Um modelo para avaliação de desempenho do sistema CDMA2000 1X com foco no acesso à Internet

Edmundo A. de Souza e Silva, Rosa M. M. Leão e Guilherme D. G. Jaime

***Resumo*— Com a popularização do acesso à Internet, a demanda por serviços que exigem banda larga tem crescido de forma significativa. Serviços de alta velocidade são necessários para prover acesso a *web*, por exemplo de casa ou a partir de uma rede celular, com taxas de dados comparáveis as de uma rede local e, ainda, fornecer suporte para aplicações multimídia. Em conseqüência, diferentes padrões de protocolos de redes têm sido propostos para atender a esta nova demanda. Um importante exemplo é o CDMA2000 1X, cujo propósito é disponibilizar serviços de comutação de pacotes de alta velocidade utilizando tecnologia de telefonia celular atualmente disponível. O objetivo deste trabalho é desenvolver modelos para prever o desempenho deste protocolo quando fornece suporte à aplicações como navegação *web* e voz sobre IP. Diversos experimentos foram realizados visando avaliar a influência da variação da população nas filas de transmissão e obter a carga máxima suportada pelo sistema sem que haja degradação da QoS das aplicações.**

***Abstract*— With the widespread use of the Internet, the demand for broadband services is constantly increasing. High speed services, from home or using the cellular infrastructure, are necessary to provide web access and multimedia transmission with data rates equivalent to that of LAN. These requirements led to development of protocols for different wireless standards of cellular networks, to provide packet switched data services as well. An important example of these is the CDMA2000 1X system. The goal of this work is to develop and implement simulation models to predict the access delay and throughput reached under different system loads as the number of users increases. Some important characteristics of the model are: accurate web user behavior model; the ability to predict the influence of population variation on the transmition queues; and the effect of call admission control on the system capacity.**

I. INTRODUÇÃO

Neste trabalho foram desenvolvidos modelos de simulação para avaliação de desempenho de mecanismos de acesso ao meio, com foco em padrões para acesso de banda larga à Internet. Inicialmente, foram implementados dois modelos de simulação usando a ferramenta TANGRAM-II[1]: um para representar o comportamento e o tráfego gerado por usuários *web* (baseado em [2], [3]); e outro, para representar o comportamento de usuários de voz sobre IP. Posteriormente foi desenvolvido um modelo detalhado que representa o sistema CDMA2000 1X [4]. Por fim, com o objetivo de avaliar os mecanismos, vários experimentos de simulação foram executados.

Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/Prog. de Engenharia de Sistemas e Computação Caixa Postal 68511, CEP: 21941-972 Rio de Janeiro, RJ {gdjaime, edmundo, rosam}@land.ufrj.br

Uma das diferenças deste trabalho em relação aos encontrados na literatura [5], [6], [7] é que foi considerado um modelo detalhado do tráfego gerado por aplicações *web*. A modelagem do tráfego *web* envolve a simulação de distribuições de cauda longa, o que dificulta o processo de obtenção de resultados do modelo. Outra diferença é que também foram considerados dois tipos de aplicações transmitindo tráfego através da rede simultaneamente: aplicações *web* e voz sobre IP. Além disso, foram representados todos os tipos de canais suplementares do sistema CDMA2000 1X.

Os resultados dos experimentos realizados com os modelos permitiram obter: o número máximo de usuários de cada tipo de aplicação de forma a que o tempo de acesso dos clientes permaneça dentro de limites aceitáveis; e o tempo de acesso para cada tipo de usuário; dentre outros. Foi possível testar, também, o tipo de aplicação que causa maior impacto na utilização dos recursos do sistema e quantificar o impacto causado, assim como identificar os elementos que são os gargalos.

Outra característica diferencial deste trabalho está no uso de uma abordagem híbrida de simulação. Devido à alta complexidade do modelo proposto e às diferenças de algumas ordens de magnitude entre as taxas de ocorrência de eventos deste modelo, foi utilizado um modelo híbrido de simulação que inclui a abordagem de modelagem de fluido concomitantemente com o paradigma de simulação de eventos discretos. Esta abordagem mista permite uma solução mais eficiente do modelo resultante do que o método tradicional.

A seção II descreve brevemente as características do padrão CDMA2000 1X. Na seção III, citamos alguns trabalhos relacionados ao estudo aqui apresentado, enfatizando as principais diferenças. Na seção IV os modelos dos usuários e do protocolo de acesso múltiplo do sistema CDMA2000 1X são introduzidos. A seção V inclui o resultado das simulações, evidenciando a capacidade do sistema, segundo o modelo desenvolvido. Por fim, nossas conclusões são apresentadas na seção VI.

II. O PROTOCOLO DE ACESSO AO MEIO DO SISTEMA CDMA2000 1X

Na arquitetura do sistema CDMA2000 1X, o serviço de pacote de dados permite que os clientes acessem serviços de rede baseados no protocolo IP sobre um *link* CDMA sem fio. Este sistema consiste em um conjunto de equipamentos que compõem a estação base CDMA e funciona como um *gateway* entre o usuário e a Internet.

Na estação base a política de escalonamento de canais do serviço de pacote de dados é baseada somente nas informações de recursos do sistema de cada estação base: o número máximo de rajadas de alta velocidade permitida por usuário; o tempo máximo de cada rajada; e a política de controle de admissão.

Quando uma nova chamada chega à estação base, ela é processada e caso seja aceita, uma conexão lógica da camada de enlace (LLC - *Link Layer Connection*) é criada e um endereço IP é alocado para o cliente. Esta conexão é composta de uma ligação PPP e um canal de rádio. A estação base passa, então, a encaminhar os pacotes vindos desta conexão para o roteador a ela conectado, fornecendo, aos usuários, acesso à Internet. Informações de contabilidade dos clientes IP como duração e número de chamadas, entre outros, também são coletadas na estação base.

Existem três estados possíveis para uma conexão lógica da LLC: ativo, inativo e fechado. Uma LLC é aberta quando o cliente faz uma chamada para transmissão de dados, passando a conexão para o estado ativo. Inicialmente, apenas um canal fundamental *semi-duplex* de 9.6Kbps é atribuído ao usuário permitindo a transferência de dados. Assim, durante todo o período que uma chamada de pacote de dados está ativa, o canal fundamental permanece ativado para transmitir e receber dados e mensagens de controle entre o usuário e a estação base. Existe uma fila de armazenamento de pacotes a serem transmitidos do usuário para a estação base e outra na estação base para armazenar pacotes a serem transmitidos ao usuário. Caso uma dessas filas ultrapassar um valor limite, uma requisição de rajada é feita para tentar aumentar a taxa de transmissão. Caso esta requisição seja aceita, um canal suplementar de maior capacidade disponível é atribuído no sentido direto ou reverso, dependendo da requisição ter sido feita pela estação base ou pelo usuário. As capacidades disponíveis são 19.2, 38.4, 76.8 e 153.6kbps. Enquanto o canal suplementar está ativo, tanto o canal fundamental quanto o suplementar são utilizados para a transmissão de dados. O canal suplementar será utilizado até que a fila correspondente se esvazie ou até que o tempo máximo da rajada seja alcançado.

Os canais fundamentais têm prioridade sobre os canais suplementares. Caso a estação base receba um pedido de atribuição de canal fundamental e não hajam recursos suficientes para a atribuição deste canal, um canal suplementar de mais alta taxa é retirado de um usuário para que o pedido pendente seja atendido. O usuário que perdeu um canal suplementar pode fazer um novo pedido, e provavelmente ganhará um canal suplementar de taxa inferior ao da requisição anterior.

Caso não haja atividade de transmissão de dados por um dado período de tempo, a conexão da camada de enlace é passada para o estado inativo. Um temporizador denominado temporizador de inatividade RLP (*Radio Link Protocol*) é mantido na estação base, para este controle. Quando o temporizador RLP expira, a LLC passa para o estado inativo. Neste estado não existe mais um canal de rádio entre o cliente e a estação base, mas as informações da conexão são mantidas pela mesma. A LLC pode ser reativada quando há chegada de dados na estação base ou quando o cliente deseja enviar mais dados. A LLC é fechada quando a estação base ou o usuário finaliza a chamada e então a estação base remove as informações da conexão LLC associada ao cliente e a conexão PPP é terminada.

Diversos métodos de controle de admissão de chamadas para o serviço de comutação de canais de dados [8], [9] do CDMA2000 estão disponíveis na literatura. Estes algoritmos possuem diferentes níveis de detalhamento e, geralmente, levam em consideração o monitoramento de variáveis como a carga e o nível de interferência no sistema, causado tanto por usuários da própria célula, quanto por usuários de células vizinhas. O padrão CDMA2000 1X, contudo, não define um algoritmo específico, deixando a seleção do método de controle de admissão por conta do fabricante do equipamento.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Recentemente vários trabalhos de avaliação do padrão CDMA2000 tem aparecido na literatura. A quase totalidade dos trabalhos avalia o sistema quando submetido ao tráfego de um único tipo de aplicação (ou seja, duas aplicações não são consideradas em conjunto) e os modelos usados para representar o tráfego gerado pelas aplicações são simplificados. Nesta seção indicaremos os principais estudos feitos para o CDMA2000 1X e para os modelos de aplicação *web*.

A. CDMA2000 1X

O trabalho de [5] investigou, via simulação, o desempenho e a compatibilidade do TCP/IP quando integrado a protocolos de redes sem fio sobre enlaces de rádio baseados no CDMA2000. Para o CDMA2000, foi apresentada uma diferença significativa de desempenho quando se alterava a subdivisão do quadro da camada física em unidades lógicas de transmissão (LTUs) menores do que as usadas na camada MAC. A única aplicação considerada foi a transferência de arquivos (FTP).

Em [7] é feito um estudo sobre a desempenho do serviço de pacotes de dados do CDMA2000 através de experimentos feitos em laboratórios e em campo usando um sistema experimental, com ênfase em testar diferentes condições dos canais físicos. As condições gerais consideradas foram muito específicas: as taxas dos canais utilizadas nos experimentos foram restritas a 153.6 e 38.4kbps no canal suplementar direto e 38.4kbps no canal suplementar reverso; o número de usuários considerados nos testes não passou de três. Transferências de arquivos utilizando FTP constituem as únicas aplicações executadas.

No estudo feito em [6], é analisado a desempenho do serviço de pacotes de dados do CDMA2000 através de simulação, com o objetivo de avaliar o sistema sob diferentes situações dos canais de rádio. São obtidos o atraso dos pacotes e a vazão do canal, considerando canais suplementares de até 76.8kbps. É utilizado um modelo simples para tráfego WWW com chegadas de pacotes Poisson e distribuição exponencial para o tamanho dos pacotes.

B. *Modelos de aplicações* web

Vários estudos já foram realizados com o intuito de caracterizar o tráfego gerado por aplicações *web*. Em [10] um conjunto de *traces* do tráfego gerado por usuários *web* é analisado. As evidências de autosimilaridade desse tráfego são apresentadas, e as possíveis explicações para esta característica de autosimilaridade são analisadas.

Em [11], os *logs* de quatro diferentes servidores *web* são analisados. Segundo este trabalho, o tráfego WWW possui características de autosimilaridade, com exceção do tempo entre requisições durante os momentos de maior ocupação dos servidores. A distribuição Lognormal é apontada como a mais apropriada para modelar a distribuição do tamanho dos objetos *web*. O canal de acesso é modelado através de uma fila M/G/1/P/S.

Em [3], foi identificado que os tamanhos dos objetos principais e dos objetos referenciados de uma página *web* possuem distribuição Lognormal. Além disso, são sugeridas a distribuição Normal para o tempo entre chegadas dos objetos referenciados e para o número de objetos referenciados por um objeto principal e a distribuição Weibull para o tempo que os usuários passam analisando uma página recebida com sucesso.

Deng [2] monitorou o tráfego WWW entre o Laboratório da GTE e a Internet e um modelo foi proposto a partir das estatísticas coletadas. Este modelo foi adotado em nosso trabalho para representar o comportamento do usuário *web*. O principal motivo desta escolha foi que diversos trabalhos da literatura tem adotado o modelo de [2], inclusive o trabalho de avaliação de mecanismos MAC apresentado em [12] que é comumente referenciado na literatura especializada. Já para representar o tamanho dos objetos enviados do servidor para o cliente, foi utilizada a distribuição Lognormal conforme sugerido em [11] e [3].

IV. Modelos para avaliação de desempenho

Nesta seção iremos descrever o modelo desenvolvido para o sistema CDMA2000 1X. Apresentaremos também os modelos adotados para representar as aplicações consideradas neste trabalho: acesso a *web* e transmissão de voz. O modelo da aplicação *web* é baseado em dois trabalhos da literatura: no modelo de [2] para representar a geração de requisições de um usuário e no modelo de [3] para representar o tráfego de retorno *web*. Já para o tráfego de voz adotamos um modelo de fonte *ON-OFF* que tem sido comumente usado na literatura.

A. Modelos de Usuários

No modelo proposto para os usuários representamos o tráfego gerado pelos usuários *web* e pelos usuários de voz conforme pode ser visto na Figura 1.

O modelo usado para representar as requisições de cada usuário *web* é do tipo *ON-OFF*. Quando um usuário clica em uma ligação de hipertexto, várias requisições 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 *OFF* para que os dados sejam absorvidos antes de um novo conjunto de requisições começar, iniciando um novo período *ON*. A caracterização de um período *ON* (que pode incluir mais de uma requisição de usuário) depende de algum valor arbitrado

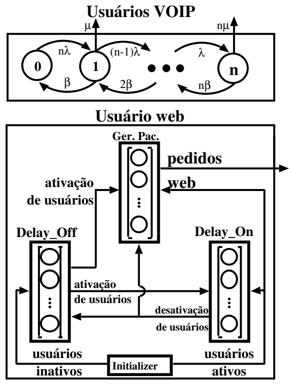

Fig. 1. Modelos de usuários

durante as medições. Em [2] requisições geradas a intervalos inferiores a 60 segundos pertencem a um mesmo período *ON*. Naquele trabalho foram identificadas três distribuições para o modelo do usuário: a distribuição Weibull, com parâmetros $\theta = 90.01$ e $k = 0.88$, foi usada para o período *ON* e a Pareto, com parâmetros $k = 60.0$ e $\alpha = 0.9$, para o período *OFF*. Para representar o intervalo entre requisições durante um período *ON*, foi usada uma distribuição Weibull com parâmetros $\theta = 4.48$ e $k = 0.5$.

No modelo do tráfego *web* agregado, usuários são representados por fichas que circulam entre os objetos *Delay_Off* e *Delay_On*/*Ger. Pac.* da Figura 1, sendo que o tempo de permanência de uma ficha em cada objeto segue a distribuição correspondente. Uma vez em *ON*, é ativado o módulo *Ger. Pac.*, responsável pela geração de pacotes. Considera-se ainda, neste modelo, que um pacote é igual a 400 *bytes*, um tamanho típico de uma requisição *web*, medido na rede local de nosso laboratório.

Além de tráfego *web*, nosso modelo inclui tráfego de voz sobre IP. O tráfego de um usuário de voz é representado por uma fonte *ON-OFF* onde o estado *ON* indica que uma ligação de voz está em andamento, com duração média de 3 minutos. (O tempo de permanência no estado *ON* é exponencial.) A sessão é terminada após este período e novas sessões são ativadas a intervalos médios de 90 minutos. (O tempo de permanência no estado *OFF* tem distribuição exponencial com média de 90 minutos.) Uma ligação de voz ativa gera um tráfego de 160 *bytes* a cada 20 mseg, correspondendo a um pacote de voz IP com 160 amostras de áudio. Para diminuir o tempo de solução do modelo proposto, a sua implementação não inclui geração de pacotes. Ao invés disso, o tráfego gerado por usuários de voz sobre IP é representado por um fluido que escoa a uma taxa (64Kbps) que corresponde às características citadas acima.

Resumidamente, o tráfego agregado de voz é modelado por uma cadeia de Markov onde cada estado representa o número de fontes de voz ativas. (Superposição das fontes *ON-OFF* descritas na parte superior da Figura 1)

Embora o contexto do CDMA2000 1X seja redes sem fio, não foram encontrados trabalhos na literatura que estudassem explicitamente o comportamento de usuários em redes deste tipo. Por isso, as características de comportamento de usuários deste estudo são baseadas em trabalhos de caracterização que não especificam o ambiente em que os usuários foram observados.

B. CDMA2000 1X

Como citado na seção II o escalonamento de canais do CDMA2000 1X é baseado em algumas variáveis e no controle de admissão. O controle de admissão que foi modelado é baseado em [13], [7]. Resumidamente, a alocação de um novo canal só é realizada se existe potência disponível para garantir uma qualidade mínima para transmissão dos dados. (Ver [14] para maiores detalhes.) Algumas hipóteses foram consideradas de modo a que o controle de admissão não onerasse demasiadamente as simulações relativas aos experimentos realizados. A primeira suposição é a de que o sistema é formado por apenas uma célula. Assume-se que os usuários do sistema estão simetricamente distribuídos em volta da estação base [13]. Além disso, considera-se que o sistema possui usuários estacionários (sem movimento) e que as potências de todos os outros usuários da célula permanecem inalteradas diante da ativação de um canal de comunicação adicional [8]. A definição das taxas de transmissão usadas em cada tipo de canal levam em consideração o *overhead* gerado pelos cabeçalhos do modelo de camadas do padrão CDMA2000 1X e pela taxa de erros dos enlaces sem fio, de acordo com [7]. Finalmente, o tipo de célula considerada é omnidirecional.

Além disso, optou-se por representar o comportamento individual de cada usuário *web* e de cada usuário de voz para permitir a modelagem detalhada do escalonamento de canais, conforme pode ser visto na Figura 2. Foi representado também o tráfego de retorno *web* e de voz, dado que existe disputa deste tráfego pelos canais diretos.

Uma outra característica deste modelo é a diferença de algumas ordens de grandeza entre a taxa dos eventos do modelo. Por exemplo, os eventos de ativação/desativação de usuários de voz são da ordem de minutos; o recebimento de mensagens de atribuição/retirada de canais e os eventos de esvaziamento de fila são da ordem de segundos; e os eventos de geração de pacotes de voz são da ordem de milisegundos. O custo computacional da simulação convencional tornou-se demasiado elevado devido ao grande número de eventos gerados na simulação deste padrão e à enorme diferença entre as taxas dos eventos, principalmente daqueles relacionados ao modelo dos usuários de voz. Para reduzir o custo computacional, foi usada uma técnica híbrida de simulação onde parte do modelo usa a abordagem de fluido e outra parte usa a simulação de eventos discretos. O tráfego de voz assim como a fila que serve este tráfego foram modelados segundo a técnica de fluido de [15].

O modelo é dividido em três partes como ilustrado na Figura 2: a parte A é o modelo do cliente, seja ele usuário *web* ou de voz; a parte B representa o retardo na Internet; e a parte C é o modelo da estação base, que essencialmente faz escalonamento de canais para toda a população de usuários, através de mensagens de controle, e mantém o estado global do sistema, com detalhes de todos os canais atribuídos.

A parte A é composta pelos modelos usados para representar as requisições geradas por um usuário *web* e para representar o tráfego de um usuário de voz, de acordo com o esquema apresentado na seção anterior. O atraso da Internet (parte B)

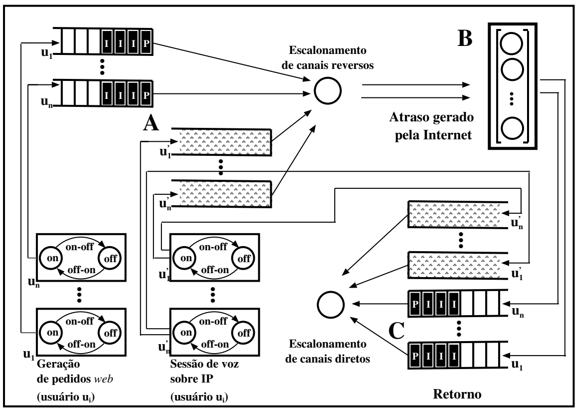

Fig. 2. Modelo do CDMA2000 1X

é modelado por uma distribuição Gaussiana cujos parâmetros foram baseados em [16]. Note que somente as requisições *web* são enviadas pela Internet pois existe uma relação de dependência entre as requisições e os objetos recuperados. Para o tráfego de voz, do momento que uma sessão é iniciada, pacotes são gerados nos dois sentidos segundo uma fonte *ON-OFF*.

A parte C do modelo inclui a fila existente na estação base para transmitir os objetos *web* requisitados e os recipientes de fluído de tráfego de voz sobre IP (tráfego de retorno *web* e VOIP). Como indicado em [3], o tráfego gerado por diferentes tipos de requisições *web* é sensivelmente diferente. Especificamente, quando um usuário *web* está ativo, a primeira requisição por ele gerada resultará no retorno de um arquivo HTML - o objeto principal (representado por "P" na Figura 2). Todas as requisições *web* geradas a partir deste momento são decorrentes dos objetos referenciados pelo objeto principal e resultarão no retorno dos objetos *In-line* (representados por "I" na Figura 2). Adotamos os resultados de [3], onde o tamanho do objeto principal é representado por uma variável aleatória Lognormal com média de 10710 *bytes* e variância de 25032 e o objeto *In-line* também é representado por uma variável aleatória Lognormal com média de 7758 *bytes* e variância de 126168. Assim, o tempo de serviço da fila da estação base para retorno do tráfego *web* tem distribuição Lognormal.

A parte C do modelo também inclui o escalonamento dos canais diretos e reversos. Este escalonamento define a maneira pela qual os canais serão alocados para as filas das requisições *web*, dos pacotes de voz e do tráfego de retorno *web* e de voz. A Figura 3 ilustra o algoritmo de escalonamento de canais implementado no modelo proposto. Quando um pedido é gerado (parte superior da Figura 3), uma requisição de canal suplementar é enviada à estação base caso não haja canal fundamental (FCH - *Fundamental Channel*) atribuído no momento e este cliente ainda não tenha feito pedido de FCH. Mesmo que haja um FCH atribuído, um pedido de canal suplementar (SCH - *Supplemental Channel*) reverso é enviado caso a fila de transmissão do canal reverso esteja acima do limite definido e o cliente ainda não tenha feito pedido de SCH

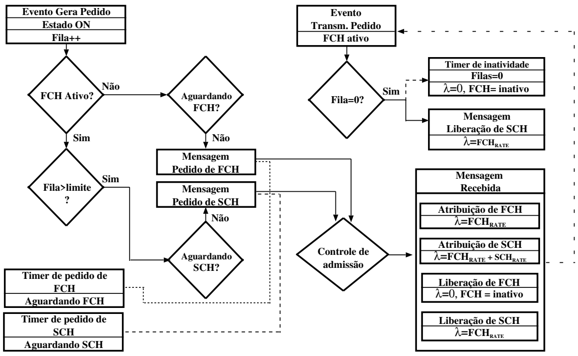

Fig. 3. Escalonamento de canais do modelo proposto

reverso. No modelo implementado o limite foi de 1000 *bytes*, de acordo com [7]. Uma vez que pedidos de canais tenham sido enviados, temporizadores de retransmissão de pedidos são habilitados para o caso de um pedido não ser atendido em um tempo definido.

A estação base irá então executar o algoritmo de controle de admissão e enviará uma mensagem ao cliente. Ao receber mensagens de atribuição de canais (parte inferior direita da Figura 3), o cliente ajusta a taxa de serviço dos servidores de pacotes *web* e de voz de acordo com as taxas dos canais atribuídos. Uma vez que um canal fundamental foi atribuído, o cliente terá direito a este canal durante um tempo máximo estabelecido pelo protocolo. Em nosso modelo, consideramos este tempo como 5.12s [7]. A transmissão dos pedidos terá como taxa, então, a soma das taxas do canal fundamental e suplementar.

Toda vez que um objeto *web* ou um pacote de voz chegar na estação base para ser enviado ao cliente, estes serão colocados na fila da estação base. Canais diretos também serão requisitados ou liberados e o controle de admissão executado de forma similar ao esquema apresentado na Figura 3.

V. RESULTADOS

Nesta seção será investigada a qualidade dos serviços oferecidos pelo CDMA2000 1X, com a variação do número de clientes. As métricas utilizadas são o tempo médio de acesso, a vazão dos canais e o tamanho médio das filas. Foram utilizados vários cenários onde variou-se o número de clientes *web* e de voz.

Nos experimentos executados, o número de usuários de voz sobre IP é constante e a população de usuários *web* é variável. Especificamente, a população de usuários VOIP manteve-se fixa em 10 usuários, e a população de usuários *web* foi variada de 10 a 200 usuários. A variação de usuários *web* foi realizada visando obter o ponto de saturação do sistema.

A Figura 4 apresenta a vazão média do sistema. Para isso, são apresentadas três curvas: (a) a vazão total do sistema; (b) a vazão dos usuários *web*; e (c) a vazão correspondente aos usuários de voz sobre IP. O ponto de saturação equivale a uma população de aproximadamente 120 usuários *web* (10 de voz) e a vazão neste ponto é de quase 200kbps. O aumento do número de usuários *web* acima do ponto de saturação causa uma ligeira queda na vazão total do sistema. Isto pode ser explicado pela prioridade dada aos canais fundamentais no CDMA2000, o que resulta na liberação forçada de canais suplementares de altas taxas de transmissão para que seja possível atender a novas requisições de canais fundamentais feitas por usuários recém chegados.

Os tamanhos médios das filas dos canais diretos e reversos dos usuários *web* são mostrados na Figura 5. Observou-se que a fila do canal direto tem tamanho médio maior que o reverso enquanto o sistema não está saturado. Este comportamento é esperado, já que o tráfego de retorno *web* é consideravelmente maior que o tráfego de subida. Já as filas dos usuários de voz sobre IP, mostradas na Figura 6, não apresentaram mudanças significativas à medida que a carga aumenta. Este comportamento pode ser explicado pelo algoritmo de escalonamento de canais, que define prioridade dos canais fundamentais sobre os canais suplementares. O gráfico da Figura 7 reafirma o

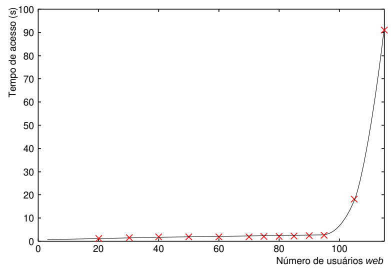

Fig. 8. Tempo médio de acesso dos usuários *web*

comportamento observado na Figura 5. A utilização da fila do canal direto permanece maior que a fila do canal reverso enquanto o sistema não se aproxima do seu ponto de saturação. Quando o sistema fica sobrecarregado, a utilização da fila do canal reverso cresce rapidamente e se aproxima de 75% enquanto que a utilização da fila do canal direto cai para 16%. Isto indica que o gargalo do sistema, quando submetido a altas cargas de tráfego *web* é o canal reverso, apesar do tráfego ser potencialmente mais intenso no canal direto. Este comportamento é explicado pela dependência entre os tráfegos em ambos os sentidos, ou seja, para que haja tráfego no canal direto, pedidos *web* têm que ter sido enviados pelo canal reverso.

A Figura 8, apresenta a média do tempo de acesso dos usuários *web*. Nota-se que o tempo de acesso permanece aceitável, entre 1 e 3 segundos, enquanto a população está abaixo de 95 usuários *web*. A partir deste ponto, como o sistema começa a ficar sobrecarregado e o tempo de acesso aumenta rapidamente, chegando a 91 segundos quando o sistema é submetido a uma população de 115 usuários *web*. Em conseqüência, o sistema não comporta uma população maior que 100 usuários *web* quando existem 10 de voz sobre IP.

Os resultados das simulações do padrão CDMA2000 1X permitiram observar, por exemplo, que o gargalo do sistema quando este está sob altas cargas é o canal reverso, e não o canal direto. Foi possível observar também, que o tempo de acesso de usuários *web* do mecanismo mesmo para cargas baixas é da ordem de poucos segundos. Tempos de acesso da ordem de poucos segundos são aceitáveis para aplicações

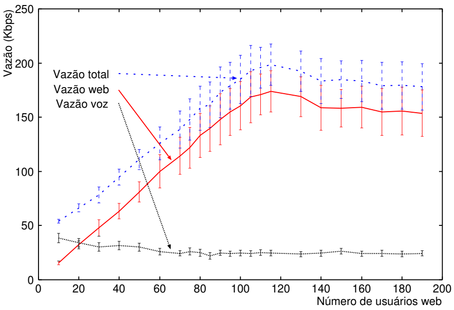

Fig. 4. Vazão média do sistema

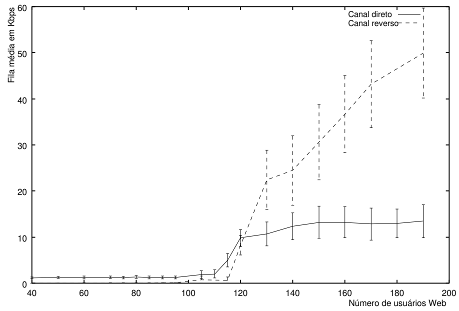

Fig. 5. Fila média dos usuários *web*

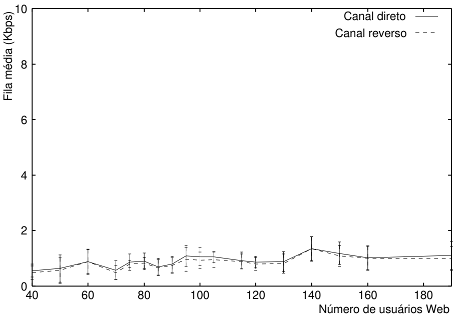

Fig. 6. Fila média dos usuários de voz

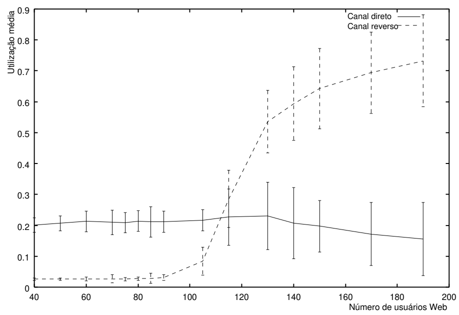

Fig. 7. Utilização média das filas dos usuários *web*

web, mas dado que aplicações de voz sobre IP possuem, como requisito, o RTT de até 400ms, este resultado indica que o mecanismo do CDMA2000 1X não é apropriado para este tipo de aplicação.

VI. Conclusão

Neste trabalho desenvolvemos um modelo de simulação do sistema de transferência de dados do padrão CDMA2000 1X que permitiu avaliar o desempenho deste protocolo.

Realizamos a implementação de modelos detalhados do comportamento de usuários, possibilitando o dimensionamento do sistema em função do número de usuários de cada tipo. Diferentemente dos trabalhos encontrados na literatura, nosso modelo de avaliação considera tráfego simultâneo de usuários *web* e de voz sobre IP, além de representar todos os tipos de canais suplementares previstos no padrão. Para tornar computacionalmente viável a solução dos modelos, utilizamos uma técnica de simulação híbrida que envolve tanto simulação convencional quanto a nova técnica de simulação de fluido.

Por fim, vários experimentos de avaliação de desempenho foram realizados, mostrando que no CDMA2000 1X o gargalo do sistema quando este está sob altas cargas é o canal reverso e este padrão não é apropriado para aplicações de voz sobre IP devido ao atraso introduzido pelo mecanismo de escalonamento de canais. Foi possível, também, prever o número de usuários suportado pelo sistema sob o ambiente considerado.

Referências

[1] Rosa M.M. Leão and Edmundo de Souza e Silva. The TANGRAM-II Environment. In *Computer Performance Evaluation / TOOLS*, volume 1786 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 366–369. Springer, 2000.

[2] Shuang Deng. Empirical Model of WWW Document Arrivals at Access Link. In *Proceedings of IEEE ICC'96*, pages 1797–1802, 1996.

[3] Hyoung-Kee Choi and John O. Limb. A Behavioral Model of Web Traffic. *International Conference of Network Protocols (ICNP)*, pages 327–334, 1999.

[4] IS-2000, a Family of Standards for CDMA2000 Spread Spectrum System. TIA/EIA.

[5] Yong Bai, Pengfei Zhu, Ashok Rudrapatna, and Andy T. Ogielski. Performance of TCP/IP over IS-2000 Based CDMA Radio Links. *IEEE Vehicular Technology Conference*, pages 1036–1040, 2000.

[6] Lin Ma and Zhigang Rong. Capacity Simulations and Analysis for CDMA2000 Packet Data Services. *IEEE Vehicular Technology Conference*, pages 1620–1626, 2000.

[7] Gang Li, Ming Lu, Martin Meyers, Devesh Patel, James Stekas, and Andrea Tonello. Performance of lucent cdma2000 3g1x packet data experimental system. *Lucent*, pages 2665–2669, 2001.

[8] Sarath Kumar and Sanjiv Nanda. Hight Data-Rate Packet Communications for Cellular Networks Using CDMA: Algorithms and Performance. *IEEE Selected Areas in Communications*, 17(3):472–492, 1999.

[9] Yu-Kwong Kwok and Vincent K. N. Lau. On Admission Control and Scheduling of Multimedia Burst Data for CDMA Systems. *Wireless Networks*, 8(5):495–506, 2002.

[10] Mark E. Crovella and Azer Bestavros. Self-Similarity in World Wide Web Traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 05:835–846, 1997.

[11] Masahiko Nabe and Masayuki Murata Hideo Miyahara. Analysis and Modeling of World Wide Web Traffic for Capacity Dimensioning of Internet Access Lines. *Performance Evaluation*, 34:249–271, 1998.

[12] M.T.Ali, R.Grover, G.Stamatelos, and David D.Falconer. Performance evaluation of candidate MAC protocols for LMCS/LMDS networks. *IEEE - Selected Areas in Communications*, 18(7):1261–1270, 2000.

[13] Lucent Technologies Inc. Engineering Guidelines. 401-614-040.

[14] Guilherme Dutra Gonzaga Jaime. Modelagem e Análise de Mecanismos para Acesso de Banda Larga a Internet. Master's thesis, UFRJ - COPPE/Sistemas, 2003.

[15] Kelvin Reinhardt, Rosa M.M. Leão, and Edmundo de Souza e Silva. Um ambiente de simulação de fluido para redes multimídia. *SBRC 2003*, pages 1101–1126, May 2003.

[16] Tamás Éltetõ and Sándor Molnár. On the Distribution of Round-trip Delays in TCP/IP Networks. In *24th Conference on Local Computer Networks*, page 172. IEEE, 1999.