

# Simulação de Algoritmos de Agendamento de Pacotes em Sistemas WCDMA<sup>1</sup>

J. Sindi Yamamoto<sup>1</sup>(\*) e Rodrigo Pasti(\*\*)  
 (\*)Universidade São Francisco/Fundação CPqD  
 (\*\*) Universidade São Francisco  
 e-mail: sindi@nipnet.com.br

**Resumo**— Neste trabalho, é investigado o quanto um sistema WCDMA perde em vazão (“throughput”) quando pacotes NRT (“No Real Time”) de vários usuários são transmitidos em paralelo ao invés de 1 ou poucos usuários de cada vez. Adicionalmente, para se obter o máximo de vazão por portadora em um sistema WCDMA, é mostrado que é melhor ter portadoras separadas para tráfego de pacotes NRT e tráfego de voz. Baseado nestes resultados, algoritmos de agendamento de pacotes são propostos e avaliados por simulação.

**Palavras-Chave**—WCDMA, agendamento, pacotes.

## I. INTRODUÇÃO

Uma das características importantes do sistema WCDMA e outros sistemas celulares de terceira geração (3G) [1], é a disponibilidade de serviços de dados por pacotes NRT (“No Real Time”). Diferentes taxas de bits são oferecidas aos usuários no enlace direto e no enlace reverso. A soma de todos os dados NRT e RT (“Real Time”) a serem transmitidos simultaneamente em uma célula excede os recursos disponíveis a cada quadro. Portanto, um “Packet Scheduler (PS)”, localizado na BTS (“Base Transceiver Station”) ou na RNC (“Radio Network Controller”), tem que dividir os recursos e designá-los aos diferentes usuários NRT. Além disto, o PS monitora a alocação de pacotes e a carga do sistema.

**Agendamento no enlace reverso:** no enlace reverso do sistema WCDMA, o PS pode ser realizado baseando-se nas medidas de interferência. A  $SIR_i$  (“Signal to Interference Ratio”) que o usuário  $i$  gera na BS (“Base Station”) em uma única célula WCDMA é definida como:

$$SIR_i = \frac{S_i}{I_{tot} - S_i} \quad (1)$$

onde  $S_i$  e  $I_{tot}$  são a intensidade do sinal recebido do usuário  $i$  e a interferência total recebida na BS, respectivamente. A interferência total é definida como:

$$I_{tot} = \sum_{i=1}^U S_i + r \quad (2)$$

onde  $U$  é o número total de MS (“Mobile Station”) na célula e  $r$  é o ruído de fundo. Das equações (1) e (2) a interferência  $I_{tot}$  pode ser expresso como:

$$I_{tot} = \frac{r}{1 - \sum_{i=1}^U \frac{SIR_i}{1 + SIR_i}} \quad (3)$$

Assume-se que a  $SIR$  é proporcional à taxa de bits, isto é,  $E_b/N_o$  é constante para todas as taxas de bits embora, no caso prático,  $E_b/N_o$  dependa do comprimento do “interleaving” e de quanto de “overhead” é adicionado pelos bits de piloto.

Seja um sistema com  $U_1$  usuários RT causando uma certa interferência no enlace reverso. Um dos aspectos investigado neste trabalho, é o ganho obtido quando se permite apenas um usuário NRT transmitir ao invés de deixar  $U_2 = U - U_1$  usuários NRT em paralelo. Se  $I_{Limite}$  é a interferência máxima permitida, então, nas situações de interferência máxima para o caso de alocação de 1 usuário por vez e  $U_2$  usuários em paralelo são dados pelas equações (4) e (5), respectivamente:

$$I_{Limite} = \frac{r}{1 - \sum_{i=1}^{U_1} \frac{SIR_i}{1 + SIR_i} - \frac{SIR_{max}}{1 + SIR_{max}}} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Trabalho patrocinado pela FAPESP

$$I_{Limite} = \frac{r}{1 - \sum_{i=1}^{U_1} \frac{SIR_i}{1 + SIR_i} - \sum_{j=U_1+1}^U \frac{SIR_j}{1 + SIR_j}} \quad (5)$$

Portanto,

$$\frac{SIR_{max}}{1 + SIR_{max}} = \sum_{j=U_1+1}^U \frac{SIR_j}{1 + SIR_j} \quad (6)$$

Assumindo-se que  $SIR_j$  é o mesmo para todos os  $U_2$  usuários, tem-se que :

$$SIR_i = \frac{SIR_{max}}{U_2 + (U_2 - 1)SIR_{max}} \quad (7)$$

Da equação (7) pode ser avaliado quanto é perdido em vazão quando pacotes NRT de vários usuários são transmitidos em paralelo ao invés de 1 ou poucos usuários de cada vez. A figura 1 mostra a vazão em função de número de usuários NRT baseado na eq. (7). Observa-se que há uma perda sensível na vazão quando são transmitidos vários usuários NRT ao invés de 1 usuário por vez. Esta perda é maior quanto maior for a taxa máxima de bits de um único usuário.

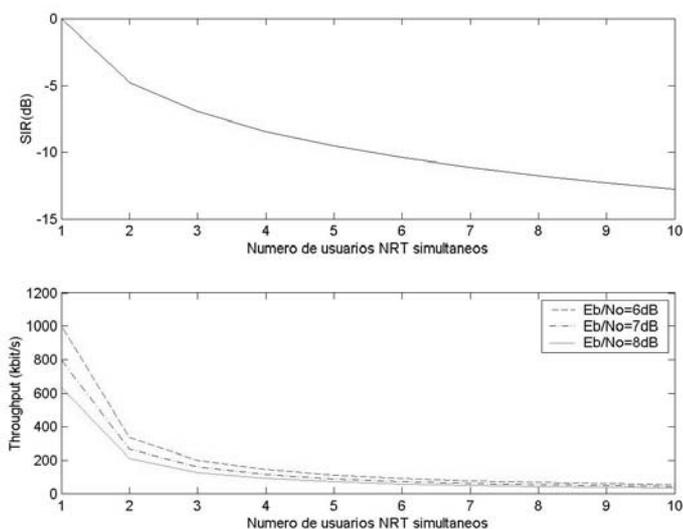


Figura 1: a)  $SIR \times$  número de usuários NRT  
b) Vazão  $\times$  número de usuários NRT

**Agendamento no enlace direto:** no enlace direto, um algoritmo PS pode usar informações sobre a potência total transmitida de uma BS ou várias BSs. Neste caso, para uma única célula, a  $SIR_i$  em cada MS  $i$  é definida como:

$$SIR_i = \frac{P_i g_i}{\alpha(P_{tot} - P_{sch} - P_i)g_i + P_{sch}g_i + r} \quad (8)$$

onde:  $P_i$  é a potência de saída da BS para a MS  $i$ ,  $\alpha$  é o fator de ortogonalidade e  $g_i$  é o ganho entre a BS e o usuário  $i$ .  $P_{tot}$ ,  $P_{sch}$  e  $r$  são, respectivamente, a potência de saída total da BS, a potência alocada para os canais de sincronização e ruído de fundo. Assumindo-se que  $E_b/N_o$  é o mesmo para todas as taxas,  $g_{max} = g_i$  e seguindo um procedimento similar ao caso do enlace reverso, pode-se demonstrar que:

$$SIR_j = \frac{SIR_{max}}{U_2 + \alpha(U_2 - 1)SIR_{max}} \quad (9)$$

A equação (9) é parecida com a equação (8), exceto pelo fator de ortogonalidade  $\alpha$ . Esta equação permite investigar o ganho obtido quando se permite apenas 1 usuário NRT transmitir de cada vez ao invés de deixar  $U_2 = U - U_1$  usuários NRT em paralelo no enlace direto. Contudo, a suposição  $g_{max} = g_i$  não é mais válido, isto é, há uma dependência com o ganho que deverá ser considerado na decisão de alocação de pacotes no canal direto.

A figura 2 mostra a vazão em função de número de usuários NRT baseado na eq. (9). Observa-se que há uma perda sensível na vazão quando são transmitidos vários usuários NRT ao invés de 1 usuário por vez. Esta perda é menos crítica do que no enlace reverso dependendo do fator de ortogonalidade  $\alpha$ .

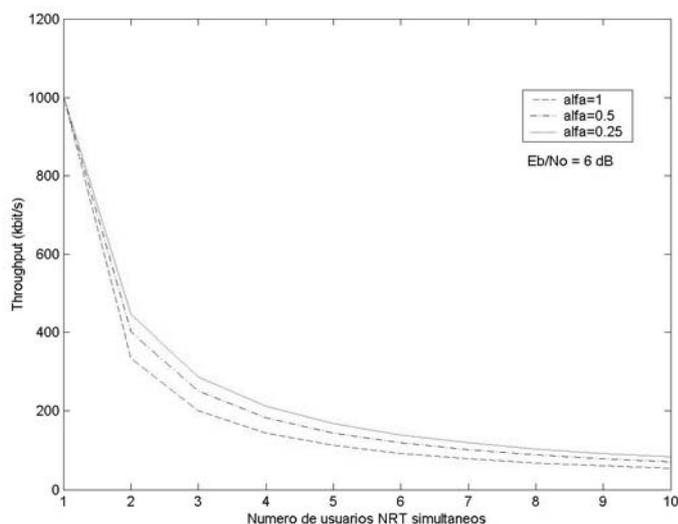


Figura 2 : Vazão  $\times$  número de usuários NRT em função do fator de ortogonalidade  $\alpha$

Neste trabalho, é implementado um modelo de simulação de transmissão de pacotes que permite avaliar a vazão dos enlaces reverso e direto de um sistema WCDMA em função de número de usuários NRT e RT. Utilizando-se este modelo de simulação, algoritmos de agendamento de pacotes são avaliados.

O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: na sessão II é apresentado o modelo de simulação. Os algoritmos

de agendamento de pacotes considerados são descritos na seção III. Na seção IV são apresentados e analisados os resultados obtidos e, finalmente, as conclusões são apresentadas na seção V.

## II. MODELO DE SIMULAÇÃO

A figura 3 ilustra o diagrama de blocos do simulador de agendamento de pacotes. O bloco PS ("Packet Scheduler") recebe as requisições de chamadas de voz e de pacotes, bem como a taxa de bits dos pacotes (TBP) de dados de cada usuário, estimada a partir da SIR, e a taxa de bit solicitado (TBS) à BS através do enlaces reverso. Baseando-se na TBP e TBS, o PS decide qual usuário (ou quais usuários) terão os seus pacotes transmitidos em um determinado intervalo de tempo. No simulador, o gerador de tráfego por circuitos gera chamadas de voz com as seguintes características:

- Intervalo entre chegadas de chamadas modelado como uma variável aleatória (VA)  $t_v$  com distribuição exponencial e média  $1/\lambda_v$ ;
- Duração da chamada modelada como uma VA  $d_v$  com distribuição exponencial e média  $1/\mu_v$ ;
- Tráfego oferecido  $A = \lambda_v/\mu_v$  Erlangs.

O gerador de tráfego por pacotes gera pacotes do tipo *web-browsing* com as seguintes características:

- Intervalo entre as chegadas de sessões modeladas como uma VA com distribuição exponencial;
- Intervalo entre as chegadas de páginas (tempo de leitura) modeladas como uma VA com distribuição Gama;
- Número de páginas em uma sessão modelado como uma VA com distribuição geométrica;
- Número de pacotes em uma página modelado como uma VA com distribuição geométrica;
- Tamanho do pacote (no. de bytes) modelado como uma VA com distribuição Multimodal;
- Intervalo entre as chegadas de pacotes modeladas como uma VA com distribuição exponencial.

A taxa de bits de cada pacote de dados,  $TBP_i$ , do usuário  $i$  é estimada da seguinte forma:

$$TBP_i = \frac{W \times SIR_i}{(E_b / N_t)_{desejado}} \quad (10)$$

onde :

$W$  : é a largura de banda do sistema WCDMA

$(E_b/N_t)_{desejado}$ : é a energia por bit por densidade de potência de ruído total desejado.

A  $SIR_i$  que o usuário  $i$  gera na BS em uma única célula WCDMA é calculada conforme as equações (1) e (2). As MSs ("Mobile Stations") são posicionadas em qualquer ponto (x,y)

dentro da área de cobertura da BS. A distribuição das MSs é realizada de acordo com números pseudo-aleatórios gerados conforme uma distribuição uniforme dentro de uma área limitada pela cobertura da BS. No enlace direto, a  $SIR_i$  em cada MS  $i$  é calculada para uma única célula conforme a equação (8).

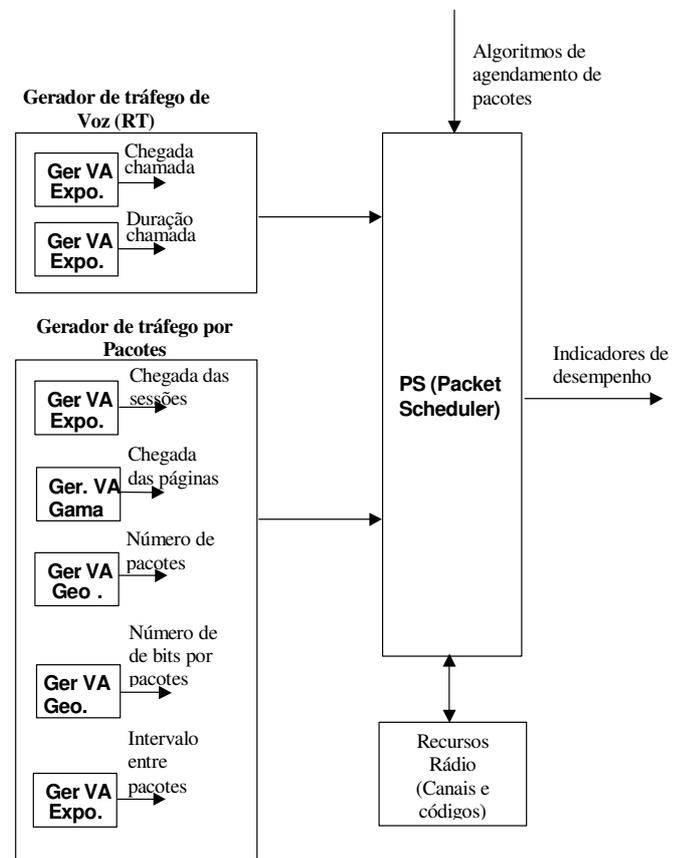


Figura 3: Diagrama de blocos do simulador de agendamento de pacotes.

## III. ALGORITMOS DE AGENDAMENTO DE PACOTES EM CONSIDERAÇÃO

No simulador é mostrado que a capacidade da BS é maximizada quando são transmitidos pacotes de um único usuário por vez. Assim, a transmissão de pacotes é dividida em intervalos de tempo de 1 seg (duração de 100 quadros WCDMA). Em cada um dos intervalos de tempo, são transmitidos pacotes de um único usuário por vez. Diversos algoritmos de agendamento de pacotes tem sido apresentados [2-6]. No simulador até então implementado, foram analisados os seguintes algoritmos de agendamento de pacotes:

- Round Robin (RR):** os usuários são selecionados um a um em uma ordem cíclica para a transmissão, independente da taxa de bits individualmente solicitada (TBS) e das condições do canal em termos de SIR. Este

algoritmo fornece o maior grau possível de igualdade em relação ao número de pacotes alocados de cada usuário. Entretanto, oferece uma baixa vazão pelo fato de não considerar as condições do canal.

- b) **Máxima taxa de bits por pacote (MTBS):** os usuários com maior TBS são selecionados independentemente da SIR. Neste algoritmo, se diversos usuários requerem a mesma TBS, é possível que pacotes de um usuário com SIR menor sejam selecionados para serem transmitidos ao invés de pacotes de um usuário com SIR maior. Adicionalmente, se muitos usuários tem TBS alta, os usuários com baixa TBS podem ser marginalmente atendidos dependendo do tráfego de dados.
- c) **Máximo SIR ou TBP(MSIR):** neste algoritmo, pacotes de usuários com melhor condição de propagação (máximo SIR) são selecionados para serem transmitidos. Neste algoritmo, se diversos usuários requerem baixa TBS, é possível que usuários com baixa TBS sejam selecionados ao invés de usuários com alta TBS. Além disto, usuários com baixos valores de SIR podem ser marginalmente atendidos.

#### IV. INDICADORES DE DESEMPENHO

Os seguintes indicadores de desempenho são obtidos por simulação:

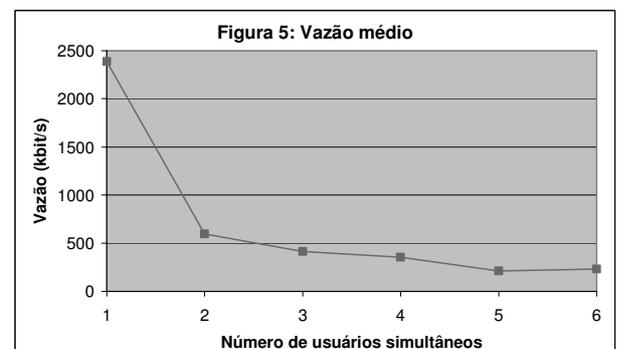
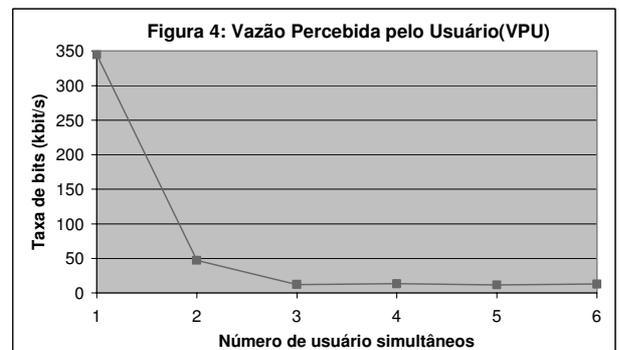
- **Atrasos na fila de espera:** um pacote entra na fila de espera quando, ao chegar ao sistema, não foi encontrado recurso disponível para a transmissão, isto é, quando  $I_{total} > I_{target}$ . O tempo que o pacote fica nesta fila é denominado atraso ou tempo na fila de espera. Este tempo é a diferença entre o instante do atendimento do pacote e o instante que ele entrou na fila.
- **Atrasos na fila de interrupção:** o atraso na fila de interrupção observado por um pacote é o somatório de todos os tempos aguardados na fila de interrupção durante seu processo de transmissão.
- **Atrasos no sistema:** o atraso no sistema é o tempo gasto na fila de espera, adicionado do tempo total de interrupções e do tempo gasto efetivamente para a transmissão. Este tempo, por sua vez, é a diferença entre o instante da conclusão da transmissão e o instante que ele entrou na fila de espera.
- **Tempo total de transmissão:** é a soma dos tempos parciais de transmissão (no caso de haver interrupções).
- **Vazão média (Throughput):** a vazão média é calculada a partir das taxas de transmissão utilizadas durante as transmissões dos pacotes. As taxas de bits utilizadas no simulador são: 38.4 kbps, 76.8 kbps, 102.4 kbps, 153.6 kbps, 204.8 kbps, 307.2 kbps, 614.4 kbps, 921.6 kbps, 1.2 Mbps, 1.8 Mbps e 2.4 Mbps.
- **Vazão percebida pelo usuário (VPU):** calculado a partir do tamanho médio das páginas e atraso no sistema, sendo definido como:

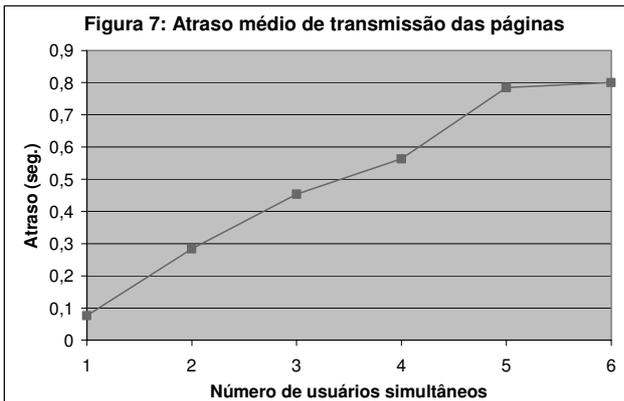
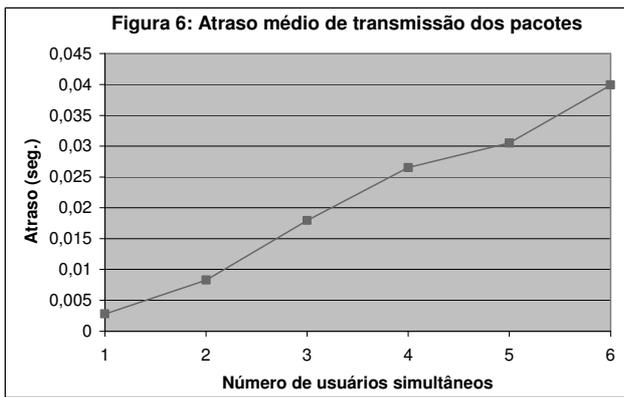
$$VPU = \frac{\text{Tamanho médio da página}}{\text{Tempo de carregamento da página}} \quad (11)$$

#### V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

##### A. Capacidade da BS para tráfego NRT

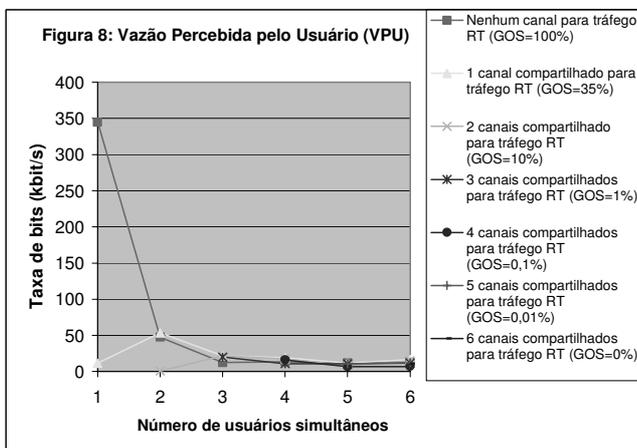
Inicialmente, são apresentados os resultados de simulação que mostram o quanto é perdido em capacidade na BS quando são transmitidos pacotes de diversos usuários simultaneamente ao invés de um único usuário por vez. A figura 4 mostra a vazão percebida pelo usuário (VPU), definido pela expressão (11), em função do número de usuários com pacotes sendo simultaneamente transmitidos. Observa-se que valores de VPU maiores são alcançados quando se agenda pacotes de 1 usuário por vez ao invés de vários usuários simultaneamente. A VPU é otimizada agendando-se um pacote por vez porque obtém-se, desta forma, a vazão mais alta possível conforme mostrado na figura 5. Agendando-se um pacote por vez, consegue-se uma vazão média de 2,4 Mbit/s, enquanto que quando se agenda a transmissão de 2 pacotes simultaneamente, a vazão diminui para apenas 614 kbit/s. Agendando-se mais do que 2 usuários por vez, obtém-se vazões abaixo de 500 kbit/s. Desta forma, os atrasos de transmissão de pacotes e páginas tornam-se mais significativos. O aumento neste atrasos, causa um aumento nos tempos de espera e interrupção, resultando em atraso de sistema maiores, conforme mostrado nas figuras 6 e 7.





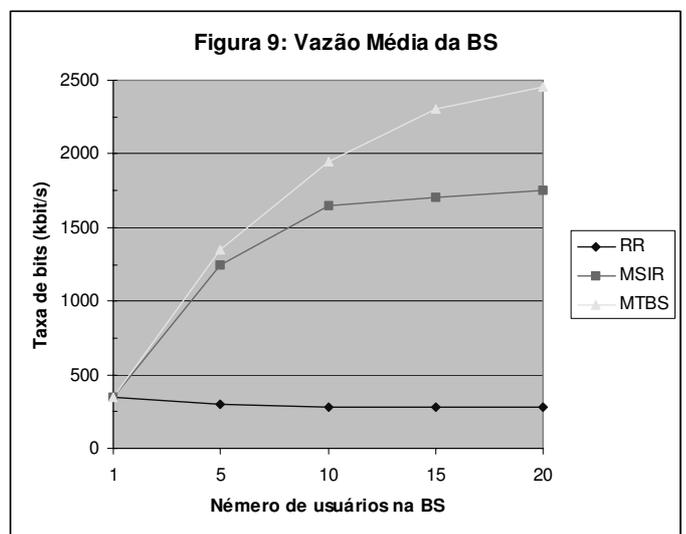
**B. Compartilhamento de Recursos da BS para tráfego RT e NRT**

A figura 8 mostra o efeito de compartilhamento de canais de tráfego de uma mesma portadora entre usuários RT e NRT para um tráfego RT de 0,5 Erlang. Os usuários RT têm prioridade sobre o tráfego NRT, de forma que pacotes são interrompidos quando  $I_{total} > I_{target}$ . Observa-se que o agendamento de pacotes de um único usuário por vez embora mantenha uma alta vazão, resulta em uma baixa VPU devido ao aumento no atraso de pacotes no sistema. O efeito sobre a VPU do compartilhamento de recursos de uma mesma portadora entre os tráfegos RT e NRT, para um mesmo tráfego RT, no caso de 0,5 Erlang, diminui na medida em que se aumenta o número de canais compartilhados. Este fato deve-se à diminuição de interrupção de pacotes pelo tráfego RT.



**C. Algoritmos de agendamento de pacotes considerados**

Os resultados de simulação da seção anterior mostram que a capacidade da BS é maximizada quando são transmitidos pacotes de um único usuário por vez. Assim, em todos os algoritmos de agendamento de pacotes considerados, a transmissão de pacotes é dividida em intervalos de tempo de 1 seg (100 quadros WCDMA). Em cada um dos intervalos de tempo, são transmitidos pacotes de um único usuário por vez. Adicionalmente, consideram-se portadoras separadas para o tráfego RT e NRT. A figura 9 mostra a vazão média de uma BS em função do número de usuários NRT. Como esperado, o algoritmo de agendamento de pacotes MTBS fornece a maior vazão média na BS, enquanto que o algoritmo RR fornece a menor vazão. O algoritmo MSIR provê uma vazão intermediária entre os algoritmos MTBS e MSIR.



**VI. CONCLUSÕES**

Neste trabalho foi apresentado um simulador de agendamento de pacotes, incluindo-se modelos de tráfego por circuitos (RT) e pacotes (NRT) bem como um modelo de mobilidade restrito onde considera-se somente a posicionamento inicial das MS (isto é, MS sem movimento). Com o simulador foi investigado o quanto um sistema WCDMA perde em vazão ("throughput") quando pacotes NRT de vários usuários são transmitidos em paralelo ao invés de 1 ou poucos usuários de cada vez. Para se obter o máximo de vazão por portadora em um sistema WCDMA, foi mostrado que é melhor ter portadoras separadas para tráfego de pacotes NRT e tráfego RT. Baseado nestes resultados, foram também simulados três algoritmos de agendamento de pacotes: Round Robin (RR), Máxima taxa de bits solicitada por pacote pelo usuário (MTBS) e Máximo SIR ou TBP (MSIR). Em todos os algoritmos, a transmissão de pacotes é dividida em intervalos de tempo de 1 seg. sendo que, em cada um dos intervalos de tempo, são transmitidos pacotes de um único usuário por vez. Os resultados de simulação mostram

que o algoritmo MTBS fornece a maior vazão na BS, seguido do algoritmo MSIR e RR. Estes resultados sugerem uma combinação dos algoritmos MTBS e MSIR, de forma a eliminar as desvantagens de cada um destes algoritmos quando operam separadamente (isto é, o primeiro atende marginalmente os usuários com baixa TBS e o segundo os usuários com baixos valores de SIR) o que deverá ser apresentado em um trabalho futuro.

#### Referências

- [1] Recomendação ITU-T Q.1701 (03/99) – Framework for IMT-2000 networks.
- [2] A. Jatali, R. Padovani, and R. Pankaj, “Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency high data rate Personal Communication Wireless system”, in Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf. (VTC 2000 Spring), Tokyo, Japan, May 2000, vol. 3, pp. 1854-1858.
- [3] Robert C. Elliott and Witold A. Krzymien, “Scheduling Algorithms for the cdma2000 Packet Data Evolution, in Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf. (VTC 2002 Fall), Vancouver, Canada, September 2002.
- [4] Jelena Damnjanovic, Avinash Jain, Tao Chen, Sandip Sarkar, “Scheduling the cdma2000 Reverse Link”, in Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf. (VTC 2002 Fall), Vancouver, Canada, September 2002.
- [5] Luis Almajano, Jordi Pérez-Romero, “Packet Scheduling Algorithms for Interactive and Streaming Services under QoS Guarantee in a CDMA System”, in Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf. (VTC 2002 Fall), Vancouver, Canada, September 2002.