Modelagem e Avaliação de Desempenho da Tecnologia Cdma2000 1xEV-DO para Aplicação no SBTvD

José Roberto Boisson de Marca[2], Flávio Pimentel Duarte[2], Guilherme D. G. Jaime[1], Edmundo de Souza e Silva[1], Rosa Maria Meri Leão[1], Patricia A. Berquó[2]

[1]LAND/PESC – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

[2]CETUC – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rio de Janeiro – RJ – Brasil

{gdjaime,flaviop,edumundo,rosam}@land.ufrj.br,
{jrbm,paberquo}@cetuc.puc-rio.br

Abstract. *The main goal of this work is to evaluate the performance of the Cdma2000 1xEV-DO technology applied in the interactive channel of the Brazilian System of Digital TV (SBTvD. This analysis is done using a simulation tool, based on the Tangram-II platform, that incorporates a detailed propagation model and can be applied in several morphologic scenarios. For the upper level application, the model considers Internet access through web browsers. This paper presents both throughput and latency results with varying number of users in the system attempting also to identify changes in the user quality of service due to the geographic position.*

Resumo. *Esse trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da tecnologia Cdma2000 1xEV-DO para aplicação no canal de interatividade no Sistema Brasileiro de TV Digital. Esta análise é feita através de uma ferramenta de simulação, baseada na plataforma Tangram II, que incorpora um detalhado modelo de propagação que pode ser aplicado para diferentes cenários morfológicos. Foi considerado que os usuários estarão utilizando o sistema para acessos à Internet através de web browsers. São apresentados resultados de desempenho em termos de vazão e retardo fim-a-fim para diferentes números de usuários no sistema buscando também identificar diferenças de comportamento devido à situação geográfica dos usuários.*

1. Introdução

Existe uma inegável demanda na sociedade atual por serviços de informação com uma crescente necessidade de maior banda. Esses serviços são acessados através de diferentes terminais, inclusive celulares, de diversos locais, por exemplo, local de trabalho e residências, e mais recentemente por vezes em movimento. Em 2004 o governo brasileiro lançou um programa de pesquisa em que um dos objetivos é permitir que o acesso a serviços de informação seja feito a partir do terminal de acesso (TA) do Sistema Brasileiro de TV Digital. Em particular é desejo do governo permitir a inserção digital de camadas menos favorecidas da nossa sociedade empregando essa nova opção tecnológica. O trabalho aqui relatado se insere nesse esforço através do Projeto InterTV. Neste trabalho é feita uma avaliação inicial de uma particular tecnologia de acesso sem fio para uso na interface aérea do canal de interatividade do SBTvD. A tecnologia

escolhida foi o Cdma2000 1xEV-DO que foi concebido justamente para atender a demanda de transmissão de dados por pacote. O EV-DO opera como um sistema CDMA típico no enlace reverso (*downlink*) enquanto que no enlace direto (*uplink*) ele utiliza multiplexação por divisão no tempo (TDM). Este último enlace foi projetado para maximizar a vazão total da célula ou setor e permite uma taxa de pico de 2.4 Mbps. Foi desenvolvida uma simulação para o EV-DO, utilizando a plataforma Tangram II, em nível de rede buscando investigar qual a capacidade desta tecnologia de prover serviço a uma capacidade razoável (superior a 50 Kbps). Foi considerado que devido à necessidade que o terminal de acesso seja barato ele terá uma capacidade de processamento e armazenagem limitada e, portanto, a vasta maioria dos serviços será obtida através de acesso a web, o que influenciou a escolha do modelo de tráfego. Também foi considerado que a maioria dos TAs estará parado com uma população bem menor de usuários se deslocando a uma velocidade de cerca de 3 Km/h. Essa hipótese de mobilidade influenciou a escolha de alguns parâmetros do modelo e de funcionalidades do EV-DO. Vale a pena salientar também que para a aplicação no canal de interatividade é interessante que a qualidade de serviço oferecida aos diversos usuários não seja muito diferente e em particular não seja dependente da posição geográfica do terminal, já que, como os mesmos em maioria serão estáticos, essa desvantagem será duradoura. Os resultados aqui apresentados consideram também essa particularidade.

Além dos documentos relativos à definição do padrão Cdma2000 1xEV-DO [Wu 2002] e [3GPP2 2001], diversos trabalhos de avaliação de desempenho do padrão Cdma2000 1xEV-DO estão disponíveis na literatura. Contudo, grande parte destes trabalhos aborda questões específicas como modelagem do nível físico. O trabalho de [Esteves 2001] apresentou as principais características da camada física do padrão IS-85 e avaliou sua capacidade por meio de simulações e soluções analíticas. Não foram realizadas análises em nível de enlace. Já [Jalali 2000] propuseram um modelo de simulação para o canal direto do Cdma2000 1xEV-DO considerando usuários que mudavam de posição em intervalos de tempo pré-definidos sem apresentar o modelo de tráfego. Em uma continuação deste trabalho [Esteves 2003] estudaram o desempenho do Cdma2000 1xEV-DO considerando usuários fixos visando obter o número de usuários necessários para alcançar a vazão máxima do sistema. Para isso foram realizadas simulações nos níveis de rede, enlace e físico, sendo avaliada a vazão do sistema por setor em função da atenuação total. O trabalho de [Esteves 2003] difere dos estudos realizados neste artigo, porque um dos objetivos desse último é determinar o número máximo de usuários que podem ser admitidos em um setor respeitando uma determinada QoS, novamente sem detalhamento dos modelos de tráfego utilizados. Em [Mohanty 2002] foi usado o simulador OPNET para avaliação de desempenho em nível de aplicação do EV-DO concluindo que em um ambiente de 4 usuários FTP e 11 usuários web o tempo de resposta médio é comparável ao de uma rede ISDN de 128 Kbps dedicada para cada usuário. Finalmente, [Huang 2002] avaliaram a vazão dos canais direto e reverso em um setor EV-DO sem que os modelos de usuários e a ferramenta de simulação fossem descritos.

Na próxima seção é feita uma breve apresentação das principais características da tecnologia EV-DO. A seguir é feita a descrição detalhada do modelo de simulação, incluindo os modelos de propagação e de tráfego empregados. Os resultados obtidos com a simulação em termos de vazão e latência para diferentes números de usuários são apresentados e analisados na Seção 4. Conclusões finais são oferecidas na Seção 5.

2. Tecnologia Cdma 2000 1xEV-DO

A tecnologia celular EV-DO faz parte da família de técnicas Cdma2000 1x otimizada para serviços de dados por pacote. Em particular o enlace direto (ou *downlink*) desta técnica, também conhecida por padrão IS-856 [3GPP2 2001], permite uma taxa de transmissão de pico superior a 2.4 Mbps. Em verdade, o enlace direto (na direção ERB para TA) emprega o esquema de Multiplexação por Divisão no Tempo (TDM) e, portanto, em cada janela de tempo (*slot*), com duração igual a 1.67 ms, é feita a transmissão para um e apenas um usuário, sempre utilizando a potência máxima da ERB. Essa transmissão pode ser feita em diferentes taxas, e a escolha da taxa específica, a cada instante, depende da razão entre Portadora/Interferência (C/I) percebida pelo TA, que passa essa informação para a ERB (ou ponto de acesso) através de um campo de bits (*DRC – Data Rate Control*) no enlace reverso.

Além do conteúdo de informação, o sinal no enlace reverso inclui um sinal piloto e um sinal de controle de acesso ao meio (MAC), sendo todos esses três sinais multiplexados no tempo. Por sua vez o sinal de camada MAC é composto de dois sinais multiplexados por divisão de código quais sejam o sinal de controle de potência (RPC) e o bit de controle de atividade do canal reverso (RA). Esse último bit é empregado pela ERB para sinalizar aos terminais na sua área de cobertura do estado de congestionamento do enlace reverso. A forma como é feito esse controle de congestionamento será abordada na seção 3.3.4. O canal lógico RPC serve para implementar o controle de potência a um sistema empregando a técnica de múltiplo acesso por divisão de código (CDMA), sendo que os bits empregados para esse fim são enviados a uma freqüência de 600 Hz. Já o sinal piloto permite uma demodulação coerente no enlace direto e também é usado em outras funções como, por exemplo, na estimativa da qualidade do canal.

O sinal no enlace direto já multiplexado é espalhado pelo método de seqüência direta (DS), com uma taxa de chips de 1.2288 Mbps, ocupando uma faixa de freqüência com largura de 1.25MHz, compatível, portanto, com os sistemas IS-95 e Cdma2000 1x.

Como a grande maioria das técnicas modernas de comunicações sem fio, o EV-DO também faz uso de um esquema adaptativo de modulação/codificação, tanto no enlace direto quanto no enlace reverso. A Tabela 1 ilustra as taxas disponíveis no enlace direto, com os respectivos tamanhos dos pacotes em bytes, e esquemas de codificação e modulação empregados. Em verdade as taxas de 307.2, 614.4 e 1228.8 também permitem uma implementação com o dobro do número de *slots*/pacote com relação aos dados da Tabela 1.

Ressalte-se que para as taxas mais baixas, o tempo para transmissão no enlace direto de uma determinada quantidade de informação ocupa um maior número de slots do que quando a taxa é alta, ou seja, ocupa o enlace por um tempo maior.

A escolha da taxa de transmissão para um determinado usuário em certo instante depende da razão C/I, ou, equivalentemente, da razão E_b/N_t, percebida pelo mesmo, onde N_t é o nível espectral da interferência sofrida de outras ERBs adicionada ao ruído térmico. A partir da Tabela 1 percebe-se que quanto maior a taxa utilizada, menos robusto é o esquema de modulação/codificação empregado. Portanto as maiores taxas de transmissão só poderão ser usadas em condições muito favoráveis de propagação ou com o sistema bastante descarregado.

A Tabela 2 exemplifica os valores da razão (SINR) entre potência da portadora e potência interferente total, incluindo ruído térmico, necessários para cada uma das taxas de transmissão para que seja garantida uma probabilidade de erro de pacote (PER) de 1% no enlace direto. O parâmetro DRC, como já mencionado, deve ser enviado pelo TA para a ERB, através do enlace reverso, informando a situação do TA naquele momento em termos SINR indicando, portanto, qual a taxa máxima que ele pode receber informação respeitando o critério de qualidade.

Tabela 1: Modos de Transmissão Disponíveis para o Enlace Direto do EV-DO, Rev.0.

Taxa de bits (Kb/s)	Tamanho do Pacote (Bytes)	Duração do Pacote (ms)	Duração do Pacote (slots)	Taxa de FEC (b/símbolo)	Modulação
38.4	128	26.67	16	1/4	QPSK
76.8	128	13.33	8	1/4	QPSK
102.6	128	10	6	1/4	QPSK
153.6	128	6.67	4	1/4	QPSK
204.8	128	5	3	1/4	QPSK
307.2	128	3.33	2	1/4	QPSK
614.4	128	1.67	1	1/4	QPSK
921.6	192	1.67	1	3/8	QPSK
1228.8	256	1.67	1	1/2	QPSK
1843.2	384	1.67	1	1/2	8PSK
2457.6	512	1.67	1	1/2	16QAM

Tabela 2. Valor da SINR necessária para transmissão em cada uma das taxas possíveis no enlace direto para uma PER de 1%.

DRC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Taxa (K												

as ais baixas ocupa vErios
slo s, a va84o agr ga3a 3o sis a cai subs a5cial 5 s fr qu 5 5 for 3a3a

prioridade a um usuário em situação de distância ou propagação desfavorável.

O enlace reverso do EV-DO permite também o uso da técnica de transmissão gradual dos bits de paridade (TgiP), também conhecida neste contexto por *Early Terminati n*. Essa estratégia permite que o pacote seja transmitido com o mínimo de redundância que as condições momentâneas do canal e de interferência permitem. Existe um intervalo de tempo entre a medição do valor de DRC e quando o pacote é transmitido com essa taxa pela ERB. Quando o TA está em movimento esses erros na estimativa do canal podem reduzir a eficiência do sistema. O método de *Early Terminati n* busca corrigir esse problema. No entanto para TAs estacionários ou se movendo em velocidades baixas o ganho propiciado pelo TgiP é baixo e por essa razão essa técnica não será modelada neste trabalho.

O enlace reverso opera no método de acesso CDMA, já bastante conhecido, mas também permite o uso de diferentes taxas de transmissão. A taxa real de transmissão depende do carregamento no setor/célula determinado pela ERB e também das condições de propagação/distância de cada terminal de acesso. O ajuste das taxas, devido ao carregamento, é feito de forma probabilística, ou seja, ao comando da ERB cada terminal ajusta ou não a sua taxa na direção (aumento ou decréscimo) de acordo com uma probabilidade que varia de acordo com o valor da taxa que está sendo usada naquele momento. Para que o terminal possa usufruir de uma taxa maior é necessário que ele transmita a uma potência maior, portanto se ele estiver muito distante da ERB ele em geral ficará restrito a taxas de transmissão mais baixas do que os usuários localizados próximos à ERB, embora o valor exato de cada taxa dependa do carregamento instantâneo da célula/setor.

A Tabela 3 ilustra as taxas de modulação disponíveis no enlace reverso com as respectivas durações de cada pacote. Note que todos os esquemas usam a mesma modulação e os pacotes têm todos a mesma duração, em unidades de tempo, independentes da taxa escolhida.

Tabela 3. Taxas de bit do enlace reverso correspondentes a diversos parâmetros.

Taxa de Dados (Kbps)	Tamanho do Pacote (Bytes)	Duração do Pacote (ms)	Tamanho do Pacote (slots)	Modulação
9.6	512	53.33	32	BPSK
19.2	1024	53.33	32	BPSK
38.4	2048	53.33	32	BPSK
76.8	4096	53.33	32	BPSK
153.6	8192	53.33	32	BPSK

Na Tabela 4 são fornecidos os ganhos de potência com relação ao canal piloto com que devem ser transmitidos os sinais em cada uma das taxas. Assim como no enlace direto também no enlace reverso terminais mais distantes da ERB terão mais dificuldades de trabalhar com as taxas mais altas devido à limitação de potência do terminal.

Além do canal de tráfego de dados o enlace direto também inclui um canal piloto, um canal de confirmação (ACK) e o canal MAC. O canal MAC é subdividido em dois outros canais lógicos, a saber: o DRC, cuja aplicação já foi discutida e o RRI (*reverse rate indicat r*) que informa a ERB a taxa que está sendo utilizada no enlace reverso. A partir do momento que uma conexão é estabelecida entre a ERB e o TA este

último transmite continuamente nos canais piloto, DRC e RRI. No entanto o terminal só transmite no canal ACK quando é detectada a transmissão de um pacote de dados a ele destinada no enlace direto. A função do canal ACK é, portanto, informar se um pacote enviado no enlace direto foi recebido corretamente. No enlace reverso, assim como em outros sistemas CDMA, é possível e desejável o uso de *soft handoff*.

Tabela 4. Potência adicional com relação ao nível do piloto necessária para transmissão em cada uma das taxas disponíveis.

Taxa de Bits (Kb/s)	9.6	19.2	38.4	76.8	153.6
Ganho de Potência (em dB)	3.75	6.75	9.75	13.25	18.5

3. Modelo de Simulação

O objetivo principal desse modelo é determinar o número de usuários que uma antena pode servir mantendo uma qualidade mínima que será determinada em função de um conjunto de parâmetros. O modelo também se destina a estudar o raio de alcance conseguido pela antena em diversas condições de interferência, bem como observar a variação da qualidade de serviço de acordo com faixas de distância entre os usuários e a estação base.

O modelo a ser simulado consiste de uma população de usuários web utilizando o padrão Cdma2000 1xEV-DO para acesso à Internet. A implementação foi feita utilizando-se o ambiente Tangram II [Silva 2000] através da criação de três objetos: Usuário Web, Estação Base e Internet, como pode ser visto na Figura 1.

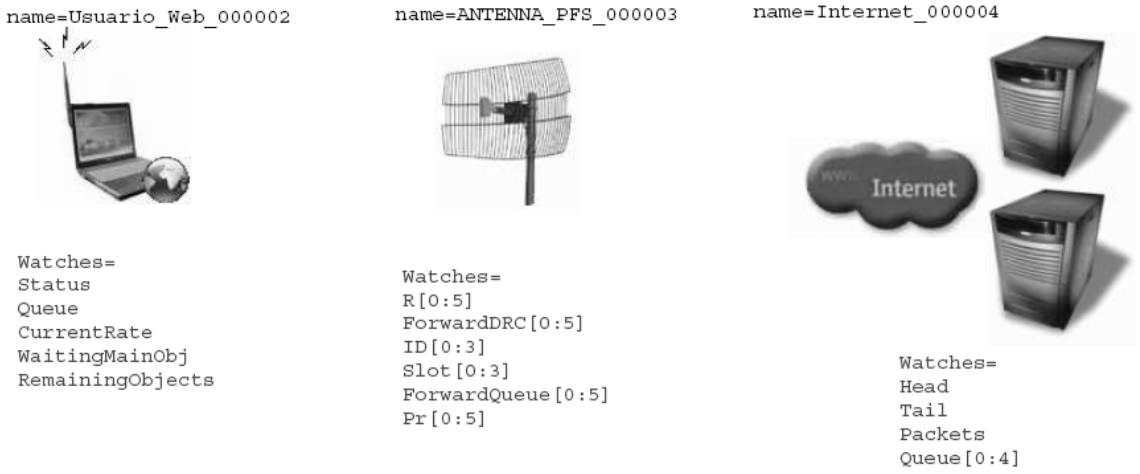

Figura 1. Objetos Implementados no Tangram 2

Nas subseções seguintes serão apresentados o modelo de propagação utilizado, o modelo do usuário com a respectiva configuração de distribuição de usuários, bem como o modelo do padrão EV-DO.

3.1. Modelo de Propagação

Para a modelagem do canal de propagação foi considerado que a perda de potência total L_{total}, expressa em dB, entre transmissor e receptor para ambiente *indoor* (existe pelo menos uma parede ou laje entre o transmissor e o receptor) em um cenário de edificações urbano é determinada por:

$$L_{total}[dB] = L_{propagação}[dB] + L_{penetração}[dB] + D[dB] \quad (1)$$

Onde: $L_{propagação}[dB]$ é a perda devido às condições do canal, $L_{penetração}[dB]$ é a perda de penetração ocorrida quando o sinal atravessa paredes e $D[dB]$ representa o efeito do desvanecimento plano (não-seletivo em freqüência) observado no percurso. Para um ambiente em que o sinal não atravessa paredes (tanto transmissor quanto o receptor se encontram fora de edificações), o termo que representa a perda de penetração deve ser eliminado. A seguir é feita a descrição de como é feito o cálculo de cada um dos termos da Equação (1).

3.1.1. Perda de Propagação

O modelo utilizado para medir as perdas provocadas pelas diversas condições do canal por onde o sinal se propaga é o modelo [Okumura 1968] e [Okumura-Hata] de Okumura-Hata que fornece o valor mediano da perda de propagação em função dos parâmetros: freqüência da portadora f_c (expressa em MHz), distância d (em Km) do terminal de acesso à base, altura da antena do terminal de acesso ao solo h_{TA} (representada em metros), e altura da antena da ERB ao solo h_{ERB} (em metros). Para validade do modelo as seguintes restrições se aplicam: $150 \le f_c \le 1500 MHz$; $30 \le h_{ERB} \le 200 m$; $1 \le h_{TA} \le 10 m$ e $1 \le d \le 20 km$.

A perda de propagação é calculada de forma distinta para cada cenário de edificações (morfológico). Para regiões com grande densidade urbanística e edifícios com dois ou mais andares, a perda de propagação será dada por:

$$L_{urbano}[dB] = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \cdot \log h_{ERB} - a(h_{TA}) + (44.9 - 6.55 \log h_{ERB}) \log d \quad (2)$$

O fator de correção $\alpha(h_{TA})$ permite diferenciar os cenários urbanos de acordo com a densidade de edificações. Para um cenário urbano denso (UD) foi utilizado:

$$a(h_{TA})[dB] = 3.2[\log(11.75 h_{TA})]^2 - 4.97 \quad (3)$$

Já para um cenário de menor densidade, aqui denominado de cenário urbano médio (UM) é empregada a expressão:

$$a(h_{TA})[dB] = (1.1 \log f_c - 0.7) h_{TA} - (1.56 \log f_c - 0.8) \quad (4)$$

Nas simulações aqui apresentadas foi utilizado apenas o cenário urbano denso com os seguintes parâmetros: $f_c = 450\ MHz$, $h_{ERB} = 40\ m$ e $h_{TA} = 1.5\ m$.

3.1.2 Perda de Penetração

A perda de penetração é a principal atenuação que ocorre em um ambiente interno (*indoor*), sendo inteiramente dependente do material das paredes externas e internas, o que significa que esse fator será variável de acordo com a construção em análise e a freqüência utilizada. Neste trabalho a perda de penetração média estimada será de $L_{penetração}[dB] = 10$.

3.1.3 Desvanecimento por Sombreamento

Além das perdas por distância e por penetração, outro fator que afeta o nível do sinal recebido pelo terminal de acesso, mesmo para terminais estacionários é o desvanecimento lento causado por obstáculos no percurso do sinal e gerando áreas de

sombreamento. A componente D[dB] pode ser modelada por uma variável aleatória com função densidade de probabilidade log-normal com média nula e desvio padrão σ_D[dB] variando de acordo com o tipo de cenário morfológico e com o ambiente de transmissão. Neste estudo foi utilizado o valor σ_D= 8 para o cenário UD.

3.2. Modelo do Usuário

Para o modelo de usuários proposto, as seguintes hipóteses foram consideradas: (i) Não há entrada e saída de usuários no sistema; (ii) Considera-se que os usuários são fixos, isto é, não há mobilidade já que este é o cenário predominante do SBTvD; (iii) Considera-se que o usuário em nenhum momento transmite/recebe dados para/de mais de uma única antena.

O modelo do usuário *web* foi construído com base em [Leão 2000] e está ilustrado no lado esquerdo da Figura 2.

O modelo usado para as requisições *web* é do tipo *ON-OFF*. Quando um usuário WWW clica em uma ligação de hipertexto, várias requisições WWW podem se seguir. A primeira transmite a requisição do usuário ao servidor, e as subseqüentes são geradas automaticamente pelo cliente de forma a obter, por exemplo, imagens da página durante o processo de *download* desta. Quando a requisição do usuário é satisfeita, normalmente segue-se um intervalo para que os dados sejam absorvidos antes de uma nova requisição.

A identificação de um período de *ON* (que pode incluir mais de uma requisição de usuário) depende de algum valor arbitrado durante as medições. Em [Deng 1996] requisições a intervalos inferiores a 60 segundos foram considerados como pertencentes ao período *ON*. Conseqüentemente, um intervalo entre requisições maior que 60 segundos é considerado como *OFF*. Desta forma, em [Deng 1996] foram identificadas três distribuições para o modelo de um usuário WWW: a distribuição Weibull foi usada para o período de *ON,* a Pareto para o período de *OFF* e para representar o intervalo entre requisições durante um período *ON,* uma distribuição Weibull foi novamente usada, mas com parâmetros distintos da primeira.

Como pode ser visto na Figura 2, a modelagem do usuário abrange tanto o comportamento do cliente quanto parte dos mecanismos da estação base. Esta abordagem foi escolhida por motivos de simplificação da implementação do modelo proposto. Desta maneira, tanto o retorno das requisições *web* quanto do tráfego de voz sobre IP, foram representados no próprio objeto do usuário, bem como os temporizadores de estado da conexão de camada de enlace.

Para que um pacote de dados seja gerado, é necessário que o usuário esteja no estado *ON*. Ao ser gerado, o pacote segue para uma fila onde espera a sua vez para ser transmitido à Internet. Assim que chega à Internet, o pacote entra em uma fila com infinitos servidores. Desta maneira é possível simular o atraso gerado pela Internet (RTT) desde o momento que um pacote é transmitido até o momento em que uma resposta é recebida pela estação base [Tamás 1999].

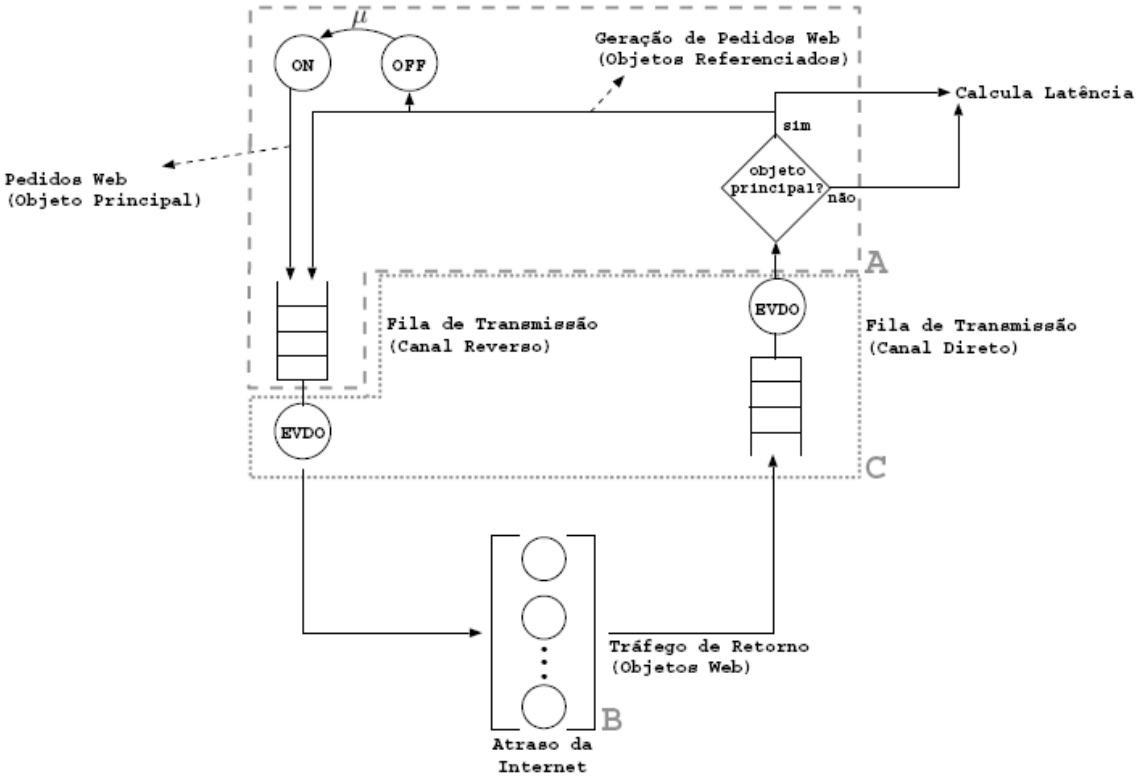

Figura 2. Visão geral do modelo implementado

Como pode ser visto em [Hyoung-Kee 1999], os tráfegos gerados por diferentes tipos de requisições *web* são sensivelmente diferentes. Mais especificamente, a partir do momento em que um usuário *web* está ativo, a primeira requisição por ele gerada resultará no retorno de um arquivo HTML chamado objeto principal. Todas as requisições *web* geradas a partir deste momento são decorrentes dos objetos (*in-line*) referenciados pelo objeto principal, como figuras, outras páginas, sons e até vídeos.

Para tornar nosso modelo mais preciso, levamos em consideração a diferença entre as distribuições do tamanho dos dois tipos de objetos acima citados. Nesta abordagem, a primeira requisição *web* gera o retorno de um objeto principal e todas as requisições subseqüentes geram retorno de objetos *in-line*. Nosso modelo utiliza a distribuição log-normal para modelar os tamanhos destes retornos, sendo que os parâmetros são diferentes para os dois casos em questão.

3.3. Modelo das Camadas Física e de Enlace

Para a simulação proposta para o sistema EV-DO, hipóteses e considerações iniciais serão feitas:

(i) Considera-se um sistema sem setorização (antena da ERB omnidirecional); sistema com setorização terá sua capacidade aumentada (2,5x para setores de 120^0) em termos de usuários/Km^2, embora a cobertura de *downlink* na borda entre dois setores possa ficar comprometida devido à interferência;

(ii) Conforme já mencionado, apesar de a especificação do padrão não definir qual deve ser a política de escalonamento de canais diretos, aqui será usada a política denominada *Proportional Fair Scheduling* comumente usada pelos estudos

disponíveis na literatura [Esteves 2001], [Jalali 2000], [Esteves 2003], [Mohanty 2002];

(iii) Por motivos já expostos, TGP (*Early Termination*) não foi implementada;

(iv) Haverá somente uma estação base no modelo, portanto não foi modelado o mecanismo de *soft handoff*.

A seguir serão descritas as implementações das funcionalidades do EV-DO que são levadas em conta pelo modelo proposto.

3.3.1. Controle de Potência

Assim como em outras tecnologias CDMA, o controle de potência no enlace reverso da tecnologia EV-DO é implementado em três etapas. Primeiramente temos o chamado controle de potência em malha aberta (CPA) que fornece uma estimativa preliminar da potência que o terminal deve usar para transmissão. O terminal estima a potência a partir da potência recebida no enlace direto. Como a potência empregada pela ERB é informada pela mesma no canal de controle, é possível estimar a perda de propagação que é sofrida pelo sinal no *downlink*.

A segunda fase do controle de potência é conhecida por controle de malha fechada (CPF). Esta segunda fase, que corresponde a um ajuste fino, é necessária porque a estimativa feita no CPA é feita em uma freqüência diferente daquela empregada para transmissão e, portanto com condições de canal que podem ser diferentes. O CPF também leva em consideração um parâmetro de qualidade, neste caso o valor da razão $\Gamma_d = E_c/(N_0 + I_{0r}/W)$ para que a probabilidade de erro de pacote (PER) esteja limitada a 1% no máximo. A quantidade E_c é a energia recebida no canal piloto para aquele usuário e I_{0r} é a potência interferente total percebida. Caso a razão calculada seja inferior ao limiar Γ_d o terminal receberá um comando de aumentar sua potência de transmissão em 1 dB. Caso contrário ele receberá um comando para diminuí-la do mesmo degrau de ajuste. Esses comandos ocorrem a uma freqüência de 600 Hz e neste trabalho os valores de Γ_d que variam ligeiramente dependendo da taxa empregada [Esteves 2002], foram tomados no intervalo entre -21 e -22.5 dBm.

Finalmente existe a possibilidade de uso do controle de potência externo (CPE). Neste controle a ERB, a partir de medidas do valor de PER que está efetivamente sendo alcançado faz ajustes no valor de Γ_d. Neste trabalho o CPE não foi empregado fazendo-se a hipótese que os valores adotados para o Γ_d são os ideais. Hipótese que é razoável para o tipo de simulação realizado e o padrão de mobilidade esperado para os usuários.

O valor determinado, como resultado do CPA e do CPF, para potência de transmissão do canal piloto do TA (P_{PILOTO}) deve então ser comparado com o valor da potência máxima (P_{MAX}) do TA subtraído do ganho para se alcançar a taxa desejada. Desta forma pode ser determinado se o cliente tem potência suficiente para transmitir nessa taxa, ou seja, $P_{PILOTO} > P_{MÁX} - DataGain[CurrentRate]$. Onde *DataGain[CurrentRate]* é o ganho necessário para se transmitir na taxa *CurrentRate*. Se a potência (P_T) que deve ser usada pelo cliente for maior do que a potência máxima disponível no terminal, o *DataGain* é reduzido até que haja potência suficiente para a transmissão ou até que *DataGain* alcance seu valor mínimo.

3.3.2. Estimativa do DRC

Para estimar a interferência proveniente de outras células no enlace direto foi empregado um método geométrico, já que apenas uma célula foi simulada. A geometria considerada é ilustrada na Figura 3. Nesta figura, são consideradas duas situações: (i) o usuário encontra-se na reta que liga o centro da célula a um vértice e (ii) o usuário encontra-se na reta perpendicular à aresta e que passa pelo centro da célula. Essas duas situações serão chamadas, respectivamente, de geometrias D e E. As demais situações, exemplificadas pela área sombreada, serão consideradas como combinações lineares das geometrias D e E. Neste cálculo foi considerado que a potência de transmissão e a área de cobertura de todas as células são iguais. O valor de DRC escolhido é obtido de acordo com o valor da razão (SINR) entre a potência recebida pelo terminal de sua ERB, calculada pela simulação, e a potência interferente calculada previamente por este método adicionado ao ruído térmico. Os valores de limiares de SINR para determinação do DRC são apresentados na Tabela 2.

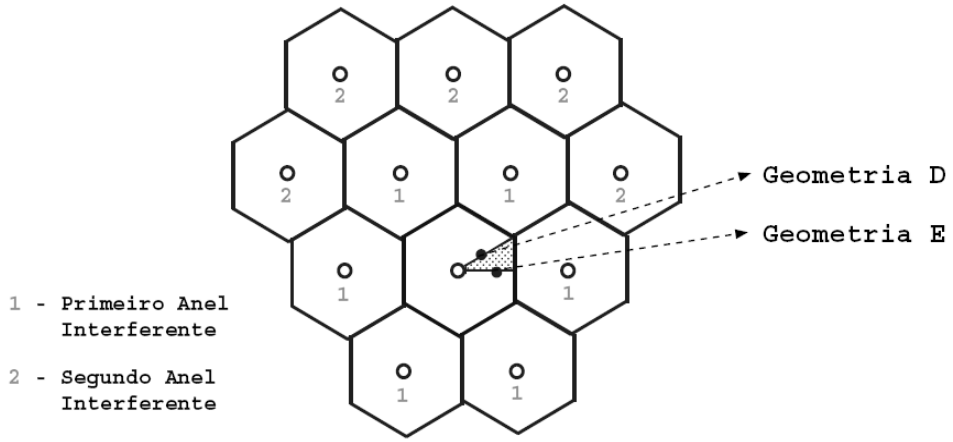

Figura 3. Parâmetros do modelo da perda por sombreamento

3.3.3 Algoritmo de Escalonamento

Do ponto de vista do objeto Usuário, a implementação do modelo do canal reverso é baseada em [Huang 2002], sendo uma aproximação, amplamente utilizada pela literatura [Lucent, K.S. Gilhousen], que provê estimativas aceitáveis para o comportamento do sistema.

Já na estação rádio-base, o atendimento da fila do canal direto é realizado segundo o algoritmo *Proportional Fair Scheduiling* (PFS) [Qiang 2002]. O PFS é dividido em duas etapas. A primeira consiste em escolher o usuário com a maior relação $DRC_i(t)/R_i(t)$, onde $DRC_i(t)$ é a taxa requisitada pelo usuário i e $R_i(t)$ é a taxa média na qual a estação base transmitiu para esse mesmo usuário, isto é:

$$j = \underset{i}{\arg\max}\left[\frac{DRC_i(t)}{R_i(t)}\right] \tag{5}$$

Na segunda etapa são atualizadas as taxas médias de cada usuário usando:

$$Ri(t+1) = (1-\alpha)Ri(t) + \alpha CRTi(t)\begin{cases} CRTi(t) = DRCi & \text{se } i = j \\ CRTi(t) = 0 & \text{se } i \neq j \end{cases} \tag{6}$$

Onde *CRTi(t)* é a taxa de transmissão atual para o usuário *i* no instante de tempo *t*. O parâmetro α controla o compromisso entre a otimização da vazão e a latência observada por um cliente que recebe o sinal da ERB com baixa relação sinal ruído.

3.3.4. Algoritmo do Controle de Congestionamento

A estação base monitora a potência total recebida no enlace reverso. Se essa potência ultrapassar um limite, a estação envia uma mensagem requisitando que os usuários baixem a sua taxa de transmissão. De maneira análoga, se essa potência estiver abaixo desse limite, a estação envia uma mensagem dizendo que os usuários podem aumentar suas taxas. Essas mensagens são enviadas em todos os *slots* do canal direto. Em ambos os casos as alterações são feitas de forma probabilística, ou seja, cada terminal TA_i, aumenta a sua taxa com probabilidade p_i e decresce com probabilidade q_i, conforme o comando recebido. Os valores de p_i e q_i dependem da taxa de bits que o TA está transmitindo naquele momento e podem ser encontrados no padrão [3GPP2 2001]. A forma como o bit RA é calculado pela ERB não faz parte do padrão. Neste trabalho foi usado o conceito de elevação do nível de ruído (*noise rise*- δ_R) como forma de medir o nível de congestionamento. O parâmetro δ_R como sendo a razão entre a potência interferente total no setor e a potência de ruído térmico, ou seja: $\delta_R = N_t/N_0$, onde o carregamento no setor N_tW pode ser expresso por: $N_tW = NW + I_t$, sendo I_t igual a soma das potências recebidas de todos os TAs ativos naquela célula mais a potência proveniente de interferência inter-celular. Neste trabalho foi utilizado como limiar de sobrecarga o valor de $\delta_R = 5$. Quando este valor era ultrapassado a ERB emitia comando de redução de taxa de transmissão para seus terminais.

4. Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o modelo. Em todas as simulações apresentadas, a interferência observada pela ERB devida aos usuários das células vizinhas corresponde a 40% da interferência gerada pelos usuários da célula. A população variou de 10, 30, 40, 60 e 80 usuários, o raio da célula permaneceu fixo em quatro quilômetros e consideramos o cenário urbano denso. Os usuários foram posicionados aleatoriamente pela célula. Os valores *p* e *q* do algoritmo de controle de congestionamento foram mantidos como apresentado pelo padrão [3GPP2 2001]. As demais constantes utilizadas nas simulações são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Constantes utilizadas nas simulações

Descrição	Valor	Unidade
Potência Máxima do Cliente	23	dBm
Potência Máxima da Antena	55.8	dBm
Perda de Penetração	10	dB
Thermal Noise	-165	dB
α do PFS	0.001	
Cable Loss	3	dB
Antenna Gain	17	dB
Sensibilidade do Cliente	-119	dBm

O método usado para organização da simulação e obtenção dos resultados foi o das replicações independentes. Foram realizadas seis execuções do modelo, cada uma com duração igual a 4000 segundos. De cada execução foi descartado um período transiente de 2000 segundos. Este período foi calculado de forma que o evento de menor taxa ocorresse um certo número de vezes. O intervalo de confiança foi então obtido aproximando-se a variável aleatória $Z = \frac{(X-\theta)\sqrt{n}}{S}$ por uma variável aleatória *t-student* com seis graus de liberdade, onde X é a média amostral obtida na simulação, θ é a média real, n é o número de amostras e S é o desvio padrão amostral. Consideramos que a probabilidade da média real estar dentro do intervalo é igual a 0.95. O intervalo de confiança obtido para todas as medidas foram 20% maiores ou menores que a média real.

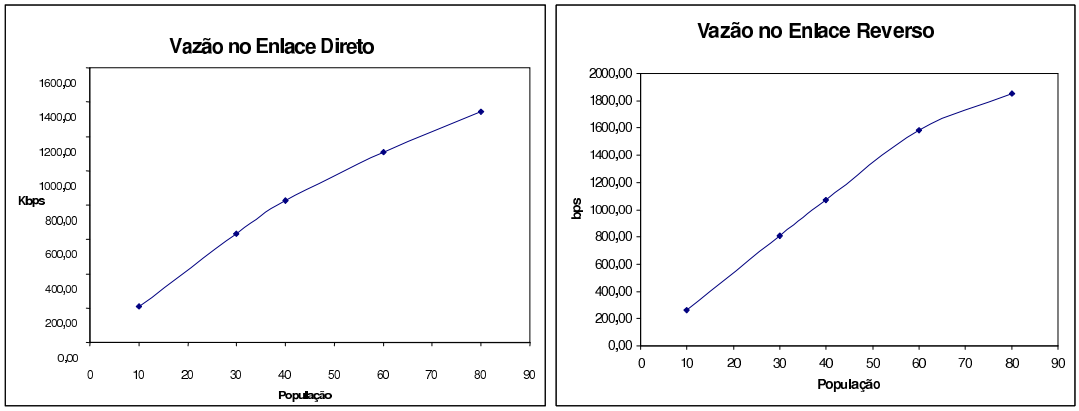

Figura 4. Vazões nos enlaces direto e reverso

A Figura 4 mostra a vazão nos enlaces direto e reverso em função da quantidade de usuários na célula. Pelos gráficos é possível observar um crescimento quase linear da vazão de ambos os enlaces quando a população aumenta. O enlace reverso apresenta uma vazão baixa devido à natureza assimétrica do tráfego gerado pelos usuários, onde a intensidade do tráfego de retorno é consideravelmente maior, ou seja, no canal reverso trafegam apenas requisições web de tamanho reduzido (200 bytes no modelo) enquanto no canal direto trafegam as páginas web com seus objetos multimídia. Desta forma, apesar da capacidade da tecnologia EV-DO no enlace direto ser superior a do enlace reverso, é bem provável que o limitante em termos de capacidade e eqüidade para o tipo de serviço e modelo de tráfego considerados seja ainda o enlace direto.

A Figura 5 apresenta as vazões individuais mínima, média e máxima em função do número de usuários na célula. Note que essas quantidades são as vazões fim a fim, ou seja, as vazões obtidas pela aplicação ou serviço sendo considerado e incluem uma solicitação que é enviada pelo enlace reverso e uma resposta que chega ao usuário pelo enlace direto levando também em consideração o retardo inserido ao atravessar a Internet, conforme ilustrado na Figura 2. Como esperado, essa vazão decresce com o aumento da população, já que os usuários são obrigados a dividir os recursos da ERB.

A Figura 6 apresenta as latências individuais mínima, média e máxima em função do número de usuários na célula. Pode-se observar que quando a população ultrapassa o valor de 60 usuários, a latência aumenta significativamente indicando a ultrapassagem do ponto de saturação do sistema para o modelo de tráfego considerado. Diferentemente da diferença entre as vazões observadas pelos usuários, a diferença entre

as latências aumenta, já que a prioridade deste protocolo é maximizar a vazão da rede e não a vazão media dos usuários, resultando em formação de fila nos usuários com piores condições, o que pode ser observado nas Figuras 6 e 7.

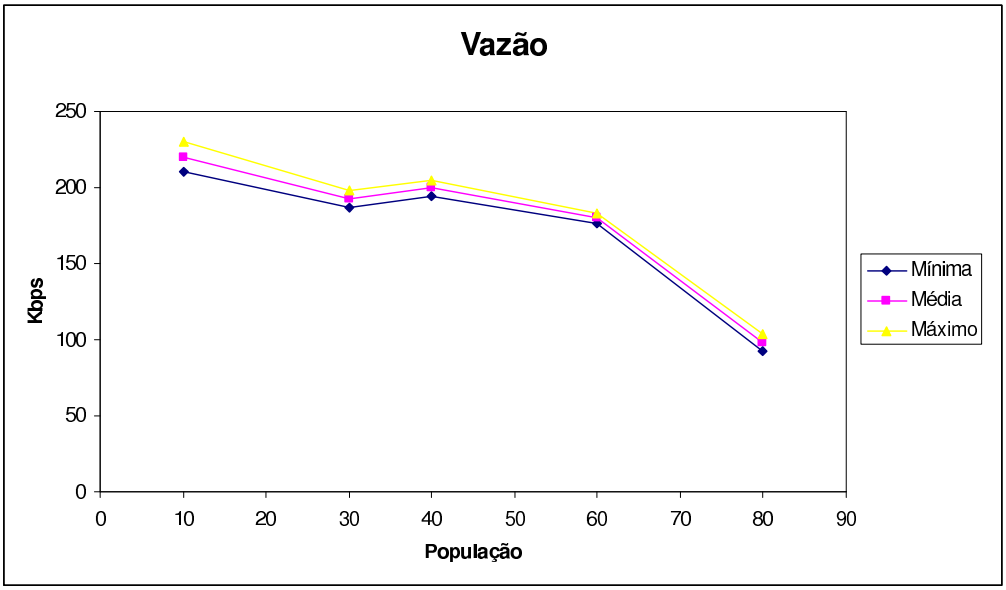

Figura 5. Vazão individual versus população

Na Figura 7 é possível observar como a distância do usuário à ERB e o tamanho da população influenciam a vazão e a latência individual. Observa-se que o posicionamento do usuário com relação à ERB influencia drasticamente na qualidade do serviço percebida pelo usuário. As unidades do eixo "Faixa" representam uma escala de 1 a 10, sendo 1 a posição mais próxima à antena e 10 a posição mais distante (mais próximo à borda). A vazão na faixa 10 pode ser menos de 20% daquela usufruída por um usuário na faixa 1. Sem dúvida a distância em relação à ERB parece ter mais influência na vazão obtida do que o aumento no tamanho da população. Pode-se notar também que para a população de 80 usuários a latência varia de 3 s (primeira faixa) até 50 s (última faixa) mostrando que a iniqüidade existente no sistema piora bastante com o aumento da população.

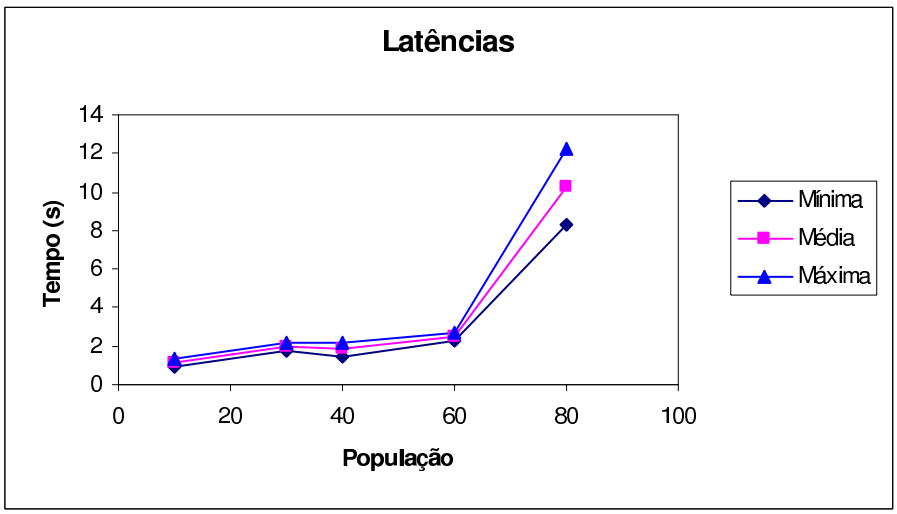

Figura 6. Latência individual versus população

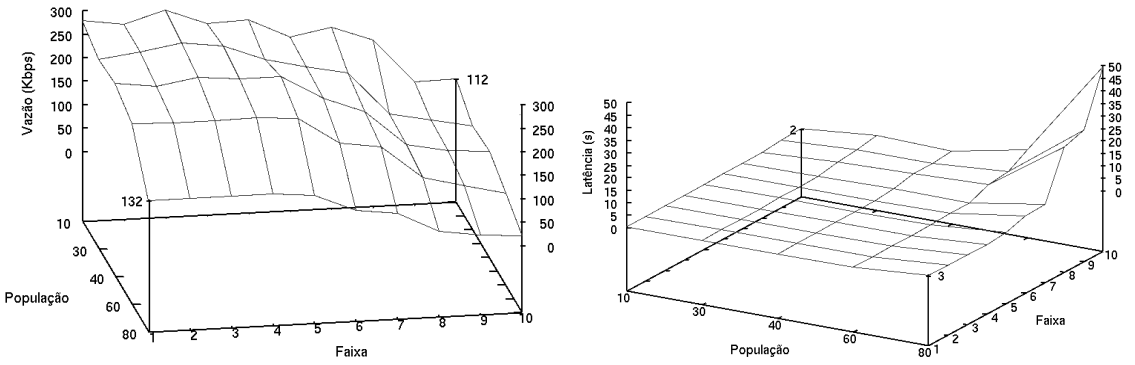

Figura 7. Vazão e latência individual em função da população e da distância para a ERB

5. Conclusão

Neste artigo foi apresentado um modelo detalhado do Cdma2000 1xEV-DO utilizando a ferramenta de simulação Tangram-II. Esse modelo serviu de base para estudar a influência de parâmetros como a população e a distância dos usuários em relação à ERB nas medidas de QoS, particularmente a vazão e a latência. Através dos resultados foi observado que para uma população de até 60 usuários: (i) a vazão e a latência obtidas encontram-se dento de limites aceitáveis e (ii) a qualidade percebida pelos usuários de cada faixa também não apresenta grandes variações.

A influência de parâmetros como o raio da célula, a interferência provocada pelas células vizinhas, o algoritmo de escalonamento e outros tipos de cenários morfológicos devem ser estudados futuramente para que se possa conhecer melhor como o Cdma2000 1xEV-DO reage a cada um destes fatores.

6. Referências

E. Esteves, M.I. Gurelli e M. Fan (2003), "Performance of Fixed Wireless Access with Cdma2000 1xEV-DO", Records, IEEE Vehic. Tech. Conf. - VTC, Fall, Orlando.

Y-K. Kim e B.K. Yi (2005), "3G Wireless and Cdma2000 Evolution in Korea", IEEE Communications Magazine, pgs. 36 -40.

N. Bhushan et. al (2005), "Cdma2000 1xEV-DO Revision A: A Physical Layer and MAC Layer Overview", IEEE Communications Magazine, 14 pgs.

Qiang Wu e Eduardo Esteves (2002). The Cdma2000 High rate Packer Data System.

3rd Generation Partnership Project 2 (2001). Cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification.

Eduardo Esteves, Mehmet I. Gurelli e Mingxi Fan (2003). Performance of fixed wireless access with Cdma2000 1xEV-DO. IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings.

Bubhu Mohanty, Ramin Rezaiifar, e Rajesh Pankaj (2002). Application layer capacity of the Cdma2000 1xEV wireless internet access system. World Wireless Congress.

C. Huang, Q. Bi, Asif Gandhi, Ron Brown, e Dongzhe Cui (2002). Forward and reverse link capacity for 1xEV-DO: third generation wireless high-speed data systems. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 1(7):871–875.

Eduardo Esteves (2001). On the reverse link capacity of Cdma2000 high rate packet data system.

A. Jalali, R. Padovani, e R. Pankaj (2000). Data throughput of Cdma-hdr a high efficiency-high data rate personal communication wireless system. IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings, 3(7):1854–1858.

E. D. Silva and R. M. Leão (2000). The TANGRAM-II Environment. In Proceedings of the 11th international Conference on Computer Performance Evaluation: Modelling Techniques and Tools.

R. M. M. Leão, E. de S. e Silva, T. R. T. Fudoli and G. D. G. Jaime (2001).“Um Modelo para avaliação do desempenho do mecanismo de acesso múltiplo do protocolo DOCSIS”. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações.

S. Deng. 1996 “Empirical Model of {WWW} Document Arrivals at Access Link”, Proceedings of IEEE ICC'96

É. Tamás e S. Molnár (1999). “On the Distribution of Round-trip Delays in TCP/IP Networks”. Proceedings of the 24th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks

Hyoung- Kee Choi e J. O. Limb. “A Behavioral Model of Web Traffic”. Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Network Protocols. 1999

Lucent Technologies Inc. “Engineering Guidelines. 401-614-040”

K.S. Gilhousen, I.M. Jacobs, R. Padovani, A.J. Viterbi, L.A. Weaver, and Wheatley. On the capacity of a cellular CDMA system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40:303–312, 1991.

E. Esteves, P.J. Black e M.I. Gurelli, “Link Adaptation Techniques for High-Speed Packet Data in Third Generation Cellular Systems”, European Wireless Conference, 2002.

Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda. Field Strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service. 16(9-10): 825-873, 1968.

Hata-Okumura. URL http://www.awe-communications.com/Propagation/hata_oku/hatoku.htm.