

Uma avaliação das redes tolerantes a atrasos e desconexões através de traces reais de mobilidade humana *

Carlos A. V. Campos¹, Rafael de M. S. Fernandes¹ e Luís F. M. de Moraes^{1†}

¹Laboratório de Redes de Alta Velocidade – RAVEL/COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro, Brasil
{beto,rafael,moraes}@ravel.ufrj.br

Abstract. *Delay tolerant networks are characterized by its intermittent connections. User mobility is the one of causes of this intermittency. Thus, to investigate these networks under the influence of real mobility is increasingly important. In this context, a capture of human mobility in a real scenario by GPS is described in this paper. This mobility was used in performance evaluation, by simulation, of the delay tolerant networks and compared with simulations using some mobility models from literature. As results were obtained the contact time and intercontact time distributions. In addition, the Epidemic, PROPHET, and Spray and Wait routing protocols were evaluated and results indicated that the performance of these protocols, when influenced by the real mobility, is quite different while compared with results using synthetic models.*

Resumo. *As redes tolerantes a atrasos e desconexões caracterizam-se pelas suas conexões intermitentes. A movimentação dos usuários é uma das causas dessa intermitência. Assim, avaliar essas redes sob a influência da mobilidade real é cada vez mais importante. Dentro desse contexto, neste artigo é descrita uma captura de mobilidade humana em um cenário real através de equipamento de GPS. Essa mobilidade foi utilizada na avaliação de desempenho, via simulação, das redes tolerantes a atrasos e desconexões, e foi comparada com simulações utilizando alguns modelos de mobilidade da literatura. Como resultados dessa avaliação foram obtidas as distribuições do tempo de contato e entre contato dos usuários. Além disso, os protocolos de roteamento Epidêmico, PROPHET e Spray and Wait foram avaliados e os resultados obtidos indicaram que o desempenho destes protocolos, quando influenciados pela mobilidade real, é bastante diferente ao ser comparado com os resultados usando modelos sintéticos.*

1. Introdução

As redes tolerantes a atrasos e desconexões (*Delay Tolerant Networks - DTN*) provêm um ambiente de desafios, onde a comunicação entre os nós é intermitente. Isso significa que a conexão entre os nós nessas redes, pode não existir em um determinado intervalo de tempo. Assim, quando um nó está desconectado, o mesmo armazena as suas mensagens e as repassa através de conexões oportunísticas estabelecidas posteriormente.

Aplicações para este tipo de rede são inúmeras, como por exemplo: redes de mobilidade terrestre, onde particionamentos podem ocorrer devido à interferência no sinal; redes que utilizam meios não comuns, como, transmissões no espaço, onde os sistemas são sujeitos a grandes latências e interrupções [8]. Em relação as redes com mobilidade

*Este trabalho foi financiado parcialmente pela CAPES, CNPq e FAPERJ.

†Autores por ordem alfabética de sobrenomes.

terrestre e aplicações semelhantes, o modo como ocorre o movimento dos nós pode ser um fator importante no funcionamento desse tipo de DTN. Para a representação dessa movimentação são usados os modelos de mobilidade [5]. Porém esses modelos são sintéticos, ou seja, o movimento de um nó é gerado por uma equação matemática ou um processo estocástico. Na literatura existem vários modelos sendo que os mais conhecidos são, o *random walk* e o *random waypoint* [5]. Recentemente, vários trabalhos, como por exemplo, [14, 20, 16], identificaram problemas e características indesejáveis nesses modelos ou do uso desses na simulação das redes móveis. Assim, é importante analisarmos as DTNs, que é um tipo de rede móvel, em um cenário real de movimentação de pessoas para responder as seguintes perguntas. Como seria o funcionamento de uma DTN em um cenário de mobilidade real? Os modelos de mobilidade influenciam da mesma maneira que a mobilidade real uma DTN? Como se comporta o desempenho de um protocolo de roteamento sob diferentes tipo de mobilidade?

O objetivo deste trabalho é responder completamente, ou parcialmente, todas essas perguntas. Dessa maneira, foi realizado um conjunto de experimentos de captura da mobilidade humana num cenário real na cidade do Rio de Janeiro. O cenário escolhido foi uma área de lazer utilizado tanto para atividades físicas quanto para estudo e pesquisa, o que sugere o uso de uma rede móvel sem fio, como por exemplo, uma DTN. Após a captura da mobilidade humana, foi realizada uma avaliação de desempenho, via simulação, dessas redes através de métricas baseadas no encontro físico dos nós e de três protocolos de roteamento muito conhecidos na literatura. Por fim, importantes resultados foram obtidos com o intuito de entender o impacto da mobilidade nessas redes e para responder as perguntas apresentadas acima.

O restante deste trabalho está dividido da seguinte forma. Na seção 2, são apresentados os trabalhos relacionados com os protocolos de roteamento em DTNs, bem como, a influência da mobilidade no desempenho dessas redes. Na seção 3, é explicado o procedimento de captura da mobilidade humana. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na seção 4 e, finalmente, as conclusões na seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

O roteamento nas DTNs é caracterizado pela forma de trocar as mensagens a cada contato. Assim, os protocolos de roteamento são classificados em, encaminhadores e replicadores. Os protocolos encaminhadores como, o PROPHET [15], o MEED [10] e o MAXPROP [3], escolhem quais mensagens serão transmitidas, e os replicadores, que têm como exemplo, o Epidêmico [19], Rapid [1] e o Spray and Wait [18], repassam cópias de suas mensagens em cada contato. A seguir, os principais trabalhos relacionados com o roteamento e a avaliação de desempenho serão descritos.

No protocolo Epidêmico [19] o roteamento das mensagens é realizado pela própria mobilidade dos nós na DTN. Assim, quando um nó entra no alcance de transmissão de outro nó é estabelecida uma conexão. Em seguida, os nós trocam suas listas de mensagens armazenadas. Deste modo, as mensagens da lista recebida é comparada com as mensagens presentes no nó, para determinar quais mensagens o nó não possui. Feito isso, o nó solicita o envio de cópias destas mensagens. O processo de troca de mensagens se repete toda vez que um nó estabelece contato com um novo nó, o que permite que as mensagens sejam rapidamente distribuídas pela rede. Assim, quanto mais cópias de uma mesma mensagem forem encaminhadas na rede, maior será a probabilidade desta mensagem ser entregue e menor será o atraso. Este foi o primeiro protocolo de roteamento proposto para as DTNs.

O protocolo PROPHET (*Probabilistic ROuting Protocol using History of Encounters and Transitivity*) [15] utiliza o mesmo princípio de troca de mensagens utilizado no protocolo Epidêmico. Quando dois nós estabelecem uma conexão, eles trocam as suas listas de mensagens. A diferença é que nesta lista existe um parâmetro novo para cada mensagem da lista. Esse parâmetro corresponde à probabilidade de cada nó a entregar mensagens para um destino conhecido b ($P_{(a,b)} \in [0, 1]$). O valor de $P_{(a,b)}$ aumenta sempre que a e b se encontram e diminui se a e b deixam de se encontrar frequentemente. O tempo é controlado por uma constante k , denominada constante de envelhecimento, que corresponde ao número de unidades de tempo transcorridas desde a última vez que a métrica foi atualizada. Quando um nó recebe a lista do vizinho, ele calcula a probabilidade de entrega para cada mensagem que ainda não possui. Em seguida, para cada mensagem, o nó compara a probabilidade indicada na sua lista com a probabilidade indicada na lista recebida do vizinho. Essa comparação é realizada para verificar qual dos dois nós possui a maior probabilidade de entrega. Após essa comparação, três procedimentos serão realizados: (i) o nó deve enviar um pedido das mensagens não armazenadas que possuem uma maior probabilidade de serem entregues através dele; (ii) recebe o pedido de mensagens do vizinho e as envia; e (iii) apaga todas as mensagens que o vizinho tem maior probabilidade de entregar. No final, cada nó possuirá somente mensagens cujas probabilidades de entrega sejam maiores através dele.

Já o protocolo *Spray and Wait* (SW) [18] combina a velocidade do protocolo Epidêmico, com a simplicidade de um envio direto (*direct transmission*) para o nó destino. Este protocolo possui duas fases, na primeira, chamada de *Spray*, para cada mensagem gerada no nó origem, L cópias desta mensagem são repassadas para outros $L - 1$ nós. Se o nó destino não foi alcançado nesta fase, o protocolo entra na fase de espera, chamada *Wait*, onde os L nós que contêm cópias da mensagem, irão repassá-las somente para o nó destino. Uma otimização deste protocolo, bastante utilizada, é chamada de *binary Spray and Wait*. Nessa otimização, cada nó se possui $n > 1$ cópias da mensagem (onde n é o número de cópias de uma mensagem contida em um nó), irá repassar $\lfloor n/2 \rfloor$ e manterá $\lceil n/2 \rceil$ cópias da mensagem consigo, até o nó possuir apenas uma cópia da mensagem ($n = 1$), quando entrará na fase *Wait*.

Não basta propor um novo protocolo ou aplicação, mas sim propor e avaliar o seu desempenho sob diferentes contextos. Assim, vários trabalhos relacionados com a avaliação de desempenho do roteamento para as DTNs serão descritos a seguir.

Em [2] uma avaliação das DTNs sobre o impacto dos modelos de mobilidade em grupo baseados em redes sociais é apresentada. Assim, métricas de desempenho, como, taxa de ocupação dos *buffers* e sobrecarga do roteamento na largura de banda, foram avaliadas. Entretanto, algumas hipóteses não realistas são assumidas como, *buffer* e largura de banda infinita, nenhuma perda na camada física e a não utilização de mobilidade real. Uma outra avaliação de protocolos de roteamento é apresentada [7], onde também foi proposta uma nova técnica de roteamento baseada em características das redes sociais e complexas. Além disso, foi mostrado que o protocolo PROPHET possui falhas em cenários de poucos nós e a mobilidade foi baseada nos arquivos de *log* das chamadas telefônicas de celulares. Em [17] é realizada uma avaliação de vários protocolos de roteamento em um cenário de larga escala, contendo 5.100 nós, aproximadamente. Nesta avaliação, várias métricas foram investigadas e importantes resultados foram obtidos. Contudo, dados de mobilidade real não foram utilizados, mas sim, uma representação do movimento baseada na associação de clientes à pontos de acesso em uma WLAN.

Uma avaliação da influência de vários modelos de mobilidade, no funcionamento das DTNs, é descrita em [13]. Além disso, foi verificado que a propriedade denominada de “comportamento super difuso” dos modelos de mobilidade, leva a resultados otimistas ou pessimistas no desempenho das DTNs. Em [9], é apresentado um importante estudo sobre a relação da distribuição do tempo entre contatos, obtidos a partir da mobilidade humana capturada, e algumas métricas de desempenho das DTNs. Vários resultados são obtidos, tais como, a aproximação do tempo entre contatos dos nós à uma distribuição Pareto truncada; e a aproximação do tempo entre contatos do modelo *Levy-walk* aos da mobilidade humana capturada. Este artigo é um dos motivadores da nossa avaliação que será apresentada na seção 4.

Recentemente, a comunidade científica vem questionando o uso da mobilidade sintética na avaliação de desempenho das redes móveis [14, 20, 16]. Além disso, a maioria dos trabalhos mencionados acima também fazem uso dessa mobilidade sintética. Assim, fazer o uso da mobilidade real na avaliação de desempenho é o foco do nosso trabalho, e que será apresentado nas próximas seções.

3. Representação da Mobilidade: Mobilidade Humana X Sintética

Com o objetivo de verificar a influência da mobilidade na avaliação de desempenho das DTNs, nesta seção serão descritas a captura da mobilidade humana, em um cenário específico, e a geração de mobilidade sintética utilizada nessa avaliação. A mobilidade humana foi obtida usando um equipamento de GPS, onde foi capturado o movimento de pessoas andando por uma área de lazer, que pode ser um potencial cenário de uso dessas redes. Para a mobilidade sintética foram escolhidos alguns modelos de mobilidade.

3.1. Mobilidade humana

3.1.1. Descrição dos experimentos para a coleta da mobilidade humana

Os experimentos foram realizados, entre os meses de janeiro à maio de 2008, no parque Quinta da Boa Vista localizado na cidade do Rio de Janeiro. O parque contém lagos, cavernas, muitas árvores e abriga dois importantes pontos turísticos: o jardim zoológico do Rio de Janeiro e o Museu Nacional. Assim, este parque foi escolhido por ser uma área de lazer bastante freqüentada pelas pessoas e porque o receptor de GPS utilizado apresentou um bom funcionamento para a captura do movimento das pessoas. A coleta dos traces ocorreu durante vários dias da semana, das 9:00 às 16:00 horas. Esse horário foi escolhido com base em um *software* de planejamento da qualidade da constelação de satélites que cobrem uma determinada área geográfica em um determinado intervalo de tempo¹. Para a coleta dos traces foi usado um receptor de GPS da marca Trimble, modelo Geo XM², que possui uma alta precisão (com erro de localização submétrico) e permite correção diferencial³. Estas características permitem ao receptor de GPS coletar posições geográficas contendo pequenos erros de localização.

Para a coleta dos registros (*traces*) de movimento, 120 pessoas que caminhavam pelo parque, em dias e horários diferentes, foram escolhidas aleatoriamente e convidadas para participarem da pesquisa como voluntárias. Assim, o receptor de GPS foi entregue a cada um dos voluntários que se movimentaram, de maneira independente pelo parque. No final da caminhada de cada voluntário, o GPS era recolhido novamente. O tempo de coleta do movimento de cada voluntário variou de 300 à 1300 segundos aproximadamente, na qual o tempo entre amostras de cada posição coletada foi de um segundo.

¹Para informações detalhadas sobre este *software* acesse <http://www.trimble.com/planningsoftware.shtml>

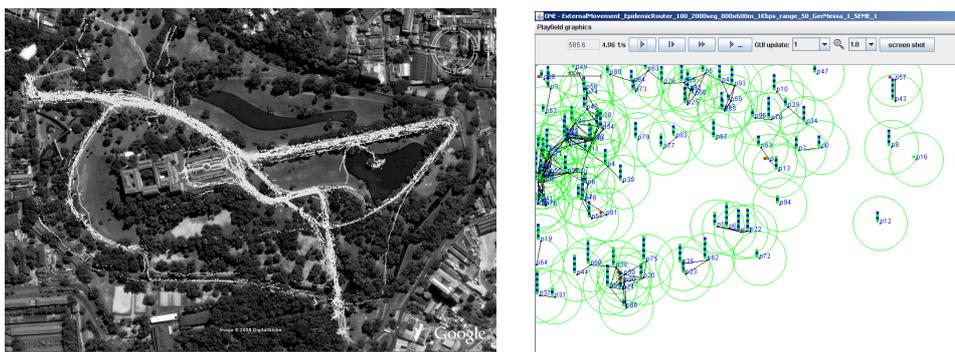
²Detalhes sobre este equipamento podem ser encontrados em <http://www.trimble.com/geoxm.shtml>

³Esta técnica ajusta a posição geográfica coletada em relação a uma base de dados geodésica.

3.1.2. Tratamento aplicado aos dados

Após a coleta dos experimentos, os dados foram submetidos à técnica de correção diferencial com o objetivo de melhorar a acurácia das medidas coletadas pelo GPS, ou seja, diminuir possíveis erros na captura da posição geográfica das pessoas através do GPS. Para isso, foi usada a ferramenta *Pathfinder Office*⁴. Além disso, valores discrepantes nos dados, não corrigidos pela técnica de correção diferencial, podem ocorrer devido a erros causados por obstáculos como as copas das árvores. Desta maneira, as posições geográficas que geraram deslocamentos (diferença entre a posição atual e a posição no segundo anterior) superiores a 2,5 metros foram descartadas⁵. Com o objetivo de ter-se uma avaliação com traces de durações iguais de tempo, foram escolhidos 100 experimentos que tiveram pelo menos 600 segundos de duração (tempo que foi usado nas simulações). O tempo remanescente (acima de 600 segundos) desses traces não foi considerado neste trabalho, juntamente com os 20 traces de duração menor que 600 segundos.

Na Figura 1(a), é mostrado o traçado do deslocamento de alguns dos experimentos usados na avaliação. Através dessa figura, pode ser observado que o deslocamento dos voluntários pelo parque, na maioria das vezes, foi influenciado pelo formato das ruas e trilhas existentes no parque. Assim, podemos dizer que esse deslocamento foi baseado em obstáculos ao contrário do deslocamento aleatório que é gerado pelos modelos de mobilidade, mais utilizados na literatura, *random walk* e *random waypoint*. Essa observação é importante e nos ajudará no entendimento dos resultados obtidos na seção 4.



(a) Amostras de registros da movimentação humana pelo parque da Quinta da Boa Vista

(b) Fotografia da mobilidade humana no simulador The ONE

Figura 1. Comportamento da mobilidade capturada no cenário investigado, ilustrado em (a) e a visão do funcionamento do simulador utilizado em (b).

3.2. Modelos de mobilidade utilizados

Foram escolhidos dois modelos aleatórios, o *random walk* e o *random waypoint* [5] para a geração de mobilidade. No modelo *random walk* (RW), dado que um nó está na posição x_i , ele escolhe aleatoriamente uma direção d e uma velocidade de deslocamento v uniformemente distribuídos entre $[0, 2\pi]$ e $[v_{min}, v_{max}]$, respectivamente. Feito isso, o nó se desloca em linha reta para uma nova posição x_{i+1} com a velocidade escolhida. Se um nó encontra a borda da área simulada, ele muda a trajetória fazendo uma reflexão na borda utilizando o ângulo de saída igual ao ângulo de incidência na borda. A cada intervalo de tempo t ou uma distância percorrida s , uma nova direção e velocidade são escolhidas para cada nó.

⁴Mais detalhes sobre esta ferramenta acesse <http://www.trimble.com/pathfindertools.shtml>

⁵Durante os experimentos, foi observado que nenhum voluntário chegou a velocidade de 2,5 m/s. Assim, deslocamentos superiores a 2,5 m, que podem ter sido gerados erroneamente, não foram considerados.

Já o modelo *random waypoint* (RWP) inclui tempos de pausa entre os deslocamentos de um nó. Após uma pausa, o nó escolhe aleatoriamente um novo destino dentro da área de simulação e uma velocidade, que é uniformemente distribuída entre $[v_{min}, v_{max}]$. Então, o nó se desloca para esse destino com a velocidade escolhida e após chegar ao destino, espera um tempo de pausa, para reiniciar o movimento. Nos últimos anos, várias características indesejáveis foram descobertas nos modelos aleatórios [5, 14, 20]. Por isso, cuidados devem ser tomados quando usa-se, nas simulações, esses modelos. Assim, neste artigo foi evitado o uso da velocidade mínima igual a zero e foi descartado o intervalo inicial das simulações, conhecido como fase transiente.

4. Avaliação de Desempenho em DTN

Como a DTN é uma rede peculiar contendo diversos desafios, avaliações de desempenho desta rede é importante para se mensurar a qualidade da comunicação dos seus usuários. O estudo do consumo de energia, por exemplo, é importante pois pode refletir diretamente no roteamento e na taxa de entrega dos pacotes da DTN, por outro lado, o número de saltos que um pacote executa até o destino afeta diretamente o consumo de energia dos nós. Outro estudo importante é a quantidade de mensagens no *buffer* dos nós, o que pode causar perda de mensagens, podendo impactar diretamente a taxa de entrega de mensagens, que é outra métrica importante numa DTN. Porém, neste trabalho estamos investigando somente o impacto da mobilidade real e sintética nessas redes, tanto no contexto do encontro dos nós, quanto no desempenho dos seus protocolos de roteamento. Como os contextos são diferentes, inicialmente os resultados para mobilidade serão apresentados e, por seguinte, os resultados para os protocolos de roteamento.

4.1. Avaliação do encontro dos nós sob a influência da mobilidade

A avaliação do encontro dos nós é de grande importância numa DTN, pois dada a característica das conexões oportunísticas, a avaliação dessas conexões reflete nas características da rede e influencia diretamente o roteamento e a entrega das mensagens. Para avaliação dessas características, as métricas mais usadas na literatura, são o tempo de contato e o tempo entre contatos [6, 4, 11]. Essas métricas serão definidas a seguir.

Sejam n_1 e n_2 nós e $p_{n_1}(t)$ e $p_{n_2}(t)$ suas respectivas posições no instante t , sejam ainda A_{n_1} e A_{n_2} suas áreas de cobertura. Se no instante t , $p_{n_2}(t) \subset A_{n_1}$ e $p_{n_1}(t) \subset A_{n_2}$ diz-se que n_1 e n_2 estão em contato no instante t . Seja t_i , o instante em que n_1 e n_2 iniciaram o contato e seja t_f , o instante em que os mesmos nós perderam o contato, onde $t_f > t_i$. Assim, o **tempo de contato (TC)** é definido como a diferença entre o instante em que n_1 e n_2 iniciaram o contato e o instante em que eles perderam o contato, ou seja, $TC = t_f - t_i$.

Sejam os mesmos dois nós n_1 e n_2 , t_f o instante em que n_1 e n_2 perderam o contato e t_r o instante em que esses nós retomaram o contato, para $t_r > t_f$. Então, **tempo entre contatos (TEC)** é a diferença entre o instante em que n_1 e n_2 perderam o contato e o instante em que esses nós retomaram o contato, ou seja, $TEC = t_r - t_f$.

4.1.1. Características da Simulação

Para avaliarmos o encontro dos nós foram usados os arquivos da movimentação real, descrita na seção 3.1.1. Esses arquivos foram formatados⁶ e inseridos como dados de entrada

⁶A formatação consistiu na filtragem de amostras contendo erros e na sincronização do tempo inicial dos traces em uma mesma simulação. O uso de traces sincronizados artificialmente é um passo intermediário entre os dados sintéticos (modelos de mobilidade) e a mobilidade, capturada ao mesmo tempo, de pessoas portando terminais portáteis.

no simulador ONE⁷. A Figura 1(b) apresenta a execução deste simulador utilizando os arquivos de movimentação real como parâmetro de entrada. Além disso, para compararmos os resultados dessa movimentação, foram simulados, também no ONE, os modelos de mobilidade *random walk* e o *random waypoint*. As medidas TC e TEC foram obtidas supondo que o movimento das pessoas seja independente e que as mensagens trocadas não interferem nesse movimento. Os parâmetros utilizados para a movimentação real e os modelos de mobilidades foram: área de simulação de 600 x 800 metros contendo 100 nós posicionados aleatoriamente, velocidade dos nós nos modelos sintéticos entre 0.5 e 1.5 m/s e tempo de pausa entre 0 e 1 segundo. Estes valores foram escolhidos com base nas características da movimentação real. Foram realizadas 10 rodadas de simulação para cada cenário, com o tempo de simulação de 600 segundos após o descarte de 1000 segundos da fase transiente.

4.1.2. Distribuição Cumulativa Complementar do Tempo de Contato - DCCTC

A análise da distribuição do TC nas DTNs é de suma importância, pois dado a característica de desconexão e do uso de conexões oportunísticas nessas redes, se o TC entre dois nós for pequeno, poucos pacotes serão trocados entre os nós, o que pode causar grandes atrasos na entrega das mensagens, estouro da capacidade (*buffer*) dos nós e, conseqüentemente, a perda das mensagens [6, 4]. Além disso, essa distribuição depende do tamanho do raio de transmissão dos nós, pois quanto maior o raio de transmissão, maior a probabilidade de eles estarem em contato. Para uma análise mais detalhada da cauda dessa distribuição é recomendado [6, 4, 11] usar a sua cumulativa complementar.

A Figura 2 apresenta a DCCTC para a mobilidade real e sintética variando o raio de transmissão. Na Figura 2(a) tem-se essa distribuição para um raio de 10 metros para cada nó da rede, na Figura 2(b) para um raio de 50 metros e na Figura 2(c) um raio de 100 metros. Pode-se observar que as DCCTC dos modelos de mobilidade não se ajustaram completamente à DCCTC da mobilidade real. Além disso, verifica-se na Figura 2(a), que 99% do tempo de contato é inferior a 70 segundos na mobilidade real e inferior a 50 segundos para a mobilidade sintética. Já na Figura 2(b), 99% do tempo de contato é inferior a 307 segundos na mobilidade real e inferior a 249 segundos para a mobilidade sintética. Este aumento no tempo de contato é devido ao raio de transmissão dos nós ser maior em relação a Figura 2(a). Isso também é verificado na Figura 2(c), onde 99% do tempo de contato é inferior a 440 seg. na mobilidade real, inferior a 385 segundos para o RWP e 477 seg. para o RW. Para TC pequenos, a diferença dos resultados desse tempo para modelos de mobilidade e mobilidade real é mais nítida. Para um raio de transmissão de 50 metros, temos que a probabilidade de um TC durar até 10 seg. é de 18,5% para mobilidade real; 11,7% para o RW e 2,9% para o RWP. Assim, uma diferença de 538% a mais de ocorrências na mobilidade real do que no RWP pode ser verificada.

O TEC numa DTN caracteriza a frequência na qual os dados podem ser transferidos entre dois nós da rede [6, 4, 11]. Esta medida também possui grande importância, pois se dois nós possuem um TEC pequeno, pode significar que eles trocam mensagens muitas vezes, o que pode acarretar uma perda de pacotes por estouro do *buffer* de mensagens, dependendo do modo como as mensagens trafegam na rede. Já se esse tempo for elevado, significa que as mensagens que devem ser trocadas pelos dois nós devem passar por muitos outros nós, o que pode provocar muitas cópias das mensagens na rede e

⁷Detalhes sobre as características deste simulador podem ser encontradas em [12].

conseqüente estouro de *buffer* de mensagens desses outros nós.

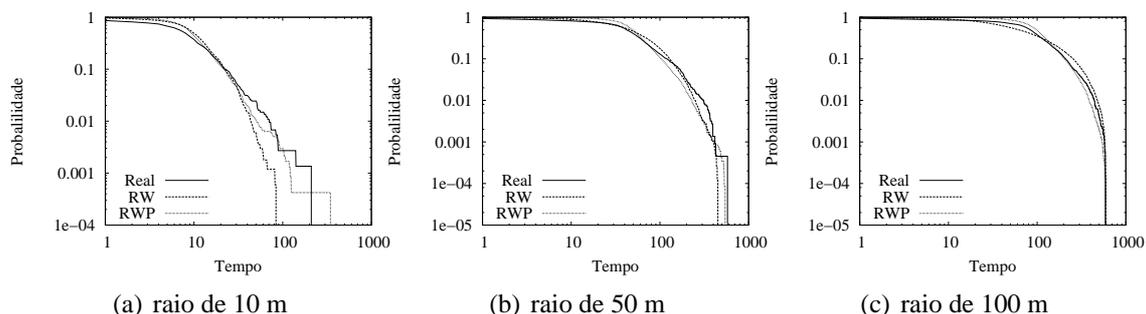


Figura 2. DCCTC da mobilidade real e sintética variando o raio de transmissão.

4.1.3. Distribuição Cumulativa Complementar do Tempo entre Contatos - DCCTEC

A Figura 3 apresenta a DCCTEC para a mobilidade real e sintética com os nós da rede contendo um raio de transmissão de 10 metros (ver Figura 3(a)), 50 metros (ver Figura 3(b)) e 100 metros (ver Figura 3(c)). Pode-se observar que a DCCTEC dos modelos de mobilidade não se ajustaram com a DCCTEC da mobilidade real, assim como ocorreu na DCCTC. Na Figura 3(a), tem-se que 90% do TEC para a mobilidade real ocorre em até 213 segundos, até 237 segundos para o RW e até 339 segundos para o RWP. Já na Figura 3(b), 90% do TEC para a mobilidade real foi de 300 segundos, para o RW, foi de 214 segundos e no RWP de 384 segundos. Por fim, na Figura 3(c) 90% do TEC para a mobilidade real ocorre até 281 segundos, 209 segundos para o RW e 400 segundos para o RWP, ou seja, através da DCCTEC verifica-se que em 90% dos casos o TEC é menor na mobilidade RW do que na mobilidade real, que é menor que o TEC do RWP.

Assim como na DCCTC, para valores de tempo entre contatos pequenos, a diferença entre a mobilidade real e os modelos sintéticos é mais aparente. Para o mesmo raio de transmissão de 50 metros, temos que a probabilidade de um TEC durar até 10 segundos é de 49,6% para mobilidade real; 15,3% para o RW e 7,5% para o RWP. Uma diferença de 561% a mais de ocorrências na mobilidade real do que no modelo RWP.

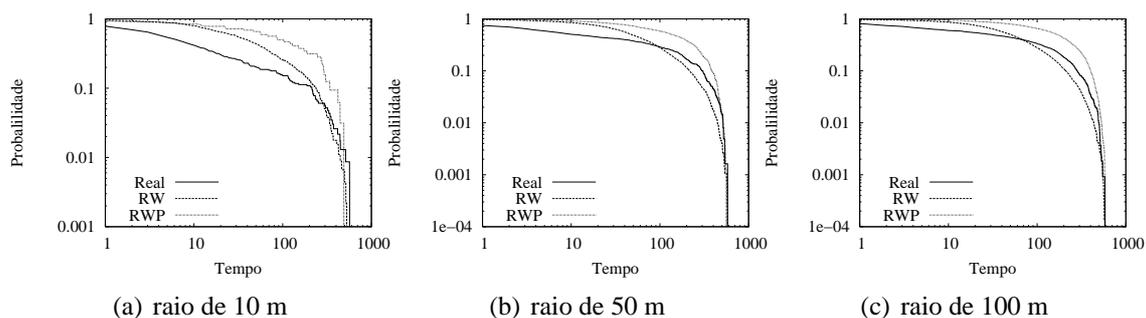


Figura 3. DCCTEC da mobilidade real e sintética variando o raio de transmissão.

Dada as análises acima, da DCCTC e da DCCTEC, pode-se concluir que simulações utilizando os modelos de mobilidade RW e RWP, para o cenário analisado, podem gerar resultados não condizentes com a realidade. Portanto, resultados que são diretamente relacionados com mobilidade podem não ser válidos, se simulados com essa mobilidade sintética. Na seção a seguir, algumas métricas de roteamento serão analisadas e comparadas, tanto usando os modelos de mobilidade quanto a mobilidade real.

4.2. Avaliação dos Protocolos de Roteamento

A maneira como os pacotes trafegam por uma rede determina, dentre outras características, a qualidade dessa rede. Informações como o número de mensagens perdidas e

recebidas, tempo de transmissão de um pacote, entre outras, são diretamente relacionadas com o tráfego de pacotes na rede. Os protocolos de roteamento são utilizados para organizar este tráfego de pacotes, e portanto, a análise do desempenho desses protocolos variando a mobilidade dos nós é um resultado importante no estudo de redes em geral e, particularmente, em DTNs, onde o roteamento ainda é um desafio. Os protocolos de roteamento avaliados neste trabalho foram o Epidêmico [19], o PROPHET [15] e o SW [18], que são os protocolos mais utilizados na literatura de DTNs e por possuírem características diferentes. O protocolo Epidêmico inunda toda a rede com mensagens, já o PROPHET é probabilístico e o SW é um protocolo que limita o número de cópias das mensagens distribuindo-as sem o uso de métricas probabilísticas.

Na avaliação desses protocolos, utilizou-se as seguintes métricas. **Probabilidade de entrega**, que é definida como sendo a razão entre as mensagens que foram roteadas até o nó destino e o total de mensagens criadas na rede. **Atraso médio** é a soma dos atrasos de todas as mensagens trafegadas na rede sobre a quantidade dessas mensagens, onde atraso é definido como a diferença entre o momento que a mensagem foi entregue no destino e o momento de criação da mesma. Por fim, a sobrecarga das mensagens na rede é dado pela quantidade de repasses de mensagens que não são para os nós finais dividido pelo número de mensagens entregues. Esta métrica apresenta a quantidade adicional de tráfego gerado na rede que foi necessário para a entrega das mensagens aos seus destinos.

A avaliação da probabilidade de entrega se deve ao fato que a essência de um protocolo de roteamento em DTNs é levar a mensagem da origem ao destino. Portanto, esta métrica demonstra a chance de uma mensagem chegar ao seu nó destino. Mas, se este roteamento da origem ao destino for muito longo, a mensagem pode se tornar obsoleta e portanto, a métrica de atraso médio ilustra o tempo de trânsito de uma mensagem pela rede. Por fim, o repasse de muitas cópias das mensagens numa DTN pode não ser uma característica interessante, pois o consumo de energia para se enviar uma mensagem é muito maior que o de processá-la. Além disso, o *buffer* dos nós são limitados, portanto a sobrecarga mostra a quantidade de tráfego gerado a mais na rede.

4.2.1. Características da Simulação

Assim como na avaliação do encontro dos nós, também foi utilizado o simulador ONE para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento. Porém para as métricas de roteamento cabe ressaltar que a camada física do simulador ONE não considera interferência no meio, a distância entre dois nós no momento da transmissão e nem possíveis obstáculos. A subcamada MAC é similar ao funcionamento do CSMA/CD, onde cada nó, antes de repassar uma mensagem verifica se o meio está ocupado. Além disso, ele verifica se o nó destino está realizando outra transmissão antes de repassar uma mensagem.

A mobilidade e os protocolos de roteamento foram avaliados em simulações de 600 segundos, numa área de 600x800 metros, possuindo 100 nós espalhados aleatoriamente. O raio de transmissão foi variado de 10 a 100 metros⁸, sendo que em cada cenário, todos os nós possuem o mesmo raio de transmissão. Foi gerada uma mensagem por segundo na rede, onde os nós origem e destino foram escolhidos aleatoriamente, sendo que o nó origem é diferente do nó destino. O tamanho das mensagens⁹ foi definido em 1KB, 20KB ou 200KB, dependendo do cenário e o tamanho do *buffer* de cada nó foi ajustado

⁸Estes valores foram escolhidos para representar dispositivos com baixa potência de transmissão, por exemplo, nós sensores e dispositivos com certa potência de transmissão, como notebooks.

⁹O tamanho da mensagem foi escolhido para permitir resultados com baixa, média e alta carga na rede.

em 5MB.

Além dos parâmetros genéricos, os protocolos de roteamento tiveram alguns parâmetros específicos ajustados. No PROPHET, a probabilidade a priori de um nó entregar uma mensagem para o destino é de 0,75. Este valor foi definido de maneira a obter menos mensagens repassadas na rede. Já para o SW, a otimização binária foi utilizada, pois é um protocolo SW ótimo e o número de cópias de cada mensagem foi definido em 6 [18]. Por fim, foram realizadas 10 rodadas de simulação para cada cenário e os resultados foram obtidos com um nível de confiança de 95%.

4.2.2. Probabilidade de Entrega

A Figura 4, apresenta a probabilidade de entrega de mensagens pela rede variando o protocolo de roteamento sob a mobilidade real. Na Figura 4(a), utiliza-se o tamanho das mensagens de 1KB para representar uma baixa carga na rede e pode-se observar que o protocolo Epidêmico obteve o melhor desempenho. Esse fato é associado ao tamanho das mensagens, já que poucas mensagens foram descartadas nesse protocolo e o mesmo tem uma taxa de entrega melhor que os outros protocolos, se poucas mensagens forem perdidas. Já na Figura 4(b), pode-se observar que o desempenho do protocolo Epidêmico diminuiu, quando as mensagens passam a ter 20KB de tamanho (para representar um cenário de carga média). O protocolo com melhor desempenho é o PROPHET para raio de transmissão maior que 40 metros, pois não replica as mensagens evitando o enchimento da memória (*buffer*) do nó. A Figura 4(c), mostra que o protocolo SW teve um desempenho superior aos outros, quando as mensagens são de 200KB (cenário de carga alta). Como o PROPHET não gera cópia das mensagens, quando ocorre estouro de *buffer*, a mensagem descartada nunca será entregue. Como nas simulações cada nó tem 5MB de *buffer* e neste cenário as mensagens tem 200KB de tamanho, então cada nó pode armazenar no máximo 25 mensagens, levando a uma maior probabilidade de perda de mensagens. Como o SW gera cópias das mensagens, mesmo com perda dessas mensagens por estouro de *buffer*, a chance de uma cópia da mensagem chegar ao destino é maior que o PROPHET. Em relação ao Epidêmico, muitas mensagens são perdidas, pois este gera muitas cópias das mensagens fazendo seu desempenho ser muito ruim em cenários de alta carga. Finalmente, como o SW gera uma quantidade fixa de cópia de mensagens e as repassa para nós aleatórios, ele evita o enchimento total do *buffer* dos nós, tanto inserindo pouco tráfego na rede, como não sobrecarregando os nós, o que pode ocorrer no PROPHET, pois poucos nós podem ter maior probabilidade de entrega, o que sobrecarregaria esses nós.

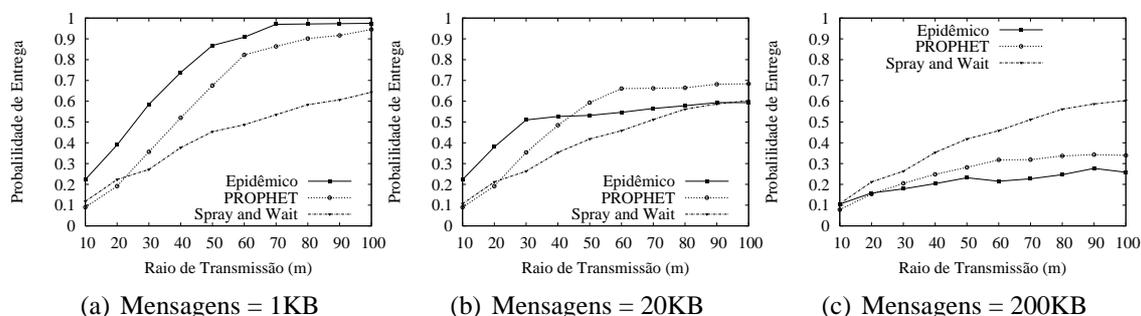


Figura 4. Probabilidade de entrega de mensagens nos protocolos de roteamento, usando a mobilidade real e variando o tamanho das mensagens (carga na rede).

A Figura 5 apresenta uma análise dos modelos de mobilidade e da mobilidade real, para o melhor protocolo de roteamento, obtido na Figura 4, para cada tamanho de mensagem. Pode-se observar resultados bastante diferentes quando se compara os tipos de

mobilidade para um determinado protocolo de roteamento. Por exemplo, para um cenário de carga baixa, protocolo Epidêmico e raio de 50 metros (vide Figura 5(a)), a probabilidade de uma mensagem ser entregue é de 0,87 na mobilidade real; 0,35 no RW e 0,71 no RWP. Além disso, pode-se verificar, por exemplo na Figura 5(c), que a probabilidade de entrega na mobilidade real é sempre maior que nos modelos sintéticos, não importando o tamanho do raio de transmissão. Portanto, esses resultados mostram que o uso de modelos aleatórios pode gerar valores sub-estimados para a probabilidade de entrega nos cenários investigados. Será que os valores serão também diferentes para as outras métricas?

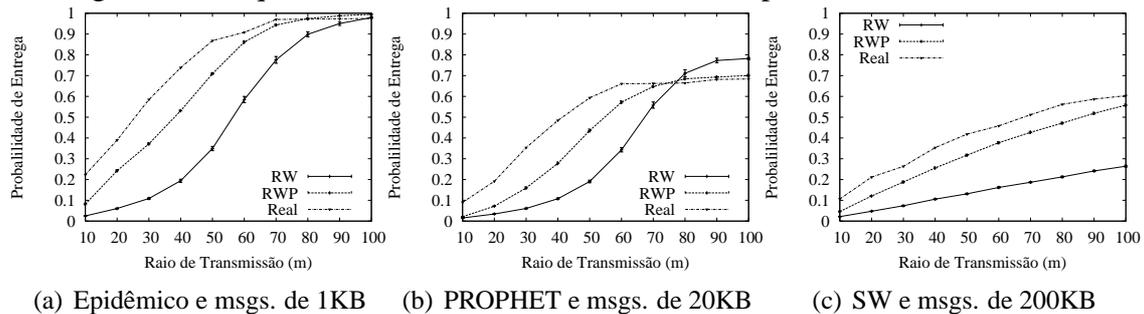


Figura 5. Probabilidade de entrega utilizando os modelos sintéticos e a mobilidade real. Em cada figura é mostrado o protocolo que obteve a maior probabilidade de entrega para o tamanho de mensagem especificado. Pela figura, variando-se a carga na rede o protocolo com melhor desempenho varia também.

4.2.3. Atraso Médio

O resultado das simulações para a métrica atraso médio utilizando apenas a mobilidade real é apresentado na Figura 6. Assim como na seção anterior, existe um resultado para cada tipo de carga na rede. Nas Figuras 6(a) e (b), pode-se observar que o protocolo Epidêmico teve um desempenho superior aos outros protocolos. Este fato se deve as características desse protocolo, já que inunda a rede com mensagens, então, apesar de perder bastante pacotes com a carga alta, os pacotes entregues podem chegar mais rápido ao destino do que nos outros protocolos, que possuem poucas mensagens na rede. Já na Figura 6(c), o protocolo PROPHET teve o melhor desempenho. Isto pode ser atribuído a menor perda de mensagens do PROPHET, que só gera uma cópia da mensagem e a repassa para um outro nó fazendo com que esta mensagem chegue mais rápido ao destino em comparação com o SW. Pode-se observar ainda que, o desempenho do SW é similar independente do tipo de tráfego. Isto é devido ao número de repasses das mensagens ser baixo e existirem poucas cópias de mensagens na rede. Assim, o SW tem a tendência de obter um atraso médio semelhante independente da carga na rede.

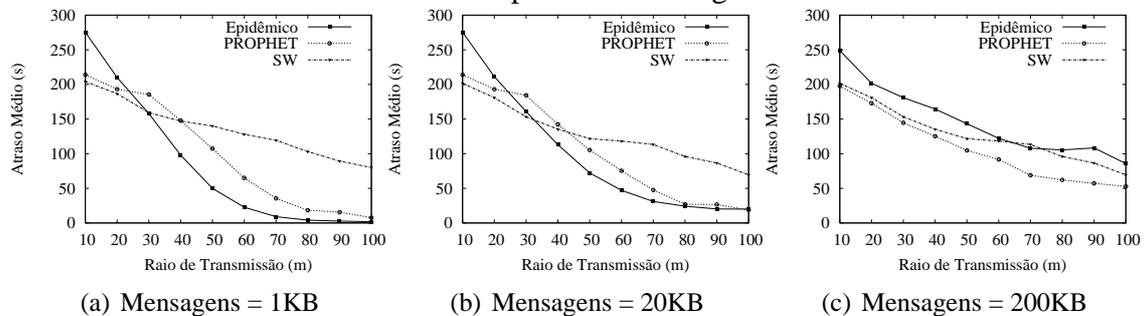
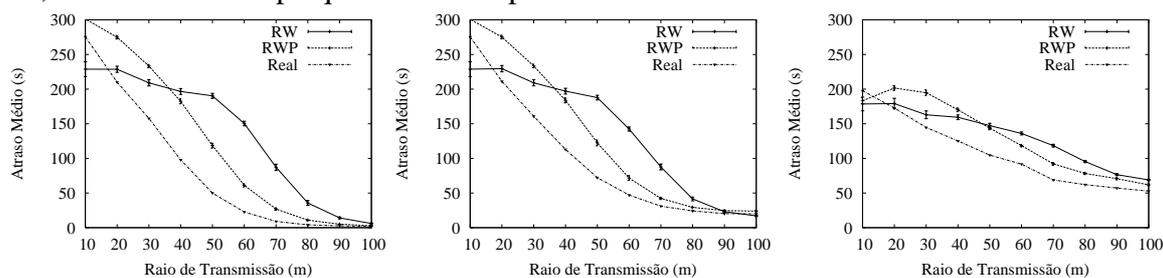


Figura 6. Atraso total médio das mensagens dos protocolos de roteamento sob a mobilidade real e variando a carga na rede através do tamanho das mensagens.

A Figura 7 apresenta uma análise da mobilidade real \times sintética, para o melhor protocolo de roteamento, em cada tamanho de mensagem, como analisado na métrica

anterior. Pode-se observar que os resultados da mobilidade real são sempre menores do que da mobilidade sintética, para qualquer carga na rede. Este resultado é esperado devido a diferença da DCCTC e da DCCTEC da mobilidade real em detrimento a mobilidade sintética, o que faz com que os protocolos de roteamento possuam mais oportunidades de rotear suas mensagens no cenário usando a mobilidade real. Para exemplificar, fixaremos novamente o raio em 50 metros e analisaremos os resultados para mensagens de tamanho 200KB. Na mobilidade real, a média do atraso das mensagens foi de 104,77 segundos, do RWP de 143,66 segundos e do RW de 147,33 segundos, o que fornece uma diferença de 42,6% a mais de tempo quando se compara a mobilidade real com o RW.



(a) Epidêmico e msgs. de 1KB (b) Epidêmico e msgs. de 20KB (c) PROPHET e msgs. de 200KB

Figura 7. Atraso médio das mensagens para a mobilidade real e sintética. Cada subfigura mostra o protocolo que obteve o menor atraso médio para o tamanho de mensagem especificado. Através desta figura, pode ser observado então que variando-se a carga na rede, o protocolo com menor atraso pode ser diferente.

4.2.4. Sobrecarga

A métrica sobrecarga, é importante nas DTNs pois, as mesmas, são suscetíveis a quantidade de tráfego na rede. Na Figura 8, pode-se verificar que o protocolo SW é o melhor em todos os casos, o que era de se esperar, já que o mesmo só repassa suas mensagens no máximo $L (=6)$ vezes, porém o número de mensagens entregues é baixo em relação aos outros dois protocolos. Também, como era de se esperar, o protocolo Epidêmico é o que possui maior sobrecarga, pois apesar de gerar muitas cópias das mensagens, a sua probabilidade de entrega é alta. Na Figura 8(a), pode-se observar que o protocolo Epidêmico possui um comportamento quase linear. Isso se deve ao aumento da probabilidade de entrega neste protocolo quando se aumenta o raio de transmissão dos nós. Já o PROPHET, com mais contatos, devido ao aumento do raio de transmissão, possui mais informações para calcular a probabilidade de entrega, com isso apesar de também aumentar a probabilidade de entrega, ele repassa mais mensagens tentando entregar a mensagem de maneira mais eficiente. Na Figura 8(b), o resultado do protocolo Epidêmico é pior, pois como as mensagens são maiores, a probabilidade de uma mensagem sair do *buffer* é maior (estouro de *buffer*), portanto um nó pode receber a mesma mensagem mais de uma vez de diferentes nós, o que gera muita troca de mensagem na rede. Na Figura 8(c), todos os protocolos tem desempenho melhor, quando comparado com o cenário de carga média. Esta melhora é associada ao estouro de *buffer* no cenário de carga alta, ocasionando menos repasse de mensagens na rede.

A Figura 8(b), foi a que obteve os resultados mais discrepantes para os três protocolos de roteamento. Por este motivo, será analisado o desempenho dos três protocolos de roteamento para os diferentes tipos de mobilidade na Figura 9. Nesta figura, pode-se verificar uma discrepância dos resultados em relação ao tipo de mobilidade. Por exemplo, para um raio de 50 metros e o protocolo Epidêmico, o valor da sobrecarga foi de 432,87 para a mobilidade real; 109,39 para o RW e 274,4 para o RWP, ou seja, uma diferença de

até 295,7% quando se compara a mobilidade real com o RW. Essa discrepância pode ser associada a DCCTC e a DCCTEC, na qual a probabilidade de se ter TC e TEC menores na mobilidade real é maior em relação a mobilidade sintética. Portanto, a mobilidade real pode gerar mais trocas de mensagens aumentando a sobrecarga.

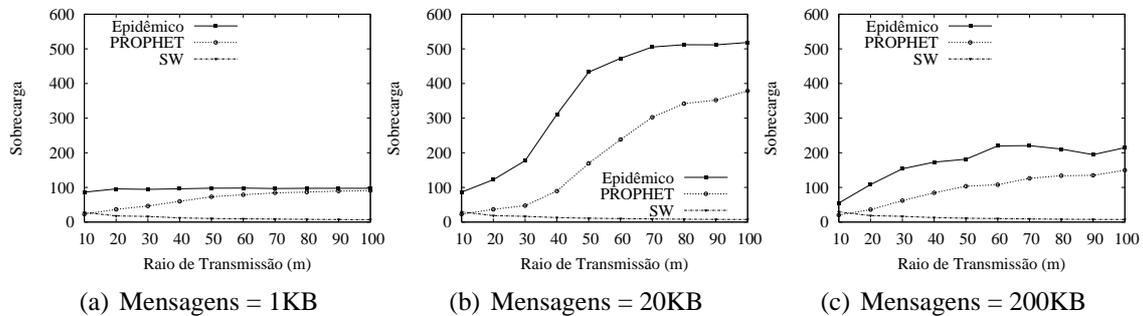


Figura 8. Sobrecarga das mensagens nos protocolos de roteamento, usando a mobilidade real e variando o tamanho das mensagens.

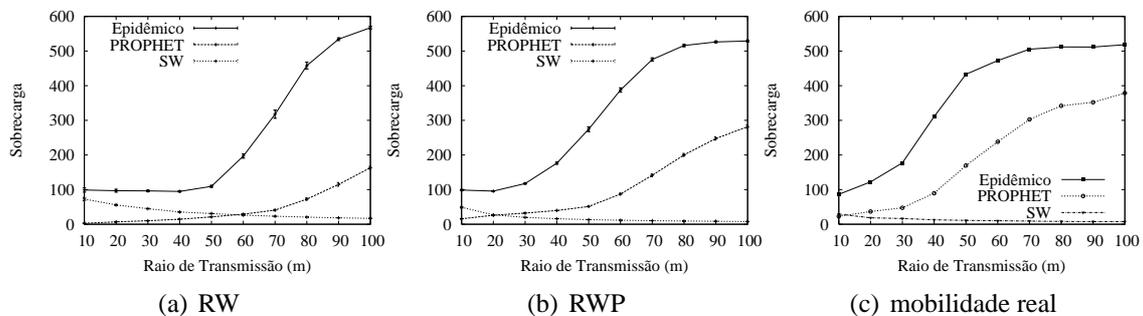


Figura 9. Sobrecarga das mensagens utilizando os protocolos avaliados com tamanho de mensagens igual a 20KB e variando o tipo de mobilidade.

5. Conclusões

Avaliar o impacto da mobilidade dos nós no desempenho das DTNs é cada vez mais necessário, visto que a mobilidade é uma das causas das desconexões nessas redes. Assim, o objetivo deste artigo foi avaliar as DTNs sob a influência da mobilidade humana capturada em um cenário real e comparar essa avaliação com resultados obtidos usando alguns modelos de mobilidade. Para isso, foi capturada a mobilidade de pessoas durante vários meses no parque Quinta da Boa Vista na cidade do Rio de Janeiro.

Após a captura da mobilidade humana, foi investigado o comportamento da DCCTC e da DCCTEC para cada tipo de mobilidade. Foi observado uma diferença no comportamento da distribuição dessas medidas usando a mobilidade humana em comparação com a mobilidade sintética. Além disso, foi avaliado o desempenho dos protocolos de roteamento Epidêmico, PROPHET e SW sob diferentes métricas. Os resultados usando a mobilidade real mostraram que o protocolo Epidêmico se comportou melhor nas métricas, probabilidade de entrega e atraso médio em cenários com baixa carga. Já o protocolo PROPHET teve a maior probabilidade de entrega de mensagens e menor atraso médio no cenário de carga média. O SW foi o melhor na probabilidade de entrega com carga alta e na métrica sobrecarga para todos os cenários, como esperava-se. Além disso, foi verificado que o desempenho dos protocolos avaliados, usando os modelos de mobilidade RW e RWP, foi bastante diferente dos resultados obtidos usando a mobilidade real. Assim, pode-se dizer que o uso desses modelos, na simulação dos cenários investigados, levou a resultados não confiáveis evidenciando a importância do desenvolvimento de modelos de mobilidade mais realistas para a avaliação de desempenho das DTNs.

Referências

- [1] A. Balasubramanian, B. Levine, and A. Venkataramani, "Dtn routing as a resource allocation problem," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 37, no. 4, pp. 373–384, 2007.
- [2] C. Boldrini, M. Conti, and A. Passarella, "Impact of social mobility on routing protocols for opportunistic nets," in *IEEE WoWMoM'07*, Helsinki, Finland, 2007, pp. 1–6.
- [3] J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen, and B. N. Levine, "MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, April 2006.
- [4] H. Cai and D. Y. Eun, "Toward stochastic anatomy of inter-meeting time distribution under general mob. models," in *ACM MobiHoc'08*, Hong Kong, 2008, pp. 273–282.
- [5] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Comm. & Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483–502, 2002.
- [6] A. Chaintreau, P. Hui, J. Crowcroft, C. Diot, R. Gass, and J. Scott, "Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms," *IEEE Trans. on Mobile Comp.*, vol. 6, no. 6, pp. 606–620, 2007.
- [7] E. M. Daly and M. Haahr, "Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant manets," in *ACM MobiHoc'07*, Montreal, Canada, 2007, pp. 32–40.
- [8] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," in *ACM Sigcomm'03*, Karlsruhe, Germany, 2003, pp. 27–34.
- [9] S. Hong, I. Rhee, S. J. Kim, K. Lee, and S. Chong, "Routing performance analysis of human-driven delay tolerant networks using the truncated levy walk model," in *ACM MobilityModels'08*, Hong Kong, China, 2008, pp. 25–32.
- [10] E. P. C. Jones, L. Li, and P. A. S. Ward, "Practical routing in delay-tolerant networks," in *Proceeding of the ACM WDTN'05*. New York, NY, USA: ACM Press, 2005, pp. 237–243.
- [11] T. Karagiannis, J.-Y. L. Boudec, and M. Vojnović, "Power law and exponential decay of inter contact times between mobile devices," in *ACM MobiCom'07*, Montréal, Québec, Canada, 2007, pp. 183–194.
- [12] A. Keränen and J. Ott, "The ONE - the opportunistic network environment simulator," disponível em <http://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/>.
- [13] S. Kim and D. D. Eun, "Impact of super-diffusive behavior on routing performance in delay tolerant networks," in *IEEE ICC'08*, Beijing, China, 2008, pp. 2941–2945.
- [14] S. Kurkowski, T. Camp, and M. Colagrosso, "MANET simulation studies: the incredibles," *SIGMOBILE Mobile Comput. and Comm. Rev.*, vol. 9, no. 4, pp. 50–61, 2005.
- [15] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén, "Probabilistic routing in intermittently connected networks," *SIGMOBILE Mobile Comput. Comm. Rev.*, vol. 7, no. 3, pp. 19–20, 2003.
- [16] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, and S. Chong, "On the levy-walk nature human mobility," in *IEEE INFOCOM'08*, Phoenix, USA, 2008, pp. 1597–1605.
- [17] L. Song and D. F. Kotz, "Evaluating opportunistic routing protocols with large realistic contact traces," in *ACM CHANTS'07*, Montreal, Quebec, Canada, 2007, pp. 35–42.
- [18] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks," in *WDTN 2005*, Philadelphia, PA, 2005, pp. 252–259.
- [19] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks," CS-200006. Duke University, Tech. Rep., Apr 2000.
- [20] J. Yoon, M. Liu, and B. Noble, "A general framework to construct stationary mobility models for the simulation of mobile networks," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 5, no. 7, pp. 860–871, 2006.