assim sou grato a ele por este apoio. A empresa Lucent Technologies também contribuiu fornecendo uma licença de software para ferramenta de simulação utilizada neste trabalho. As simulações foram realizadas no laboratório do DT/FEEC onde foi instalada o software de simulação, assim agradeço a ambas instituições por fornecer as ferramentas essenciais para obtenção dos resultados. Durante a última fase da redação e conclusão da tese mudei de emprego para Qualcomm. A empresa, bem como meu supervisor, o Dr. Eduardo Esteves, foram também bastante importantes, incentivando e colaborando com sugestões, possibilitando o término do trabalho. A empresa inclusive patrocinou a exposição deste trabalho em congresso na Virginia-EUA, desta forma agradeço à Qualcomm e ao Dr. Eduardo Esteves. No lado pessoal precisei deixar momentos de lazer e com a família, também em períodos especiais de minha vida como meu casamento e nascimento de meu filho Pedro. Pela compreensão da importância da conclusão do curso e apoio sou grato a minha esposa, Rosa. E finalmente meu pai, Jacobus Swart, também professor desta faculdade, sempre contribui com dicas e apoio na condução do mestrado que ajudaram bastante.

Acrônimos e Abreviaturas

1xEV-DO – 1x (single 1.25MHz carrier) Evolution-Data Optimized

1xRTT – 1x (single 1.25MHz carrier) Radio Transmission Technology

2G – 2nd Generation Wireless Technologies

3G – 3rd Generation Wireless Technologies

3GPP - 3rd Generation Partnership Project

3GPP2 - 3rd Generation Partnership Project 2

AT – Access Terminal

BSC – Base Station Controller

BTS – Base Transceiver Station

CAC – Connection Admission Control

CDMA – Code Division Multiple Access

CS – Coding Scheme

DRC – Data Rate Control

EDGE – Enhanced Data Rates for Global Evolution

ETSI – European Telecommunication Standards Institute

FEC – Forward Error Corrector

GPRS – General Packet Radio Service

GSM – Global System for Mobile Communications

HTTP – Hyper Text Transfer Protocol

IEEE – Institute of Electrical Engineering

IETF – Internet Engineering Task Force

IP – Internet Protocol

IMT-2000 – International Mobile Communication 2000

ITU-T – Setor de telecomunicações de padronização do ITU

LBS – Location Based Services
MAC – Medium Access Control
PCM – Pulse Code Modulation
PDSN – Packet Data Service Node
QoS – Quality of Service
RLP – Radio Link Protocol
RF – Radio Frequency
SINR – Signal to Interference and Noise Ratio
SMTP – Simple Mail Transfer Protocol
TCP – Transport Control Protocol
TDMA – Time Division Multiple Access
TS – Time Slot
UDP – User Datagram Protocol
UMTS – Universal Mobile
VPN – Virtual Private Network
WCDMA – Wideband CDMA
WLAN – Wireless Local Area Network
WWW – World Wide Web

Lista de figuras

Figura 1.1. Evolução dos padrões de telefonia celular

Figura 1.2. Diferença de demanda para cada aplicação

Figura 2.1. Arquitetura de Rede 1xEV-DO

Figura 2.2. Protocolos de rede 1xEV-DO

Figura 2.3. Quadro da portadora 1xEV-DO e divisão em time-slots (TS).

Figura 2.4. Distribuição das taxas de transmissão do sistema 1xEV-DO.

Fig.2.5. Constelação do sinal QPSK

Fig.2.6. Constelação do sinal 8PSK

Fig.2.7. Constelação do sinal 16QAM

Figura 2.8. Divisão dos TSs da portadora 1xEV-DO entre usuários.

Figura 2.9. Variação da condição do canal de RF com o tempo.

Figura 2.10. Comparação da vazão utilizando o Escalonador de Equidade Proporcional

Figura 2.11. Pacote de 2 TSs com intervalo de transmissão de 4 TSs

Figura 2.12. Soft-Handoff Virtual

Figura 2.13. Transição de taxas de dados no enlace reverso

Figura 3.1. Filas com diferentes prioridades na estação base do sistema 1xEV-DO

Figura 3.2. Taxa de chegada de cada classe em uma fila

Figura 3.3. Diagrama exemplificando taxas de dados em uma a) célula grande, b) média e c) pequena

Figura 3.4. Gráfico da vazão em função de número de usuários para cenário 1

Figura 3.5. Gráfico de atraso médio de pacotes em função do número de usuários para cenário 1

Figura 3.6 Gráfico de utilização do sistema em função de número de usuários para Cenário 1

Figura 3.7. Gráfico da vazão em função da taxa de chegada para Cenário 2

Figura 3.8. Gráfico de atraso médio de pacotes em função da taxa de chegada para cenário 2

Figura 3.9. Gráfico de utilização do sistema em função da taxa de chegada para cenário 2

Figura 3.10. Gráfico da vazão em função do tamanho da célula para cenário 3

Figura 3.11. Gráfico de atraso médio de pacotes em função do tamanho da célula para cenário 3

Figura 3.12. Gráfico da utilização em função do tamanho da célula para cenário 3

Figura 3.13. Diagrama ilustrativo de um a) bom planejamento de rede, b) médio planejamento de rede ou c) mau planejamento de rede

Figura 4.1: Diagrama de fila M/G/1 de Multi-Usuários

Figura 4.2. Gráfico da vazão em função de número de usuários para modelo teórico sem prioridade no cenário 1

Figura 4.3. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função de número de usuários para modelo teórico sem prioridade no cenário 1

Figura 4.4. Gráfico da ocupação dos sistema em função de número de usuários para modelo teórico sem prioridade no cenário 1

Figura 4.5. Gráfico da vazão em função de taxa de chegada para modelo teórico sem prioridade no cenário 2

Figura 4.6. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função de taxa de chegada para modelo teórico sem prioridade no cenário 2

Figura 4.7. Gráfico da ocupação do sistema em função de taxa de chegada para modelo teórico sem prioridade no cenário 2

Figura 4.8. Gráfico da vazão em função do tamanho da célula para modelo teórico sem prioridade no cenário 3

Figura 4.9. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função do tamanho da célula para modelo teórico sem prioridade no cenário 3

Figura 4.10. Gráfico da ocupação do sistema em função do tamanho da célula para modelo teórico sem prioridade no cenário 3

Figura 4.12: Diagrama de fila M/G/1 de Multi-Usuários com Prioridade

Figura 4.13. Gráfico da vazão em função de número de usuários para modelo teórico com prioridade no cenário 1

Figura 4.14. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função de número de usuários para modelo teórico com prioridade no cenário 1

Figura 4.14. Gráfico da ocupação do sistema em função de número de usuários para modelo teórico com prioridade no cenário 1

Figura 4.16. Gráfico da vazão em função da taxa de chegada para modelo teórico com prioridade no cenário 2

Figura 4.17. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função da taxa de chegada para modelo teórico com prioridade no cenário 2

Figura 4.18. Gráfico da utilização do sistema em função da taxa de chegada para modelo teórico com prioridade no cenário 2

Figura 4.19. Gráfico da vazão em função do tamanho da célula para modelo teórico com prioridade no cenário 3

Figura 4.20. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função do tamanho da célula para modelo teórico com prioridade no cenário 3

Figura 4.21. Gráfico da ocupação do sistema em função do tamanho da célula para modelo teórico com prioridade no cenário 3

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Configurações do enlace direto para o sistema 1xEV-DO.

Tabela 3.1. Distribuição default das prioridades (Pr)

Tabela 3.2. Proporção default de classes de cobertura e respectivas taxas

Tabela 3.3. Probabilidades de classes de cobertura para células de diferentes áreas.

Tabela 3.4. Distribuição das prioridades nas diferentes simulações

Tabela 3.5. Vazão (em kbps) para variação da distribuição de prioridades

Tabela 3.6. Atraso médio (em ms) para variação da distribuição de prioridades

Tabela 3.7. Utilização do sistema para variação da distribuição de prioridades.

Tabela 4.1. Vazão (em kbps) para variação da distribuição de prioridades no modelo teórico com prioridades

Tabela 4.2. Atraso médio dos pacotes (ms) e ocupação para variação da distribuição de prioridades no modelo teórico com prioridades

Tabela 4.3. Ocupação para variação da distribuição de prioridades no modelo teórico com prioridades

Sumário

Capítulo 1: Introdução	1
Capítulo 2: O Sistema 1xEV-DO.....	9
2.1. Introdução	9
2.2. Arquitetura de Rede	10
2.2.1. Protocolos de Rede	11
2.3. Interface aérea – Enlace direto.....	13
2.3.1. Formato do quadro enlace direto	13
2.3.2. Taxas de transmissão	14
2.3.3. Adaptação de Modulação.....	15
2.3.3. <i>Link Budget</i>	16
2.3.4. Alocação de <i>time-slots</i>	17
2.3.5. Adaptação de Taxa de Código	18
2.3.6. Desempenho.....	20
2.3.6.1 Escalonador de Equidade Proporcional	21
2.3.6.2. Terminação Antecipada de Pacotes	23
2.3.7 <i>Handoff</i>	24
2.3. Interface aérea – Enlace reverso	25
2.4. Faixa de Operação no Espectro de Frequências	26
2.5. Conclusão.....	27
Capítulo 3: Simulação e Análise dos Resultados	28
3.1. Introdução	28
3.2. O Modelo	29
3.1.1. Índices de desempenho	31
3.1.2. Valores <i>default</i>	31
3.2. Cenários de Análise	34
3.2.1. Cenário 1: Variação do número de usuários.....	34
3.2.2. Cenário 2: Variação da taxa de chegada de bits	35
3.2.3. Cenário 3: Variação do tamanho da célula	35
3.2.4. Cenário 4: Variação da distribuição de prioridades.....	37

3.3. Análise dos Resultados	38
3.3.1. Cenário 1: Variação do número de usuários	38
3.3.2. Cenário 2: Variação da taxa de chegada de bits	42
3.3.3. Cenário 3: Variação do tamanho da célula	44
3.3.4. Cenário 4: Variação da distribuição de prioridades	48
3.4. Conclusões	50
Capítulo 4: Modelo Teórico e Comparação com Simulação	52
4.1. Introdução	52
4.2. Modelos de fonte e tempo de atendimento	52
4.3. Modelo Sem Prioridade	53
4.3.1. Cenário 1	56
4.3.2. Cenário 2	58
4.3.3. Cenário 3	59
4.4. Teoria Com Prioridade	61
4.4.1. Cenário 1	64
4.4.2. Cenário 2	66
4.4.3. Cenário 3	68
4.2.4. Cenário 4	70
4.3 Conclusão	71
Capítulo 5: Conclusões Finais.....	72
Referências.....	74
Apêndice 1: Ferramenta de Simulação Q+	78
Apêndice 2: Aplicativos de Internet Móvel	95
Apêndice 3: Artigo publicado SBrT03 – Rio de Janeiro, Brasil	101
Apêndice 4: Artigo publicado ASTC – Arlington, EUA	116

Capítulo 1: Introdução

A grande disseminação em todo o mundo de telefonia celular e sua infraestrutura de transmissão instalada estão possibilitando o atendimento de demanda de acesso sem-fio à internet, a rede mundial de computadores. A necessidade por acesso a informação em qualquer lugar a qualquer momento criada pela internet, faz uma pressão por desenvolvimento de novas tecnologias que consigam garantir um bom desempenho para aplicações em um ambiente sem fio, de forma a não mais depender de um acesso fixo e com cabo. E com o surgimento de formas de enviar dados pela rede celular, novos serviços são visualizados e criados que por sua vez requerem melhor desempenho da rede que os suporta.

Com esta visão, o ITU-T formou um grupo, o IMT-2000 [1], [2], responsável por definir as características de serviços de dados a serem oferecidos por uma rede celular e de estabelecer um padrão único, com *roaming* global.

Foram previstos serviços como comunicação multimídia, localização de terminais (LBS – *Location Based Services*), acesso seguro a intranet (VPN – *Virtual Private Network*) entre outros sendo que todos possuem em comum a necessidade de altas taxas de transmissão de dados. De acordo com a sugestão do IMT-2000, estas taxas devem atingir de 144 kbps (usuários com alta velocidade - mobilidade automotiva) a 2 Mbps (usuários sem mobilidade).

As principais tecnologias surgidas para atender os requisitos do IMT-2000 provieram das tecnologias digitais de telefonia celular consideradas de segunda geração (2G) e foram denominados de terceira geração (3G). A seguir, estas tecnologias de 2G e como evoluíram para 3G são descritas.

GSM

A tecnologia digital de comunicação celular 2G que conseguiu maior penetração no mundo é o GSM (*Global System for Mobile communications*) [3]. O GSM foi desenvolvido e padronizado pelos fabricantes europeus liderados pelo organismo ETSI (*European Telecommunication Standard Institute*) e amplamente difundido.

O GSM utiliza técnica TDMA (*Time Division Multiple Access*) com portadora de largura de banda de 200 kHz dividida em 8 *time-slots* (TS), sendo um TS dedicado a cada usuário de voz. Sua versão para comutação de dados por pacote denominada de GPRS (*General Packet Radio Service*) [4], [5] consiste em dedicar TSs ao tráfego de dados por pacote sendo que neste caso os TSs são alocados por demanda entre os usuários. No GPRS existem diferentes esquemas de codificação (*Coding Schemes – CS*) [6] numerados de 1 a 4 que garantem de 8kbps a 20.35 kbps por TS. A escolha do tipo de esquema de codificação é feita de acordo com a condição de sinal observada pelo usuário. Atualmente existem terminais em operação que utilizam até o CS 2 e um máximo de 4 TSs dedicados, chegando-se a uma taxa de pico por usuário de 49.4 kbps.

A evolução do GSM/GPRS para terceira geração de telefonia celular utiliza a tecnologia de acesso WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) [7] na interface aérea com uma portadora de largura de banda de 5 MHz, alcançando-se um máximo de 2 Mbps de dados comutados a pacote. Este padrão é comumente também chamado de UMTS (*Universal Mobile Telecommunication Service*). O acesso múltiplo por divisão de código foi escolhido, pois a eficiência espectral deste método frente ao TDMA é bastante significativa.

A fim de padronizar, difundir e promover o WCDMA, os fabricantes que suportam a tecnologia e aliados a órgãos de padronização criaram um grupo chamado de 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). As normas estão disponíveis em seu *web site* e são todas numeradas a partir de códigos definidos pelo grupo.

O ETSI além do GPRS também definiu um outro padrão para transmissão de dados, o EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*), que tem na teoria taxa máxima de 473.6 kbps por usuário. O EDGE é bastante similar ao GPRS, apenas introduz novas formas de modulação com mais bits por símbolo e novos tipos de esquemas de codificação. Porém ainda não se sabe se este será amplamente adotado por operadoras, tendo em vista que o WCDMA já está disponível e tem melhor eficiência que o EDGE.

As outras duas tecnologias digitais de 2G que contém considerável base de assinantes são as desenvolvidas por fabricantes norte-americanos: o sistema TDMA IS-136 [8] e o sistema CDMA IS-95 (*Code Division Multiple Access*) [9].

TDMA IS-136

Conceitualmente o TDMA IS-136, a partir deste ponto chamado apenas de TDMA, é próximo do GSM na interface aérea, porém possui portadora com banda de 30 kHz dividida em 3 TSs. A alternativa para chegar-se ao 3G via o TDMA, o UWC-136 (*Universal Wireless Communications*), não foi levada adiante pelos fabricantes e as operadoras que utilizam esta tecnologia estão sendo obrigadas a escolher entre as evoluções do GSM e do CDMA.

CDMA IS-95

O sistema CDMA IS-95 por sua vez, a partir deste ponto chamado apenas de CDMA, utiliza uma banda de 1,25 MHz e os usuários a utilizam simultaneamente com códigos ortogonais entre si, sendo muito mais eficiente espectralmente se comparado ao GSM e ao TDMA. Sua evolução para permitir o tráfego de dados por pacote foi denominada de CDMA2000 (IS-2000) e permite também o tráfego simultâneo de voz comutada a circuito. O sistema CDMA2000 tem variações sendo que a versão 1xRTT (*Single Carrier Radio Transmission Technology*) possibilita transmissão de voz comutada a circuito e dados comutado a pacotes em uma portadora de 1.25MHz, porém a taxa máxima alcançada por um usuário fica restrita a 153 kbps atingindo assim somente o requisito de velocidade automotiva do ITU. Esta tecnologia já está comercialmente disponível e implementada em diversas operadoras no mundo.

A fim de garantir o atendimento a todos os requisitos do IMT-2000 para 3G utilizando a tecnologia CDMA, foi desenvolvida uma técnica de transmissão na interface aérea chamada de CDMA 1xEV-DO (*Single Carrier Evolution – Data Optimized*) capaz de superar a barreira dos 2 Mbps exigida. Isto é conseguido em uma portadora de largura de banda de 1.25MHz dedicada a dados comutados a pacote, permitindo assim a manutenção do plano de frequências das operadoras celulares que já utilizam o CDMA IS-95 ou IS-2000. Alocando uma portadora para uso exclusivo de dados em detrimento

de voz comutada a circuito, permite o uso muito mais eficiente do espectro, através de técnicas de adaptação do enlace, alcançando assim velocidades de transmissão de dados bem mais expressivas.

Uma das diferenças do 1xEV-DO frente ao WCDMA é que o segundo foi modelado para atender o transporte de voz também na mesma portadora, ou seja, taxas simétricas, garantia de qualidade de voz que não são observados em dados. Focando apenas em dados, o 1xEV-DO consegue ser muito mais eficiente espectralmente (mais de 2 Mbps em 1,25MHz versus 2 Mbps em 5MHz).

A fim de padronizar, difundir e promover o CDMA2000, os fabricantes que apóiam a tecnologia e aliados a órgãos de padronização criaram um grupo chamado de 3GPP2 (*3rd Generation Partnership Project 2*) que tem basicamente os mesmos propósitos do 3GPP do WCDMA. As normas do CDMA2000 tem normalmente duas nomenclaturas, uma do TIA/EIA que posteriormente são adotadas pelo 3GPP2 com outro código e disponibilizadas em seu *web site*.

O diagrama abaixo resume a evolução das principais tecnologias de telefonia celular e as taxas máximas de pacotes previstas em cada uma delas.

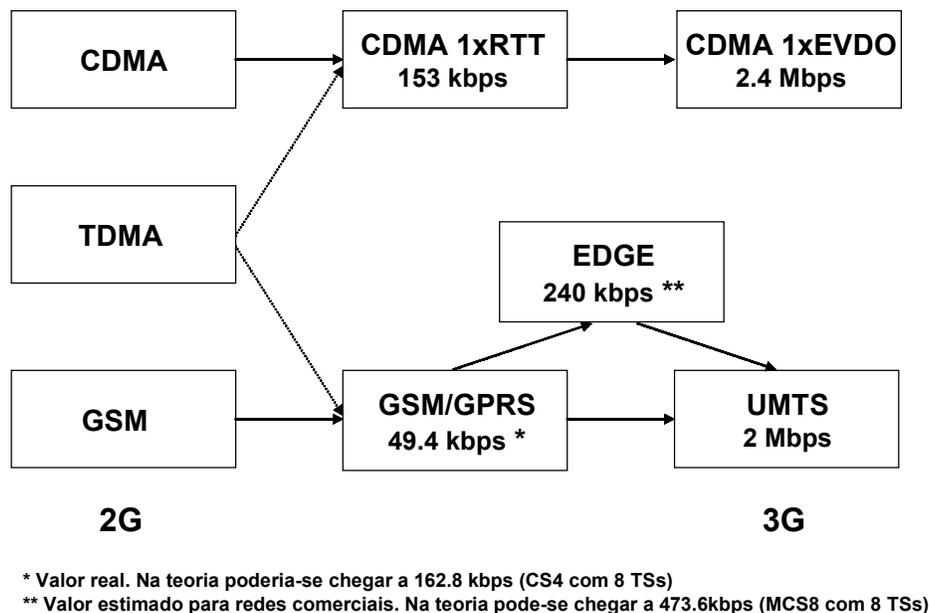


Figura 1.1. Evolução dos padrões de telefonia celular

As taxas máximas mencionadas até o presente momento são atingidas somente em condições específicas para um determinado usuário. No CDMA2000, por exemplo, a taxa de 153 kbps será fornecida pela rede se houver apenas um usuário ativo no setor naquela portadora, caso contrário a banda será compartilhada com outros usuários. Em outra condição de RF em que o sinal esteja com uma baixa relação sinal-ruído, taxas mais baixas serão fornecidas. O mesmo comportamento é observado em todas as tecnologias mencionadas neste texto.

IEEE 802.11 (WLAN)

Outra tecnologia que vem atraindo bastante atenção para transmissão de dados com dispositivos sem-fio é o padrão do IEEE, o 802.11 comumente chamado de WLAN (*Wireless Local Area Network*) ou Wi-Fi. Este padrão não tem o conceito de telefonia celular, foi projetado para atender redes locais (LAN) assim tem cobertura restrita a poucas centenas de metros e não prevê mobilidade de seus usuários, apenas portabilidade. Também não é indicada para ambientes *outdoor* (fora de prédios). A grande vantagem é que tem uma vazão de dados expressiva, chegando a 11Mbps na versão b (802.11b) e 54 Mbps na versão a e na versão g. Assim, apesar de competir em algumas circunstâncias com a telefonia celular para transmissão de dados, na verdade atua de forma complementar. Alguns fabricantes já estão integrando redes WLAN com WWAN (*Wireless Wide Area Network*), fazendo com que seja feito o *handoff* ao se locomover de uma área coberta por uma rede para outra. Um dos protocolos utilizados para tal é o Mobile IP [29].

Objetivos do estudo

Dentro da linha evolutiva celular CDMA, o sistema 1xEV-DO tem características bastante adequadas para transmissão de dados e está sendo objeto de intensa pesquisa [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17] e [21].

A maioria dos trabalhos apresentados na literatura estuda o sistema 1xEV-DO sob o ponto de vista de desempenho da vazão. Em [11] é mostrado que a regra de alocação de *slots* é o principal fator que afeta a vazão do sistema. Em [13], o desempenho de vazão é analisado sob vários fatores como área de cobertura de célula e o atraso de

acesso. O comportamento da vazão quando é introduzido um controle de acesso de usuários à portadora é investigado em [14]. Uma forma de escalonamento onde se dá prioridade de transmissão para usuários em melhores condições de RF e que otimiza a vazão é proposta e analisada em [12].

Neste trabalho, é estudado o desempenho da vazão do sistema 1xEV-DO sob o ponto de vista de prover qualidade de serviço (QoS) para usuários com diferentes necessidades e aplicações. É sabido que aplicações como e-mail, voz sobre IP, vídeo *real-time*, acesso *web*, entre outras aplicações tem necessidades de desempenho bastante diferentes e da forma como está implementado hoje, o sistema 1xEV-DO as trata igualmente. A Fig.1.2 ilustra as necessidades de desempenho para cada aplicação.

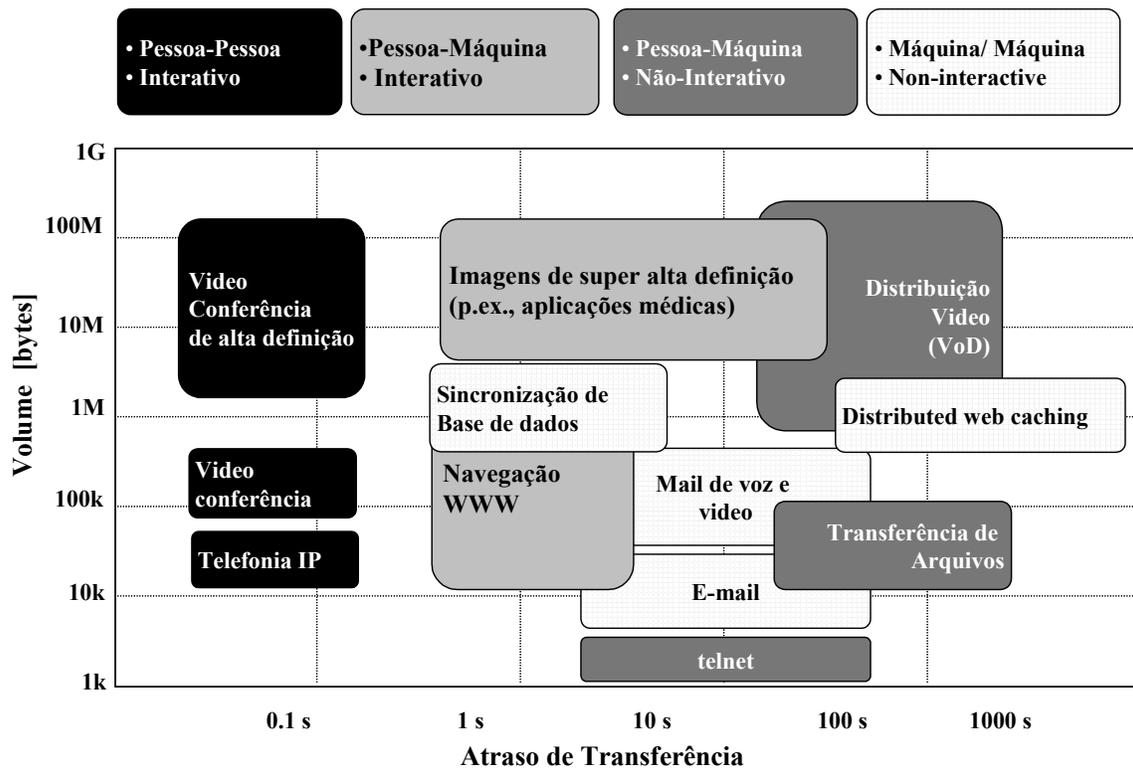


Figura 1.2. Diferença de demanda para cada aplicação

Esta diferenciação também se faz necessária entre usuários com perfis distintos, alguns necessitam de muito mais velocidade e melhor desempenho do que outros e, principalmente, estes usuários que tem estas necessidades provavelmente aceitem pagar mais por um serviço diferenciado.

Porém, em qualquer uma das tecnologias de comunicação sem-fio celular a garantia de banda para um usuário é algo difícil de se alcançar, pois a qualidade do sinal de RF varia muito, não possibilitando atingir-se as taxas máximas em qualquer condição. Outro empecilho em se garantir banda é que o número efetivo de usuários fazendo uso dos recursos simultaneamente é difícil de se estimar tendo em vista a característica de mobilidade dos mesmos. Desta forma, uma saída para amenizar as diferenças entre usuários ou aplicações é a priorização de tráfego.

No 1xEV-DO, apesar da taxa máxima instantânea de 2,45 Mbps ser considerável, quando a utilização do sistema é alta (tráfego pesado de dados), pode haver queda de desempenho, frustrando seus usuários com necessidades críticas. Assim, neste trabalho tentou-se avaliar a priorização de tráfego na interface aérea do 1xEV-DO como forma de amenizar a queda de desempenho para pacotes de dados considerados mais importantes.

No *core* da rede de dados, existem diversas formas de se prover QoS, uma vez que as redes fixas já estão em operação a mais tempo e muito já se foi discutido e implementado. Assim, técnicas de QoS da rede fixa poderiam ser mapeadas nas prioridades de serviço do 1xEV-DO, provendo um nível de qualidade fim-a-fim. Seria imediato o mapeamento de técnicas como *DiffServ* [24] ou as classes do ATM [19] e, caso não houvesse este mapeamento, a interface aérea poderia se tornar um gargalo na comunicação. O *DiffServ*, em poucas palavras, implementa a priorização do tráfego na internet através do cabeçalho DSCP (*DiffServ Code Point*) que é interpretado em cada nó da rede e tratado de acordo com o PHB (*Per Hop Behavior*) respectivo. Já o ATM permite a definição de banda para cada circuito virtual, sendo bastante eficiente na garantia de QoS.

O trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentado o sistema 1xEV-DO em detalhes. No capítulo 3 é proposto o modelo do sistema para simulação. A apresentação de resultados de simulação e suas análises são feitas no capítulo 4. No capítulo 5 é apresentado o modelo analítico para o sistema proposto bem

como comparado com os resultados do capítulo anterior. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões.

Capítulo 2: O Sistema 1xEV-DO

2.1. Introdução

O sistema 1xEV-DO proporciona para terminais sem-fio, através de radiofrequência, a transmissão de dados com picos de 2.45 Mbps de velocidade instantânea no enlace direto (estação base para terminal), e até 153 kbps no enlace reverso (terminal para estação base). As taxas assimétricas de *download* e *upload* são apropriadas para maioria das aplicações de dados.

Como o sistema foi desenvolvido para suportar apenas tráfego de dados, várias modificações em nível físico e enlace foram incorporadas de forma a otimizar a velocidade de transmissão. As técnicas tais como controle de taxa adaptativo controlados por canais de estado de resposta rápida, modulação adaptativa, *soft-hadoff* virtual, controle de erro adaptativo foram implementadas e serão abordadas com maiores detalhes no decorrer do capítulo. Estas técnicas dificilmente poderiam ser utilizadas em um sistema que suportasse o tráfego de voz por circuito também, uma vez que este serviço tem requisitos bastante distintos como ser pouco tolerante a atraso, necessitar de alocação de canal durante a chamada, ser simétrico e precisar de uma central de comutação de circuito fazendo com as técnicas acima não sejam imediatas de se combinar.

O padrão 1xEV-DO, assim como o CDMA IS-95 original, foi proposto pela Qualcomm que detém patentes nestas tecnologias. Foi aceito pelo ITU e pelo 3GPP2 como sendo de terceira geração e muitos fabricantes de equipamentos de telefonia celular e terminais de acesso estão aderindo a sua implementação como Lucent, Motorola, Nortel, LG, Samsung, entre outros. A norma principal que define as características do sistema é a IS-856 pelo TIA/EIA e identificada no 3GPP2 como C.S0024 [10]. O sistema 1xEV-DO tem suas principais características explicadas em [21].

O objetivo deste capítulo é descrever o sistema 1xEV-DO em detalhes pertinentes para o estudo, com o intuito de definir os principais conceitos do sistema que serão utilizados nos capítulos posteriores.

2.2. Arquitetura de Rede

Na arquitetura de rede 1xEV-DO não há central de comutação de circuito, uma vez que só se suporta o tráfego de pacotes de dados. Assim, os elementos de rede se resumem a: estação rádio base (BTS – *Base Transceiver Station*) que é responsável pela comunicação via rádio com os terminais sem-fio (AT – *Access Terminal*), controladora de estações base (BSC – *Base Station Controller*) e PDSN (*Packet Data Serving Node*) sendo que o último é normalmente implementado em roteadores e é responsável por terminar as sessões dos assinantes bem como interfacear com as redes de dados. Além destes, existem outros módulos periféricos como o servidor Radius para autenticação e tarifação do usuário, servidores de gerenciamento da rede, entre outros menos relevantes para este trabalho. A arquitetura de rede é mostrada na Fig.2.1 e mais detalhada em [26].

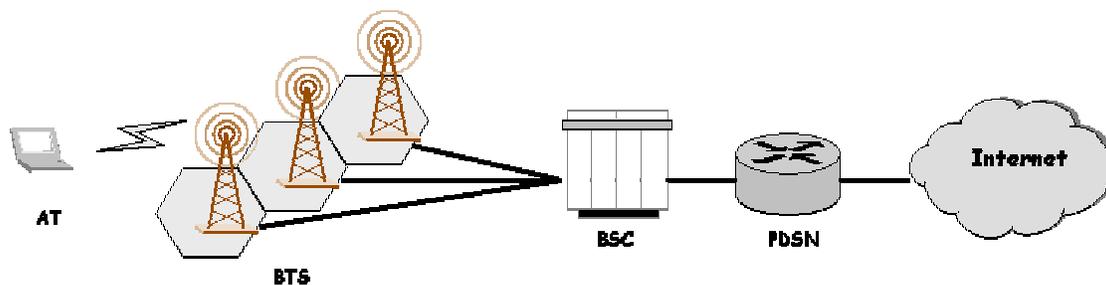


Figura 2.1. Arquitetura de Rede 1xEV-DO

Do ponto de vista de QoS, os perfis dos usuários podem estar no servidor de autenticação Radius [23] mencionado acima. Assim, no momento do estabelecimento da sessão de dados ao se fazer a autenticação do usuário, o servidor Radius informa a validação do usuário à rede e também como tratar pacotes provenientes de/para este usuários. Desta forma, a rede verifica no servidor Radius a prioridade deste e pode tratá-lo de acordo.

Outro elemento de rede que deve ser analisado sob o ponto de vista de QoS é o PDSN, uma vez que este faz a interface com as redes de dados e deve ter a capacidade de interpretar parâmetros de QoS, como o cabeçalho DiffServ (*Differentiated Services*) dos pacotes IP provenientes da Internet, e mapeá-lo nos pacotes enviados à BSC. Da mesma

forma a BSC deve passar esta informação adiante às BTS para que estas tratem diferentemente estes pacotes através de seus escalonadores.

2.2.1. Protocolos de Rede

Os protocolos de rede definidos para o sistema 1xEV-DO foram baseados em protocolos comuns da internet, padronizados pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*), como o próprio IP (*Internet Protocol*) e o PPP (*Point to Point Protocol*). O diagrama da Fig.2.2 ilustra quais os protocolos utilizados para comunicação e sinalização entre os elementos de rede.

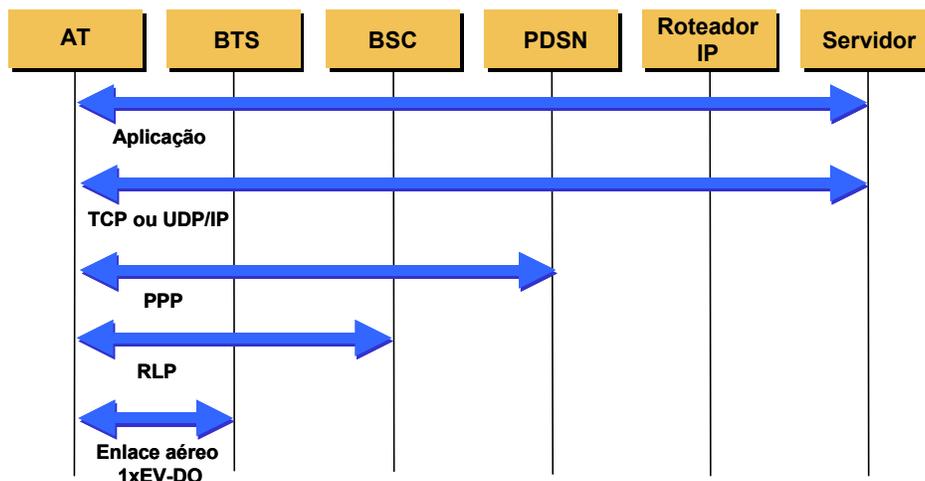


Figura 2.2. Protocolos de rede 1xEV-DO

Abaixo, cada um dos protocolos é sumarizado com suas principais funções.

PPP (*Point to Point Protocol*): protocolo de enlace entre o dispositivo móvel e o PDSN. Ao solicitar acesso à rede o dispositivo móvel estabelece uma sessão PPP com o PDSN onde são negociados parâmetros de comunicação, dentre eles a autenticação e o endereço IP que o móvel irá receber. A sessão PPP fica aberta até que o AT solicite sua desconexão, mesmo que o AT não esteja transmitindo ou recebendo informação. O protocolo PPP está definido em [22].

RLP (*Radio Link Protocol*): protocolo de enlace entre o dispositivo móvel e a BSC. Este protocolo visa minimizar o erro na comunicação na interface aérea, detectando erros na transmissão e re-transmitindo pacotes não recebidos com sucesso pelo AT. O RLP tem como objetivo manter erros a uma taxa menor do que 10^{-6} . O RLP também é responsável pelo sequenciamento dos pacotes, verificando se nenhum foi perdido. O protocolo RLP está definido em [10].

IP (*Internet Protocol*): protocolo de rede não orientado a conexão. É o protocolo utilizado na internet. Utilizando o IP, a rede 1xEV-DO é vista como um nó da internet. O protocolo IP está definido em [25].

TCP/UDP (*Transport Control Protocol / User Datagram Protocol*): protocolos de transporte para controle de pacotes IP. Na realidade esta camada é transparente para rede 1xEV-DO e fica a cargo da aplicação decidir qual dos dois utilizar, sendo que o UDP é mais apropriado para aplicações que não precisam de alta confiabilidade e o TCP para aplicações que precisam de um controle de confiabilidade maior, exigindo retransmissões e controle de taxas de transmissão do ponto de origem. Como esta camada não é analisada pela rede 1xEV-DO, outros protocolos de transporte também são suportados como RTP (*Real-time Transport Protocol*). Os protocolos TCP e UDP estão definidos em [31] e [30], respectivamente.

Assim, o AT se comunica com a BTS através do protocolo 1xEV-DO na camada física e MAC na camada de enlace, com a BSC através do RLP na camada de enlace, com o PDSN através do PPP na camada de enlace e IP na camada de rede e finalmente com o *host* através de IP e TCP.

A BTS está normalmente conectada à BSC através de feixe E1 com um protocolo de enlace que depende do fabricante. Assim, dificilmente haverá interoperabilidade de BTSs de um fabricante e BSCs de outro fabricante. Entre a BSC e o PDSN, existe uma interface padronizada na norma EIA/TIA IS-835 e chamada de interface R-P. Esta interface estabelece a conexão de chamadas, *handoffs* entre BSCs, entre outras sinalizações necessárias para funcionamento do sistema. Como esta interface é padronizada, é possível utilizar PDSNs de um fabricante conectados à BSCs de outro.

2.3. Interface aérea – Enlace direto

As altas taxas obtidas no enlace direto do sistema 1xEV-DO são alcançadas com uma maximização da potência da estação base para um usuário em cada instante de tempo, otimizando assim a utilização do espaço de códigos Walsh e possibilitando a utilização de técnica de modulação 16QAM não encontrada em outras tecnologias de telefonia sem-fio. O canal segue o espalhamento espectral típico de técnica CDMA utilizando 1.25MHz de banda de frequência. Assim, pode-se resumir o 1xEV-DO em um sistema de técnicas combinadas de TDM e CDM. Em [17] são detalhadas as técnicas de adaptação de enlace adotadas no sistema 1xEV-DO bem como analisados os ganhos que cada uma destas técnicas trazem para o desempenho do sistema.

2.3.1. Formato de quadro do enlace direto

Como em outras tecnologias TDM, cada TS do enlace direto tem duração fixa. O tempo definido para cada TS foi de 1,667 ms e um quadro determinado por 16 TSs. A Fig.2.3 mostra este formato.

O canal piloto é enviado pela BTS duas vezes a cada TS e é utilizado pelo AT para mensurar a potência do sinal de cada BTS e cálculo de SINR (relação sinal/interferência e ruído – sigla em inglês SINR). O nível de SINR é retornado para a rede através de um canal lógico no link reverso chamado de DRC (*Data Rate Control*). Existem outros canais lógicos definidos no padrão como o de controle e o MAC, mas que não serão tratados em detalhe neste trabalho.

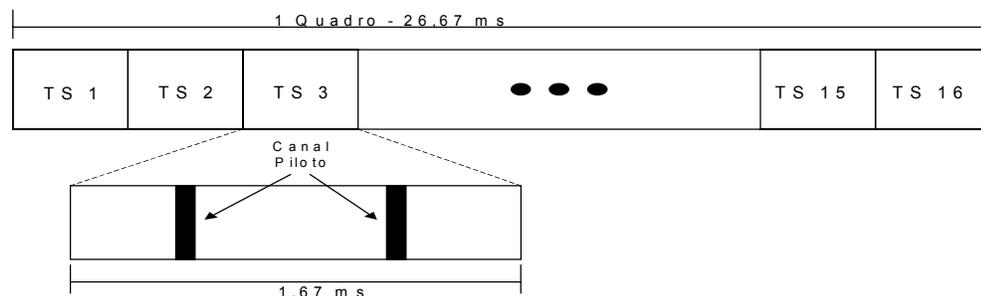


Figura 2.3. Quadro da portadora 1xEV-DO e divisão em time-slots (TS).

2.3.2. Taxas de transmissão

No sistema 1xEV-DO também se observa que com a degradação do sinal de RF, que normalmente acontece com o distanciamento do terminal da estação base, a taxa máxima não é possível de ser fornecida pelo sistema e em casos extremos (localidades distantes) chega a um mínimo de 38,7 kbps de taxa de atendimento. Na realidade, a queda da taxa de transmissão é gradual, quanto mais forte o sinal, maior a taxa, e poderíamos aproximar este cenário à Fig.2.4 com regiões de cobertura para cada velocidade de transmissão. A área destas regiões irá depender de faixa de operação, faixas mais baixas como em torno de 450 MHz tem melhor propagação de sinal de RF do que faixas mais altas como em torno de 1900 MHz; características de morfologia do terreno, por exemplo, em uma região montanhosa ou com muitos prédios a potência do sinal decai rapidamente, assim as regiões de taxas mais altas serão menores. A área de cobertura de uma célula 1xEV-DO é bastante similar à do CDMA IS-95 ou IS-2000 conforme demonstrado em [15], tendo as mesmas características de propagação, *link budgets* (ver item 2.3.3), planejamento de rede, etc, permitindo a utilização das mesmas antenas e *sites* de redes legadas.

A norma IS-856 da tecnologia 1xEV-DO [10] define quais as taxas devem ser fornecidas pelo sistema de forma a não degradar a qualidade da informação recebida pelo terminal. Isto é alcançado através de mais de uma forma de modulação do sinal e técnica de correção de erro. Assim, terminais em regiões com maior potência de sinal recebido terão modulações com mais bits por símbolo, como 16QAM e 8PSK, e terminais em piores condições de RF receberão sinais modulados com QPSK e melhores corretores de erro (que ocupam mais banda).

A seleção de que taxa utilizar é deixada a cargo do terminal que está constantemente monitorando o canal piloto (canal lógico de sinalização do enlace direto), calculando a relação SINR e informando a estação base em que velocidade de transmissão ele pode receber os pacotes sem prejudicar o enlace de comunicação. A informação de qual taxa de transmissão o terminal pode receber é enviada através do canal lógico DRC a cada 1,67ms. Como as características do sinal de rádio mudam

constantemente, é provável que durante uma sessão de dados a taxa será chaveada diversas vezes.

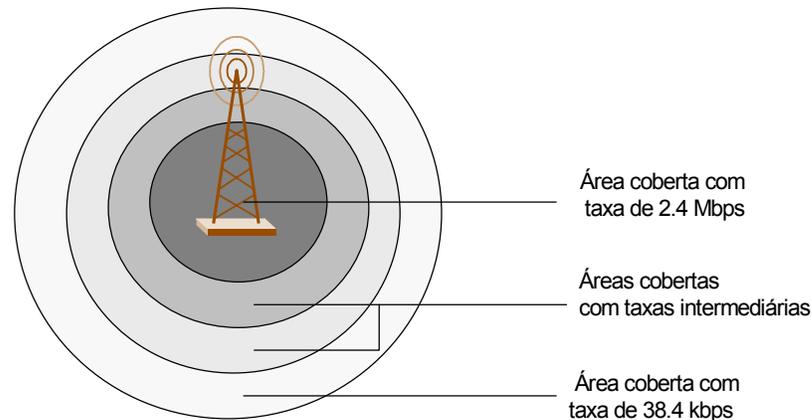


Figura 2.4. Distribuição das taxas de transmissão do sistema 1xEV-DO

2.3.3. Adaptação de Modulação

Conforme mencionado anteriormente, o tipo de modulação da onda de rádio transmitida pela BTS para o terminal será determinado pela intensidade de potência de recepção do terminal. Se o terminal estiver com uma boa relação SINR, isto implicará em uma boa recepção com poucas chances de erro, permitindo o emprego de um tipo de modulação que possibilite o envio de mais bits por símbolo e corretores de erro com menor redundância. Como pode ser visto nas Figs.2.5, Fig.2.6 e Fig.2.7, que representam a tradução da fase e amplitude do sinal em bits para as modulações QPSK, 8PSK e 16QAM respectivamente, é possível enviar mais bits simultaneamente dependendo do tipo de modulação escolhido. Desta forma, se o usuário estiver em uma condição de sinal que possibilite o recebimento com baixa probabilidade de erro enviando mais bits por símbolo, uma modulação com mais bits por símbolo será utilizada.

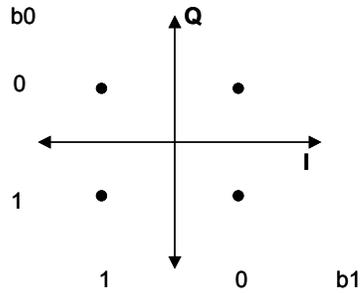


Fig.2.5. Constelação do sinal QPSK

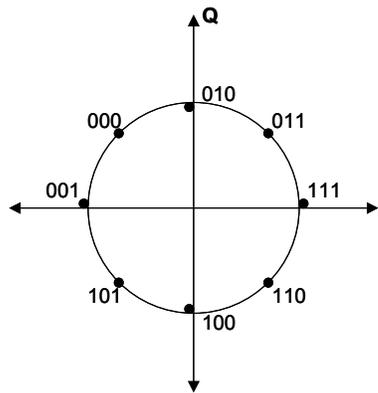


Fig.2.6. Constelação do sinal 8PSK

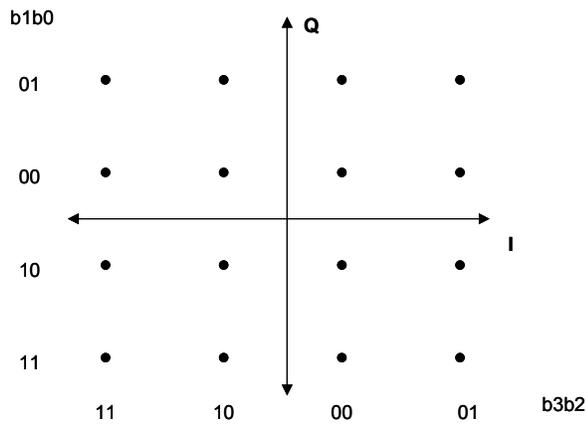


Fig.2.7. Constelação do sinal 16QAM

2.3.3. Link Budget

O *link budget* determina a maior perda de potência que o sinal pode sofrer ainda conseguindo manter um enlace de comunicação satisfatório. Para um sistema sem-fio é a diferença entre a potência transmitida na antena da BTS e a sensibilidade do receptor,

mais o ganho da antena de recepção e menos a margem de variância do sinal e as perdas de penetração de prédios e corpo. A sensibilidade do receptor indica o nível mínimo de sinal no conector da antena necessário para fechar um enlace de comunicação em uma determinada taxa de transmissão.

Em [15] foi demonstrado o cálculo do *link budget* para um sistema 1xEV-DO e comparado com o do sistema CDMA IS-95, chegando-se a conclusão de que são equivalentes. Ou seja, um sistema legado CDMA IS-95 ou IS-2000 1xRTT terão a mesma área de cobertura de um sistema 1xEV-DO para taxas de até 76.8kbps sendo interessante para as operadoras das primeiras tecnologias já que podem re-aproveitar a infra-estrutura existente para implementar o 1xEV-DO.

2.3.4. Alocação de *time-slots*

A quantidade de TSs designados para usuários de cada classe de taxa de transmissão não é homogênea, pois não seria justo se fosse designado 1 TS para o usuário de 2,4 Mbps e 1 para o de 38 kbps, uma vez que o último teria uma vazão média significativamente pior do que o primeiro. Assim, designando diferentes quantidades de TSs para cada taxa e tamanho de pacotes diferenciados, obtém-se um desempenho mais balanceado entre os usuários. Em [11] foi estudado a influencia da forma de alocação de TSs entre as diferentes classes de taxa de transmissão, mostrando que a vazão do sistema quando os TSs são distribuídos igualmente entre usuários de diferentes taxas é maximizados e mostrando também a redução da vazão do sistema quando se aloca mais TSs para usuários com menor taxa, porém obtendo um desempenho menos dispare entre os usuários em diferentes condições de RF.

O número de TSs e o tamanho do pacote para cada taxa estão definidos no padrão IS-856 [10] e reproduzido na Tab. 2.1. O padrão define além das classes mostradas na Tab.2.1, taxas de 307.2 kbps com 4 TSs, QPSK e 2048 bits, 614.4 kbps com 2 TSs, QPSK e 2048 bits e também 1.228 Mbps com 2 TSs, 16QAM e 4096 bits, porém não foram consideradas neste estudo para simplicidade e comparação com outros trabalhos feitos como [13] que também não consideraram.

2.3.5. Adaptação de Taxa de Código

Com a degradação do nível de sinal, a relação SINR piora e mais erros de transmissão são observados. Assim, nestas condições é desejável a utilização de melhores algoritmos de correção de erro (FEC – Forward Error Corrector), para minimizar a retransmissão de pacotes.

O sistema 1xEV-DO toma proveito da variação de SINR, fornecendo códigos corretores de erro com menor redundância para ATs com maiores SINR, fazendo com que sua taxa seja maior, e códigos com maior nível de redundância, reduzindo a taxa de transmissão efetiva da informação de usuário quando o AT está em uma condição de menor SINR.

Tabela 2.1. Configurações do enlace direto para o sistema 1xEV-DO.

Classe de Taxas (kbps)	38,4	76,8	153,6	307,2	614,4	921,6	1228,8	1843,2	2458
Tipo de Modulação	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	8PSK	QPSK	8PSK	16QAM
Time Slots	16	8	4	2	1	2	1	1	1
Bits por Pacote	1024	1024	1024	1024	1024	3072	2048	3072	4096
Taxa de Código	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Fator de repetição	9.6	4.8	2.4	1.2	1	1.02	1	1	1

O mecanismo corretor de erro adotado no 1xEV-DO é o código convolucional (CC) concatenado do tipo turbo (*turbo code*), que introduz redundância na informação enviada e emprega vários níveis de complexidade. Os bits de informação de usuário são codificados a uma taxa de código (R) de 1/3 ou 1/5 dependendo do tipo de pacote. O codificador turbo utiliza dois codificadores convolucionais conectados em paralelo com um *interleaver* precedendo o segundo codificador conforme mostra o diagrama da

Fig.2.8. Para atingir a taxa de código 1/3 utiliza-se 4 das saídas dos codificadores e para a taxa 1/5 utiliza-se as 6 saídas dos codificadores. O interleaver é responsável por embaralhar a informação para que um erro que ocorra em uma seqüência de bits não afete a decodificação da informação após o desembaralhamento no receptor. A saída dos codificadores é concatenada e repetida para atingir o nível desejado símbolos de saída conforme fator de repetição da Tab.2.1. Em [10] e [17] encontram-se maiores detalhes sobre o funcionamento do código turbo. A Tab.2.1 também indicadas as taxas de código turbo para cada classe de taxa de transmissão e taxa de código efetiva observada.

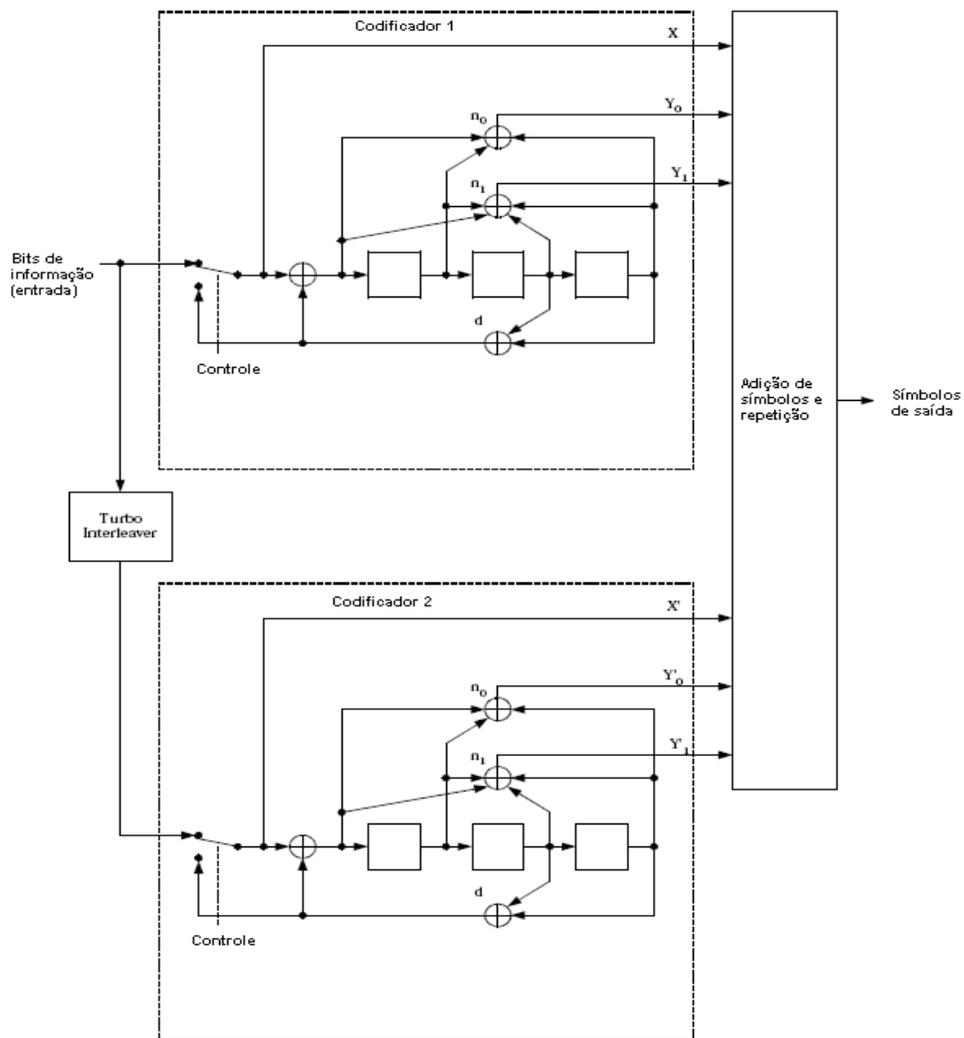


Figura 2.8. Diagrama do Codificador Turbo

2.3.6. Desempenho

Estar em uma zona geográfica que permite determinada taxa, não quer dizer que a vazão média observada pelo usuário será aquela que a classe determina, uma vez que dependerá do número de usuários buscando acesso simultaneamente. Ou seja, para obter como vazão média a taxa que a região permite, é necessário que um único usuário faça uso da portadora, já que o canal é compartilhado. A Fig.2.9 explicita este conceito, mostrando que o usuário é servido com a taxa que a sua classe permite, porém para vazão média ser constante ele precisaria ser o único a utilizar o recurso da portadora.

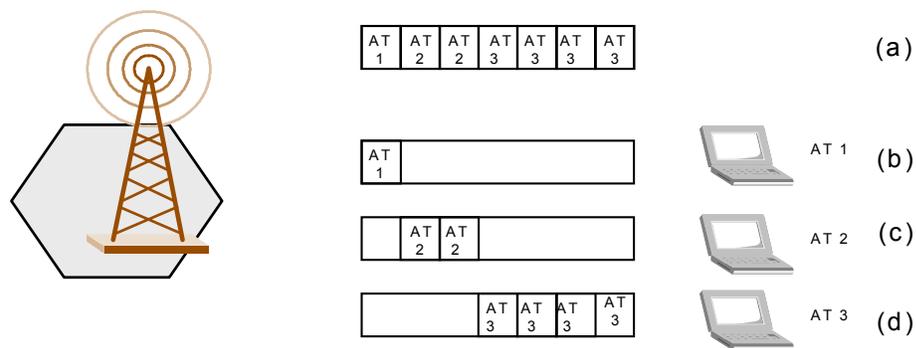


Figura 2.9. Divisão dos TSs da portadora 1xEV-DO entre usuários. Em a) visualiza-se a portadora sendo dividida temporalmente com os três ATs. Em b) mostra-se o AT 1 com classe de 1 TS. Em c) mostra-se o AT 2 com classe de 2 TSs, e em d) o AT 3 com classe de 4 TSs

Do ponto de vista de desempenho para o usuário final, os fatores que mais influenciam o sistema 1xEV-DO são:

a) Intensidade de tráfego (numero de usuários acessando a rede e vazão média de cada um). O número de usuários simultaneamente transmitindo irá influenciar diretamente na banda observada por cada usuário, uma vez que os TSs serão compartilhados entre todos;

b) Raio da célula (células muito grande fazem com que mais usuários fiquem em áreas com classes de menor taxa que ocupam mais recursos por necessitarem de mais TSs para transmitir seus pacotes);

c) Atraso de acesso (tempo para se estabelecer canais de tráfego);

d) Mecanismo de controle de acesso ao meio físico.

Estas variáveis e a forma como interferem no desempenho do sistema são analisadas em [13].

O número teórico máximo de usuários fazendo uso de uma portadora é 59, pois se trabalha com o W64 (64 possíveis códigos Walsh) sendo que 5 são reservados para outros propósitos que não a identificação do usuário. Este código é utilizado para diferenciar pacotes de usuários distintos, sendo que o preâmbulo de cada pacote é codificado com o código Walsh designado para cada usuário.

Porém, dependendo do perfil de tráfego dos usuários, o sistema deverá ser programado para não atender novos usuários mesmo antes de atingir o valor máximo teórico, de forma a não degradar sensivelmente o desempenho dos que estão conectados. Por exemplo, caso os usuários fizessem uso predominantemente de aplicações como telemetria ou rastreamento de veículos, poderia se chegar ao limite de usuários em uma portadora, mas se caso contrário fossem usuários com predominância de aplicações de tráfego pesados como *video-streaming* ou monitoramento de câmeras de vídeos não se poderia chegar no número máximo devido à capacidade do sistema. Assim a operadora deve definir qual o número máximo de usuários que o sistema deve aceitar, uma vez que não há um mecanismo de CAC (*Connection Admission Control*) para cada nova sessão solicitada.

2.3.6.1 Escalonador de Equidade Proporcional

Para melhorar o desempenho do sistema 1xEV-DO, foi implementado pelos fabricantes um algoritmo que não está no padrão chamado de Escalonador de Equidade Proporcional (Proportional Fair Scheduler, em inglês). O conceito deste algoritmo é baseado em cálculos da média da potência do sinal e da vazão de cada usuário, onde o escalonador da BTS irá dar preferência a pacotes de usuários que estão com nível de potência maior que sua média. Por exemplo, em uma situação onde um usuário tem uma condição de sinal que suporta em média 614 kbps, o escalonador buscará servi-lo quando este observar um nível de sinal que permita taxas mais altas que 614 kbps. Conforme ilustra a Fig. 2.10, extraída de [20], a qualidade do sinal de RF varia muito de acordo com

a posição do dispositivo móvel e com o tempo, assim este escalonador busca se aproveitar dos momentos de boa qualidade do sinal de cada usuário, maximizando a vazão do sistema.

O algoritmo do Escalonador de Equidade Proporcional é baseado na razão entre a taxa de transmissão instantânea informada pelo AT (DRC) e a vazão média de cada usuário (R). Pacotes de usuários com maior razão DRC/R serão enviados primeiro, assim se um AT começar a ter sua média reduzida por não ter sido servido há muito tempo, a razão DRC/R irá aumentar e, por outro lado, se indicar que tem condições de receber uma taxa maior do que sua média irá ter preferência em receber seu pacote.

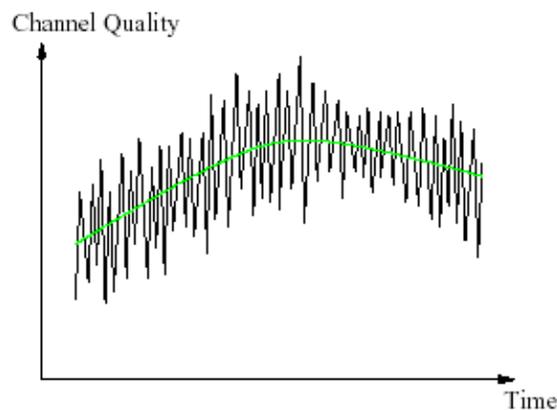


Figura 2.10. Variação da condição do canal de RF com o tempo.

A Fig. 2.11, extraída de [20] compara a vazão do sistema quando este algoritmo é utilizado.

Este algoritmo de escalonamento de pacotes implementa uma forma de diversidade multi-usuário. Pois seleciona os usuários em melhor condição de sinal em relação a sua média maximizando a vazão do sistema. Assim, como pode ser visto na Fig.2.11, conforme o número de usuários aumenta, a vazão do sistema também aumenta. E como ilustra também a Fig.2.11, em cenários onde os usuários estão se locomovendo, o ganho multi-usuário é maior do que quando estão fixos, já que quando se locomovem, a condição de sinal irá variar mais, possibilitando que o sistema determine os momentos

em que o usuário esteja com uma condição melhor de sinal. Em um cenário de usuários fixos, o sinal não varia tanto já que não há mudança da posição e somente há a variação do sinal em relação ao tempo.

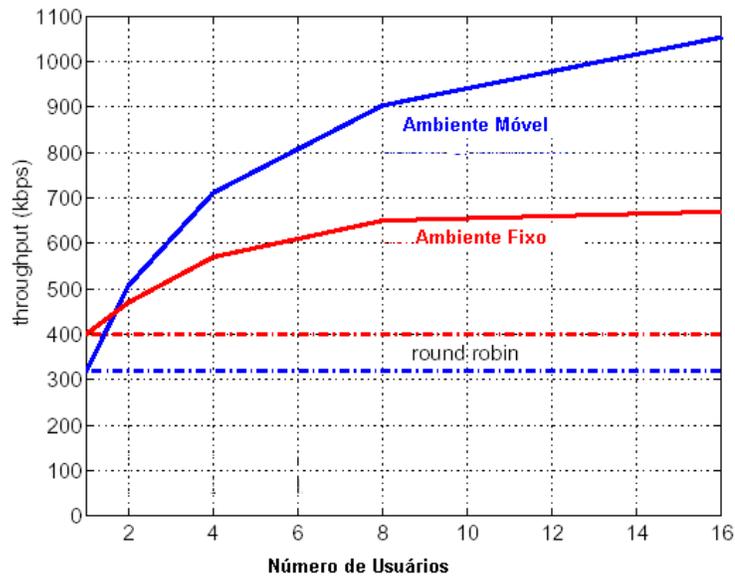


Figura 2.11. Comparação da vazão utilizando o Escalonador de Equidade Proporcional

2.3.6.2. Terminação Antecipada de Pacotes

Para melhorar ainda mais a percepção do usuário de altas taxas de dados, uma outra característica foi adicionada ao 1xEV-DO explorando a característica de variação do canal de rádio. Pacotes que utilizam mais de um TS (vide tabela 2.1) são transmitidos com um espaçamento de 4 TSs (Fig.2.12). O espaçamento de 4 *slots* permite que o terminal decodifique a parte do pacote que chegou e envie um ACK caso já tenha conseguido decodificar completamente a informação do pacote sem receber os TSs restantes que contém basicamente informação redundante. Caso a BTS receba um ACK do terminal, a transmissão do pacote é terminada, aumentando efetivamente a taxa de dados percebida pelo usuário. Este procedimento também é referenciado como *hybrid-ARQ* e quando o canal é bastante imprevisível como em *fast fading*, este esquema de ARQ traz uma melhora substancial na eficiência espectral. Esta é uma técnica de diversidade temporal. Em [16] e [17] são analisados os ganhos de desempenho com a utilização desta técnica. Em [17], por exemplo, apresenta o gráfico da Fig.2.13 que indica

o ganho proporcionado pela terminação antecipada de pacotes para uma taxa requisitada de 76.8kbps em um canal a 120km/h.

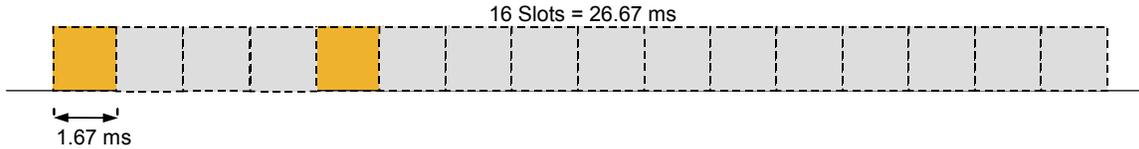


Figura 2.12. Pacote de 2 TSs com intervalo de transmissão de 4 TSs

2.3.7 Handoff

Através do canal piloto, o AT identifica quais os setores que tem potência suficiente para transmitir pacotes com sucesso. O conjunto destes setores é chamado de *active set*. Com esta medição do canal piloto, o AT também verifica o setor de BTS que possui o melhor nível de sinal e indica para a rede qual o setor que deve servi-lo através do canal DRC. Apenas uma BTS serve um AT por vez, mas se este se movimentar para um local com sinal mais forte provindo de outro setor ou há uma mudança na potência do sinal, a informação do canal mais forte será enviada pelo canal DRC para o setor com melhor SINR e os próximos pacotes serão enviados pelo novo setor. Assim, diferentemente do CDMA IS-95 ou CDMA2000, não há o *soft-handoff* onde mais de uma BTS transmite simultaneamente para um mesmo usuário e o móvel soma o sinal proveniente das diferentes antenas. Porém, como não há uma mudança abrupta da chamada como ocorre em uma situação de *hard-handoff* e o móvel mantém o *active set*, este cenário no 1x-EVDO é chamado *soft-handoff* virtual.

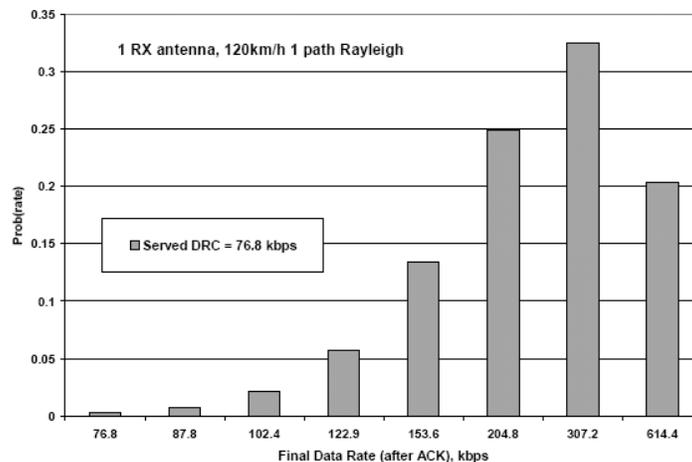


Figura 2.13. Ganho relativo à Terminação Antecipada de Pacotes [17]

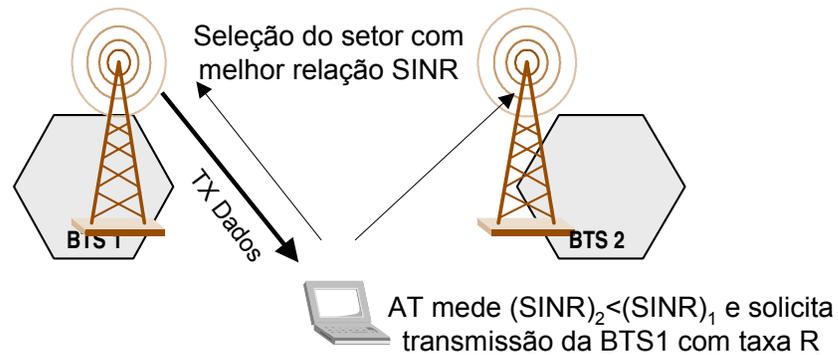


Figura 2.14. Soft-Handoff Virtual

2.3. Interface aérea – Enlace reverso

O enlace reverso não foi desenvolvido com as mesmas características que o enlace direto, isto é, não utiliza diferentes modulações para transmitir a informação dependendo da condição de RF. O pico de velocidade de transmissão do AT para BTS é de 153kbps sendo o mínimo de 9.6kbps. Isto porque o enlace reverso foi concebido de forma bastante similar ao padrão CDMA2000 1XRTT, seguindo as mesmas taxas de transmissão e a divisão da portadora entre os usuários por código e não por tempo. Desta forma, no enlace reverso todos usuários transmitem simultaneamente e são divididos por código.

Entretanto, estas taxas menores no envio de informação são compatíveis com a grande maioria das aplicações, pois têm características assimétricas para recebimento e envio de pacotes (volume de “*download*” maior do que de “*upload*”). Assim, considerou-se apenas o enlace direto, uma vez que é neste sentido que usualmente se encontra o gargalo da comunicação de dados.

No enlace reverso, a taxa de transmissão permitida para cada terminal é determinada por um algoritmo MAC distribuído. A idéia em que se baseia este algoritmo é permitir que os terminais decidam se querem ou não transmitir a uma taxa mais alta baseado em algumas regras. Isto elimina a necessidade da BTS determinar a taxa que o usuário pode utilizar, minimizando cabeçalhos de controle e eliminando recursos não utilizados. Porém a BTS ainda fica capaz de controlar a carga do enlace reverso e

indicando ao terminal se podem aumentar ou devem diminuir a taxa de transmissão. Esta informação é enviada através do canal lógico RAB (*Reverse Activity Bit*) e indica a carga da BTS (setor). Como mostrado na Fig.2.15, se o estado da carga da BTS é “*not busy*”, é permitido que os terminais aumentem sua taxa em um degrau probabilisticamente. Por outro lado, se o estado é “*busy*”, todos os terminais devem reduzir sua taxa de transmissão em um degrau probabilisticamente. A probabilidade de alteração de taxa é um parâmetro específico por usuário, que é designado pela rede 1xEV-DO.

Utilizando este mecanismo de controle re-alimentado, é possível controlar o nível de interferência recebido na BTS. Esta é uma melhora significativa sobre o CDMA IS-95, onde o nível de interferência era controlado indiretamente.

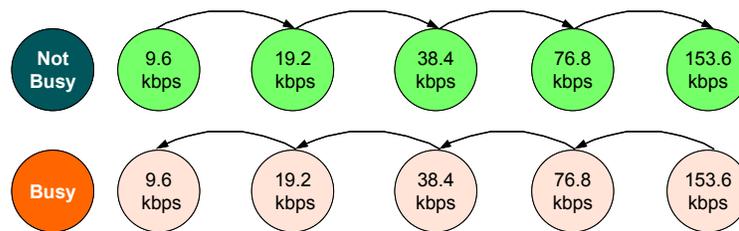


Figura 2.15. Transição de taxas de dados no enlace reverso

Como o foco deste trabalho está no enlace direto, não serão dados maiores detalhes sobre esta parte da tecnologia.

2.4. Faixa de Operação no Espectro de Frequências

O IMT-2000 além de definir serviços e especificar parâmetros de operação das tecnologias de 3G, sugere também faixas de frequência de operação destas tecnologias em torno de 2.1 GHz. Porém, o 1xEV-DO apesar de tecnicamente poder operar nesta faixa, tem sido implementado nas faixas de tecnologias de 1G e 2G. Assim, uma operadora com CDMA IS-95 ou CDMA2000 pode sem a necessidade de adquirir novas licenças de espectro, oferecer serviços de 3G. Já o sistema WCDMA ou UMTS, apesar de tecnicamente também poder operar nestas faixas, tem sido implementado exclusivamente nas bandas de 3G sugeridas pelo IMT-2000.

2.5. Conclusão

Neste capítulo, foram descritas as principais características relevantes do sistema 1xEV-DO para o estudo. A arquitetura do sistema 1xEV-DO visa utilizar, ao máximo, os protocolos definidos nas redes tradicionais de dados, como a Internet. São tomadas providências nos pontos onde podem ocorrer taxas maiores de erro, como a interface aérea. Entre o terminal e a BSC é utilizado o protocolo RLP para minimizar a taxa de erro.

Para o sistema 1xEV-DO conseguir alta taxa de transmissão no sentido da estação base para os terminais que ficam nas regiões de alta potência de recepção, as técnicas de modulação como 16QAM e 8PSK são utilizadas. Para regiões de piores condições de recepção, são utilizados a técnica de modulação QPSK e melhores corretores de erro.

Apesar das altas taxas máximas fornecidas pelo sistema 1xEV-DO, estas nem sempre estarão disponíveis dependendo do número de usuários fazendo uso do sistema e da qualidade do sinal de RF.

Capítulo 3: Simulação e Análise dos Resultados

3.1. Introdução

A fim de se verificar o desempenho do sistema 1xEV-DO com a utilização de priorização de tráfego, foi simulada através da ferramenta Q+ desenvolvida pelo Bell Labs da Lucent Technologies, uma rede com os parâmetros do 1xEV-DO para o enlace direto, adicionando quatro filas de diferentes prioridades, como mostra a Fig.3.1, diferentemente do modelo atual que está implementado com fila única.

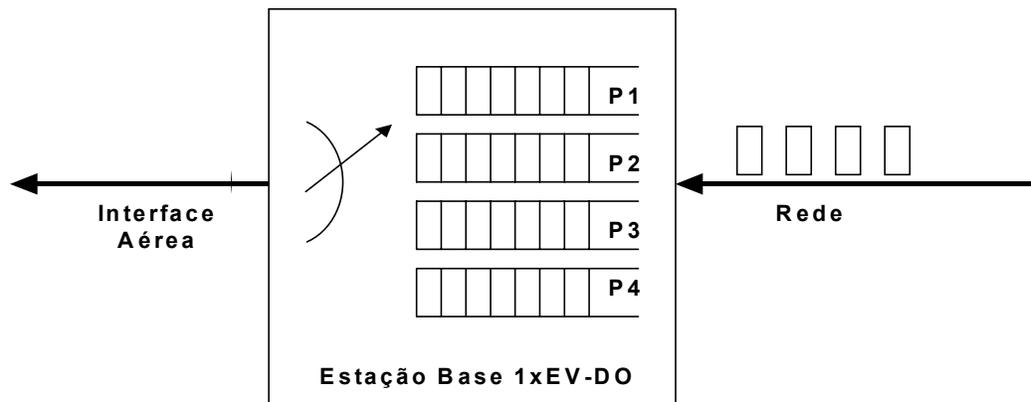


Figura 3.1. Filas com diferentes prioridades na estação base do sistema 1xEV-DO

Com quatro filas poderia se oferecer serviços do tipo Ouro, Prata, Bronze e Melhor-Esforço com tarifas diferenciadas para usuários que optarem por serviços nestas categorias. Outra possibilidade seria alocar uma fila para tráfego de *video-streaming*, outra para aplicações VoIP (*Voice over IP*), e a última para melhor esforço, para pacotes http (*Hyper-Text Transfer Protocol*) ou SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*). Idealmente, mais níveis de prioridade se fariam necessários como, por exemplo, deixar uma prioridade somente para aplicações emergenciais ou críticas que de maneira alguma podem ter atraso (como um sistema de comunicação de segurança da polícia ou de ambulâncias), e a segmentação maior por tipo de aplicação e usuários. Aplicações de telemetria poderiam ser agrupadas em uma prioridade, já que tem características similares que geralmente requerem pouca banda e tem pacotes pequenos, mas mesmo estas têm diferenças, umas podem ser críticas, precisam ser recebidas imediatamente após um evento, outras se atrasarem alguns minutos ou horas não trazem impacto para a aplicação. Este é o caso de medidores de água e luz que não precisam de tanta precisão de tempo,

mas já em um sistema de rastreamento de veículos alguns minutos podem fazer uma diferença significativa no caso de um sinistro ou em um sistema de gerenciamento de frotas para logística.

Assim, o objetivo deste capítulo é inicialmente descrever o modelo utilizado pelo estudo para o sistema 1xEV-DO com os parâmetros e suposições adotadas. A seguir são apresentados os resultados e suas análises.

3.2. O Modelo

Para o trabalho foram adotadas as seguintes suposições:

- a) Os pacotes são marcados com as prioridades em algum momento antes de chegar ao escalonador da estação base. Conforme comentado anteriormente, o PDSN pode traduzir códigos de prioridade provenientes da rede de dados (cabeçalho DiffServ, por exemplo);
- b) Os pacotes de maior prioridade são atendidos em primeiro lugar. Somente quando a fila de maior prioridade ficar vazia é que a fila de prioridade seguinte é atendida, não sendo considerados esquemas com peso para cada prioridade como o WFQ ou WQ;
- c) O escalonador é baseado em prioridade sem preempção, ou seja, se um pacote de menor prioridade estiver sendo servido e um pacote de maior prioridade chega no sistema, termina-se o serviço do pacote de menor prioridade para então tratar o de maior prioridade;
- d) Somente o tráfego referente ao enlace direto é investigado, uma vez que este é enlace crítico para a maioria das aplicações;
- e) O *buffer* de cada fila tem tamanho infinito. Esta suposição é justificada com:
 - i. Custo de memória vem sendo reduzido a cada ano.

- ii. Não é de interesse que pacotes de menor prioridade sejam descartados, mesmo em situações onde pacotes desta prioridade não sejam atendidos por muito tempo, uma vez que o objetivo desta implementação é justamente deixar para atender estes pacotes em momentos de menor utilização da rede.

- f) Os pacotes são armazenados no esquema FIFO (First In First Out) em cada fila;

- g) Não se considerou neste trabalho o Escalonador de Equidade Proporcional, uma vez que este não é mandatário pelo padrão 1xEV-DO, porém esta técnica poderia ser utilizada mesmo com a criação de mais prioridades sendo que o escalonador estaria analisando a razão DRC/R para cada uma das filas, otimizando-se assim a vazão de cada fila do sistema;

- h) Considerou-se neste trabalho o desempenho de um setor de uma célula (BTS), pois o resultado é idêntico para os demais setores/células. Como não há *soft-handoff* onde mais de um setor serve um mesmo usuário simultaneamente, não se faz necessário a análise de um sistema com diversos setores;

- i) Não se considerou neste trabalho a Terminação Antecipada de Pacotes por simplicidade, porém esta técnica poderia ser utilizada mesmo com a criação de mais prioridades, pois os pacotes de cada fila poderiam ter seu término, otimizando-se assim a vazão de cada fila do sistema;

- j) A chegada de pacotes obedece a uma distribuição exponencial negativa. O tráfego de dados na internet possui características diferentes da exponencial, mas devido a limitações na ferramenta de simulação foi aproximado para este tipo de distribuição. Sabe-se que o tráfego de Internet é melhor modelado por fontes auto-similares que aproximam mais das características de geração de pacotes deste tráfego. Porém este estudo considerou apenas a exponencial para ter um resultado aproximado da realidade. Outra justificativa

para esta escolha é que apesar do 1xEV-DO fornecer conectividade à Internet, ainda não se sabe como será o perfil do usuário e tráfego quando este acessar aplicativos próprios para um celular. Este tópico é discutido em maiores detalhes no capítulo 5;

k) O tempo de serviço ($1/\mu$) é igual à duração do número de TSs que cada região de cobertura tem (por exemplo, a região de 38 kbps tem $1/\mu$ de 26,67 ms, enquanto que a região com 2.4 Mbps tem $1/\mu$ de 1,67 ms). Este tópico é discutido em maiores detalhes no capítulo 4;

l) As classes de taxa de transmissão determinadas pela cobertura de RF são denominadas de A a I de forma a facilitar a referência às mesmas (A é utilizada para classe de 38,7 kbps e I para a de 2,45 Mbps);

m) Para a simulação foi adotado um período de simulação de 60s que equivale a aproximadamente 36.000 vezes o tempo de um TS.

3.1.1. Índices de desempenho

Os índices de desempenho tomados como mais importantes neste estudo são: atraso médio dos pacotes, vazão de saída e nível de utilização do sistema. Tanto o atraso quanto a vazão foram medidos para cada fila e também a média do sistema considerando as quatro filas. Os mesmos parâmetros foram usados para análise do sistema sem prioridades.

O *software* de simulação Q+ utilizada não provê estatísticas de vazão, porém possibilita a programação de estatísticas a critério do usuário. Assim, foi escrito um programa para calcular a vazão de cada fila e do sistema como um todo e reproduzido no Anexo 1 (A1.2).

3.1.2. Valores default

O tráfego de pacotes é dividido em prioridades obedecendo à proporção mostrada na Tab. 3.1. Esta distribuição foi adotada desta forma, pois naturalmente a

operadora do sistema irá cobrar mais pelos pacotes de maior prioridade, assim estima-se que menos usuários irão optar por utilizar serviços *premium*.

Tabela 3.1. Distribuição *default* das prioridades (Pr)

Prioridade	Probabilidade (Pr)
1	10%
2	25%
3	30%
4	35%

O número de usuários na portadora/setor da célula é denominado genericamente de N. Foi tomado como *default* o número N=20. As classes de cobertura são divididas nas proporções (Pc) que foram baseadas em [11], conforme a tabela abaixo:

Tabela 3.2. Proporção *default* de classes de cobertura e respectivas taxas.

Classe	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Taxa (kbps)	38,4	76,8	153,6	307,2	614,4	921,6	1228,8	1843,2	2458
Pc	2%	3%	8%	18%	23%	17%	15%	10%	4%

A vazão média por usuário é denominada R_u e o valor *default* foi considerado de $R_u = 17$ kbps. R_u é a média de vazão entre instantes de atividade (que normalmente se dá em rajadas) e de inatividade (*download* e leitura de um web site por exemplo); é a taxa de chegada de tráfego em bits por segundo por usuário.

Esta média foi tomada pensando-se em uma distribuição de aplicações do tipo acesso à internet, e-mail, ftp, mp3 e *video-streaming*.

Para se calcular a taxa média de pacotes (λ) de cada classe de cada prioridade é utilizada a seguinte expressão:

$$\lambda_x = \frac{N \cdot Pr \cdot Pc \cdot R_u}{T_c} \quad (3.1)$$

Onde N , Pc , Pr e R_u são parâmetros definidos anteriormente e T_c é o comprimento de pacote em bits de cada classe de cobertura (de acordo com a Tab.2.1). A Fig.3.2 exemplifica λ de cada classe em uma fila de prioridade.

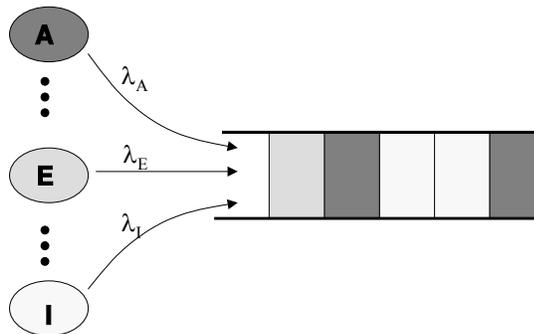


Figura 3.2. Taxa de chegada de cada classe em uma fila.

O *software* de simulação Q+ utilizado neste estudo possibilita a definição de expressões para taxa de chegada de pacotes. Desta forma, foram feitas expressões considerando a Eq.3.1 reproduzidas no Anexo 1 (A1.1). Também os tempos de serviços foram definidos através destas expressões.

A partir dos valores default pode-se extrair a vazão máxima do sistema (um setor de uma portadora). Para calcular a capacidade do sistema, é preciso antes chegar na proporção do tempo que cada classe ocupa do sistema. A Tab.3.2 define a distribuição dos usuários dentre as classes, porém um usuário a 38.4 kbps utiliza o sistema 16 vezes mais do que o um usuário a 2.4 Mbps, já que são alocados 16 TSs para o primeiro e apenas 1 para o segundo. Além disto, um usuário a 2.4 Mbps transmite 4 vezes mais em 1 TSs (4096 bits) do que um usuário a 38.4 kbps (1024). Desta forma, para chegar-se a proporção de utilização dos recursos para cada classe, é preciso calcular a média

ponderada com estas 3 distribuições chegando aos valores de utilização do sistema por cada classe (U_C) conforme Tab.3.3.

Tabela 3.3. Taxa de utilização do sistema por cada classe.

Classe	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Taxa (kbps)	38,4	76,8	153,6	307,2	614,4	921,6	1228,8	1843,2	2458
U_C	18,8%	14,1%	18,8%	21,2%	13,6%	6,6%	4,4%	1,9%	0,6%

A utilização do sistema pelos pacotes de taxas mais baixas é significativamente maior do que as taxas mais altas. Como exemplo, somente 2% dos pacotes são gerados na classe A, porém estes pacotes ocupam o sistema durante 18.8% de seu tempo. Multiplicando-se a taxa de distribuição das classes P_C pela taxa de transmissão da classe chegar-se-ia a uma taxa do sistema de 835kbps, esta seria a capacidade do sistema caso os pacotes das diferentes classes tivessem o mesmo tamanho em bytes e tivessem o mesmo número de TSs. Agora, multiplicando-se a taxa de utilização do sistema de cada classe U_C pela taxa de transmissão das classes respectivas chega-se a capacidade do sistema que é igual a 361 kbps.

3.2. Cenários de Análise

As simulações foram feitas variando cada um dos parâmetros referenciados acima. Assim, foram simulados quatro cenários com algumas medidas para observação dos resultados. Em todos os cenários, foram simulados também os mesmos parâmetros no modelo sem prioridade para efeito de comparação. Os cenários de simulação considerados estão descritos a seguir:

3.2.1. Cenário 1: Variação do número de usuários

Alterando-se o número de usuários, muda-se o valor de λ conforme Eq.3.1. Foram simulados 5 valores: 5, 10, 15, 20 e 25 usuários. Este cenário é bastante relevante tendo em vista a característica de mobilidade de sistemas celulares, onde em determinados momentos pode-se observar uma grande concentração de usuários, assim, o objetivo deste cenário é o de verificar a importância das prioridades nas condições de

aumento de número de usuários. Além da questão da mobilidade, existe sempre o interesse da operadora de telefonia celular de otimizar seus recursos, colocando o maior número possíveis de usuários com o menor investimento, assim este cenário é bastante interessante sobre o aspecto financeiro.

3.2.2. Cenário 2: Variação da taxa de chegada de bits

Alterando-se a taxa de chegada de bits, muda-se também o valor de λ conforme a Eq.3.1. Foram simulados 6 valores: 8 kbps, 11 kbps, 14 kbps, 17 kbps, 20 kbps e 23 kbps. Apesar de similar ao cenário 1, tendo em vista que o valor de λ se altera, o intuito foi enfatizar o fato de que uma mudança de perfil dos usuários, utilizando aplicações diferentes dos valores de *default*, pode-se atenuar ou acentuar a necessidade do uso de prioridades no tratamento dos pacotes. Por exemplo, se o sistema for basicamente utilizado para aplicações do tipo de telemetria, telemedicação, automação de força de vendas (geração de pedidos, consulta de estoque no cliente) que não requerem muita banda, mas que podem representar uma grande quantidade de usuários, o comportamento será bastante distinto de poucos usuários, com taxas altas de bits como monitoramento por vídeo, *downloads* pesados, etc.

3.2.3. Cenário 3: Variação do tamanho da célula

Sabe-se que uma alteração no tamanho ou morfologia da célula acarreta em características de propagação diferentes e conseqüentemente alterando também a distribuição das taxas. A Fig.3.3 exemplifica como a alteração no tamanho da célula altera a distribuição das classes e a Tab.3.3 mostra as distribuições adotadas no trabalho para uma célula pequena, uma média e outra grande.

A intenção de se analisar este cenário é a verificação da possibilidade de se utilizar células maiores garantindo-se um bom nível de desempenho para aplicações consideradas importantes, possibilitando-se assim uma boa economia para operadoras de telefonia celular permitindo a cobertura de uma mesma região com menos BTSs.

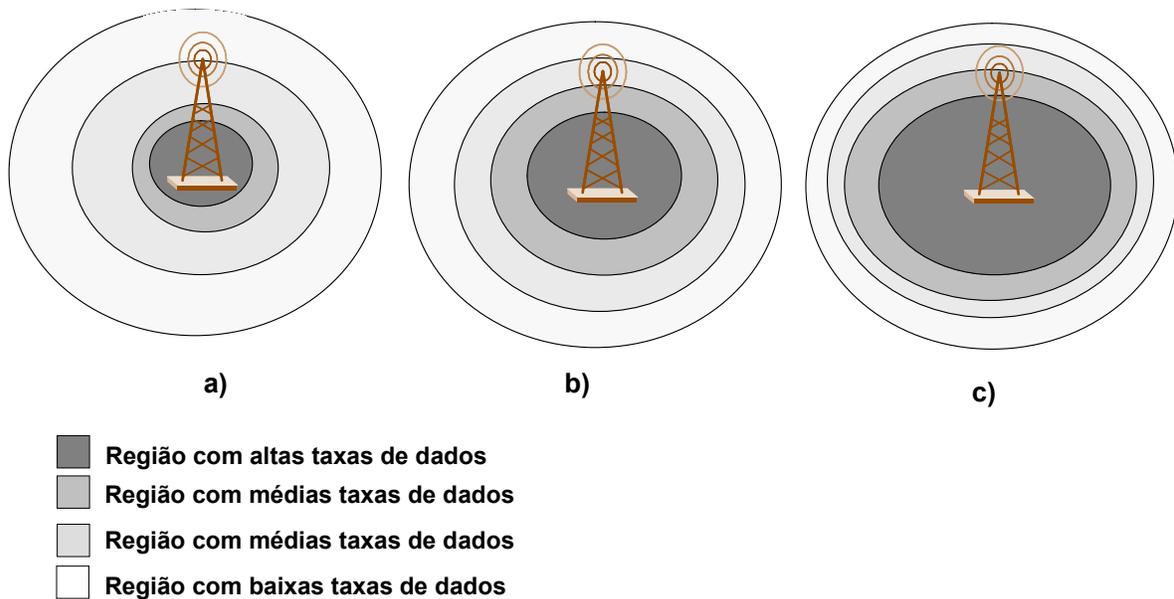


Figura 3.3. Diagrama exemplificando taxas de dados em uma a) célula grande, b) média e c) pequena.

Tabela 3.4. Probabilidades de classes de cobertura para células de diferentes áreas.

	A	b	C	D	E	f	g	h	i
	38,4	76,8	153,6	307,2	614,4	921,6	1228,8	1843,2	2458
Pequena	1%	1%	4%	8%	11%	24%	19%	18%	14%
Média	2%	3%	8%	18%	23%	17%	15%	10%	4%
Grande	5%	7%	19%	25%	18%	13%	8%	3%	2%

Da mesma maneira que foi calculada a capacidade do sistema no item 3.2.1, pode-se chegar a capacidade do sistema para estes casos de células de diferentes tamanhos.

A Tab.3.5. indica a ocupação de cada classe no sistema para as células grande e pequena. A partir destes valores são calculadas as capacidades do sistema para célula grande, 602 kbps, e celular pequena, 209 kbps.

Tabela 3.5. Taxa de utilização do sistema por cada classe.

Classe	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Taxa (kbps)	38,4	76,8	153,6	307,2	614,4	921,6	1228,8	1843,2	2458
U _C (Grande)	15,7%	7,9%	15,7%	15,7%	10,8%	15,5%	9,4%	5,8%	3,4%
U _C (Pequena)	27,2%	19,0%	25,8%	17,0%	6,1%	2,9%	1,4%	0,3%	0,2%

3.2.4. Cenário 4: Variação da distribuição de prioridades

Foi alterada a distribuição das prioridades para se verificar o impacto no desempenho. As distribuições escolhidas são mostradas na Tab.3.6.

Uma vez definido o uso de prioridades, neste cenário analisa-se o efeito que traz o aumento da proporção de pacotes com maiores prioridades, pois existe a possibilidade de muitas aplicações pedirem um tratamento prioritário. Por exemplo, analisar o efeito de mais da metade dos usuários optarem por um tratamento diferenciado, se isto traria uma queda de desempenho significativa eliminando os ganhos da priorização do tráfego. Ou também, aplicações que exigem maior prioridade como VoIP se tornarem comuns e se tornarem a aplicação majoritária na rede.

Tabela 3.6. Distribuição das prioridades nas diferentes simulações

	Prioridade 1	Prioridade 2	Prioridade 3	Prioridade 4
10/25/30/35	10%	25%	20%	35%
25/25/25/25	25%	25%	25%	25%
25/30/30/10	25%	30%	30%	15%
60/20/10/10	60%	20%	10%	10%
50/50/0/0	50%	50%	0%	0%

3.3. Análise dos Resultados

Os resultados obtidos nas simulações para os diferentes cenários estão mostrados em gráficos e tabelas. Nos gráficos de vazão, R Px indica a vazão observada para cada fila de prioridade, R TP div 2 indica a curva para a vazão total de todas as filas dividido por 2 e R SP div 2, a vazão para a simulação sem prioridade também dividida por 2. Nos gráficos de atraso médio de pacotes, D Px indica o atraso observado para cada fila de prioridade. D SP e D TP indicam o atraso médio total sem prioridade e com prioridade, respectivamente. Os gráficos de atraso médio de pacotes estão em escala logarítmica para melhor visualização de todas as curvas. Nos gráficos de utilização do enlace, U SP e U CP indicam as utilizações sem prioridade e com prioridade, respectivamente.

3.3.1. Cenário 1: Variação do número de usuários

A Fig.3.4 mostra o resultado da simulação para a vazão quando se varia o número de usuários.

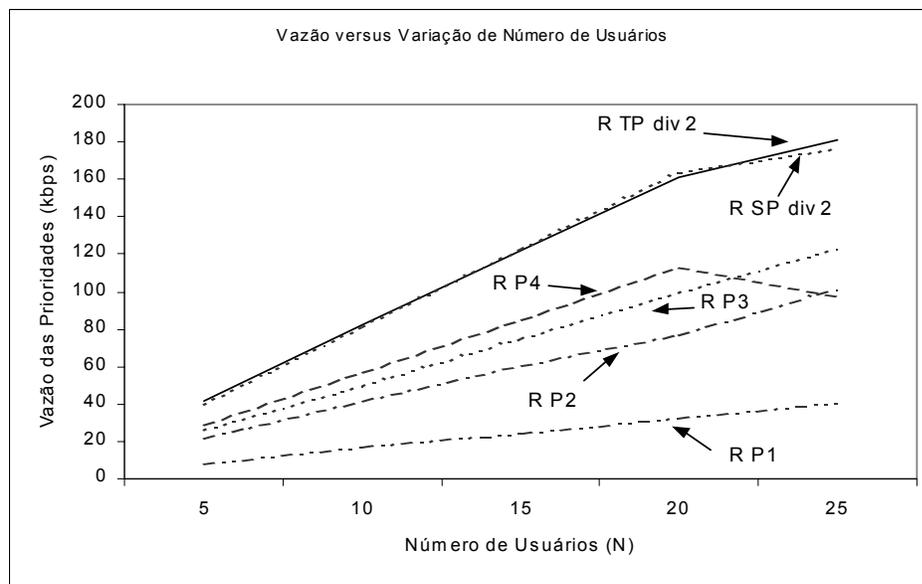


Figura 3.4. Gráfico da vazão em função de número de usuários para cenário

Observa-se que aumentando o número de usuários e conseqüentemente a taxa de chegada de pacotes (λ) no sistema, a vazão total do sistema cresce proporcionalmente até o número de 20 usuários. Na simulação com 25 usuários, observou-se que a taxa de chegada de pacotes foi maior do que a capacidade de tratamento do sistema, assim o crescimento da vazão não foi proporcional, uma vez que foi limitada. Esta limitação foi observada somente para os pacotes da prioridade 4, assim a vazão dos demais não foi prejudicada. Pacotes que chegam na fila 4 ficam no *buffer* e o sistema não consegue tratar todos, assim a fila cresce infinitamente até que alguns usuários saiam do sistema e este fique menos carregado voltando a condição de estacionaridade. Esta é a vantagem de se trabalhar com buffer infinito ou de tamanho expressivo, pois, pode-se deixar para atender estes pacotes em momentos de menor ocupação da rede, maximizando a utilização dos recursos. Conforme previsto no item 3.2.1, a capacidade do sistema fica em torno de 360 kbps quando de sua máxima utilização.

Já o atraso médio dos pacotes, como mostra a Fig.3.5, foi sensivelmente diferente para as prioridades nas simulações com muitos usuários (alta utilização do sistema). Com poucos usuários (5 e 10) os atrasos observados não foram tão dispares entre as prioridades, sendo que a utilização de priorização de tráfego não traria grandes benefícios para maioria das aplicações. Mas com o aumento do número dos usuários, a priorização se mostrou fundamental. Com 20 usuários o atraso de pacotes da prioridade 4 aproximou-se de 1s, enquanto que o atraso da prioridade 1 permaneceu próximo a da observada com poucos usuários (poucos ms, que não introduz atraso suficiente para acarretar em perda de qualidade na maioria das aplicações). Quando da não utilização de prioridade, para 20 usuários houve um atraso médio de 75 ms que poderia causar baixa performance dependendo do serviço e dos demais atrasos sofridos em outros pontos da rede pela qual passou, enquanto que a prioridade 1 teve apenas 9 ms de atraso. Para uma aplicação de voz, por exemplo, (VoIP por exemplo), para boa qualidade de comunicação o atraso ponta-a-ponta não deve ultrapassar 150 ms, assim adicionar 50 ou 100 ms somente na interface aérea invariavelmente comprometerá o desempenho final observado pelo usuário, uma vez que deve-se somar ainda o tempo de processamento em cada um

dos elementos de rede na comunicação entre as duas pontas, tempo de espera em cada elemento e tempo de propagação nos outros trechos da rede.

Na condição de congestionamento, caso não haja priorização do tráfego todos os pacotes independentemente do destino e do tipo sofrerão igualmente e como pode ser visto na Fig.3.5 para 25 usuários o atraso tende ao infinito, ou seja, nenhum pacote é tratado com bom desempenho.

Assim, percebe-se que a priorização do tráfego tornou-se vantajosa principalmente para condições em que há alta utilização do sistema. Esta é normalmente a condição de uma rede comercial durante os horários de pico, sendo que o interesse financeiro é sempre utilizar ao máximo seus investimentos. Mas o sistema, mesmo se dimensionado para poucos usuários por célula, pode e provavelmente irá apresentar situações com muitos usuários por célula, devido à mobilidade dos mesmos, sendo que não é possível prever com exatidão qual o número de terminais que estarão usufruindo a rede simultaneamente. Desta forma, a utilização de um escalonador de prioridades amenizaria o impacto das situações onde muitos terminais móveis se locomovem para uma mesma célula durante determinados períodos. Caso não houver a priorização, provavelmente usuários ficariam insatisfeitos com o serviço e a operadora poderia precisar instalar nova portadora na região de congestionamento para atender somente alguns períodos de pico de concentração de usuários.

A Fig.3.6 mostra a utilização do sistema em relação ao número de usuários. A utilização do sistema cresce linearmente com o aumento de número de usuários até 20 usuários. Acima de 20 usuários, o sistema entra em saturação aproximando de 100% de utilização. Em redes cabeadas é bem mais fácil controlar o nível de utilização da rede, pois a demanda média por usuário ou por região é mais ou menos sabida e apesar de nas redes sem-fio também haver médias com base em estatísticas, devido a mobilidade dos usuários é mais fácil acontecerem pontos de congestionamento na rede relacionados a eventos, anormalidades (por exemplo, um congestionamento de trânsito poderia fazer com que muitas pessoas utilizassem serviços de dados para passar o tempo) entre outros fatores onde a priorização poderia ajudar a conter estas adversidades.

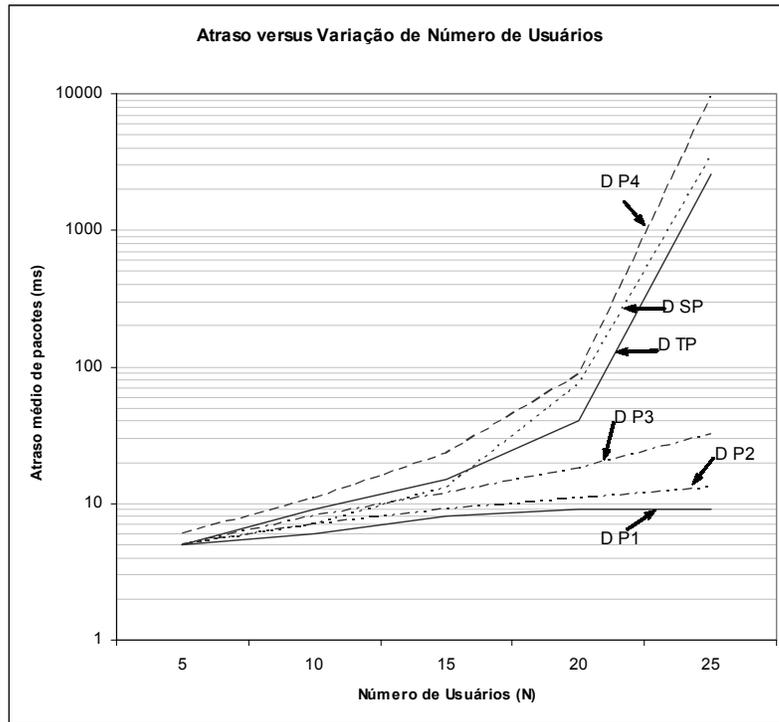


Figura 3.5. Gráfico de atraso médio de pacotes em função do número de usuários para cenário 1

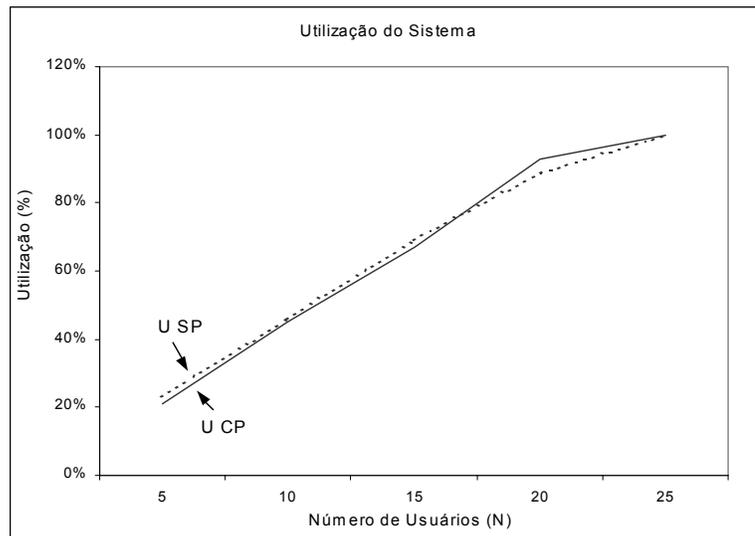


Figura 3.6 Gráfico de utilização do sistema em função de número de usuários para cenário 1

3.3.2. Cenário 2: Variação da taxa de chegada de bits

As Figs.3.7, 3.8 e 3.9 mostram os gráficos obtidos para a vazão, o atraso médio de pacotes e a utilização, respectivamente, quando se varia a taxa de chegadas de bits por usuário.

Como o aumento de R_u também traz um aumento de λ , as curvas apresentaram as mesmas características do cenário 1. Assim, quando se aproxima da utilização máxima do sistema, pacotes de mais baixa prioridade foram tratados com um atraso bastante alto, mas garantindo que os pacotes de mais alta prioridade mantenham atrasos médios baixos. Apesar de terem a mesma característica, este cenário foi analisado, pois poderia se pensar em projetar células para poucos usuários, mas caso o perfil de uso mudasse com maior demanda por dados, a priorização se faz necessária para não prejudicar o desempenho de aplicações de maior prioridade. Como exemplo, se no início de operação do sistema, os jogos fossem apenas baixados para os aparelhos celulares uma única vez onde o atraso ou *jitter* não são críticos e a rede suportasse essa aplicação satisfatoriamente, no momento em que surjam novos jogos onde a interatividade se tornasse o modelo de jogo mais comum e neste caso o atraso e *jitter* mínimos são fundamentais além de uma alta quantidade de informação sendo transmitida provavelmente a mesma rede não seja capaz de atender todo o tráfego satisfatoriamente. Uma opção seria aumentar a capacidade na rede com uma portadora adicional, o que exige considerável investimento em infraestrutura e este investimento poderia ser adiado caso se optasse por priorizar o tráfego na rede garantindo o desempenho para os jogos interativos em detrimento de aplicativos como tráfego de aplicações de telemetria ou SMTP. Outra comparação similar é se usuários utilizem a rede apenas para enviar e receber fotos, ou ler notícias versus usuários fazendo *streaming* constantes de áudio e vídeo bem como fazendo vídeo-telefonía. São perfis de utilização bastante distintos e dependendo de como os usuários da rede se comportam, a priorização do tráfego pode ou não ser importante.

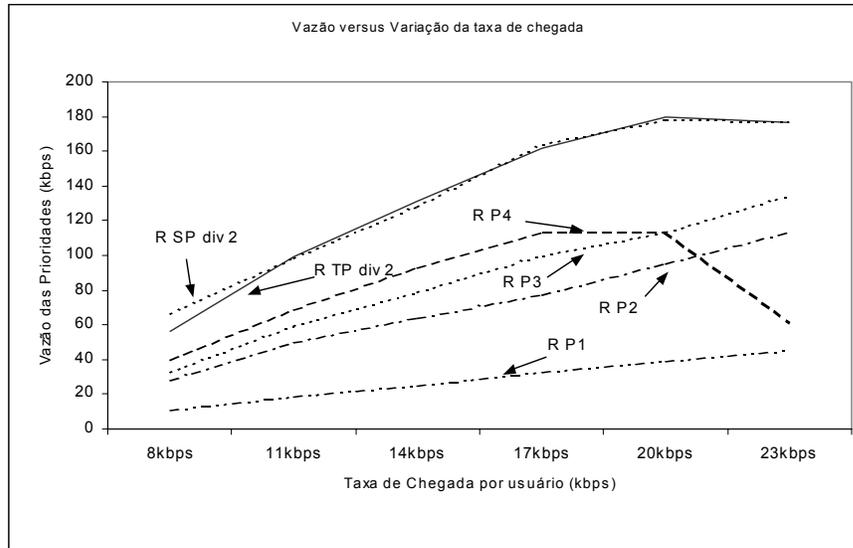


Figura 3.7. Gráfico da vazão em função da taxa de chegada para cenário 2

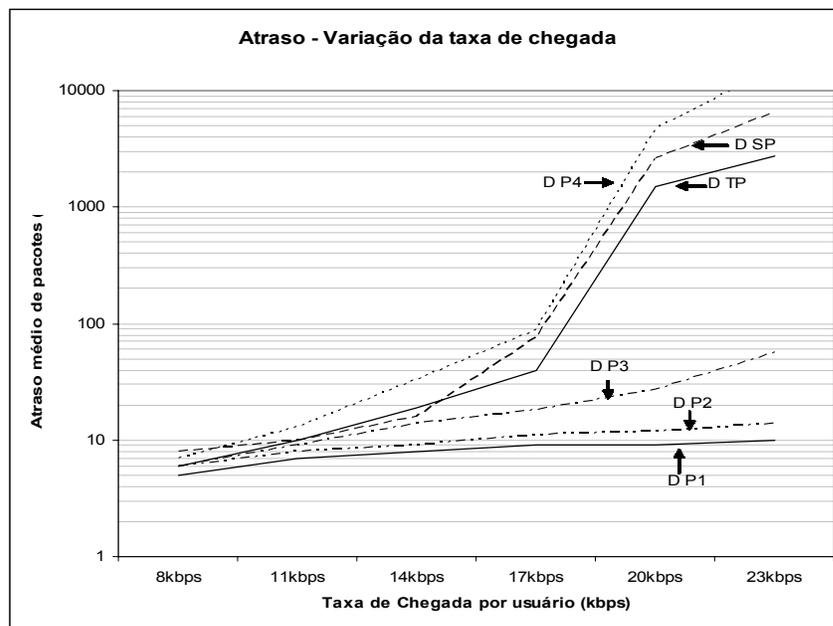


Figura 3.8. Gráfico de atraso médio de pacotes em função da taxa de chegada para cenário 2

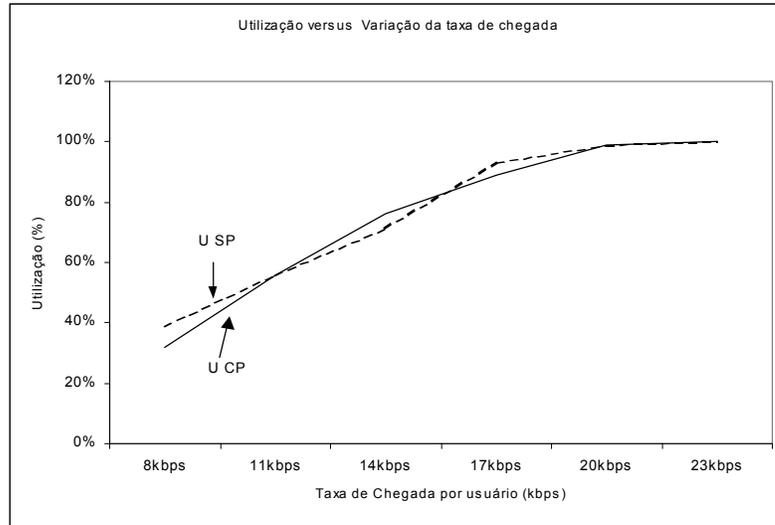


Figura 3.9. Gráfico de utilização do sistema em função da taxa de chegada para cenário 2

3.3.3. Cenário 3: Variação do tamanho da célula

As Figs. 3.10, 3.11 e 3.12 mostram os gráficos da vazão, do atraso médio de pacotes e da utilização, respectivamente, quando se leva em conta a variação do tamanho da célula. Com o aumento do tamanho da célula, observou-se que a ocupação do sistema foi ficando maior, uma vez que a proporção de usuários em classes de taxas mais baixa aumenta e como estas tem tempo de serviço maior por pacote, acarretou em congestionamento do servidor. Assim, a priorização do tráfego se mostrou mais importante neste tipo de célula. Enquanto que em células pequenas a necessidade não se mostrou essencial, tendo em vista que as taxas mais altas obtidas nestas condições têm menor tempo de serviço por pacote ocupando menos o sistema.

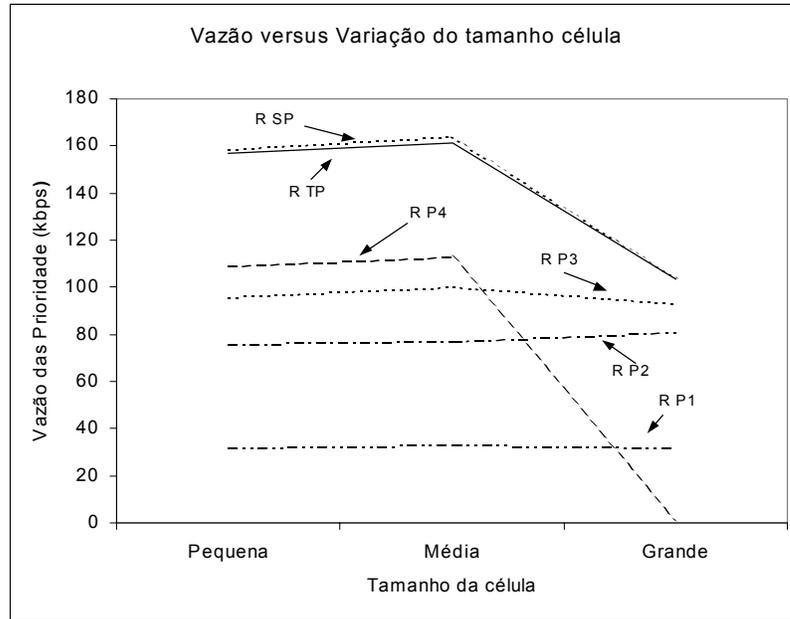


Figura 3.10. Gráfico da vazão em função do tamanho da célula para cenário 3

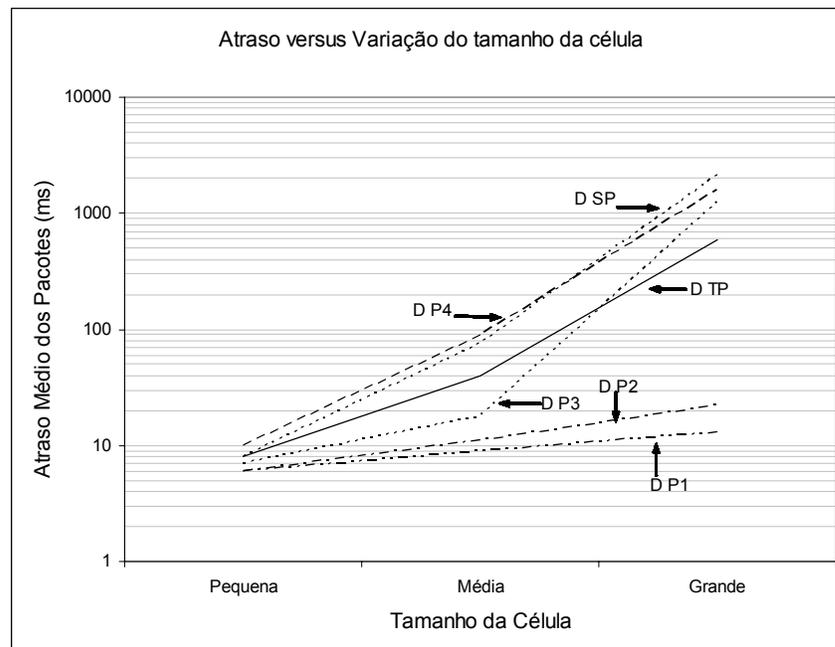


Figura 3.11. Gráfico de atraso médio de pacotes em função do tamanho da célula para cenário 3

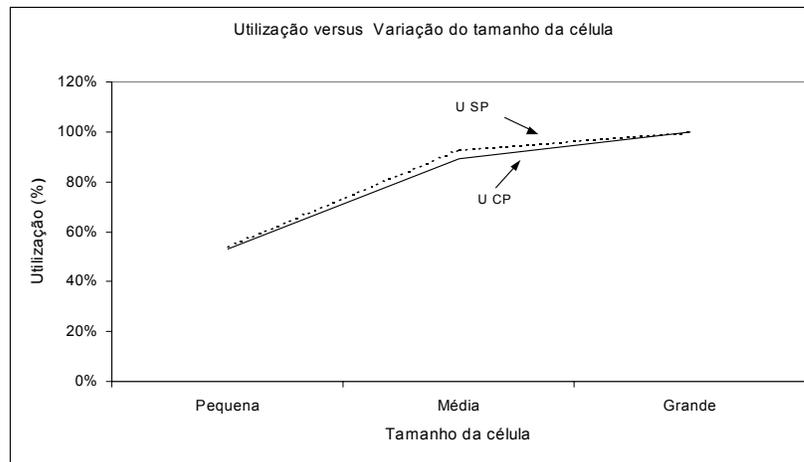


Figura 3.12. Gráfico da utilização em função do tamanho da célula para cenário 3

Passando de uma célula pequena para uma grande, o grau de ocupação passou de 53% para 100% e neste último caso a fila aumentou constantemente, fazendo com que o atraso médio também aumentasse e os pacotes da prioridade 4 não fossem tratados apenas sendo acumulados na fila. É interessante notar que a curva do atraso médio dos pacotes da prioridade 4 é bastante próxima da curva do caso sem priorização do tráfego, confirmando que é vantajoso priorizar o tráfego fazendo com que pelo menos os pacotes das aplicações consideradas mais importantes sejam tratados satisfatoriamente.

Porém neste cenário, a taxa de chegada de pacotes foi muito maior que a capacidade de atendimento do sistema, fazendo com que até pacotes da prioridade 3 deixassem de ser atendidos. Esta pode ser uma condição não desejada pela operadora, pois pode ser que estes pacotes não possam esperar momentos de pouca utilização da rede para serem transmitidos e neste caso provavelmente a operadora deve optar por investir em mais uma portadora 1xEV-DO. A capacidade do sistema para célula grande ficou em 207 kbps, muito próxima do previsto no item 3.2.3. Para célula pequena, como não se chegou a utilização máxima do sistema, não se pôde comprovar a capacidade do sistema prevista no item 3.2.3.

Amenizando a queda de desempenho para aplicações críticas ou usuários com maiores necessidades de QoS em células de maior tamanho, possibilita o oferecimento de serviços de dados para uma mesma área com menos BTSs, podendo trazer uma economia significativa para as operadoras deste serviço. Em outras palavras, uma operadora pode

cobrir uma mesma região com menor número de BTSs traduzindo em um menor investimento.

Outras técnicas tentam alcançar o mesmo benefício da redução do tamanho da célula que basicamente são mecanismos de melhorar a relação SINR, pois aumentando esta relação permite a entrega de pacotes com uma classe de maior taxa. Alguns exemplos destas técnicas são:

- Diversidade de recepção: terminais com mais de uma antena combinando os sinais das antenas ou selecionando o melhor sinal das antenas;
- Melhores equalizadores nos terminais: com melhores equalizadores, a probabilidade de um terminal ser atendido com taxas maiores aumenta.

Entretanto ambas as técnicas listadas acima requerem terminais mais sofisticados com um custo maior que muitas vezes pode desestimular seu uso, mas são soluções válidas para aumentar a eficiência da rede que aliadas à priorização do tráfego são ferramentas importantes para garantir um bom retorno financeiro para as operadoras.

Este cenário (cenário 3) foi estudado a partir do trabalho [13] que verificou o desempenho do 1xEV-DO variando-se o tamanho da célula, porém sem a utilização de priorização do tráfego. Verificou-se que com o aumento do tamanho da célula, a vazão do total do setor diminui devido a maior proporção de usuários com menores taxas de transmissão. Entretanto, um fator que deve ser levado em conta é que ao diminuir o tamanho da célula, as BTSs ficarão mais próximas umas das outras, implicando em maior interferência para o AT que além de receber o sinal da BTS que está lhe transmitindo informação, estará também recebendo sinais mais fortes de BTSs vizinhas irradiando para outros ATs. Diminuindo a relação SINR, fará com o AT tenha de optar por uma classe de menor taxa de transmissão, anulando o benefício de ter um sinal com maior potência.

Neste trabalho não se levou o aumento da interferência em consideração da mesma forma que [13], mas os mesmos resultados podem se aplicar para cenários onde se consiga trazer o AT para uma região com melhor SINR. Por exemplo, um bom planejamento de rede irá instalar as BTSs próximo às regiões com alta concentração de

usuários conforme Fig.3.13, mas muitas vezes isto não é possível de se fazer primeiro porque é difícil prever exatamente as localidades de alta concentração de usuários, já que são móveis, e muitas vezes existem dificuldades físicas de se instalar uma BTS em determinada região (não existe espaço físico, prefeituras não autorizam, etc). Assim, a priorização de tráfego irá amenizar a queda de desempenho em localidades onde não se consegue instalar uma BTS adequadamente, ou ameniza o impacto de um mau planejamento de rede que não previu a concentração de usuários corretamente.

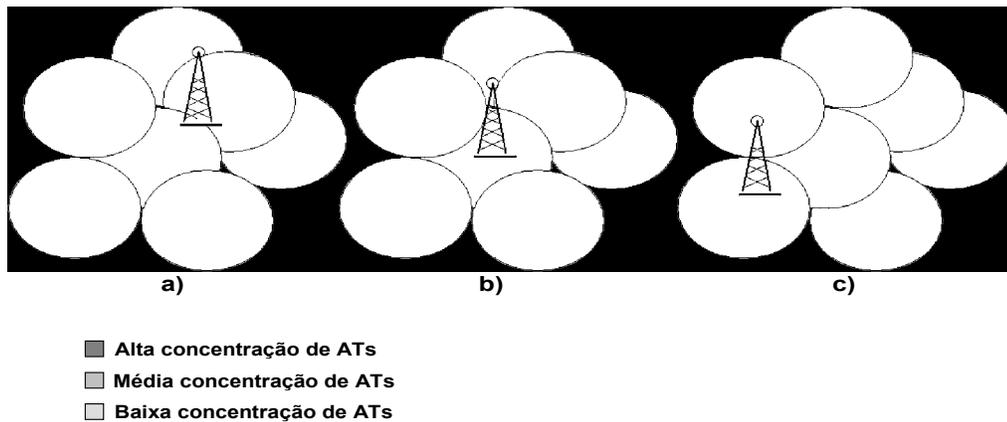


Figura 3.13. Diagrama ilustrativo de um a) bom planejamento de rede, b) médio planejamento de rede ou c) mau planejamento de rede

3.3.4. Cenário 4: Variação da distribuição de prioridades

As Tabs. 3.7, 3.8 e 3.9 mostram a vazão, o atraso médio de pacotes e a utilização, respectivamente, quando se leva em conta a variação da distribuição de prioridades. Como era de se esperar, a vazão não sofreu conseqüências com a alteração de distribuição de prioridades, mantendo o valor total e somente re-distribuindo a vazão para cada prioridade proporcionalmente. A mudança de atendimento de serviço não implica em quantidade total de pacotes no sistema e nem na alteração da taxa com que serão servidos.

Mesmo crescendo a porcentagem de participação da prioridade 1, os atrasos sofridos pelos pacotes desta prioridade não foram severamente afetados. Por exemplo, na simulação 60/20/10/10 a prioridade 1 apresentou atraso de 14 ms o que não representa uma introdução crítica de atraso na comunicação. Porém, observou-se um aumento do

atraso médio do sistema com o aumento das prioridades mais altas. Desta forma, mesmo que muitas aplicações ou usuários comecem a requisitar tratamento com maior prioridade, o desempenho terá uma queda, porém ainda aceitável.

Para uma distribuição homogênea entre as prioridades (25/25/25/25), os usuários de mais alta prioridade sofreram um acréscimo de atraso de pouco mais de 10% apesar de passar de 10% para 25% dos usuários com esta prioridade. Já os da última prioridade, viram seu atraso crescer 60% passando de 89ms para 142ms. Outro ponto interessante foi que a utilização de apenas duas filas com prioridades distintas (50/50/0/0) já trouxe melhora significativa para o atraso da mais alta prioridade, pois comparando com a 100/0/0/0 que apresentou atraso médio de 75 ms, a primeira prioridade teve apenas 12 ms. Assim, caso o processamento adicional necessário para implementação de muitas filas no sistema for grande, a divisão dos pacotes em duas prioridades com distribuição homogênea trouxe uma melhora significativa para a prioridade mais alta.

Desta forma, este cenário de análise comprovou que não se precisa preocupar tanto com a seleção de grande parte dos usuários/aplicações por tratamento prioritário, pois a mais alta prioridade não é muito prejudicada com atrasos significativos e as mais baixas apesar terem um incremento no atraso ainda assim ficam abaixo de 1s.

Tabela 3.7. Vazão (em kbps) para variação da distribuição de prioridades.

	Vazão Medida	Vazão Prior. 1	Vazão Prior. 2	Vazão Prior. 3	Vazão Prior. 4
10/25/30/35	323	33	77	100	113
25/25/25/25	323	83	81	80	79
25/30/30/10	324	81	97	97	49
60/20/10/10	322	194	66	30	32
50/50/0/0	323	83	81	80	79
100/0/0/0	328				

Tabela 3.8. Atraso médio (em ms) para variação da distribuição de prioridades

	Atraso Médio Total	Atraso Médio Prior. 1	Atraso Médio Prior. 2	Atraso Médio Prior. 3	Atraso Médio Prior. 4
10/25/30/35	40	9	11	18	89
25/25/25/25	47	10	14	27	142
25/30/30/10	53	10	15	42	223
60/20/10/10	70	14	46	139	395
50/50/0/0	53	12	93	0	0
100/0/0/0	75				

Tabela 3.9. Utilização do sistema para variação da distribuição de prioridades.

	Ocupação do Sistema
10/25/30/35	89%
25/25/25/25	90%
25/30/30/10	91%
60/20/10/10	92%
50/50/0/0	90%
100/0/0/0	93%

3.4. Conclusões

Neste capítulo foram inicialmente apresentados as suposições e valores *default* considerados no estudo. Foram mostrados os cenários adotados neste trabalho, explanando que os mesmos sempre objetivaram analisar situações recorrentes em redes

de telefonia celular e que possivelmente teriam maior ganho com a inserção de prioridades. Algumas características que fabricantes implementaram como o Escalonador de Equidade Proporcional e a Terminação Antecipada de Pacotes não foram consideradas por simplicidade, mas a introdução de prioridades não anula os efeitos destes e poderiam ser implementados concomitantemente só melhorando o desempenho geral de cada fila.

A seguir foram apresentados os resultados das simulações de um sistema 1xEV-DO com tratamento de pacotes considerando sua prioridade utilizando a ferramenta de simulação Q+. Foi concluído que a priorização de pacotes na interface aérea do 1xEV-DO pode suavizar situações de alta ocupação do sistema para pacotes de aplicações ou usuários que necessitam de melhor desempenho. A alta ocupação pode acontecer quando se adicionam mais usuários fazendo uso simultâneo do sistema, quando se altera o perfil de tráfego do usuário e quando se muda a cobertura da célula (fazendo-as com maior raio ou com um mau planejamento de rede).

Entretanto, se uma situação de congestionamento perdurar por longo período de tempo, apesar de pacotes da primeira prioridade não sofrerem tanta influência, pacotes da última prioridade não serão tratados e caso seja um fato recorrente naquela região, a melhor solução deva ser a adição de nova portadora 1xEV-DO. Porém permite que se utilize mais eficientemente a rede, tratando pacotes menos prioritários em instantes de menor ocupação do sistema, fora do horário de pico. Portanto, a priorização dos pacotes pode suportar satisfatoriamente todos as aplicações em casos onde a ocupação do sistema está em torno de 90% e pode suportar durante um espaço limitado de tempo em casos de ocupação próximo a 100%, sendo uma solução interessante para operadoras que queiram maximizar a utilização de seus recursos.

Capítulo 4: Validação e Comparação de Modelo Analítico com Simulação

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados modelos analíticos de escalonador de pacotes para o sistema 1xEV-DO. Os dois modelos propostos são: modelo de fila multi-usuários sem prioridade e modelo de fila multi-usuários com prioridade.

Discutem-se inicialmente os modelos de fonte e o tempo de atendimento. A seguir é analisado o modelo de filas sem prioridade e comparado com os resultados da simulação. Finalmente, o modelo de filas com prioridade é discutido em detalhes bem como comparado com os resultados das simulações.

4.2. Modelos de fonte e tempo de atendimento

Diferentemente do tráfego de voz que é conhecido há muitos anos devido a existência há longa data das redes de telefonia fixa, o tráfego de dados não tem os mesmos padrões previsíveis de voz que em média cada usuário usa o canal metade do tempo e nem as estatísticas de duração e horário do dia são bem conhecidas. O tráfego de Internet recentemente tem atraído bastante atenção [27], [28] e chegou-se a conclusão que fontes auto-similares traduzem melhor este tipo de serviço. Porém, apesar de o sistema 1xEV-DO basicamente prover conectividade à Internet para terminais sem-fio, ainda não se sabe como será o perfil dos usuários deste serviço. Por um lado pode se concentrar em usuários com laptops equipados com cartões 1xEV-DO e neste caso tendo um perfil bastante próximo do tráfego Internet convencional, mas por outro lado, o serviço de dados em telefones celulares pode crescer muito e assim ter características diferenciadas do tráfego Internet de hoje. Por exemplo, se aplicações como VOD (*Video On Demand*) via celular se popularizarem, este tipo de tráfego poderá ser modelado diferentemente de um serviço http. Pelo fato de não se ter certeza de quais serão as aplicações predominantes nos celulares, optou-se neste trabalho utilizar uma fonte com taxa média próxima de aplicações existentes hoje e com distribuição exponencial.

Outra justificativa para adoção desta premissa é baseada em artigos como o [18] em que se defende que o tráfego de Internet não deve ser aproximado a fontes específicas, uma vez que devido a quantidade enorme de diferentes aplicações que têm perfis completamente distintos uma das outras e não ser possível prever a distribuição das mesmas na rede, é melhor não tentar modelá-las a uma fonte auto-similar por exemplo.

Como foi apresentado no capítulo 2 deste trabalho, o número de TSs alocados para um AT dependerá da classe de taxa de transmissão. Assim, o número de TSs é o tempo que a BTS transmite informação para o AT que está sendo servido e desta forma é o tempo de serviço para aquela classe. Isto é, $1/\mu$ para cada classe de taxa de transmissão será igual ao número de TSs alocados para cada uma. Por exemplo, se um pacote é transmitido a 76.8kbps, ele será dividido em 8 TSs, como cada um deles tem duração de 1.667ms, o pacote levará 13.3ms para ser servido na sua totalidade. Assim, $1/\mu$ para esta classe é de 13.3ms. Esta característica de ter tempo fixo de serviço para cada classe facilita seu modelamento analítico, uma vez que existem modelos já definidos que tratam diferentes usuários sendo tratados pelo mesmo servidor. São os modelos multi-usuários que serão explanados a seguir.

4.3. Modelo Sem Prioridade

Para obter os valores teóricos do sistema 1xEV-DO como está implantado nas redes hoje, sem prioridade, utilizou-se o modelo de filas de multi-usuários sem prioridade. Trata-se de uma fila do tipo M/G/1 conforme exemplifica o diagrama da Fig. 4.1 extraído de [32]. No diagrama, r indica o número de multi-usuários e p um usuário genérico. Neste modelo, cada classe 1xEV-DO é representada por um usuário, já que tem tempo de serviço distintos. C indica o servidor do sistema, representando a BTS da rede 1xEV-DO, uma vez que este elemento só atende um pacote por vez. A fila armazena os pacotes que chegam na BTS e precisam esperar para serem atendidos.

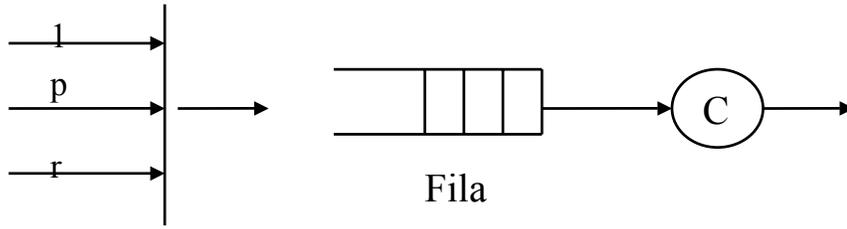


Figura 4.1: Diagrama de fila M/G/1 de Multi-Usuários

Este modelo permite o cálculo do atraso médio dos pacotes na fila $E\{W\}$ através da equação abaixo:

$$E\{W\} = \frac{1}{(1-\rho)} E\{T_0\} \quad (4.1)$$

onde ρ é a somatória de todos os ρ_k (Eq.4.3), sendo que ρ_k representa a carga de cada usuário ou classe de taxa de transmissão e é dado por:

$$\rho_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k} \quad (4.2)$$

onde λ_k é a taxa de chegada de cada classe e $1/\mu_k$ o tempo de serviços para cada classe.

Ou seja, ρ é a ocupação total do sistema, a soma dos recursos que cada usuário consome do sistema.

$$\rho = \sum_{k=1}^r \rho_k \quad (4.3)$$

T_0 na Eq.4.1 é o tempo residual de atendimento quando da chegada de um novo pacote e sua esperança é dada pela equação abaixo:

$$E\{T_0\} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \lambda_k E\{R_k^2\} \quad (4.4)$$

$E\{R_k^2\}$ é o valor quadrático médio do tempo de atendimento da classe k , e λ_k é a taxa de chegada de pacotes de cada classe.

Com as equações acima, calcula-se o atraso médio dos pacotes na fila. Para o tempo total médio gasto no sistema por pacote, soma-se o tempo de serviço de cada usuário (classe de taxa de transmissão), conforme Tab.2.1.

As equações acima são válidas para ρ menor que 1, condição de estacionaridade do sistema. Quando ρ se torna maior que 1, a taxa de chegada de pacotes é maior que o servidor pode tratar, assim o tempo de serviço dos pacotes aumenta cada vez mais tendendo a infinito. Neste caso o denominador da Eq.4.1 fica negativo, não sendo um resultado válido.

Para cálculo da vazão do sistema, foi apenas multiplicado a taxa de chegada de pacotes por usuário pelo número de usuários do sistema, uma vez que se não há congestionamento, todo tráfego é escoado. Nos casos onde o ρ é maior que 1, foi subtraído a porção que passa deste limiar conforme Eq.4.5:

$$R_T = N * R_U \quad (4.5)$$

para $\rho \leq 1$

$$R_T = \frac{(N * R_U)}{\rho} \quad (4.6)$$

para $\rho > 1$

Inserindo os valores de cada classe e as variações dos cenários chegam-se aos resultados das próximas sub-seções. São apresentados gráficos com os números obtidos através do modelo acima proposto, bem como comparado aos resultados das simulações. Novamente os gráficos dos atrasos médios de pacotes estão em escala logarítmica para melhor visualização de todas as curvas. Para diferenciar as curvas do modelo teórico e da simulação, utilizou-se respectivamente os sub-índices Teo. e Sim. e também curva tracejada para o modelo teórico e contínua para a simulação.

4.3.1. Cenário 1

A variação do número de usuários acarreta na alteração de λ e conseqüentemente os valores resultantes das Eq.4.1, 4.2 e 4.3. Assim, para cenário 1 tem-se os resultados mostrados na Figs. 4.2, 4.3 e 4.4.

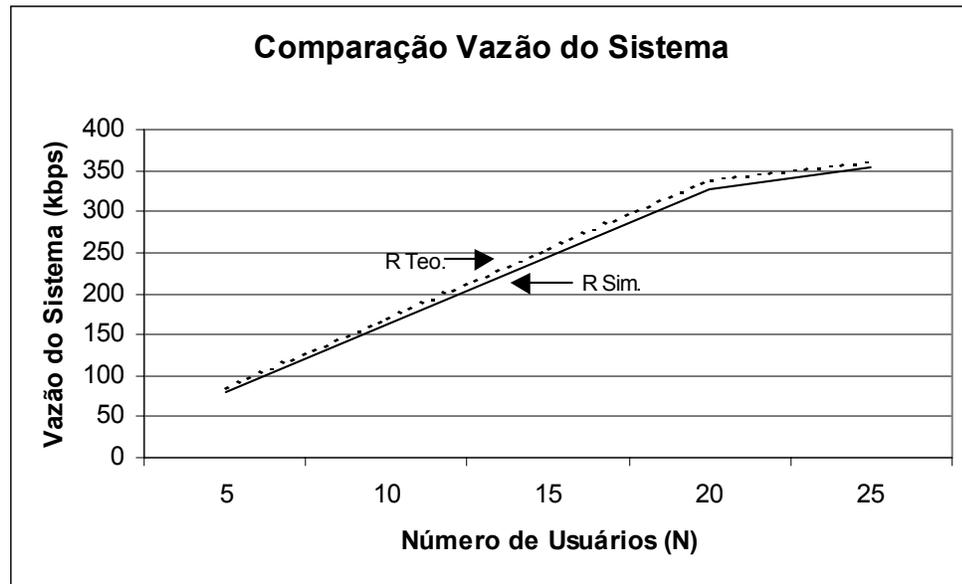


Figura 4.2. Gráfico da vazão em função de número de usuários para modelo teórico sem prioridade no cenário 1

Como para 25 usuários ρ ficou acima de 1, não obedecendo a condição de estacionaridade, o sistema não consegue servir todos os pacotes e o modelo teórico proposto não se torna mais válido (Eq.4.1 resulta em valor negativo), assim este ponto não está representado no gráfico do atraso médio dos pacotes da Fig.4.3. Neste caso, a fila aumenta constantemente e o atraso médio tende a infinito.

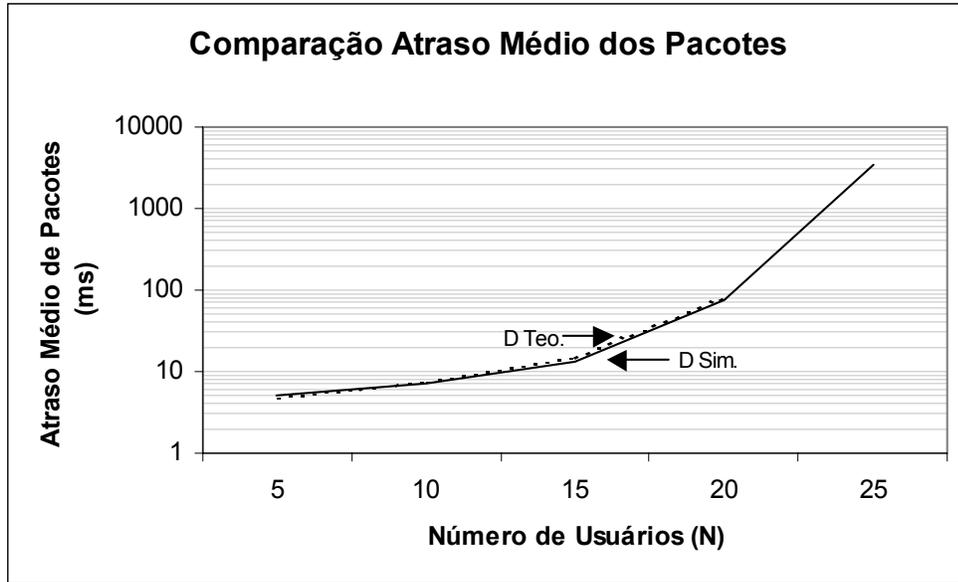


Figura 4.3. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função de número de usuários para modelo teórico sem prioridade no cenário 1

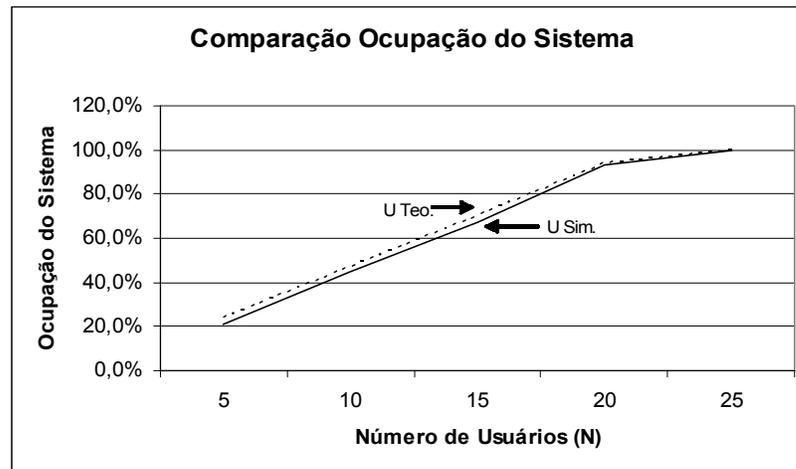


Figura 4.4. Gráfico da ocupação dos sistema em função de número de usuários para modelo teórico sem prioridade no cenário 1

Em geral o erro entre a simulação e o modelo teórico ficou abaixo de 10% para todos os parâmetros de análise, indicando que o modelo teórico proposto fica próximo do caso simulado, validando os resultados obtidos através da simulação.

4.3.2. Cenário 2

A variação da taxa de chegada de bits por usuário acarreta novamente na alteração de λ e conseqüentemente os valores resultantes das Eq.4.1, 4.2 e 4.3. Assim, para o cenário 2 tem-se os resultados mostrados na Figs.4.5, 4.6 e 4.7.

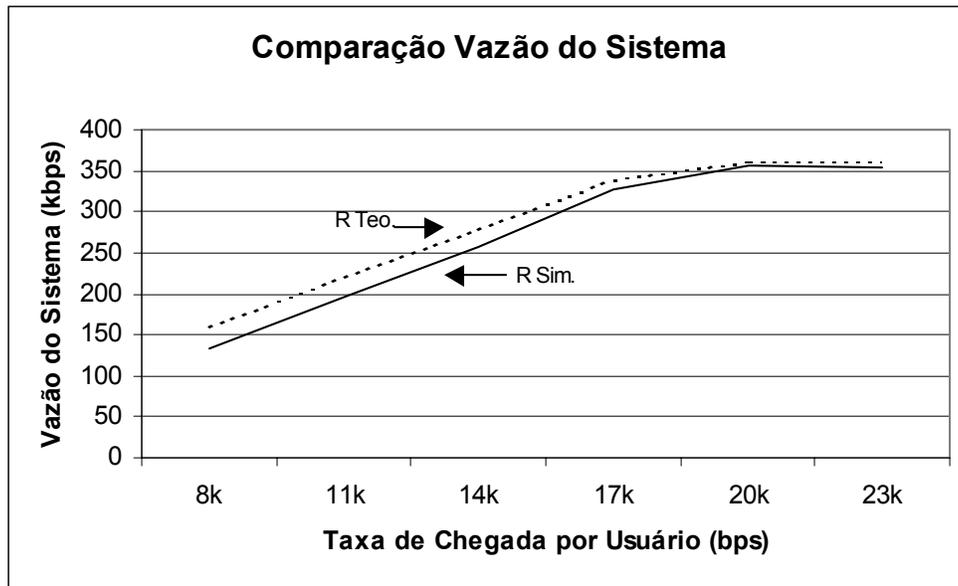


Figura 4.5. Gráfico da vazão em função de taxa de chegada para modelo teórico sem prioridade no cenário 2

Neste cenário a condição de estacionaridade também não foi satisfeita com o aumento da taxa de chegada de bits. Neste caso, os pontos em que a condição de estacionaridade não foi atendida foram com 20kbps e 23kbps por usuário. Desta forma, estes pontos não estão representados no gráfico do atraso médio dos pacotes da Fig.4.6.

Mais uma vez o erro entre a simulação e o modelo teórico ficou abaixo de 10% para os diferentes parâmetros de análise, indicando que o modelo teórico proposto fica próximo do caso simulado, validando os resultados obtidos através da simulação.

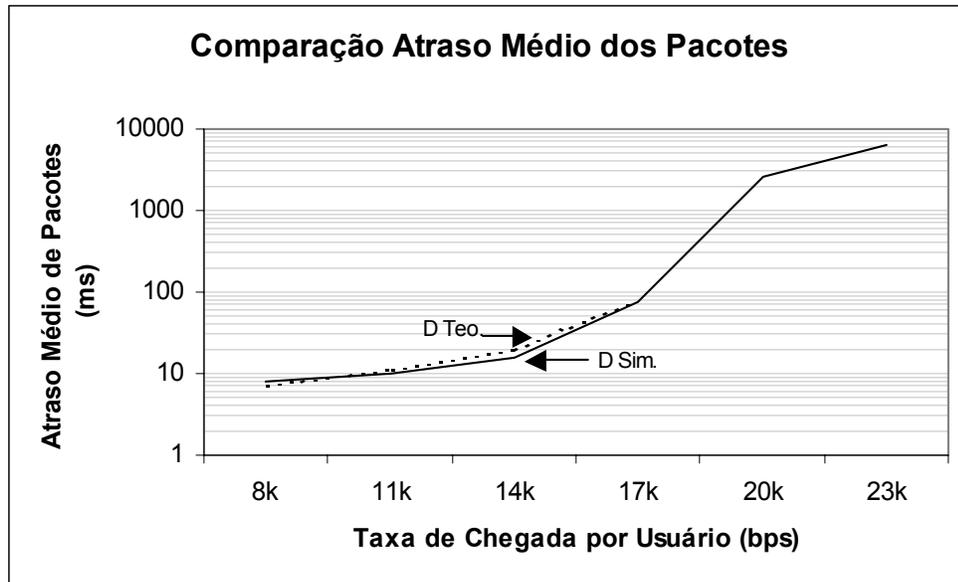


Figura 4.6. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função de taxa de chegada para modelo teórico sem prioridade no cenário 2

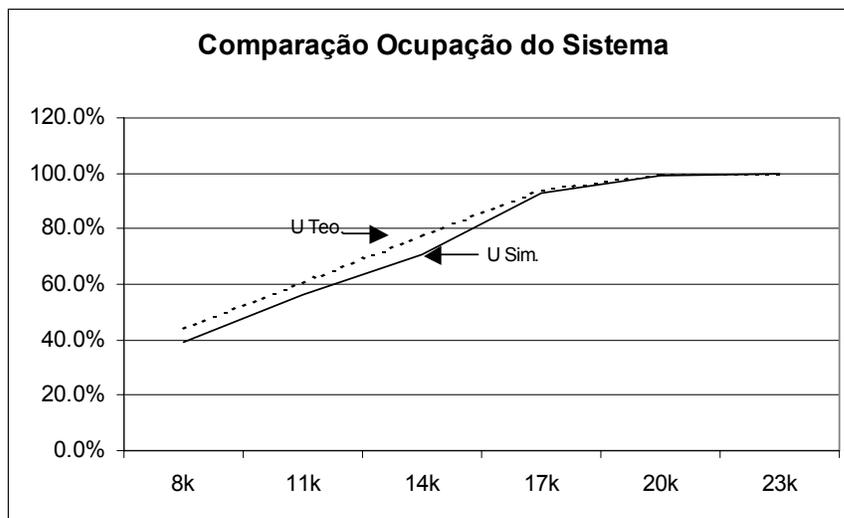


Figura 4.7. Gráfico da ocupação do sistema em função de taxa de chegada para modelo teórico sem prioridade no cenário 2

4.3.3. Cenário 3

A variação do tamanho da célula altera a proporção dos usuários da Eq.4.3 e Eq.4.4. Com outras palavras, a taxa de chegada de bits no sistema é a mesma, mas a distribuição em cada uma das classes será modificada. Assim, para o cenário 3 tem-se os resultados mostrados nas Figs.4.8, 4.9 e 4.10. Neste cenário a condição de

estacionaridade não foi satisfeita para a situação de célula grande, não sendo representado na Fig.4.9.

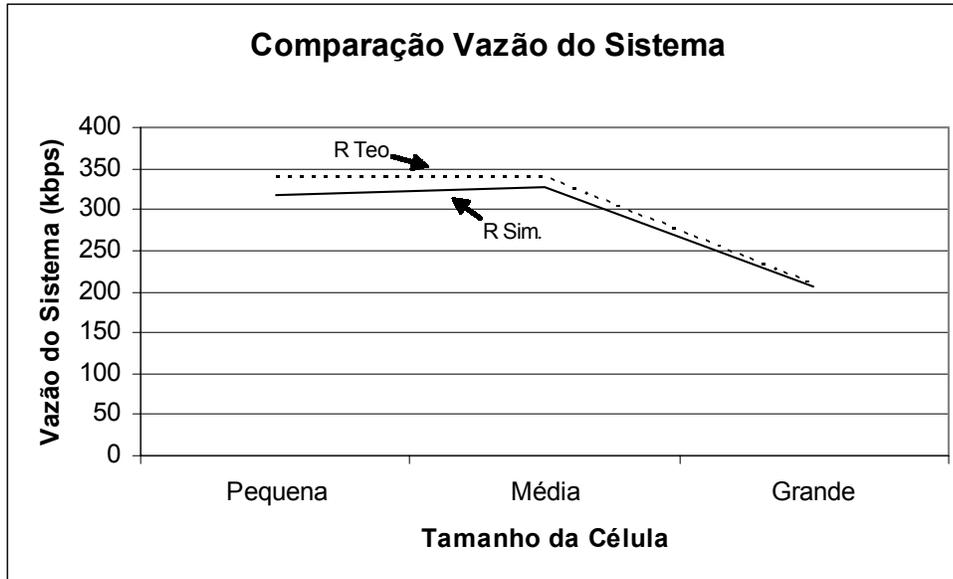


Figura 4.8. Gráfico da vazão em função do tamanho da célula para modelo teórico sem prioridade no cenário 3

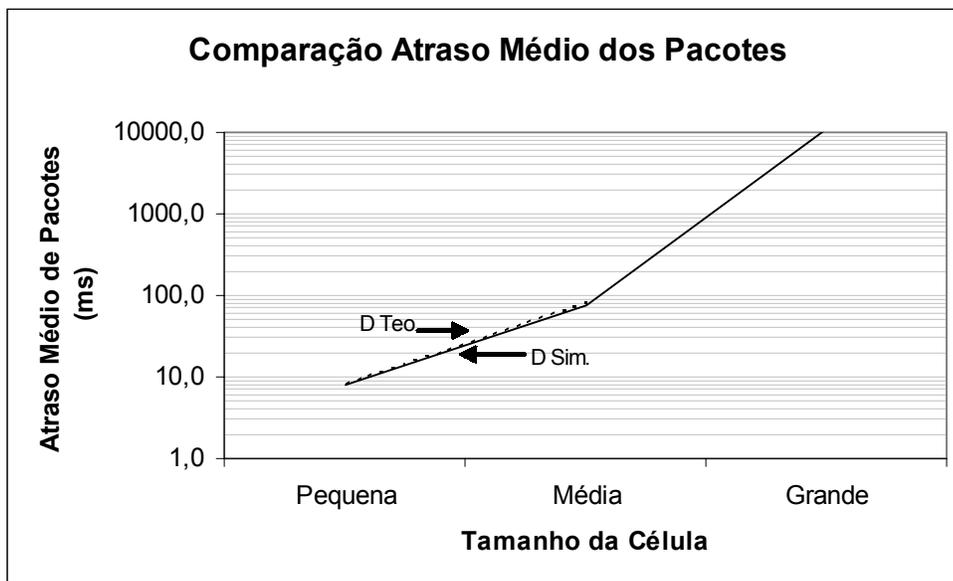


Figura 4.9. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função do tamanho da célula para modelo teórico sem prioridade no cenário 3

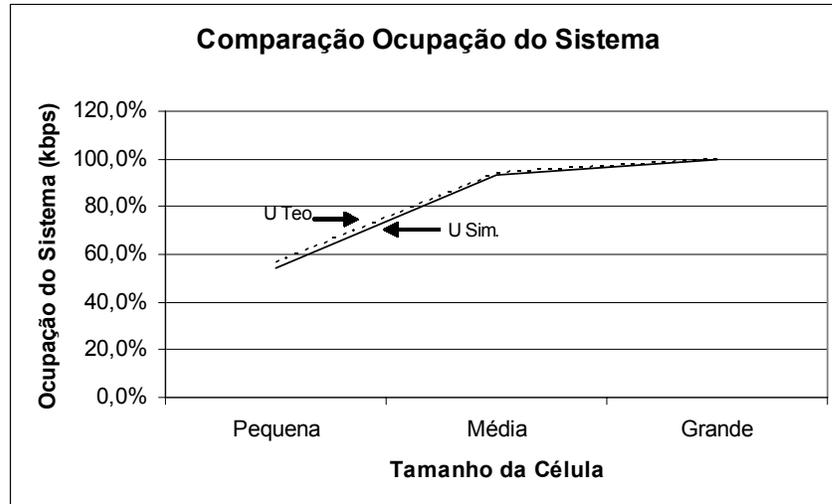


Figura 4.10. Gráfico da ocupação do sistema em função do tamanho da célula para modelo teórico sem prioridade no cenário 3

Em geral o erro entre a simulação e o modelo teórico ficou abaixo de 10% para os diferentes parâmetros de análise, indicando que o modelo teórico proposto fica próximo do caso simulado, validando os resultados obtidos através da simulação.

4.4. Teoria Com Prioridade

Sistemas que tenham como características os pontos abaixo podem ter seus tempos de serviços calculados pelo modelo de fila multi-usuários com prioridade. Maiores detalhes do modelo podem ser obtidos em [32].

1. Esquema de acesso prioritário sem preempção. Na Fig.4.12 1 é o usuário mais prioritário, r é o menos;
2. Fila de tamanho infinito;
3. r usuários poissonianos com taxas $\lambda_1, \dots, \lambda_r$;
4. Distribuições quaisquer dos serviços;
5. Usuários de mesma prioridade são atendidas na ordem de chegada, isto é, no esquema FIFO.

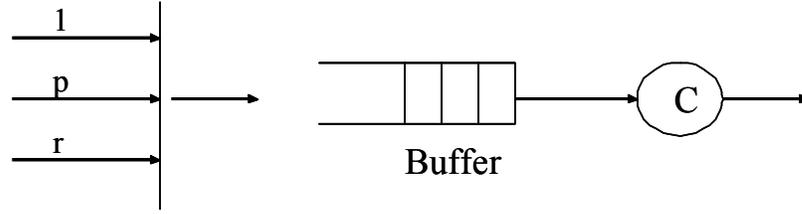


Figura 4.12: Diagrama de fila M/G/1 de Multi-Usuários com Prioridade

Assim, comparando-se com o modelo proposto para o 1xEV-DO com prioridades, nota-se que estas condições são atendidas e que desta forma pode-se utilizar as equações do modelo multi-usuários com prioridade descritas a seguir.

O atraso médio dos pacotes de cada prioridade é dado por:

$$E\{W_p\} = \frac{E\{T_0\}}{(1-\sigma_{p-1})(1-\sigma_p)} \quad p = 2, \dots, r \quad (4.7)$$

Onde σ_k é definido por:

$$\sigma_0 = 0, \quad \sigma_1 = \rho_1, \quad \sigma_2 = \rho_1 + \rho_2, \quad \dots, \quad \sigma_r = \rho \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Nota-se que para a prioridade mais alta, a equação se torna igual ao modelo sem prioridade, porém com valores diferentes para ρ agora só considerando ρ da prioridade 1, aumentando o denominador da Eq.4.8 e conseqüentemente diminuindo o tempo de espera médio do pacote.

$$E\{W_1\} = \frac{E\{T_0\}}{1-\rho_1} \quad (4.9)$$

Para a menor prioridade a Eq.4.6 se resume a:

$$E\{W_r\} = \frac{E\{T_0\}}{(1-\sigma_{r-1})(1-\rho)} \quad (4.10)$$

O termo $E\{T_0\}$ continua o mesmo do modelo sem prioridade, dado por:

$$E\{T_0\} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \lambda_k E\{R_k^2\} \quad (4.11)$$

Para cálculo da vazão do sistema com prioridade, foi apenas multiplicado a taxa de chegada de pacotes pelo número de usuários do sistema pela distribuição das prioridades, uma vez que se não há congestionamento, todo tráfego é escoado. A Eq.4.12 mostra este cálculo.

$$R_p = N * R_U * P_R \quad (4.12)$$

para $\rho \leq 1$ e $\rho > 1$ em filas de maior prioridade

Nos casos onde o ρ é maior que 1, o sistema não consegue dar vazão a todos os pacotes que chegam no sistema, assim pacotes das menores prioridade serão afetados. Para cálculo da vazão de cada prioridade destas filas, multiplica-se a Eq.4.12 pela proporção do tráfego que não é limitada pela capacidade do sistema. Esta proporção é calculada subtraindo de ρ_p a fração de ρ que passa de 1 e dividindo por ρ_p . Assim a Eq.4.13 é a proporção de ρ_p que não é afetada pela capacidade do sistema.

$$\rho_p' = \frac{\rho_p - (\rho - 1)}{\rho_p} \quad (4.13)$$

$$R_p = N * R_U * P_R * \frac{\rho_p - (\rho - 1)}{\rho_p} \quad (4.14)$$

para $\rho > 1$ em filas de menor prioridade

Inserindo os valores de cada classe e as variações dos cenários chega-se aos resultados das próximas sub-seções. São apresentados gráficos com os números obtidos através do modelo acima proposto bem como comparado aos resultados das simulações. Novamente os gráficos dos atrasos médios de pacotes estão em escala logarítmica para melhor visualização de todas as curvas. Para diferenciar as curvas do modelo teórico e da simulação, utilizou-se curva tracejada para simulação e contínua para o modelo teórico. As curvas de cada prioridade são indicadas pelo índice próximo a curva com a prioridade respectiva.

4.4.1. Cenário 1

A variação do número de usuários acarreta na alteração de λ e conseqüentemente os valores resultantes de ρ_s e σ_s . Assim, para cenário 1 tem-se os resultados mostrados na Figs. 4.13, 4.14 e 4.14.

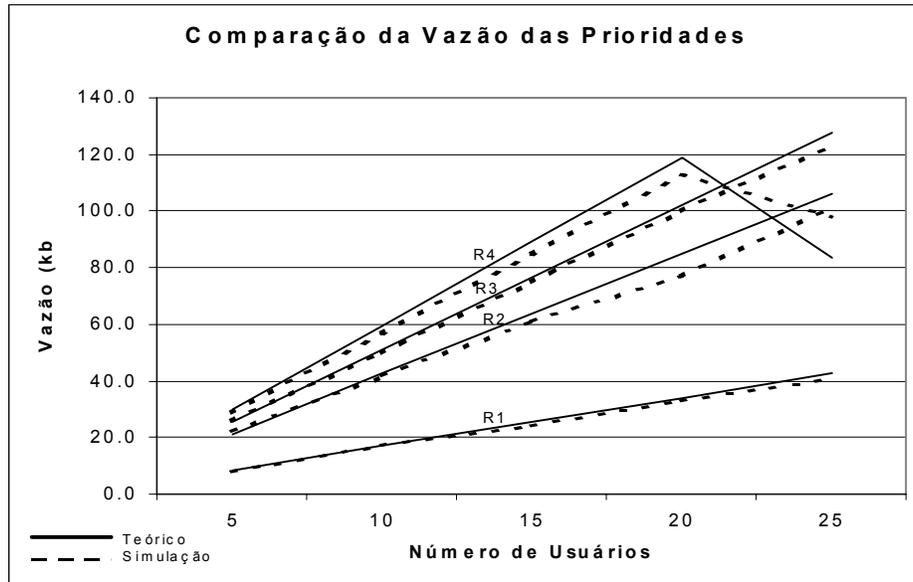


Figura 4.13. Gráfico da vazão em função de número de usuários para modelo teórico com prioridade no cenário 1

Como para 25 usuários ρ ficou acima de 1, não obedecendo a condição de estacionaridade, o sistema não consegue servir todos os pacotes, porém agora somente os pacotes da fila de mais baixa prioridade são prejudicados e o atraso médio de seus pacotes tende a infinito. Neste caso o valor da Eq.4.10 não se torna mais válido, assim este ponto da curva da prioridade 4 não está representado no gráfico do atraso médio dos pacotes da Fig.4.14.

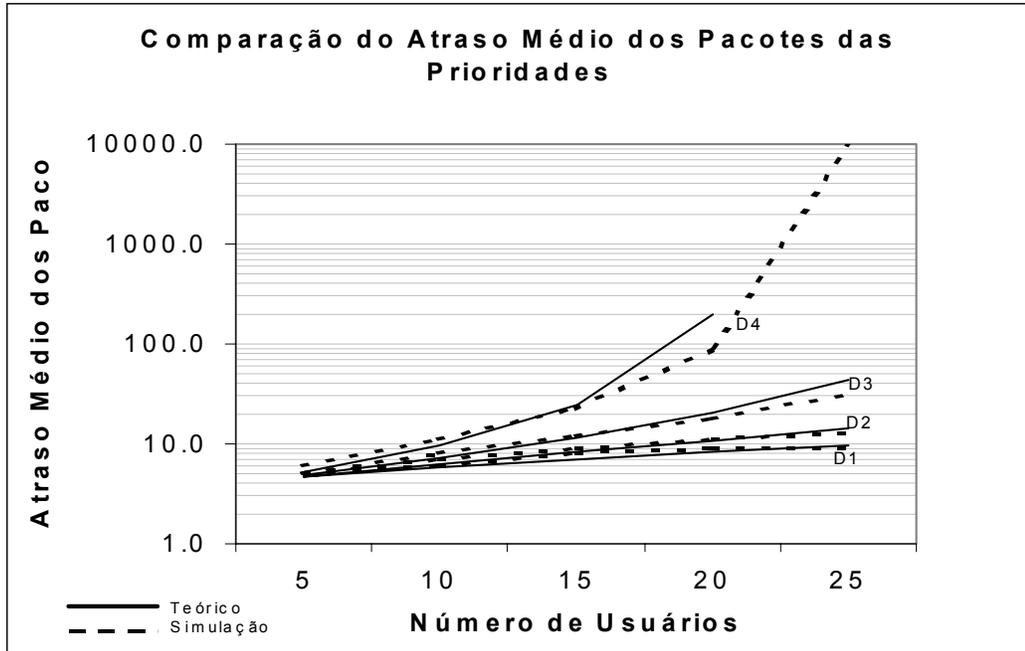


Figura 4.14. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função de número de usuários para modelo teórico com prioridade no cenário 1

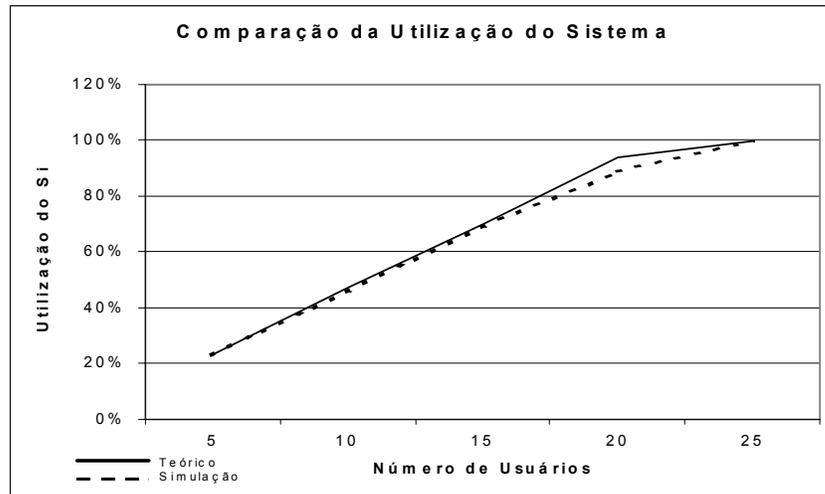


Figura 4.14. Gráfico da ocupação do sistema em função de número de usuários para modelo teórico com prioridade no cenário 1

Os resultados foram próximos aos da simulação, principalmente para as filas de mais alta prioridade. Para prioridade 4 que tem os maiores atrasos médios de serviço dos pacotes, a diferença foi maior, mas ainda na mesma ordem de grandeza.

4.4.2. Cenário 2

A variação do número da taxa de chegada de bits por usuário acarreta na alteração de λ e conseqüentemente os valores de ρ_s e σ_s . Assim, para cenário 2 tem-se os resultados mostrados na Figs. 4.16, 4.17 e 4.18.

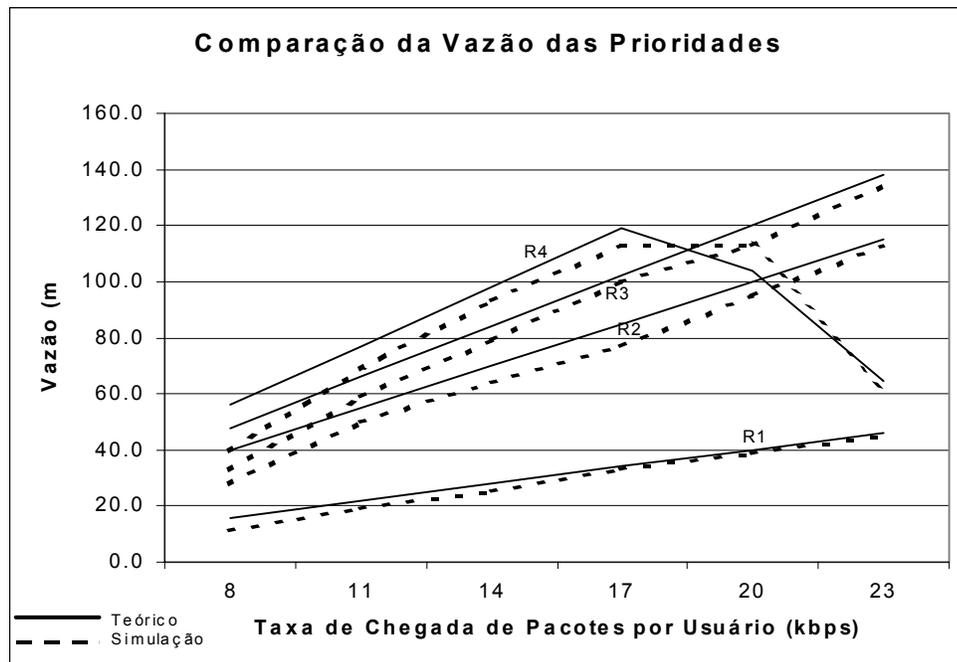


Figura 4.16. Gráfico da vazão em função da taxa de chegada para modelo teórico com prioridade no cenário 2

Como para taxa de chegada de 20 e 23kbps ρ ficou acima de 1, não obedecendo a condição de estacionaridade, o sistema não consegue servir todos os pacotes. Neste caso os valores da Eq.4.10 e não se tornam mais válidos, assim estes pontos não estão representados no gráfico do atraso médio dos pacotes da Fig.4.17.

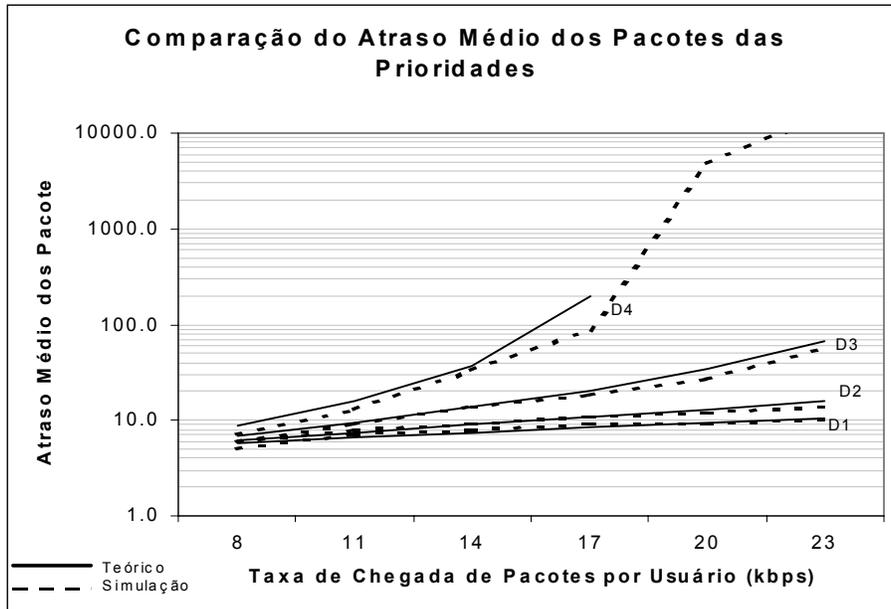


Figura 4.17. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função da taxa de chegada para modelo teórico com prioridade no cenário 2

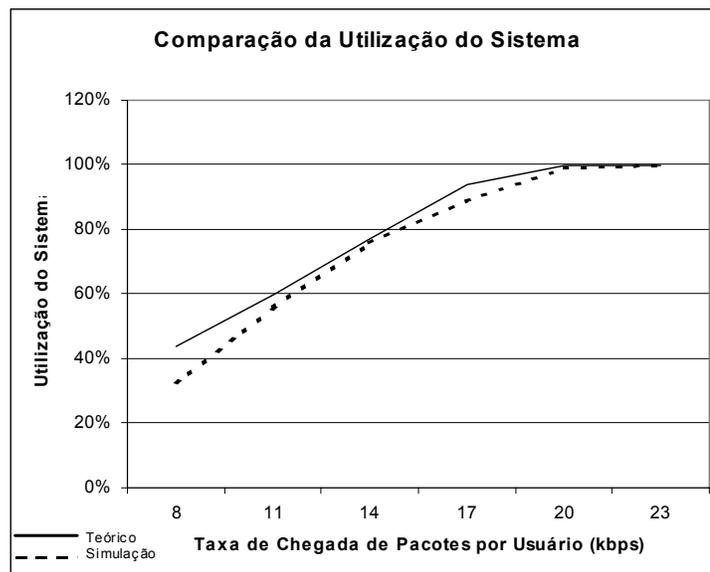


Figura 4.18. Gráfico da utilização do sistema em função da taxa de chegada para modelo teórico com prioridade no cenário 2

Os resultados foram mais uma vez próximos aos da simulação, principalmente para as filas de mais alta prioridade. Para prioridade 4 que tem os maiores atrasos médios de serviço dos pacotes, a diferença foi maior, mas ainda na mesma ordem de grandeza.

4.4.3. Cenário 3

A variação do tamanho da célula altera a proporção das classes de usuários. Assim, para o cenário 3 tem-se os resultados mostrados na Figs.4.19, 4.20 e 4.21.

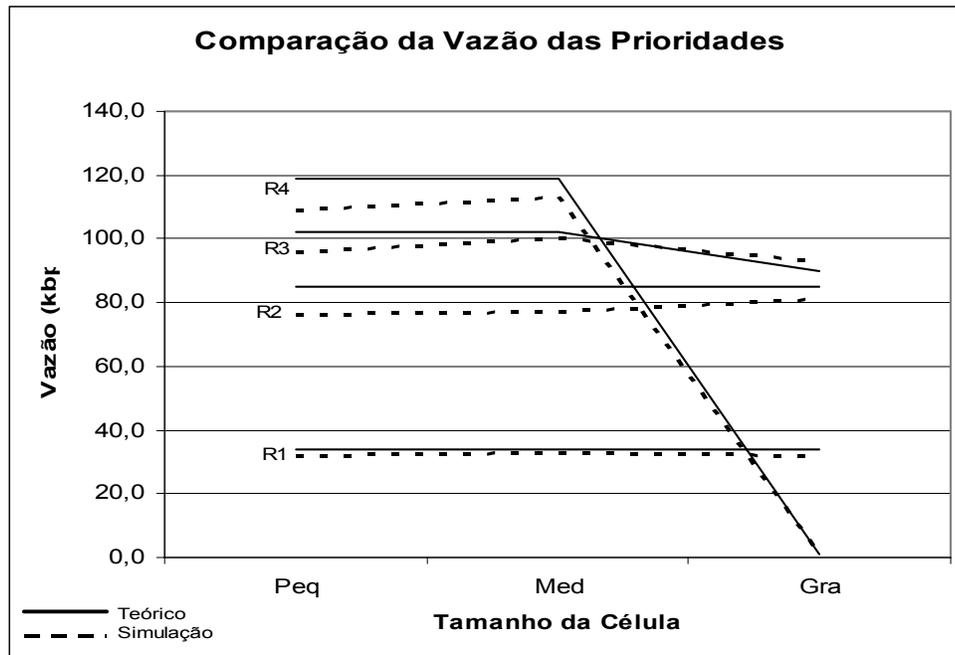


Figura 4.19. Gráfico da vazão em função do tamanho da célula para modelo teórico com prioridade no cenário 3

Como para célula grande ρ ficou acima de 1, não obedecendo a condição de estacionaridade, o sistema não consegue servir todos os pacotes. Neste caso além de não conseguir servir adequadamente os pacotes da prioridade 4, como ρ chega a 1.63 os pacotes da prioridade 3 também não conseguem ser atendidos e esta fila terá seu tamanho estendido infinitamente até que o sistema fique menos carregado.. Neste caso o valor da Eq.4.10 não se torna mais válido, bem como da Eq.4.7 para $p=3$. Assim estes pontos não estão representados no gráfico do atraso médio dos pacotes da Fig.4.20.

De forma similar aos cenários anteriores, os resultados foram bastante próximos aos da simulação, validando os resultados obtidos através da simulação.

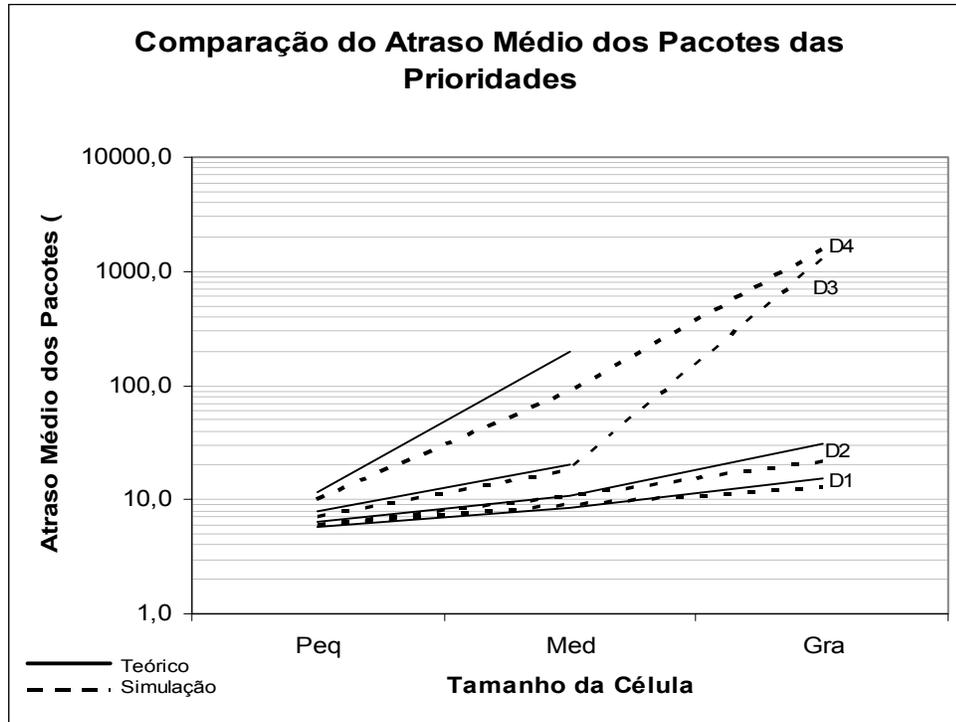


Figura 4.20. Gráfico do atraso médio dos pacotes em função do tamanho da célula para modelo teórico com prioridade no cenário 3

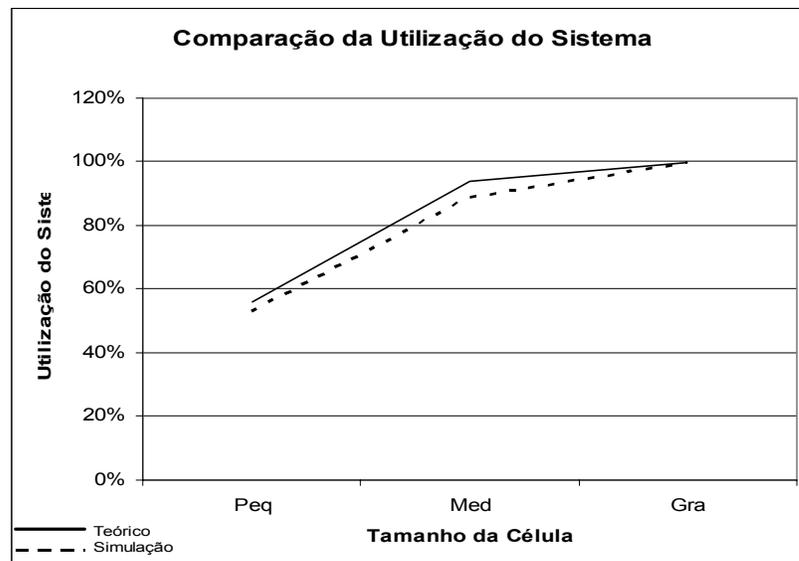


Figura 4.21. Gráfico da ocupação do sistema em função do tamanho da célula para modelo teórico com prioridade no cenário 3

4.2.4. Cenário 4

A variação da distribuição das prioridades altera o λ_x de cada prioridade de cada classe, modificando conseqüentemente os ρ_s e σ_s apresentados nas equações deste capítulo. Assim, para cenário 4 tem-se os resultados mostrados nas tabelas a seguir.

Tabela 4.1. Vazão (em kbps) para variação da distribuição de prioridades no modelo teórico com prioridades

	10.24.30.35		24.30.30.15		50.50.0.0		60.20.10.10		24.24.24.25	
	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.
R1	34	33	85	81	170	160	204	194	85	83
R2	85	77	102	97	170	164	68	66	85	81
R3	102	100	102	97			34	30	85	80
R4	119	113	51	49			34	32	85	79

Tabela 4.2. Atraso médio dos pacotes (ms) e ocupação para variação da distribuição de prioridades no modelo teórico com prioridades

	10.24.30.35		24.30.30.15		50.50.0.0		60.20.10.10		24.24.24.25	
	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.
D1	8	9	9	10	12	12	14	14	9	10
D2	11	11	16	15	147	93	45	46	14	14
D3	21	18	50	42			121	139	32	27
D4	199	89	384	223			501	395	262	142

Tabela 4.3. Ocupação para variação da distribuição de prioridades no modelo teórico com prioridades

	10.24.30.35		24.30.30.15		50.50.0.0		60.20.10.10		24.24.24.25	
	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.	Teórico	Simul.
ρ	94%	89%	94%	91%	94%	90%	94%	92%	94%	90%

Os resultados foram mais uma vez próximos aos da simulação, principalmente para as filas de mais alta prioridade. Para prioridade 4 que tem os maiores atrasos médios de serviço dos pacotes, a diferença foi maior, mas ainda na mesma ordem de grandeza.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os modelos analíticos que traduzem o sistema 1xEV-DO proposto neste estudo e o sistema 1xEV-DO existente hoje sem prioridade. Também foram mostrados os resultados obtidos a partir dos modelos teóricos e feitas comparações com as simulações. As diferenças entre resultados teóricos e simulações foram em geral bastante baixas, validando os valores obtidos com a simulação.

Capítulo 5: Conclusões Finais

Neste trabalho foi apresentado o estudo de desempenho do sistema 1xEV-DO com e sem prioridades de serviços na interface aérea. O escalonador de prioridades utilizado no estudo é bastante simples e permite a sua implementação em sistemas de terceira geração de telefonia celular.

O estudo mostrou que o sistema 1xEV-DO é capaz de prover altas taxas de dados, porém, caso não haja tratamento diferenciado para aplicações e usuários em condições de alta utilização do sistema pode haver frustração com serviço devido ao alto atraso médio dos pacotes observado em sistemas sem utilização de prioridades.

Neste estudo mostrou-se que com a priorização dos pacotes, mesmo com ρ maior que 1, as aplicações de prioridade máxima não observam mais do que uma adição de 20ms na interface aérea, mesmo que 60% dos pacotes sejam desta prioridade, não impactando significativamente seu desempenho dependendo obviamente do atraso obtido no restante do meio de comunicação. O atraso médio dos pacotes para aplicações menos prioritárias aumenta se comparado com o sistema sem prioridade, porém são aplicações que podem sofrer um maior atraso e não impactar em seu desempenho, assim pacotes destas prioridades suportam esperar até que o sistema esteja menos carregado para sejam servidos.

O esquema de prioridades adotado no estudo mostrou-se essencial em condições de alta utilização do sistema, como no caso de muitos usuários ou no caso de alta taxa de chegada de pacotes por usuário. Assim, a priorização de tráfego pode levar o mesmo nível de satisfação dos usuários com um menor número de portadoras 1xEV-DO, traduzindo em menor investimento com a mesma receita para operadora. A determinação do momento em que se deva fazer novo investimento de portadoras 1xEV-DO com o uso de prioridades irá depender de quais as aplicações que estão sendo utilizadas em cada prioridade e verificando o nível de desempenho das mesmas e a satisfação dos usuários com a rede.

Sintetizando os benefícios da solução proposta, mostrou-se que com a priorização do tráfego possibilita uma operadora trabalhar com maiores índices de utilização do sistema ainda oferecendo níveis de QoS aceitáveis para aplicações e usuários que necessitam destes.

O estudo não considerou duas características do 1xEV-DO que melhoram o desempenho do sistema, o Escalonador de Equidade Proporcional e a Terminação Antecipada de Pacotes, assim os resultados obtidos nas simulações são menores do que as redes atuais podem oferecer. Porém ambas as melhorias poderiam ser implementadas no sistema proposto. O Escalonador de Equidade Proporcional poderia ser implementado em cada fila e a Terminação Antecipada de Pacotes é independente do número de filas. Desta forma, as prioridades trariam os mesmos benefícios com ambas as melhorias.

Outro ponto que poderia ser pensado em trabalhos futuros seria a alteração de modelos de como são tratadas as diferentes filas. Nos cenários onde houve congestionamento do sistema, observou-se que pacotes da prioridade 4 experimentaram um atraso altíssimo, assim para minimizar o efeito no desempenho para usuários/aplicações desta prioridade poderia se implementar um esquema de tratamento diferente das filas, ao invés de se considerar apenas o escalonamento de prioridade, considerar a utilização de técnicas de escalonamento como a WFQ (*Weighted Fair Queuing*) que prevê a utilização de pesos para cada prioridade.

Para o cenário 3, não foi considerado o aumento de interferência causado por células vizinhas, fazendo com que a diminuição do tamanho das mesmas não traga um aumento tão expressivo das taxas observadas pelos usuários. Assim, seria interessante para um próximo estudo considerar este efeito de forma a melhor aproximar os resultados da realidade.

Referências

- [1] URL IMT-2000 <http://www.itu.int/osg/imt-project/index.html>
- [2] FPLMTS/IMT-2000 Standardization Callendar, M.H.; Eng, C. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1994. PIMRC'94. Wireless: Merging onto the Information Superhighway., Sixth IEEE International Symposium on , Volume: 3 , 1995 Page(s): 1387
- [3] ETSI GSM 04.01 “Physical layer on the radio path; General description”
- [4] 3GPP TS 01.60 “GPRS requirements”
- [5] 3GPP TS 03.60 “General Packet Radio Service (GPRS) Service description; Stage 2”
- [6] 3GPP TS 04.03 “Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Channel coding”
- [7] 3GPP TS 04.01 “Physical layer on the radio path; General description”
- [8] TIA/EIA/IS-136 “TDMA Cellular PCS”
- [9] TIA/EIA/IS-2000.2 “Physical layer standard for cdma2000 spread spectrum systems”
- [10] TIA/EIA/IS-856 “CDMA2000, High Rate Packet Data Air Interface Specification”TIA/EIA/IS-856 “CDMA2000, High Rate Packet Data Air Interface Specification”
- [11] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi “CDMA/HDR: A Bandwidth-Efficient High-Speed Wireless Data Service for Nomadic Users”, IEEE Communications Magazine, pp.70-78, vol.38, July 2000

- [12] A.Jalali, R. Padovani and R. Pankaj, “Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency high-rate personal communication wireless system”, IEEE Vehicular Technology Conference, Tokyo, May 2000
- [13] W. Chung, H. Lee, J. Moon “Downlink Capacity of CDMA/HDR”, IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2001, Spring, pp. 1937-1941, 2001
- [14] Q. Bi and S. Vitebsky, “Performance Analysis of 3G-1X EVDO High Data Rate System”, Wireless Communications and Networking Conference, 2002. 2002 IEEE, vol.1, Mar2002, pp: 389 –395
- [15] Black, P.J.; Qiang Wu, “Link budget of cdma2000 1xEV-DO wireless Internet access system”, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on , Volume: 4 , 15-18 Sept. 2002 Pages:1847 - 1852 vol.4
- [16] Yavuz, M.; Paranchych, D.; Geng Wu; Ge Li; Krzymien, W., “Performance improvement of the HDR system due to hybrid ARQ” Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th, Volume: 4 , 7-11 Oct. 2001, Pages:2192 - 2196 vol.4
- [17] Esteves,E.; Black,P.; Gurelli,M.; “Link Adaptation Techniques for High-Speed Packet Data in Third Generation Cellular Systems”, European Wireless Conference 2002

- [18] Paxson,V.; Floyd,S.; “Why We Don’t Know How To Simulate The Internet”, December 1997, Lawrence Berkeley National Laboratory
- [19] Magalhães, M; Cardoso, E; “IP sobre ATM”, Apostila curso IA003
- [20] Tse, D.; “Multiuser Diversity in Wireless Networks: Smart Scheduling, Dumb Antennas and Epidemic Communication”, IMA Wireless Workshop, August 2001
- [21] Esteves,E.; “High Data Rate Evolution of cdma2000 cellular system”, Multi-access, Mobility and Teletraffic in Wireless Communications: Volume 5,Ed.G.Stuber and B.Jabbari, Kluwer Academic Publishers
- [22] Simpson, “The Point to Point Protocol (PPP)”, RFC 1661, July 1994
- [23] Rigney, Rubens, Simpson, Willens, “Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS)”, RFC 2138, August 1997.
- [24] Blake, Black, Carlson, Davies, Wang, Weiss, “An Architecture for Differentiated Services”, RFC 2475, December 1998.
- [25] Internet Protocol, RFC 791, Sept. 1981
- [26] White Paper “1xEV-DO System Architecture”, disponível através do site <http://www.qualcomm.com/technology/1xev-do/webpapers/>
- [27] Kasahara,S. “Internet Traffic Modeling: Markovian Approach to Self-Similar Traffic and Prediction of Loss Probability for Finite Queues”, IEICE Trans.Commun., Vol.E84B, NO.8, August 2001

[28] Zukerman, M.; Neame, T.D.; Addie, R.G.; “Internet traffic modeling and future technology implications”; INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE , Volume: 1 , 30 March - 3 April 2003 Pages:587 - 596

[29] Perkins, C.; “IP Mobility Support”, IETF RFC 2002, Outubro 1996

[30] Postel, J., “User Datagram Protocol”, RFC 768, Agosto 1980

[31] “Transmission Control Protocol”, RFC 793, Setembro 1981

[32] Motoyama, S.; “Fila de Multi-Usuários Sem e Com Prioridade”,

Apostila curso IE670 Aula 11 disponível em

<http://www.dt.fee.unicamp.br/~mtoyama/ie670/ie670.html>

Apêndice 1: Ferramenta de Simulação Q+

A Lucent Technologies gentilmente cedeu uma licença de software para a ferramenta de simulação Q+ enquanto o aluno foi funcionário da empresa. O software foi desenvolvido pelo departamento de Análise de Performance do Bell Labs para predição de desempenho de modelos.

O simulador Q+ é um software para criar, debugar, animar e executar modelos de simulação sem necessidade de programação, apesar de estar aberto com restrições para inserções de alguma programação. Os programas escritos para este estudo estão descritos em A1.1 e A1.2.

Permite-se criar modelos graficamente, inserindo nós e arcos de rede seus respectivos parâmetros. Após a simulação tem como resultado uma análise estatística de parâmetros com vazão, atraso, utilização, entre outros definidos pelo usuário. A animação durante a execução da simulação permite a visualização do processo.

As facilidades da ferramenta incluem a criação de classes de tráfego com tempos de serviço e intervalos de chegada distintos, priorização de classes. Permite-se também a utilização de fórmulas para estes parâmetros (intervalo de chegada entre pacotes e tempo de serviço, por exemplo) através da definição de expressões em arquivos criados por um editor de texto qualquer e gravados com a extensão .e.

A Fig.A.1 mostra a tela com o modelo utilizado para este trabalho e a Fig.A.2 resume as demais funcionalidades da ferramenta de simulação.

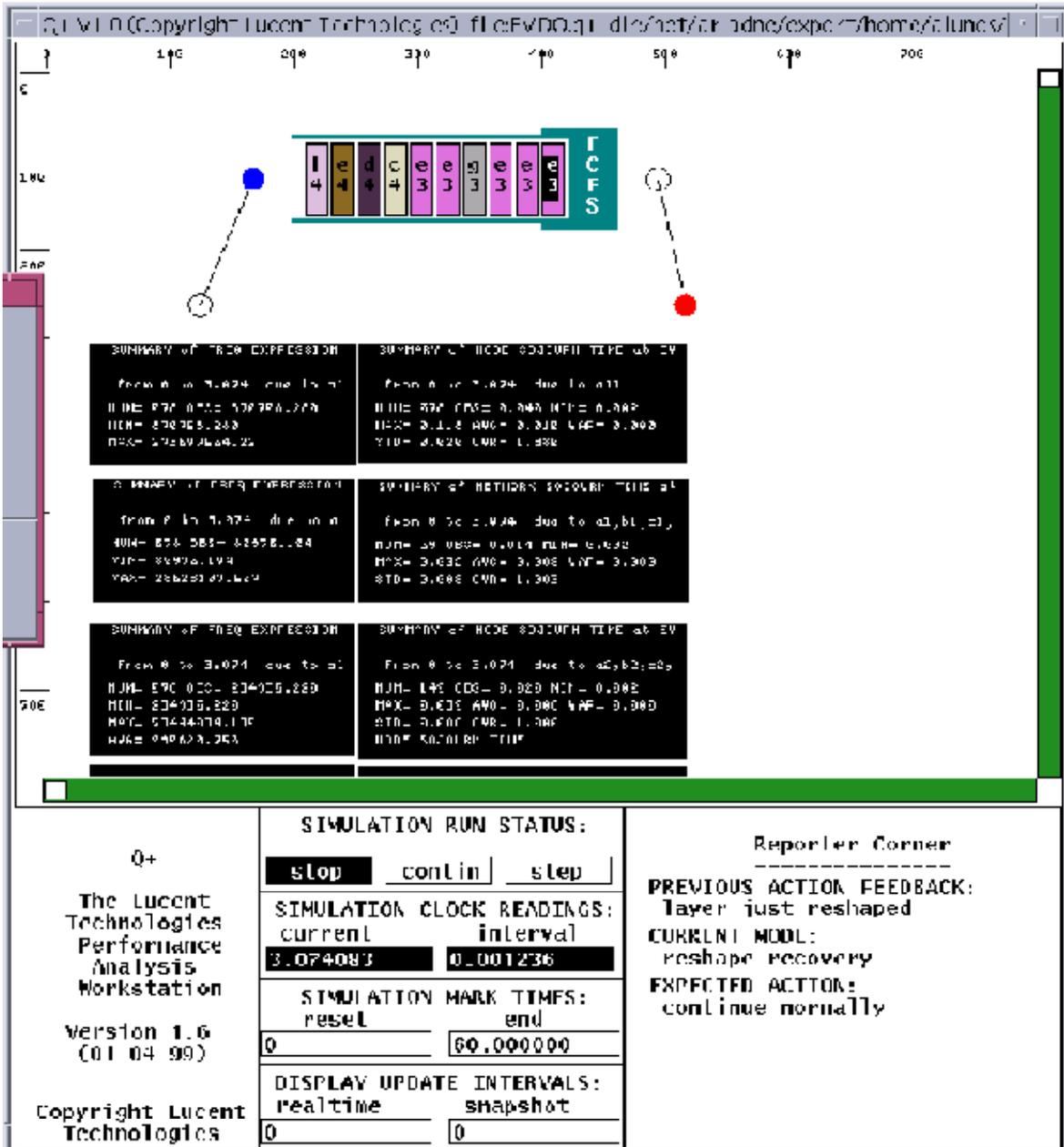


Figura A.1. Tela Q+ para modelo 1xEV-DO

Lucent Technologies Queuing + Analysis Software

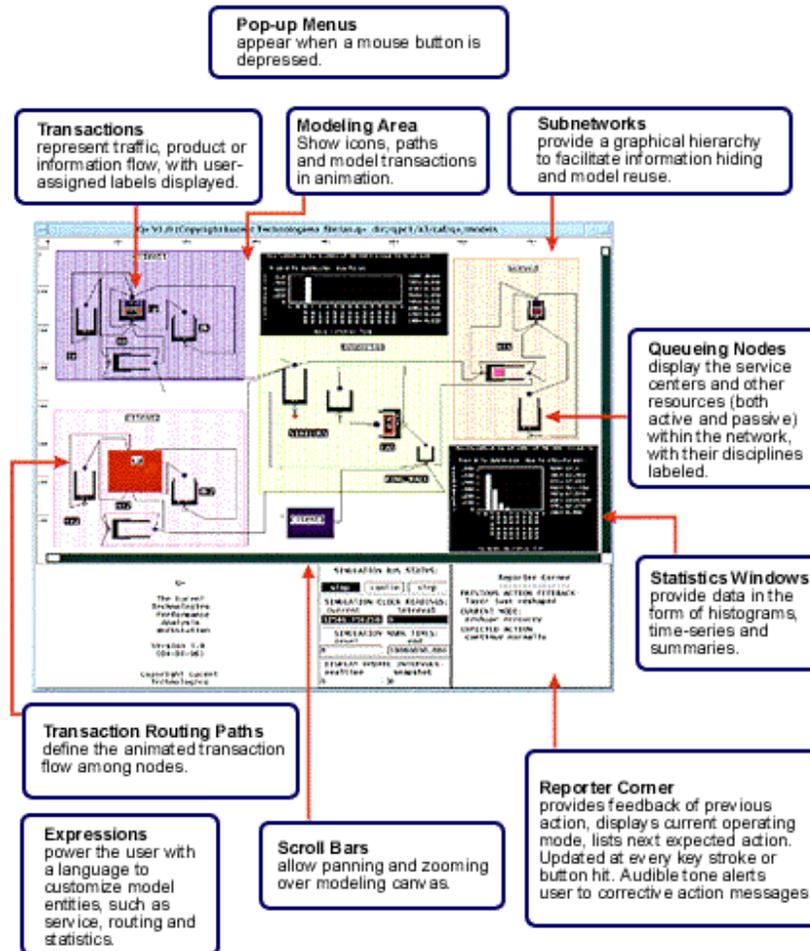


Figura A.2. Resumo da Funcionalidades do Q+

A1.1 Programa para Determinação de Taxa de Chegada de Pacotes e Tempo de Serviço de Cada Classe

```
/* parametros de entrada */
```

```
nu = 20;
```

```
pa = 0.02;
```

```
pb = 0.03;
```

```
pc = 0.08;
```

```
pd = 0.18;
```

```
pe = 0.23;
```

```
pf = 0.17;
```

```
pg = 0.15;
```

```

ph = 0.10;
pi = 0.04;

Ri = 20000;

l1 = Ri/1024;
l2 = Ri/3072;
l3 = Ri/2048;
l4 = Ri/4096;

/* Calculo da taxa de chegada de cada classe-prioridade */

Aa1 = 1/(nu*pa*l1);
Ab1 = 1/(nu*pb*l1);
Ac1 = 1/(nu*pc*l1);
Ad1 = 1/(nu*pd*l1);
Ae1 = 1/(nu*pe*l1);
Af1 = 1/(nu*pf*l2);
Ag1 = 1/(nu*pg*l3);
Ah1 = 1/(nu*ph*l2);
Ai1 = 1/(nu*pi*l4);

/* atribuicao da taxa de chegada para o no EVDO_Sched */

define_arrival("EVDO_Sched", "a1", 'r_exponential(Aa1));
define_arrival("EVDO_Sched", "b1", 'r_exponential(Ab1));
define_arrival("EVDO_Sched", "c1", 'r_exponential(Ac1));
define_arrival("EVDO_Sched", "d1", 'r_exponential(Ad1));
define_arrival("EVDO_Sched", "e1", 'r_exponential(Ae1));
define_arrival("EVDO_Sched", "f1", 'r_exponential(Af1));
define_arrival("EVDO_Sched", "g1", 'r_exponential(Ag1));
define_arrival("EVDO_Sched", "h1", 'r_exponential(Ah1));
define_arrival("EVDO_Sched", "i1", 'r_exponential(Ai1));

/* tempo de servico - duracao dos time-slots */

ts16 = 0.02667;
ts8 = 0.01333;
ts4 = 0.00667;
ts2 = 0.00333;
ts1 = 0.00167;

/* atribuicao do tempo de servico ao no EVDO_Sched */

define_service("EVDO_Sched", "a1", ts16);
define_service("EVDO_Sched", "b1", ts8);
define_service("EVDO_Sched", "c1", ts4);
define_service("EVDO_Sched", "d1", ts2);
define_service("EVDO_Sched", "e1", ts1);
define_service("EVDO_Sched", "f1", ts2);
define_service("EVDO_Sched", "g1", ts1);
define_service("EVDO_Sched", "h1", ts1);
define_service("EVDO_Sched", "i1", ts1);

```

A1.2 Programa para Geração de Estatísticas de Vazão

```
EVDO_Sched=get_node("EVDO_Sched");
sink=get_node("sink");

/* Inicialização das Variáveis*/

na1 = 0;          na2 = 0;          na3 = 0;          na4 = 0;
nb1 = 0;          nb2 = 0;          nb3 = 0;          nb4 = 0;
nc1 = 0;          nc2 = 0;          nc3 = 0;          nc4 = 0;
nd1 = 0;          nd2 = 0;          nd3 = 0;          nd4 = 0;
ne1 = 0;          ne2 = 0;          ne3 = 0;          ne4 = 0;
nf1 = 0;          nf2 = 0;          nf3 = 0;          nf4 = 0;
ng1 = 0;          ng2 = 0;          ng3 = 0;          ng4 = 0;
nh1 = 0;          nh2 = 0;          nh3 = 0;          nh4 = 0;
ni1 = 0;          ni2 = 0;          ni3 = 0;          ni4 = 0;
Rt1 = 0;          Rt2 = 0;          Rt3 = 0;          Rt4 = 0;

Rt = 0;

/* Cálculo da Vazão a cada pacote servido*/

let throughput1() == {
    if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "a1") then {
        na1 = na1+1;
        Rt1 =
        (na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
        2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
        (na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
        2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
        (na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
        2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
        (na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
        2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"a1");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "b1") then {
        nb1 = nb1+1;
        Rt1 =
        (na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
        2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
        (na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
        2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
        (na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
        2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
        (na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
        2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
```

```

        print(1,Rt);
        list(sink,"b1");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "c1") then {
        nc1 = nc1+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"c1");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "d1") then {
        nd1 = nd1+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"d1");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "e1") then {
        ne1 = ne1+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"e1");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "f1") then {
        nf1 = nf1+1;
        Rt1 =

```

```

(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list(sink,"f1");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "g1") then {
    ng1 = ng1+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list(sink,"g1");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "h1") then {
    nh1 = nh1+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list(sink,"h1");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "i1") {
    ni1 = ni1+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =

```

```

(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print(1,Rt);
    list(sink,"i1");});
};

let throughput2() == {
    if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "a2") then {
        na2 = na2+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"a2");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "b2") then {
        nb2 = nb2+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"b2");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "c2") then {
        nc2 = nc2+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =

```

```

(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list (sink, "c2");}
else if ((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "d2") then {
    nd2 = nd2+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list (sink, "d2");}
else if ((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "e2") then {
    ne2 = ne2+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list (sink, "e2");}
else if ((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "f2") then {
    nf2 = nf2+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list (sink, "f2");}
else if ((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "g2") then {

```

```

        ng2 = ng2+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"g2");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "h2") then {
        nh2 = nh2+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"h2");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "i2") {
        ni2 = ni2+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"i2");};
};

let throughput3() == {
    if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "a3") then {
        na3 = na3+1;
        Rt1 =

```

```

(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list(sink,"a3");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "b3") then {
    nb3 = nb3+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list(sink,"b3");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "c3") then {
    nc3 = nc3+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list(sink,"c3");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "d3") then {
    nd3 = nd3+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =

```

```

(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print(1,Rt);
    list(sink,"d3");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "e3") then {
    ne3 = ne3+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print(1,Rt);
    list(sink,"e3");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "f3") then {
    nf3 = nf3+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print(1,Rt);
    list(sink,"f3");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "g3") then {
    ng3 = ng3+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;

```

```

        print(1,Rt);
        list(sink,"g3");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "h3") then {
        nh3 = nh3+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"h3");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "i3") {
        ni3 = ni3+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"i3");};
};

let throughput4() == {
    if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "a4") then {
        na4 = na4+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"a4");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "b4") then {

```

```

        nb4 = nb4+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"b4");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "c4") then {
        nc4 = nc4+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"c4");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "d4") then {
        nd4 = nd4+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
        print(1,Rt);
        list(sink,"d4");}
    else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "e4") then {
        ne4 = ne4+1;
        Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
        Rt2 =

```

```

(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print(1,Rt);
    list(sink,"e4");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "f4") then {
    nf4 = nf4+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print(1,Rt);
    list(sink,"f4");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "g4") then {
    ng4 = ng4+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print(1,Rt);
    list(sink,"g4");}
else if((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "h4") then {
    nh4 = nh4+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =

```

```

(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list (sink, "h4");}
else if ((this_trans().T_CLASS).C_TYPE == "i4") {
    ni4 = ni4+1;
    Rt1 =
(na1*1024+nb1*1024+nc1*1024+nd1*1024+ne1*1024+nf1*3072+ng1*2048+nh1*307
2+ni1*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt2 =
(na2*1024+nb2*1024+nc2*1024+nd2*1024+ne2*1024+nf2*3072+ng2*2048+nh2*307
2+ni2*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt3 =
(na3*1024+nb3*1024+nc3*1024+nd3*1024+ne3*1024+nf3*3072+ng3*2048+nh3*307
2+ni3*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt4 =
(na4*1024+nb4*1024+nc4*1024+nd4*1024+ne4*1024+nf4*3072+ng4*2048+nh4*307
2+ni4*4096)/get_panel_field(T_CURR);
    Rt = Rt1+Rt2+Rt3+Rt4;
    print (1,Rt);
    list (sink, "i4");};
};

```

```

define_routing("EVDO_Sched", "a1", 'throughput1());
define_routing("EVDO_Sched", "b1", 'throughput1());
define_routing("EVDO_Sched", "c1", 'throughput1());
define_routing("EVDO_Sched", "d1", 'throughput1());
define_routing("EVDO_Sched", "e1", 'throughput1());
define_routing("EVDO_Sched", "f1", 'throughput1());
define_routing("EVDO_Sched", "g1", 'throughput1());
define_routing("EVDO_Sched", "h1", 'throughput1());
define_routing("EVDO_Sched", "i1", 'throughput1());

```

```

define_routing("EVDO_Sched", "a2", 'throughput2());
define_routing("EVDO_Sched", "b2", 'throughput2());
define_routing("EVDO_Sched", "c2", 'throughput2());
define_routing("EVDO_Sched", "d2", 'throughput2());
define_routing("EVDO_Sched", "e2", 'throughput2());
define_routing("EVDO_Sched", "f2", 'throughput2());
define_routing("EVDO_Sched", "g2", 'throughput2());
define_routing("EVDO_Sched", "h2", 'throughput2());
define_routing("EVDO_Sched", "i2", 'throughput2());

```

```

define_routing("EVDO_Sched", "a3", 'throughput3());
define_routing("EVDO_Sched", "b3", 'throughput3());
define_routing("EVDO_Sched", "c3", 'throughput3());
define_routing("EVDO_Sched", "d3", 'throughput3());
define_routing("EVDO_Sched", "e3", 'throughput3());
define_routing("EVDO_Sched", "f3", 'throughput3());
define_routing("EVDO_Sched", "g3", 'throughput3());
define_routing("EVDO_Sched", "h3", 'throughput3());
define_routing("EVDO_Sched", "i3", 'throughput3());

```

```

define_routing("EVDO_Sched", "a4", 'throughput4());
define_routing("EVDO_Sched", "b4", 'throughput4());

```

```
define_routing("EVDO_Sched", "c4", 'throughput4());
define_routing("EVDO_Sched", "d4", 'throughput4());
define_routing("EVDO_Sched", "e4", 'throughput4());
define_routing("EVDO_Sched", "f4", 'throughput4());
define_routing("EVDO_Sched", "g4", 'throughput4());
define_routing("EVDO_Sched", "h4", 'throughput4());
define_routing("EVDO_Sched", "i4", 'throughput4());

create_nodal_stat(EVDO_Sched, SUMMARY, USER_FREQ, 'Rt1);
create_nodal_stat(EVDO_Sched, SUMMARY, USER_FREQ, 'Rt2);
create_nodal_stat(EVDO_Sched, SUMMARY, USER_FREQ, 'Rt3);
create_nodal_stat(EVDO_Sched, SUMMARY, USER_FREQ, 'Rt4);
create_nodal_stat(EVDO_Sched, SUMMARY, USER_FREQ, 'Rt);
```

Apêndice 2: Aplicativos de Internet Móvel

Foi comentado que a internet acessada de terminais fixos tem crescido vigorosamente desde meados da década de 90 bem como o número de usuários de telefonia móvel celular. Com a junção de ambos, são visualizadas inúmeras aplicações, porém poucas já conquistaram seu espaço no mercado com as redes de pacote amplamente instaladas hoje como a CDMA2000 1xRTT e a GPRS. Uma das razões é que nenhuma delas oferece boa vazão por usuário com baixo atraso de pacotes comprometendo o desempenho de grande parte das aplicações. Outra razão é que as tecnologias mencionadas acima não tem uma alta eficiência espectral, fazendo com que não tragam retorno financeiro satisfatório para operadoras celulares. Assim, o 1xEV-DO é visto como uma grande oportunidade para as operadoras, uma vez que resolve ambos os problemas permitindo a adoção em massa dos aplicativos de internet móvel.

O objetivo deste apêndice é dar uma visão geral de quais são os aplicativos que podem usufruir de uma rede celular eficiente para transmissão de dados e despontar no futuro próximo.

Segmentos de Mercado

Os serviços de dados através de redes 1xEV-DO podem beneficiar diversos segmentos de mercado, mas os visualizados como mais significativos inicialmente seriam o corporativo, o consumidor de telefones celulares e o acesso “banda-larga” fixo residencial.

É imediato verificar que o segmento corporativo tem enormes vantagens competitivas com o 1xEV-DO, pois seus funcionários podem ter conectividade à internet ou à intranet da empresa em qualquer lugar fora do escritório gerando aumento de produtividade. Para este nicho, aparelhos como cartões PCMCIA para laptops e PDAs com módulo 1xEV-DO embutidos são os mais apropriados.



Já o mercado “banda-larga” residencial, pode usufruir da facilidade de instalação de um modem 1xEV-DO a um desktop pelo usuário final e também a facilidade de implementação da rede 1xEV-DO por operadoras que não precisam de uma infra-estrutura cabeada, tornando o investimento menor e mais rápido. Este modelo de negócio com 1xEV-DO foi adotado pela Vésper em São Paulo.



Porém é no mercado consumidor de telefones celulares equipados com chip 1xEV-DO que os níveis de penetração de mercado podem ser bastante altos. Países como a Coréia e o Japão já tem operadoras com redes 1xEV-DO oferecendo serviços multimídia a aparelhos celulares. Neste segmento as operadoras tem muito a explorar com conteúdo avançado e novos serviços.



Aplicativos Mercado Consumidor e Corporativo

Vídeo

Vídeo *streaming* e vídeo *download*. Vídeo é visto como um grande impulsionador de serviço de dados no celular. Alguns exemplos são: *streaming* ou *download* de *clips* musicais, trailers de filmes, aulas diversas, visualização de vias públicas *on-line* e até mesmo broadcast televisivo. Para este tipo de serviço, o atraso de pacotes e a velocidade de transmissão são de fundamental importância para boa experiência de usuário.



Jogos

Download e jogos interativos *on-line*. O mercado de jogos eletrônicos no celular é outro que tem alcançado bons números de receita e pode se aproveitar da possibilidade de usuários fazerem *download* de jogos para seus aparelhos e jogá-los interativamente com outros jogadores. Para *download* de jogos, não é primordial a alta taxa de dados ou latência mínima, uma vez que geralmente o tamanho dos arquivos não é muito grande, porém para jogar contra outros jogadores *on-line* torna-se crítico o atraso e a velocidade de transmissão.



Músicas

Download de MP3 e rádio *on-line*. Arquivos de música no formato MP3 estão cada vez mais comuns na Internet e tem um bom potencial para buscá-las na Internet através do celular. Suas características são parecidas com as mencionadas no item anterior, porém os arquivos MP3 costumam ter um tamanho muito maior, sendo importante uma alta taxa de

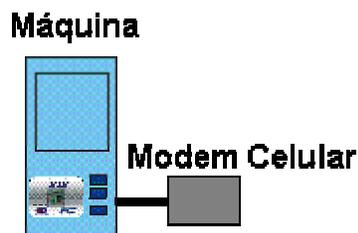
dados. Arquivos menores já estão disponíveis hoje para download de *ring-tones* e se tornaram bastante populares, confirmando este como sendo um serviço com boa aceitação

Vídeo-Conferência

Vídeo-conferência pelo celular é mencionado na mídia como sendo um serviço importante de 3G, mas ainda não se sabe se o público em geral realmente irá adotar este serviço. De qualquer forma, este é um serviço que requer um controle bastante aferido de QoS, uma vez que tanto o *upload* como o *download* precisam de garantias de desempenho, tanto em latência, quanto *jitter* e velocidade de transmissão.

Telemetria

Comunicação máquina-máquina. Muitas aplicações de telemetria deixam de ser implementadas por ter um custo de comunicação muito alto com técnicas com-fio. Utilizando tecnologia sem-fio, aplicações como medidores de água e gás enviando o consumo instantâneo, monitoramento de níveis de reservatórios remotos, acionamento de válvulas e motores a distância, monitoramento de sinais vitais de veículos, etc, se tornam viáveis economicamente. Este tipo de aplicação em geral tem requisitos mais flexíveis de desempenho. Geralmente, não requerem baixos atrasos ou altas velocidades, porém o número de terminais pode ser bastante elevado, fazendo com que o tráfego total gerado por este tipo de aplicação seja alto. Assim, este tipo de serviço poderia ser deixado no modelo proposto no estudo como mais baixa prioridade, sendo deixado para transmitir em instantes de menor ocupação de rede.



Acesso a Internet

Esta é a aplicação mais imediata, pois não há a necessidade de se criar nada novo. As páginas html estão prontas e um cartão PCMCIA ou modem 1xEV-DO conectado a um desktop poderiam acessá-las. Também se incluem nesta categoria aplicativos como e-mail, chat, WAP, entre outros. O acesso à intranet para executivos e funcionários remotos também é um aplicativo visto como muito importante por estes profissionais.

Rastreamento de veículos e cargas

Em países como o Brasil onde a preocupação com segurança é constante, aplicativos de segurança para veículos e cargas de alto valor tem potencial de se tornarem populares. Para este tipo de serviço, geralmente obtém-se a posição do usuário através de receptor GPS ou alguma outra maneira e através da rede celular envia esta informação para uma central de controle que a disponibiliza para o usuário final. Este serviço é não só interessante para quesitos de segurança, mas também para logística de frotas de caminhões por exemplo. Neste caso o atraso da informação em alguns segundos ou até mesmo minutos não traz impactos significativos, porém caso a informação seja um botão de pânico, por exemplo, qualquer minuto ganho pode ser diferencial. Novamente, este não é um serviço que tem muito tráfego por terminal, porém como a quantidade de terminais pode ser grande, uma rede com alta capacidade de dados pode atender tranqüilamente esta demanda sem prejudicar o tráfego de voz por exemplo.

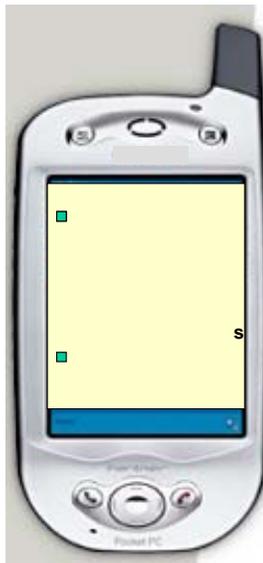
LBS (Location Based Services)

Apesar de parecido com o último serviço, serviços de LBS são mais voltados para aparelhos celulares. Assim, um usuário poderia através de seu aparelho descobrir restaurantes, lojas, etc mais próximos a partir da posição em que está. Também são possíveis serviços como rotas de trânsito, serviços de encontros (procura um parceiro com as suas características perto de onde o usuário estiver), monitoramento dos filhos, entre outros.



Automação de Processos de Funcionários de Campo

Este serviço é voltado para o mercado corporativo. Com ele um entregador de uma empresa de laticínios, por exemplo, pode ao passar em cada padaria enviar os pedidos de novas encomendas e informar o que foi entregue a um custo muito baixo. Empresas de pesquisa também podem se beneficiar deste serviço. Uma empresa deste ramo poderia passar preços de determinado produto da concorrência instantaneamente. O funcionário teria um formulário no seu aparelho e iria preenchendo os valores encontrados em um supermercado, evitando que ele fique com um volume muito grande de papéis, depois alguém tenha que digitar as informações para só então ficarem disponíveis para que outro departamento possa tratar da informação. PDAs são mais indicados para este tipo de aplicação, mas telefones também podem ser utilizados através de WAP ou programas Java ou Brew (suportados por muitos aparelhos hoje).



Conclusão

Além das aplicações comentadas neste apêndice, muitas outras são visualizadas (na maioria variantes destas), porém não detalhas nesta seção. Mas pode ser visto que estas aplicações estão ganhando espaço e com elas a necessidade de uma rede que possa suportá-las eficientemente, com uma boa performance por usuário (caso contrário ele não irá utilizá-las) e gerando receita para operadoras que disponibilizem estas redes (para isto a eficiência espectral é fundamental).

Apêndice 3: Artigo publicado SBrT03 – Rio de Janeiro, Brasil

Estudo de Desempenho do Sistema 1xEV-DO com Prioridades de Serviços na Interface Aérea

Hugo Swart, Shusaburo Motoyama

DT - FEEC - UNICAMP

Caixa Postal 6101– 13083-970 – Campinas – SP – Brasil

hswart,motoyama@dt.fee.unicamp.br

***Resumo.** Neste artigo é apresentado um estudo de desempenho do sistema 1xEV-DO com prioridades de serviços na interface aérea. Através da introdução de um escalonador de prioridades simples, o sistema 1xEV-DO é estudado por simulação em relação à vazão de saída, ao atraso de espera dos pacotes e à utilização do enlace. É feita, também, a comparação com o sistema sem prioridades. Os estudos mostraram que o sistema 1xEV-DO é capaz de prover altas taxas de dados. Porém, caso não haja tratamento diferenciado para aplicações, poderá frustrar os usuários, devido a um longo atraso dos pacotes em instantes de tráfego intenso de pacotes.*

1. Introdução

A grande disseminação em todo o mundo de telefonia celular e sua infra-estrutura de transmissão instalada estão possibilitando o atendimento de demanda de acesso sem-fio à internet, a rede mundial de computadores. A tecnologia de comunicação sem-fio 1xEV-DO (1x Evolution – Data Optimized) foi desenvolvida para atender esta necessidade. Ela é um produto da evolução do padrão CDMA (Code Division Multiple Access) e permite velocidades de transmissão de até 2,45 Mbps por setor de uma célula em uma portadora de largura de banda de 1.25MHz dedicada a dados comutados a pacote.

O sistema 1xEV-DO tem características bastante adequadas para transmissão de dados e está sendo objeto de intensa pesquisa [2], [3], [4] e [5]. A maioria dos trabalhos

apresentados na literatura estuda o sistema 1xEV-DO sob o ponto de vista de desempenho da vazão. Em [2] é mostrado que a regra de alocação de *slots* é o principal fator que afeta a vazão do sistema. Em [4], o desempenho de vazão é analisado sob vários fatores como área de cobertura de célula e o atraso de acesso. O desempenho da vazão quando é introduzido um controle de acesso de usuários à portadora, é investigado em [5]. Uma forma escalonamento onde se dá prioridade de transmissão para usuários em melhores condições de RF e que otimiza a vazão é proposta e analisada em [3].

Neste artigo, é estudado o desempenho da vazão do sistema 1x EV-DO sob o ponto de vista de prover qualidade de serviço (QoS) para usuários com diferentes necessidades e aplicações. Em qualquer tecnologia de comunicação sem-fio que permite o tráfego de dados, a garantia de banda é algo difícil de se alcançar, pois a qualidade do sinal de RF varia muito e condições de sinal piores não permitem atingir-se as taxas máximas possíveis. A priorização de tráfego poderá amenizar as diferenças entre usuários ou aplicações, satisfazendo as expectativas dos usuários.

Na seção 2 é apresentado o sistema 1xEV-DO. Na seção 3 é proposto o modelo do sistema para simulação. A apresentação de resultados de simulação e suas análises são feitas na seção 4. Finalmente, na seção 5 são apresentadas as principais conclusões.

2. O Sistema 1xEV-DO

O sistema 1xEV-DO provê para terminais sem-fio, através de radiofrequência, a transmissão de dados com picos de 2.4 Mbps de velocidade instantânea no enlace direto (estação base para terminal), e até 153 kbps no enlace reverso (terminal para estação base). As altas taxas são obtidas no enlace direto com uma maximização da potência da estação base para um usuário em cada instante de tempo e utilizando técnica de

modulação 16QAM. O canal segue a codificação típica de técnica CDMA. Assim, pode-se resumir o 1xEV-DO em um sistema de técnicas combinadas de TDMA (Time Division Multiple Access) e CDMA. Cada TS (Time-Slot) do enlace direto tem duração fixa de 1,667ms e um quadro determinado por 16 TSs.

Com a degradação do sinal de RF, a taxa máxima não é possível de ser fornecida havendo uma queda gradual com a queda do sinal e em casos extremos chega-se a um mínimo de 38,7 kbps, conforme exemplificado na Fig.2.1.

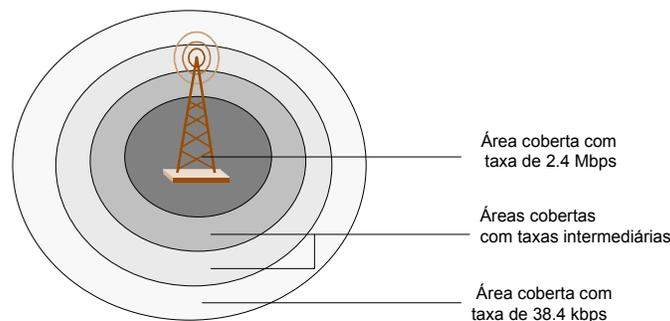


Figura 2.1. Distribuição das taxas de transmissão do sistema 1xEV-DO.

O padrão da tecnologia [1] define as taxas que devem ser fornecidas pelo sistema para cada nível de potência do sinal de forma a não degradar a qualidade da informação recebida pelo terminal através de diferentes formas de modulação do sinal (16QAM, 8PSK e QPSK). Para balancear o desempenho entre usuários, a alocação de quantidade de TSs entre usuários não é uniforme, assim usuários com taxas mais baixas terão mais TSs disponíveis. O número de TSs, a modulação e o tamanho do pacote para cada taxa estão definidos no padrão [1] e reproduzido na Tab. 2.1.

Tabela 2.1. Configurações do enlace direto para o sistema 1xEV-DO.

Taxas (kbps)	38	76	153	307	614	921	1228	1843	2458
Bits / Pacote	1024	1024	1024	1024	1024	3072	2048	3072	4096
Time Slots	16	8	4	2	1	2	1	1	1
Modulação	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	8PSK	QPSK	8PSK	16QAM

Do ponto de vista de desempenho para o usuário final, os fatores que mais influenciam o sistema 1xEV-DO são:

- e) Intensidade de tráfego (número de usuários acessando a rede e vazão média de cada um), uma vez que os TSs serão compartilhados.
- f) Raio da célula (células menores permitem um sinal de rádio melhor).

3. Modelo de Simulação

A fim de se verificar o desempenho do sistema 1xEV-DO com a utilização de priorização de tráfego, foi simulada através da ferramenta Q+ desenvolvida pelo Bell Labs da Lucent Technologies, uma rede com os parâmetros do 1xEV-DO para o enlace direto, adicionando quatro filas ao invés de fila única do modelo atual. Os índices de desempenho tomados como mais importantes neste estudo são: atraso médio dos pacotes, vazão de saída e fator de utilização do sistema. As medidas foram feitas para cada fila e também a média do sistema considerando as quatro filas.

As seguintes suposições são adotadas para a simulação. O escalonador é baseado em prioridade sem preempção. Os pacotes de maior prioridade são atendidos em primeiro lugar; somente quando a fila de maior prioridade ficar vazia é que a fila de prioridade seguinte é atendida. Somente o tráfego referente ao enlace direto é investigado. O *buffer*

de cada fila tem tamanho infinito. Os pacotes são armazenados no esquema FIFO (First In First Out) em cada fila. A chegada de pacotes obedece a uma distribuição exponencial. O tempo de serviço ($1/\mu$) é igual à duração do número de TSs que cada região de cobertura tem (por exemplo, a região de 38 kbps tem $1/\mu$ de 26,67 ms). As classes de taxa de transmissão determinadas pela cobertura de RF são denominadas de *A* a *I* de forma a facilitar a referência às mesmas (*A* é utilizada para classe de 38 kbps e *I* para a de 2,4 Mbps).

Como *default* o tráfego de pacotes foi dividido em prioridades obedecendo à proporção da Tab. 3.1.

Tabela 3.1. Distribuição default das prioridades (Pr).

Prioridade	Probabilidade (Pr)
1	10%
2	25%
3	30%
4	35%

O número de usuários na célula é denominado genericamente de *N*. Foi tomado como *default* o número $N=20$. As classes de cobertura são divididas nas proporções (*Pc*), conforme a tabela abaixo:

Tabela 3.2. Proporção default de classes de cobertura e respectivas taxas

Classe	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Taxa (kbps)	38	76	153	307	614	921	1228	1843	2458
Pc	2%	3%	8%	18%	23%	17%	15%	10%	4%

A vazão média demandada por usuário é denominada R_u e o valor *default* foi considerado de $R_u = 17$ kbps. R_u é a média de vazão entre instantes de atividade e de inatividade (leitura de um web site por exemplo). Para se calcular a taxa média de pacotes (λ) de cada classe de cada prioridade é utilizada a seguinte expressão:

$$\lambda_x = \frac{N \cdot Pr \cdot Pc \cdot R_u}{T_c} \quad (3.1)$$

Onde N , P_c , P_r e R_u são parâmetros definidos anteriormente e T_c é o comprimento de pacote em bits de cada classe de cobertura.

As simulações foram feitas variando os parâmetros referenciados acima. Assim, foram simulados três cenários bem como os mesmos parâmetros para o modelo sem prioridade.

Cenário 1: Variação do número de usuários.

Alterando-se o número de usuários, muda-se o valor de λ conforme Eq.3.1. Foram simulados 5 valores: 5 usuários, 10 usuários, 15 usuários, 20 usuários e 25 usuários.

Cenário 2: Variação do tamanho da célula.

Sabe-se que uma alteração no tamanho ou morfologia da célula acarreta em características de propagação diferentes e conseqüentemente alterando também a distribuição das taxas. A Tab.3.3 mostra as distribuições adotadas para uma célula pequena, uma média e outra grande.

Tabela 3.3. Probabilidades de classes de cobertura para células de diferentes áreas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Taxa (kbps)	38,4	76,8	153,6	307,2	614,4	921,6	1228,8	1843,2	2458
Pequena	1%	1%	4%	8%	11%	24%	19%	18%	14%
Média	2%	3%	8%	18%	23%	17%	15%	10%	4%
Grande	5%	7%	19%	25%	18%	13%	8%	3%	2%

Cenário 3: Variação da distribuição de prioridades.

Foi alterada a distribuição das prioridades para se verificar o impacto no desempenho. As distribuições escolhidas são mostradas na Tab.3.4.

Tabela 3.4. Distribuição das prioridades nas diferentes simulações

	Prioridade 1	Prioridade 2	Prioridade 3	Prioridade 4
10/25/30/35	10%	25%	30%	35%
25/25/25/25	25%	25%	25%	25%
25/30/30/10	25%	30%	30%	15%
60/20/10/10	60%	20%	10%	10%
50/50/0/0	50%	50%	0%	0%

4. Análise dos Resultados

Os resultados obtidos nas simulações para os diferentes cenários estão mostrados em gráficos e tabelas. Nos gráficos de vazão, R Px indica a vazão observada para cada fila de prioridade, R TP div 2 indica a curva para a vazão total de todas as filas dividido por 2 e R SP div 2, a vazão para a simulação sem prioridade também dividida por 2. Nos gráficos de atraso médio de pacotes, D Px indica o atraso observado para cada fila de prioridade. D SP e D TP indicam o atraso médio total sem prioridade e com prioridade, respectivamente. Nos gráficos de utilização do enlace, U SP e U CP indicam as utilizações sem prioridade e com prioridade, respectivamente.

Cenário 1: Variação do número de usuários.

A Fig.4.1 mostra o resultado da simulação para a vazão quando se varia o número de usuários.

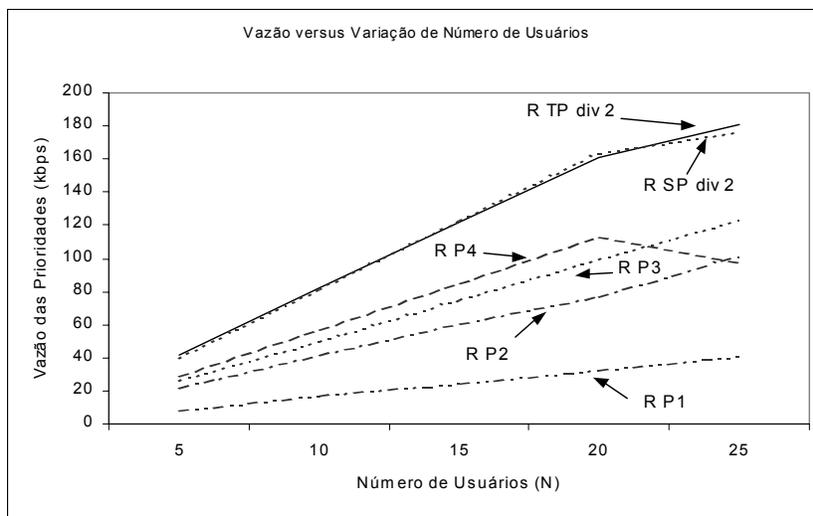


Figura 4.1. Gráfico da Vazão em função de número de usuários para cenário 1.

Observa-se que aumentando o número de usuários e conseqüentemente o λ , a vazão total do sistema cresce na mesma proporção até o número de 20 usuários. Na simulação com 25 usuários, observou-se que a taxa de chegada de pacotes foi maior do que a capacidade de tratamento do sistema, assim o crescimento da vazão não foi proporcional, uma vez que foi limitada. Esta limitação foi observada somente para os pacotes da prioridade 4, assim a vazão dos demais não sofreu decréscimo. Desta forma, pacotes com maior prioridade não foram deixados de ser atendidos.

Já o atraso, como mostra a Fig.4.2, foi sensivelmente diferente para as prioridades nas simulações com muitos usuários (alta utilização do sistema). Com poucos usuários (5 e 10) os atrasos observados não foram tão dispares entre as prioridades, sendo que a utilização de priorização de tráfego não traria grandes benefícios para maioria das aplicações. Mas com o aumento do número dos usuários, a priorização se mostrou fundamental. Com 20 usuários o atraso de pacotes da prioridade 4 aproximou-se de 1s, enquanto que o atraso da prioridade 1 permaneceu próximo a da observada com poucos

usuários. Quando da não utilização de prioridade, para 20 usuários houve um atraso médio de 75 ms que poderia causar baixa performance dependendo do serviço, enquanto que a prioridade 1 teve apenas 9 ms de atraso.

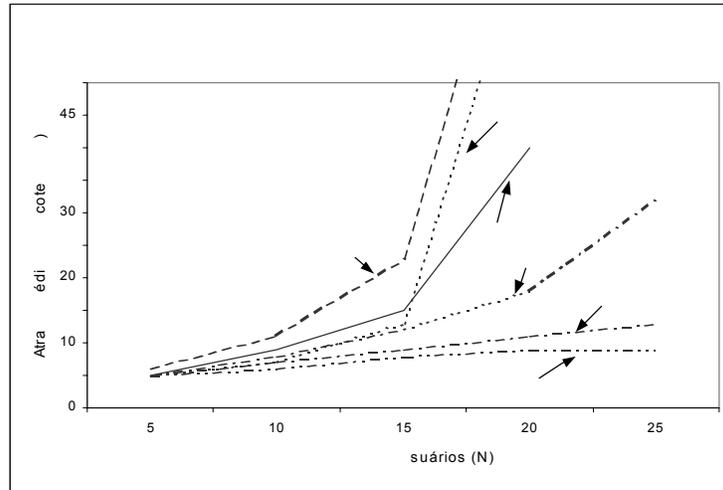


Figura 4.2. Gráfico de atraso médio de pacotes em função do número de usuários para cenário 1.

Assim, percebe-se que a priorização do tráfego tornou-se vantajosa principalmente para condições em que há alta utilização do sistema. Esta é normalmente a condição de uma rede comercial, sendo que o interesse financeiro é sempre utilizar ao máximo seus investimentos. Mas o sistema, mesmo se dimensionado para poucos usuários por célula, pode e provavelmente irá apresentar situações com muitos usuários por célula, devido a mobilidade dos mesmos. Desta forma, a utilização de um escalonador de prioridades amenizaria o impacto das situações onde muitos terminais móveis se locomovem para uma mesma célula.

A Fig.4.3 mostra a utilização do sistema em relação ao número de usuários. A utilização do sistema cresce linearmente com o aumento de número de usuários até 20 usuários. Acima de 20 usuários, o sistema entra em saturação aproximando de 100% de utilização.

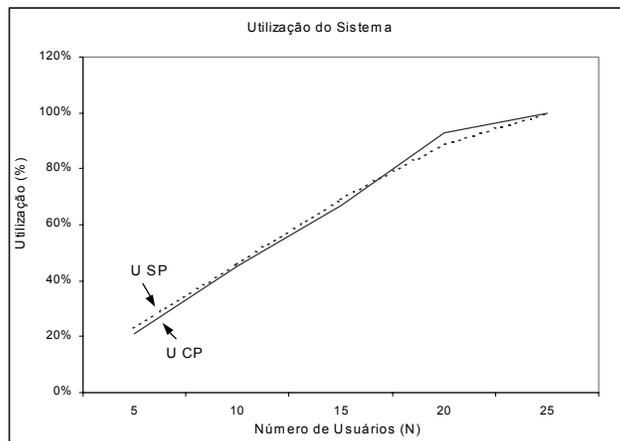


Figura 4.3 Gráfico de utilização do sistema em função de número de usuários para
Cenário 1.

Cenário 2: Variação do tamanho da célula.

As Figs. 4.4, 4.5 e 4.6 mostram os gráficos da vazão, do atraso médio de pacotes e da utilização, respectivamente, quando se leva em conta o tamanho da célula. Com o aumento do tamanho da célula, observou-se que a ocupação do sistema foi ficando maior, uma vez que a proporção de usuários em classes de taxas mais baixa aumenta e como estas tem tempo de serviço maior por pacote, acarretou em congestionamento do servidor.

Assim, a priorização do tráfego se mostrou mais importante neste tipo de célula. Enquanto que em células pequenas a necessidade não se mostrou essencial, tendo em vista que as taxas mais altas obtidas nestas condições têm menor tempo de serviço por pacote.

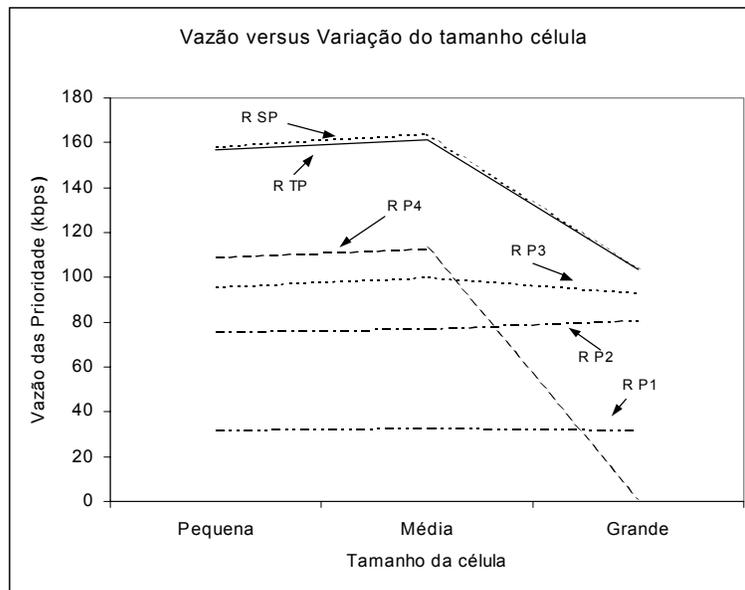


Figura 4.4. Gráfico da vazão em função do tamanho da célula para cenário 2.

Passando de uma célula pequena para uma grande, o grau de ocupação passou de 53% para 100% e neste último caso a fila aumentou constantemente, fazendo com que o atraso médio também aumentasse e os pacotes da prioridade 4 não fossem tratados.

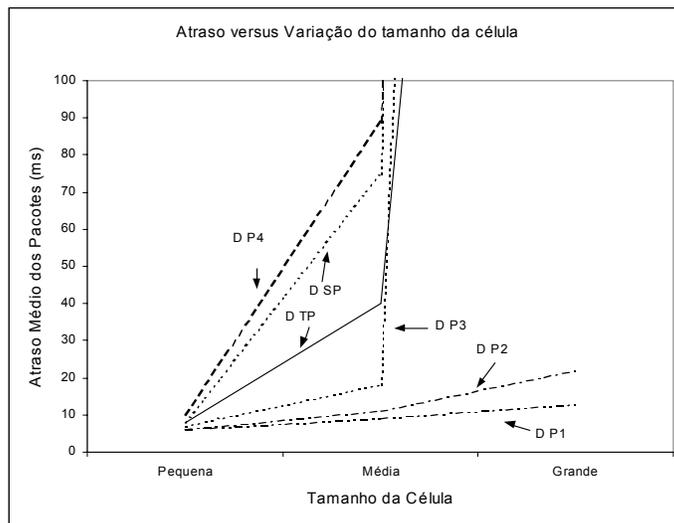


Figura 4.5. Gráfico de atraso médio de pacotes em função do tamanho da célula para cenário 2.

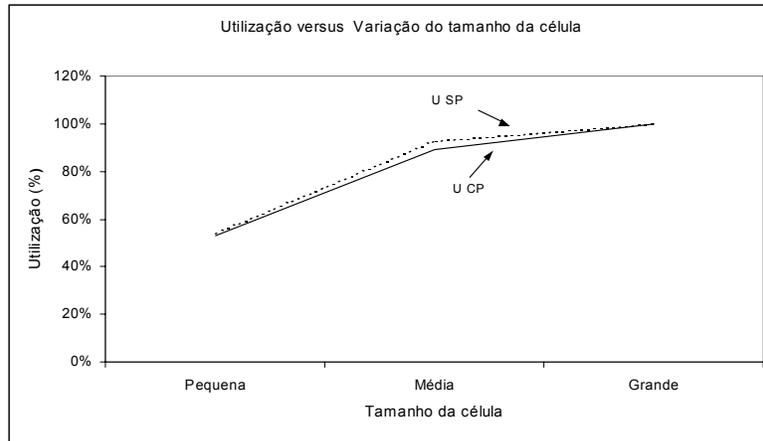


Figura 4.6. Gráfico da utilização em função do tamanho da célula para cenário 2.

Cenário 3: Variação da distribuição de prioridades.

As Tabs. 4.1, 4.2 e 4.3 mostram a vazão, o atraso médio de pacotes e a utilização, respectivamente, quando se leva em conta a variação da distribuição de prioridades. Como era de se esperar a vazão não sofreu conseqüências com a alteração de distribuição de prioridades, mantendo o valor total e somente re-distribuindo a vazão para cada prioridade proporcionalmente.

Mesmo crescendo a porcentagem de participação da prioridade 1, os atrasos sofridos pelos pacotes desta prioridade não foram severamente afetados. Por exemplo, na simulação 60/20/10/10 a prioridade 1 apresentou atraso de 14 ms que ainda não é crítico para maioria das aplicações. Porém, observou-se um aumento do atraso médio do sistema com o aumento das prioridades mais altas. Outro ponto interessante, foi que a utilização de apenas 2 filas com prioridades distintas (50/50/0/0) já trouxe melhora significativa para o atraso da mais alta prioridade, pois comparando com a 100/0/0/0 que apresentou atraso médio de 75 ms, a primeira prioridade teve apenas 12 ms. Assim, caso o processamento adicional necessário para implementação de muitas filas no sistema fosse

grande, mostrou-se que mesmo a divisão dos pacotes em duas prioridades com distribuição homogênea, trouxe uma melhora significativa para a prioridade mais alta.

Tabela 4.1. Vazão (em kbps) para variação da distribuição de prioridades

	RT	RP1	RP2	RP3	RP4
10/25/30/35	323	33	77	100	113
25/25/25/25	323	83	81	80	79
25/30/30/10	324	81	97	97	49
60/20/10/10	322	194	66	30	32
50/50/0/0	323	83	81	80	79
100/0/0/0	328				

Tabela 4.2. Atraso médio (em ms) para variação da distribuição de prioridades.

	DT	DP1	DP2	DP3	DP4
10/25/30/35	40	9	11	18	89
25/25/25/25	47	10	14	27	142
25/30/30/10	53	10	15	42	223
60/20/10/10	70	14	46	139	395
50/50/0/0	53	12	93	0	0
100/0/0/0	75				

Tabela 4.3. Utilização do sistema para variação da distribuição de prioridades.

	Ocupação do Sistema
10/25/30/35	89%
25/25/25/25	90%
25/30/30/10	91%
60/20/10/10	92%

50/50/0/0	90%
100/0/0/0	93%

5. Conclusões

Neste artigo foi apresentado o estudo de desempenho do sistema 1xEV-DO com prioridades de serviços na interface aérea. O escalonador de prioridades utilizado no estudo é bastante simples e permite a sua implementação em sistemas de terceira geração de telefonia celular de maneira bastante fácil.

O estudo mostrou que o sistema 1xEV-DO é capaz de prover altas taxas de dados, porém caso não haja tratamento diferenciado para aplicações e usuários pode haver frustração com serviço devido ao alto atraso médio dos pacotes observado em sistemas sem utilização de prioridades.

O esquema de prioridades adotado no estudo mostrou-se essencial em condições de alta utilização do sistema, como no caso de muitos usuários ou no caso de alta taxa de chegada de pacotes.

Referências

- [1] TIA/EIA/IS-856 “CDMA2000, High Rate Packet Data Air Interface Specification”
- [2] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi “CDMA/HDR: A Bandwidth-Efficient High-Speed Wireless Data Service for Nomadic Users”, IEEE Communications Magazine, pp.70-78, vol.38, July 2000
- [3] A.Jalali, R. Padovani and R. Pankaj, “Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency high-rate personal communication wireless system”, IEEE Vehicular Technology Conference, Tokyo, May 2000

- [4] W. Chung, H. Lee, J. Moon “Downlink Capacity of CDMA/HDR”, IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2001, Spring, pp. 1937-1941, 2001
- [5] Q. Bi and S. Vitebsky, “Performance Analysis of 3G-1X EVDO High Data Rate System”, Wireless Communications and Networking Conference, 2002. 2002 IEEE, vol.1, Mar2002, pp: 389 -395

Apêndice 4: Artigo publicado ASTC – Arlington, EUA

Performance Analysis of High Data Rate Wireless Cellular System with Service Priority at the Air Interface

Shusaburo Motoyama and Hugo Swart

DT - FEEC - UNICAMP

P.O. Box 6101 13081-970 Campinas, S.Paulo, Brazil

Phone: +55-19-3788-3765 Fax: +55-19-3289-1395

E-mail: motoyama@dt.fee.unicamp.br; hswart@dt.fee.unicamp.br

Abstract. In this article a performance study of the 1xEV-DO system considering service priority at the air interface is presented. Through the introduction of a simple priority scheduler, the 1xEV-DO system is studied by simulation in relation to the output throughput, packet delay and link utilization. A comparison to the system without priority is also carried out. The results showed the 1xEV-DO system is capable to provide high data rate. However, if differentiated treatment of applications is not provided, it could disappoint users, due to a long packet delay in case of high load of packet traffic

“Keywords” Wireless, 1xEV-DO, Performance, Priority Scheduling.

1. INTRODUCTION

The widespread utilization of wireless mobile telephony and its installed transmission infrastructure are enabling wireless access to Internet, the World Wide Web. With the goals of defining the type of data services to be supported by a wireless network and to establish a technology standard, the ITU created a group, the IMT-2000 [1], [2]. Services such as multimedia communication, terminal location and secure intranet access among others were envisioned, and they all have in common the need for high data transmission rates. The bit rates suggested by IMT-2000 ranged from 144 kbps for automotive mobility to 2 Mbps for fixed terminals.

In order to comply with all IMT-2000 requirements for 3G, a new air interface was developed denoted CDMA 1xEV-DO (1x Evolution – Data Only), capable of surpassing the required 2 Mbps. This is achieved with a 1.25 MHz bandwidth carrier dedicated to packet data traffic, thus maintaining the same frequency planning of current CDMA cellular systems.

The 1xEV-DO system has characteristics well suited for packet data transmission and is subject of intense research [4], [5], [6] e [7].

The majority of the articles presented in the literature study the 1xEV-DO system in terms of throughput performance. In [4] it is shown that the time slot allocation rule is the main aspect that affects the system throughput. In [6] the throughput performance is analyzed in terms of parameters such as the cell coverage area and access delay. The throughput performance when user access control is

introduced is investigated in [7]. A scheduler at base station with transmission priority to users with better RF signal is proposed and analyzed in [5].

In this paper, the throughput performance is studied when QoS (Quality of Service) levels are introduced to users with different requirements and applications. In any wireless technology, guaranteed band is difficult to achieve, due to the nature of the RF signal variation. The weak signals do not allow high data rate transmission. By using a scheduler with traffic priority it is possible to ease the differences among users or applications, meeting user expectations.

This article is organized as follows. Section 2 presents 1xEV-DO system in details. In section 3 the simulation model and main assumptions adopted are presented. The result presentation and its analysis are made in section 4. Finally, in section 5 the main conclusions are presented.

2. 1xEV-DO SYSTEM

The 1xEV-DO system provides packet data transmission with peak rates of 2.45 Mbps in the forward link (base station to terminal), and up to 153 kbps in the reverse link (terminal to base station). A possible network architecture is shown in Fig. 1.

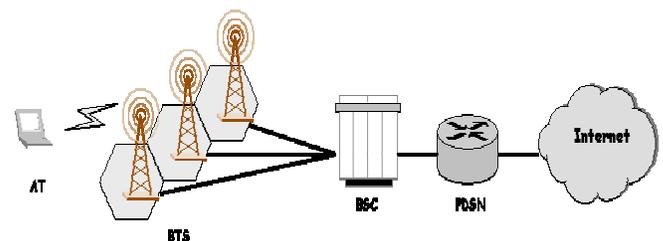


Figure 1. 1xEV-DO network architecture.

The 1xEV-DO network architecture consists of base stations (BTS – Base Transceiver Station) that are responsible for the radio communication with the wireless terminals (AT – Access Terminal), Base Station Controller (BSC) and PDSN (Packet Data Serving Node) that is

implemented on routers and is responsible to terminate user sessions and interface with the packet data networks. There is no circuit-switched center (MSC -Mobile Switching Center).

The highest data rate is achieved in the forward link by using the maximum base station power to only one user at a time and utilizing 16QAM modulation technique. The channel is spread much like the typical CDMA technique. Since the 1x EV-DO also uses TDM technique, the air interface can be summarized as a combined TDM/CMDA technology.

As in others TDM technologies, each TS (Time-Slot) in 1xEV-DO has fixed duration. The time period in forward link for each TS is 1.67 ms long and a frame is composed of 16 TSs. Fig.2 shows the frame structure used in 1xEV-DO. The pilot channels carry power information and each terminal uses this information to return to the base station, how good it is receiving the signal.

As observed in others systems, the RF signal degradation, that normally occurs when the AT is distant from the base station, limits the maximum data transmission rate supported by the system and in extreme case the rate gets into a minimum of 38.7 kbps. The decreasing of the rate is gradual, the stronger the signal the higher rates can be achieved.

The technology standard [3] defines the data rates that should be supported by the system for each signal power level while still guarantying an error rate below 10^{-6} at the AT. This is achieved by using adaptive modulation schemes and error correction algorithms. Thus, terminals in regions with higher signal power will have more bits per symbol using 16QAM and 8PSK and terminals in worse RF conditions will have signals modulated with QPSK and better error correction technique (using more bandwidth).

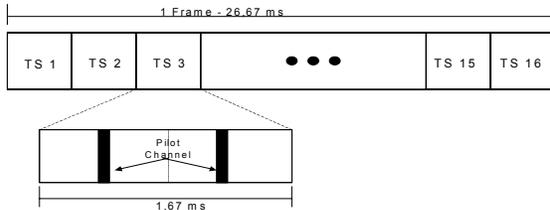


Figure 2. 1xEV-DO frame and time slot structures.

The number of TSs assigned to each user using different transmission rate is not equal, since it wouldn't be fair to allocate an even number of TSs for the 2.4 Mbps and the 38 kbps users. Assigning different number of TSs for each rate and defining different packet sizes for each rate, results in a more balanced performance among users. The number of TSs and the packet size for each rate are defined in the standard [3] and reproduced in the Tab.1.

A user in an area that allows a specific rate may not experience that rate as it's average rate, that will depend on the number of users asking for simultaneous access. Thus, to obtain the class rate as the transmission rate it is necessary that the user be the only one using the carrier resource.

The terminal does the rate selection by constantly monitoring the pilot channel and informing the base station in which class it can receive the packets with good quality. As the characteristics of the radio signal change rapidly, it is likely that during a data connection, the rate will be switched several times.

Table 1. Forward link configuration for the 1xEV-DO system.

Class Rate (kbps)	38.4	76.8	153.6	307.2	614.4	921.6	1228.8	1843.2	2458
Bits per packet	1024	1024	1024	1024	1024	3072	2048	3072	4096
Time slots)	16	8	4	2	1	2	1	1	1
Code Rate	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Modulation type	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	8PSK	QPSK	8PSK	16QAM

As far as the performance of the final user is concerned, the factors that impact more significantly on the 1xEV-DO system are:

- g) Traffic intensity (number of users accessing the network and the average load of each of them). The number of users simultaneously transmitting will impact directly the bandwidth allocated for each user, since the TSs are shared between all.
- h) Network Planning (a better planed network will deploy BTS near where most of the users are).
- i) Access delay (delay to establish a traffic channel).
- j) Medium access control mechanism.

3. SIMULATION MODEL

With the objective of analyzing the performance of the 1xEV-DO system when introducing traffic priority, a simulation was carried out using the tool Q+, developed by Bell Labs from Lucent Technologies. Only the forward link was simulated adding 4 queues instead of the only queue from the current model, as shown in Fig.3.

Four queues could provide services such as Gold, Silver and Bronze or Best-Effort with different billing rates for each user that selects these services. Other possibility of using such implementation is allocating each queue for a different type of application. For instance the highest priority queue for video-streaming, followed by the queue for emergency applications and the last queue for best-effort traffic such as http (Hyper-Text Transfer Protocol) or SMTP (Simple Mail Transfer Protocol).

The performance parameters used in this study are: average packet delay, output throughput and system utilization. The delay and the throughput are measured for each queue and also for system average.

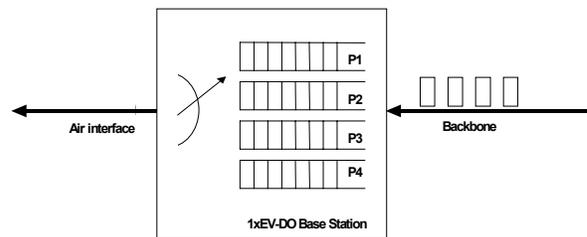


Figure 3. Queues with different priorities in the 1xEV-DO system base station.

The following assumptions are adopted for the simulation. The packets are marked with its respective priority somewhere before getting into the base station scheduler. The scheduler is based on nonpreemptive priority.

The packets of higher priority are served first and only when the higher priority queue is empty the following priority queue is served. Only the forward link is considered. The buffer from each queue has infinite size. The packets are stored in a FIFO (First In First Out) scheme in each queue. The packet arrival follows a negative exponential distribution. The service time ($1/\mu$) is equal the duration of the number of TSs that the region has (for instance, the 38 kbps class has $1/\mu$ of 26,67 ms, while the region with 2.4 Mbps has $1/\mu$ of 1.67 ms). The transmission rate classes are named from a to i to ease the reference to them (a is utilized for the 38.7 kbps and i to reference the 2.45 Mbps). Additional features of the 1xEV-DO system such as the Proportional Fair Scheduler and Hybrid-ARQ are not considered in this analysis to make it simpler, but these could impact system performance increasing throughput and lowering average packet delay.

The packet traffic is divided into priorities according to the priority 1, 2, 3 and 4 with probability (Pr) 10%, 25%, 30% and 35%, respectively.

The default number of users in a cell is $N=20$. The distribution of percentage (Pc) of each coverage class is shown in Tab. 3.1.

Table 2. Default distributions of the coverage classes and their respective rate.

Class	a	b	C	d	e	f	g	h	i
Rate (kbps)	38	76	153	307	614	921	1228	1843	2458
Pc	2%	3%	8%	18%	23%	17%	15%	10%	4%

The average load of bits per user is denoted R_u and the default value is $R_u = 17$ kbps. R_u is the average arrival rate of activity and inactivity intervals (requesting a web site and reading it for example). To calculate the average arrival of packets (λ) for each class of each priority the following expression is used:

$$\lambda_x = \frac{N \cdot Pr \cdot Pc \cdot R_u}{T_c} \quad (1)$$

Where N , P_c , Pr e R_u are parameters previously defined and T_c is the size of the packet in bits for each class (see Tab.2).

Four simulations scenarios are carried out by varying each of the parameters above discussed. In all scenarios the nonpriority model is also simulated. The four simulation scenarios are described below.

Scenario 1: Variation of number of users.

Modifying the number of users, the value of λ changes according to Eq.1. Five values are simulated: 5, 10, 15, 20 and 25 users.

Scenario 2: Variation of arrival bit rate.

Modifying the arrival bit rate, the value of λ changes according to Eq.1. Six values are simulated: 8, 11, 14, 17, 20 and 23 kbps.

Scenario 3: Variation of network planning accuracy.

Depending on where the BTS is deployed, users will be able to be served with better or worse rates. So a good network planning, based on where the majority of the users are located can deeply impact on system performance. An

accurate network planning is achieved when the BTSs are deployed exactly where there is high concentration of users, resulting in many users close do the BTS. Tab.3 shows the distribution assumed for a poor, a good and an excellent planned networks.

Table 3. Class probabilities for different RF planning accuracy.

Class	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Rate (kbps)	38	76	153	307	614	921	1228	1843	2458
Excellent	1%	1%	4%	8%	11%	24%	19%	18%	14%
Good	2%	3%	8%	18%	23%	17%	15%	10%	4%
Poor	5%	7%	19%	25%	18%	13%	8%	3%	2%

Scenario 4: Variation of priority distribution.

The priority distribution is changed to analyze its impact in the system performance. The chosen distributions are shown in Tab.4.

Table 4. Priority distributions in different simulations.

	P 1	P 2	P 3	P 4
10/25/30/35	10%	25%	30%	35%
25/25/25/25	25%	25%	25%	25%
25/30/30/10	25%	30%	30%	15%
60/20/10/10	60%	20%	10%	10%
50/50/0/0	50%	50%	0%	0%

4. RESULTS ANALYSIS

The results obtained in the simulations for the different scenarios are presented in figures and tables. In figures for throughput performance analysis, the labels R_{Px} indicate the throughput observed in each priority queue (x indicates the priority); R_{TP} indicates the curve for the total throughput and $R_{w/o P}$, the throughput for the simulation without priority. In figures for average packet delay analysis, the labels D_{Px} indicate the packet delay observed in each priority queue. $D_{w/o P}$ indicates the average packet delay for the simulation without priority and D_{TP} for the average packet delay considering all queues. In figures for system utilization analysis, $U_{w/o P}$ and U_P indicate the system utilization for the simulations without and with priority, respectively.

Scenario 1: Variation of number of users.

Fig.4 depicts the results of the simulations for the throughput when varying the number of users N in a cell.

It is seen that increasing the number of users and consequently the λ , the total system throughput increases in the same proportion up to 20 users. For 25 users simulation case, the packet arrival rate is higher than the serving capacity of the system, so that the total throughput is not proportional. The limitation is only observed for packets with priority 4 and the throughputs for the other queues are not affected and kept proportional.

As can be seen in Fig.5 the average packet delays are significantly different for different priorities in simulations with many users (high system utilization). With few users (5 and 10) the delays observed are not so distinct among different priorities, and in this case the traffic priority strategy does not offer much benefit for the majority of the applications. But with the increase of the number of users, priority strategy showed to be fundamental. With 20 users the packet delay of priority 4 is close to 1 second while the

packets with priority 1 experienced delay close to the case with few users (9 ms)

When priority strategy is not used, for 20 users an average delay of 75 ms added is observed and this may cause a low performance depending on the application and the delay added in the rest of the network.

Thus the introduction of traffic priority scheduler is worthwhile in conditions of high usage of the system. This is the normal condition of operation of a commercial network, since the carrier wants to optimize its resource to maximize profitability. But even if the system is designed for few users per cell, circumstances may occur where many users ask for services due to the mobility of the users and their locations are unpredictable. Thus, the use of the priority scheduler could soften the impacts of many users moving into a common cell.

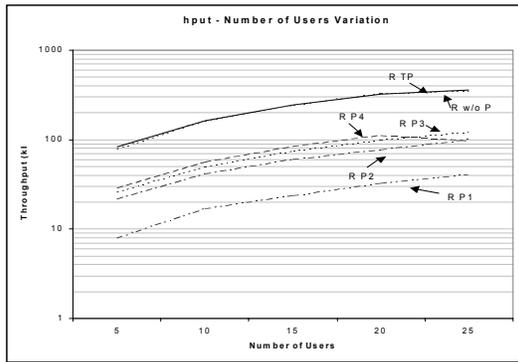


Figure 4. Throughput performance for the variation of number of users.

Fig.6 depicts the utilization of the system with the variation of number of users. The utilization grows linearly with the increase of the number of users until 20 users. Above this number the system gets saturated with almost 100% utilization.

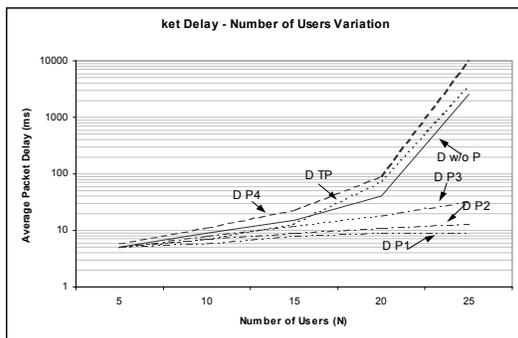


Figure 5. Average packet delay versus variation of number of users.

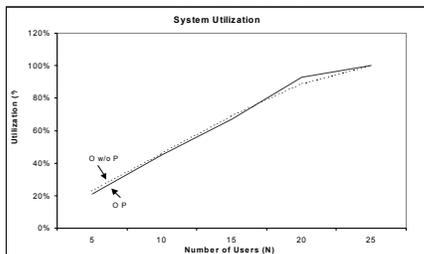


Figure 6. System utilization versus variation of number of users.

Scenario 2: Variation of arrival bit rate.

Figs.7, 8 and 9 present the simulation results obtained for the throughput, average packet delay and utilization, respectively, when the bit arrival rate is changed.

As the increasing in R_u rate also increases the λ , the curves for this scenario are very close to the ones presented in scenario 1. So, when the system utilization gets close to the maximum utilization, packets of lower priority are served with an enormous delay, but guarantying that the higher priority packets maintain acceptable delay levels. Although these both scenarios have similar characteristics, it was decided to analyze it, since the network can be designed to support a small number of users, but if the users have or change to a different usage profile with a demand for higher data rates, the priority scheduler makes itself worthwhile in order to not compromise the performance of the applications of higher priority.

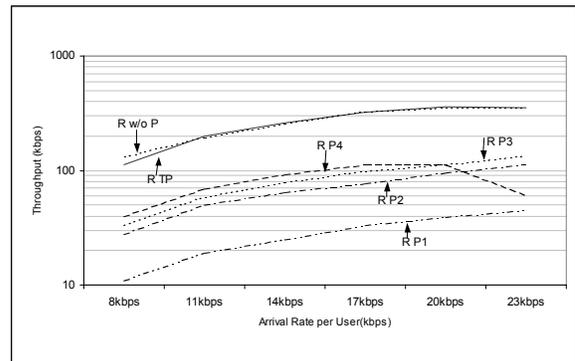


Figure 7. Throughput versus variation of arrival bit rate.

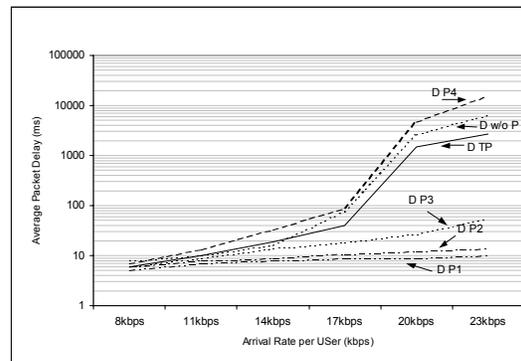


Figure 8. Average packet delay versus variation of bit arrival rate.

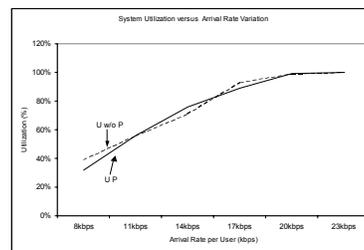


Figure 9. System utilization versus variation of arrival bit rate.

Scenario 3: Variation of network planning accuracy.

Figs.10, 11 and 12 present the simulation results obtained for the throughput, average packet delay and utilization, respectively, when the accuracy of the network plan is changed.

A poor RF plan leads to the higher system utilization, since the proportion of users in classes with lower speeds increases and these users have also longer service time per packet, causing congestion in the server. Thus, traffic priority scheduler showed to be worthwhile in networks that are not able to have good RF plan and in well design networks the scheduler does not show to be essential, since classes with higher data rates have shorter service times.

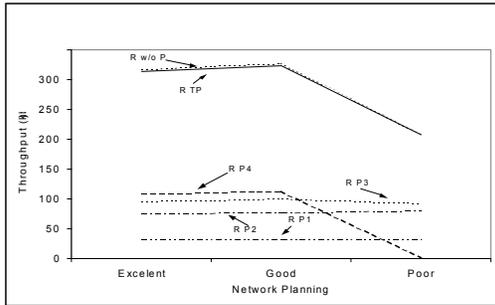


Figure 10. Throughput versus variation of cell size.

When simulating an excelente network design and going to a poor network design, the utilization of the system goes from 53% to 100% and in the later case the queue grows constantly, causing the packets of priority 4 not to be served.

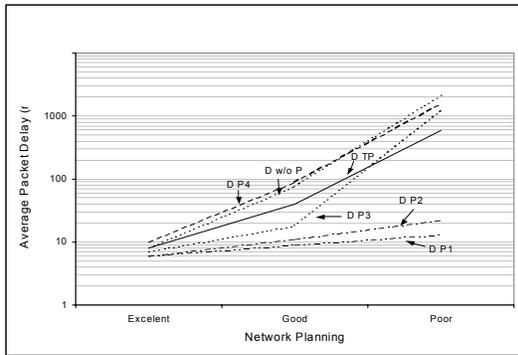


Figure 11. Average packet delay versus variation of cell size.

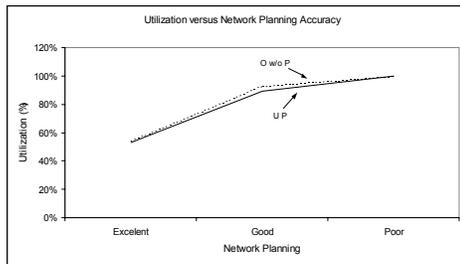


Figure 12. System utilization versus variation of cell size.

Scenario 4: Variation of priority distribution.

Tabs. 5, 6 and 7 present the simulation results for the throughput, average packet delay and utilization, respectively, when the distribution of the priorities is changed. As expected there is no any impact in the throughput with the altering of the priority distribution, maintaining the value, just re-distributing proportionally among the priorities. Even increasing the share of priority 1, the delays suffered from the packets in this priority are not severally impacted. For instance, in the 60/20/10/10 simulation case (it means 60%, 20%, 10% and 10% for priorities 1, 2, 3 and 4, respectively) the packets of priority 1 have a delay of 14 ms that is still not critical to most of the applications depending on the delay experienced in the rest of the network. But in this case, an increase in the system average packet delay is observed. The use of only 2 priority queues (50/50/0/0) already brought significant improvement for the higher priority. For instance the nonpriority scheme has an average packet delay of 75 ms while the higher priority packets have only 12 ms of average delay. This improvement is obtained in detriment for the lower priority packets that have an average delay of 93 ms.

Table 5. Throughput (in kbps) for the variation of priority distribution

	R TP	R P 1	R P 2	R P 3	R P 4
10/25/30/35	323	33	77	100	113
25/25/25/25	323	83	81	80	79
25/30/30/10	324	81	97	97	49
60/20/10/10	322	194	66	30	32
50/50/0/0	323	83	81	80	79
100/0/0/0	328				

Table 6. Average Packet Delay (in ms) for the variation of priority distribution.

	D T	D P 1	D P 2	D P 3	D P 4
10/25/30/35	40	9	11	18	89
25/25/25/25	47	10	14	27	142
25/30/30/10	53	10	15	42	223
60/20/10/10	70	14	46	139	395
50/50/0/0	53	12	93	0	0
100/0/0/0	75				

Table 7. System Utilization for the variation of priority distribution.

	System Utilization
10/25/30/35	89%
25/25/25/25	90%
25/30/30/10	91%
60/20/10/10	92%
50/50/0/0	90%
100/0/0/0	93%

5. CONCLUSIONS

In this article the performance analysis of the 1xEV-DO system with the introduction of priority classes at the air interface was presented. The priority scheduler considered in the analysis is simple and allows it to be implemented in 3G wireless systems in a very easy manner.

The analysis pointed out that the 1xEV-DO system is capable of providing high data rates in a wireless environment, but if service differentiation for applications and users is not provided, some disappointment with the service may arise due to the long average packet delay observed in high load nonpriority scheme.

The priority scheme adopted in the analysis showed to be essential in conditions of high system utilization, as in the case of many users or in the case of high arrival rate of packets.

6. REFERENCES

- [33] URL IMT-2000 <http://www.itu.int/osg/imt-project/index.html>
- [34] FPLMTS/IMT-2000 Standardization Callendar, M.H.; Eng, C. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1995. PIMRC'95. Wireless: Merging onto the Information Superhighway., Sixth IEEE International Symposium on , Volume: 3 , 1995 Page(s): 1387
- [35] TIA/EIA/IS-856 "CDMA2000, High Rate Packet Data Air Interface Specification"
- [36] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi "CDMA/HDR: A Bandwidth-Efficient High-Speed Wireless Data Service for Nomadic Users", IEEE Communications Magazine, pp.70-78, vol.38, July 2000
- [37] A.Jalali, R. Padovani and R. Pankaj, "Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency high-rate personal communication wireless system", IEEE Vehicular Technology Conference, Tokyo, May 2000
- [38] W. Chung, H. Lee, J. Moon "Downlink Capacity of CDMA/HDR", IEEE , pp. 1937-1941, 2001
- [39] Q. Bi and S. Vitebsky, "Performance Analysis of 3G-1X EVDO High Data Rate System", Wireless Communications and Networking Conference, 2002. 2002 IEEE, vol.1, Mar2002, pp: 389 –395.