

Influência da topologia da área de movimentação na capacidade de transmissão de redes DTN de pessoas

Danilo A. Moschetto², Douglas O. Freitas¹, Lourdes P. P. Poma¹, Ricardo A. P. Almeida¹, Hélio C. Guardia, Cesar A. C. Marcondes

¹Departamento de Computação – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

moschetto@gmail.com
{douglas_freitas,lourdes.poma,ricardoalmeida,helio,
marcondes}@dc.ufscar.br

Abstract. *Casual encounters among people have been studied as a means to deliver messages indirectly, using delay tolerant networks (DTNs). This work analyses the message forwarding in people-based DTNs, focusing on the topology of the mobility area. By using simulations, we evaluate the influence of the environment connectivity on the network performance. Several parameters have also been considered: network density, forward algorithm and storage capacity. In general, considering the already limited capacity of mobile devices and a reduced network density, the mobility environment interconnectivity seems to have a relevant effect in message delivery rates.*

Resumo. *Encontros ao acaso entre pessoas têm sido estudados para a entrega de mensagens indiretamente, utilizando redes tolerantes a atraso. Este trabalho analisa o encaminhamento de mensagens em redes DTN formadas por pessoas, focando na topologia da área de movimentação. Através de simulações, avalia-se a influência da conectividade dos ambientes de movimentação no desempenho das redes. Diversos parâmetros também são considerados: densidade da rede, algoritmo de encaminhamento e capacidade de armazenamento. De maneira geral, considerando a capacidade ainda limitada dos dispositivos móveis e uma densidade reduzida da rede, observa-se que a interconectividade do ambiente de movimentação dos nós tem efeito relevante na taxa de entrega de mensagens.*

1. Introdução

A arquitetura atual da Internet está fundamentada basicamente no argumento fim a fim [Saltzer et al. 1984] e no modelo TCP/IP, concentrando a inteligência de comunicação nos *hosts* de origem e destino, enquanto mantém o núcleo da rede simplificado. Embora este argumento simples seja um dos maiores fatores de sucesso da Internet, nota-se que ele também é um dos principais responsáveis por torná-la “ossificada” [Spyropoulos et al. 2007].

Em especial, a Internet tem dificuldade de operar com *links* de alto atraso e/ou intermitentes e *hosts* móveis. Tais cenários demonstram certas deficiências que vêm estimulando novas propostas como as de redes tolerantes a atraso, ou *delay tolerant*

networks (DTNs) [Fall and Farrel 2008]. Em tais redes, é possível a comunicação ocasional, onde não há um caminho fim a fim sempre ativo, valendo-se, portanto, de intermediários para o encaminhamento de mensagens.

Diversos usos de DTN já foram propostos, tais como os descritos em [Juang et al. 2002], [Shah et al. 2003] e [Burgess et al. 2006]. De maneira geral, DTNs aplicam-se a áreas sem infraestrutura de comunicação (áreas rurais ou remotas), áreas com infraestrutura danificada (desastres naturais ou conflitos, por exemplo) e até mesmo em áreas urbanas, onde a infraestrutura de rede convencional não está acessível. Aplicações como jogos, informações turísticas, anúncios publicitários também podem beneficiar-se dessa forma de comunicação.

Considera-se a eficiência da comunicação de uma rede DTN de acordo com o atraso e a probabilidade de entrega de mensagens. Na seleção da heurística apropriada para o encaminhamento, são relevantes o número de encontros entre os nós, a capacidade de transmissão por nó, e o consumo de energia. Além disso, outras características também podem ser consideradas, como: tamanho de *buffer*, tecnologia de comunicação sem fio utilizada, poder de processamento, algoritmo de roteamento utilizado, proximidade dos nós, concorrência do canal sem fio e a existência de obstáculos.

No presente artigo, considera-se o caso específico de redes DTN formadas por pessoas que se deslocam em uma região central metropolitana. Nesse tipo de rede, é preciso considerar fatores não técnicos, como a mobilidade, a disposição de grupos, a ocorrência de encontros e pontos de interesse, o que torna desafiador o encaminhamento de mensagens.

Embora muitos dos fatores citados tenham sido avaliados previamente de forma isolada [Juang et al. 2002], [Hanbali et al. 2008], [Oliveira et al. 2011], pouca atenção tem sido dedicada à influência da área de movimentação das pessoas (topologia das cidades) na eficiência da comunicação. Assim sendo, este trabalho investiga o impacto da topologia de cidades na capacidade de transmissão de redes DTN formada por pessoas. Os resultados mostram a importância desse fator para a melhoria da probabilidade de entrega e do atraso médio, independentemente de outras características da rede.

Uma avaliação do impacto da complexidade da topologia de mapas também é apresentada, demonstrando que alterações na conectividade de ruas influenciam na capacidade de entrega. Os estudos foram conduzidos através de conjuntos de simulações e análise estatística, variando parâmetros como densidade da rede, tamanho de *buffer*, tecnologia de transmissão, algoritmo de encaminhamento e topologia da área de movimentação de pessoas.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentada uma discussão sobre o encaminhamento de mensagens em DTNs e alguns trabalhos relacionados. A seção 3 apresenta o ambiente de simulação utilizado. A seção 4 discute modelos de mobilidade e apresenta o modelo utilizado neste trabalho. A seção 5 realiza uma categorização de topologias segundo características de cidades. Na seção 6 avalia-se a influência de parâmetros (*buffer*, densidade de nós e protocolos de roteamento) na capacidade de transmissão da rede DTN. A influência de modificações

na topologia de um mapa é investigada na seção 7. Por fim, na seção 8, são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como uma discussão a respeito de trabalhos futuros.

2. Encaminhamento de mensagens em redes DTN

O encaminhamento de mensagens em redes DTN de pessoas, quando não há uma infraestrutura de comunicação disponível, é baseado em oportunidades de transmissões quando as pessoas se encontram próximas umas das outras. Diferentes tecnologias de transmissão sem fio podem ser utilizadas e a decisão de repasse de mensagens pode basear-se em diferentes critérios e políticas. A eficiência do encaminhamento, nesse caso, estará relacionada com decisões que implicam maior ou menor consumo de recursos, como espaço de armazenamento temporário e consumo de energia. A minimização do consumo de recursos e a maximização da eficiência de entrega são características desejáveis nesse tipo de rede.

Este trabalho visa analisar a capacidade de entrega de uma rede DTN formada por pessoas em ambientes urbanos e avaliar o impacto das topologias (disposições de ruas, avenidas, acidentes geográficos, etc.) de cidades distintas na comunicação. Dentre as opções de análise, nota-se que uma modelagem analítica torna-se inviável dada a dificuldade de modelar matematicamente parâmetros como a topologia ou o movimento humano restrito a ruas. Adicionalmente, a experimentação real com um grande número de pessoas demandaria recursos não disponíveis no momento. Na literatura, é possível observar alguns esforços em modelar e estudar características isoladas de redes DTN em geral ou aplicadas a pessoas.

Em [Hanbali et al. 2008], por exemplo, uma rede DTN formada por 3 nós é modelada utilizando redes de filas para avaliar o atraso na entrega de mensagens entre os nós, mostrando que o atraso sofre influência do tempo de contato dos nós apenas em alguns períodos da transmissão. Entretanto, esse estudo não considera a topologia da área de movimentação e se limita a uma rede de apenas 3 nós, dado que o número de estados da rede cresce exponencialmente.

Por outro lado, [Garetto et al. 2009] apresenta um trabalho de maior abrangência que define um *framework* para análise da capacidade de transmissão em redes *ad hoc* móveis, mostrando que se o processo de mobilidade dos nós é estacionário e ergódico, então apenas o padrão de movimento é necessário para determinar a capacidade de transmissão da rede. Tal resultado apresenta relação com a hipótese levantada neste trabalho, pois se o movimento é suficiente para determinar a capacidade, então claramente a restrição de movimento devido à topologia também deve ter influência.

Com relação a trabalhos que consideram topologias de áreas de movimentação, [Piorkowski 2008] propõe um protocolo de georroteamento que implementa um serviço *geocast* de melhor esforço valendo-se de informações de GPS e mapas de mobilidade. O protocolo é avaliado por meio de simulação e mostra uma ligeira melhoria no atraso e entrega de mensagens. Entretanto, trata-se de uma heurística onde a premissa não foi testada.

Seguindo uma linha que considera o contexto da rede e do ambiente, [Sandulescu et al. 2010] propõe uma abordagem para a construção de mapas de recursos de vizinhança visando estimar a disponibilidade de recursos (nível de bateria, espaço em

buffer e largura de banda) de nós vizinhos em uma rede DTN. Por meio dos mapas de recursos, os nós da rede podem determinar com mais eficácia para quais nós vizinhos as mensagens serão encaminhadas, contribuindo assim para aumentar o número de entregas e reduzir o consumo energético e o atraso. Outro trabalho, [Oliveira et al. 2011], mostra uma avaliação do impacto dos protocolos de roteamento para redes DTN por meio de simulação, cujos resultados sugerem que o uso de protocolos parametrizáveis, baseados em contexto, possibilita um aumento significativo da taxa de entrega. Ambos os trabalhos citados poderiam ser estendidos para considerar a topologia da área de movimentação durante a decisão de encaminhamento.

Com base no exposto, nota-se que é relevante estudar a hipótese levantada. Embora registros de movimentação (*traces*), coletados em cenários reais [Crawdad 2012], pudessem representar de maneira mais fiel a movimentação de pessoas, não foi possível encontrar dados aplicáveis aos cenários e condições avaliados nesse trabalho. Assim, na próxima seção descreve-se o ambiente de simulação utilizado e modificações realizadas no mesmo, bem como a escolha de parâmetros sensíveis.

3. Ambiente de simulação

Considerando a ampla gama de opções de ambientes de simulação disponíveis, nota-se que o simulador *The One* [Keränen e Kärkkäinen 2009], desenvolvido em Java, tem sido amplamente utilizado em trabalhos relacionados a redes DTN. Entre as principais vantagens que ele apresenta para a realização deste trabalho, pode-se destacar: variedade de módulos de roteamento, possibilidade de inclusão de novos modelos de mobilidade, capacidade de extensão de funcionalidades e suporte a formatos de arquivos gerados por outros programas (ex: arquivos *WKT* que representam a topologia de cidades).

Embora o simulador *The One* tenha um conjunto amplo de recursos para a realização de simulações em redes DTN, algumas informações de interesse desse trabalho não são fornecidas pelo simulador por padrão, tal como o exato local onde as entregas de mensagens ocorreram. Diante disso, torna-se necessário adicionar funcionalidades ao simulador, a fim de utilizar as coordenadas providas pela classe *DTNHost* e o modelo *Stationary Movement* para criar relatórios com as localizações precisas onde ocorreram entregas de mensagens. A partir dos resultados produzidos pelas modificações, é possível criar um *script* de configuração para que o simulador exiba em seu modo gráfico os pontos de entrega sobre o mapa utilizado na simulação.

Considerando o suporte do simulador a arquivos *WKT*, que modelam mapas vetoriais de cidades por meio de *linestrings* e, tendo disponível uma variedade de mapas de partes importantes de grandes cidades ao redor do mundo, é possível conduzir a experimentação deste trabalho realizando simulações em topologias distintas. Para isso, foram utilizados mapas extraídos de [Mayer 2010], os quais se baseiam no projeto *Open Street Map*, que mapeia vetorialmente cidades ao redor do mundo por meio de contribuições individuais.

Os mapas utilizados neste trabalho apresentam uma área de aproximadamente 6 Km², variando segundo o número de ruas e suas interconexões. Esta área considera áreas centrais de cidades, compreendendo um microcosmo da área urbana como um todo. Além disso, como este trabalho avalia a movimentação de pessoas, distâncias maiores percorridas a pé não são relevantes neste contexto.

Com relação a outros parâmetros de análise, não é de interesse desse trabalho avaliar exaustivamente o desempenho de algoritmos de encaminhamento, como o *Epidemic* [Vahdat e Becker 2000], o qual é utilizado neste trabalho. Informações sobre esse tipo de estudo podem ser encontradas em [Oliveira et al. 2011]. Desse modo, foi realizado um estudo prévio de sensibilidade de parâmetros como tempos de simulação e tamanhos de *buffer* suficientes a fim de reduzir a influência dos mesmos nos algoritmos de encaminhamento utilizados. Além disso, por também não fazerem parte do escopo do trabalho, aspectos sobre o consumo energético dos dispositivos não foram considerados.

4. Modelos de mobilidade

Para redes DTN formadas por pessoas, um dos parâmetros mais estudados é a mobilidade dos nós. Em [Rhee 2011], argumenta-se que o modelo matemático *Levy Walk* permite capturar bem as nuances da movimentação humana, uma vez que seres humanos, assim como outros mamíferos (zebras, por exemplo), tendem a realizar movimentos curtos em torno de pontos de interesse e alternar para movimentos longos usando o menor caminho para outros pontos de interesse distantes.

O modelo *Levy Walk* original considera a movimentação aleatória em ambientes livres de obstáculos, o que difere da movimentação em cidades, onde o deslocamento se limita à ruas e avenidas. Entre os modelos de mobilidade baseados em mapa disponíveis no simulador *The One*, nota-se que o *Shortest Path Map-based Movement* (SPMBM) [Keränen e Kärkkäinen 2009] tem um comportamento semelhante ao *Levy Walk* no que diz respeito à seleção de menor caminho, utilizando o algoritmo de Dijkstra. Portanto, a escolha do SPMBM pode ser considerada razoável devido ao comportamento dos seres humanos em sempre escolherem o menor caminho para se chegar a um destino e ao conhecimento prévio que eles possuem em relação à cidade onde vivem.

Buscando validar a compatibilidade entre o SPMBM e o *Levy Walk* para os cenários avaliados nesse trabalho, foram realizadas simulações preliminares, comparando os dois modelos. Para essas simulações, foi considerada uma rede de densidade compatível com o restante das simulações (seções 6 e 7) e uma área de 6,25 Km², também semelhante às áreas de todos os mapas utilizados neste trabalho. Para os testes com o algoritmo SPMBM, foi escolhido o mapa da cidade de Veneza, o qual apresenta um grande conjunto de ruas e interconexões, contribuindo para uma maior aleatoriedade de movimentação. Para os testes com *Levy Walk*, a movimentação dos nós não está atrelada a mapas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre os modelos *Levy Walk* e *Shortest Path*

	<i>Levy Walk</i>		<i>Shortest Path</i> (Veneza)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Prob. de Entrega	83%	1%	88%	0,7%
Mensagens transmitidas	813719	1778	879501	1860
Número de encontros	6147	46	15032	421

O tempo de simulação considerado foi de aproximadamente 4,5h, suficiente para atingir um regime estacionário. A rede utilizada foi formada por 600 nós que transmitem mensagens de 1 KB entre si por meio da tecnologia Bluetooth e utilizando o algoritmo *Epidemic* (o qual apresenta uma alta capacidade de entrega, obtida graças à geração de

diversas cópias de uma mesma mensagem) com *buffer* de armazenamento de 1 GB, o que é típico desse tipo de rede. Cada nó da rede é capaz de se mover a uma distância de até 1100 metros em relação ao ponto de onde partiu. As simulações foram executadas 5 vezes para cada modelo de mobilidade, utilizando sementes distintas para a geração randômica das posições dos nós.

A Tabela 1 mostra que a probabilidade média de entrega nas simulações com ambos os modelos de mobilidade foi semelhante, variando em cerca de 5% apenas, com pouco desvio. Além disso, o número de mensagens transmitidas manteve-se próximo em ambos os resultados (cerca de 8%). Por fim, nota-se uma diferença importante ao comparar o número de encontros, pois o modelo SPMBM apresenta uma quantidade absoluta de 2,4 vezes mais encontros do que o *Levy Walk*. Este resultado é justificado pela ausência de barreiras físicas para limitar a movimentação dos nós nas simulações executadas com o *Levy Walk*. Uma vez tendo um maior número de possibilidades de movimentação, os nós tendem a se encontrar com menos frequência, diferentemente dos testes realizados com o SPMBM, nos quais os nós estavam limitados a se movimentar apenas pelas ruas de Veneza.

Considerando os resultados apresentados, observa-se que nos cenários avaliados o SPMBM tem comportamento complementar ao *Levy Walk* ao limitar a movimentação a somente ruas, enquanto mantém a mesma probabilidade de entrega. Com base nisso, o SPMBM foi utilizado no restante das simulações.

5. Categorização de topologias segundo a sua complexidade

É possível argumentar que topologias com complexidades distintas exercem influência na probabilidade de entrega de redes DTN. Portanto, foi realizada uma categorização preliminar que considera aspectos de complexidade do grafo embutido na topologia de cidades.

Inicialmente, foram selecionados 10 mapas aleatórios a fim de determinar similaridades. Foram conduzidas simulações com os mapas de Cairo, Chennai, Karlsruhe 1, Karlsruhe 2, Los Angeles, Nova Dehli 1, Nova Dehli 2, Richmond, Tóquio e Veneza. As simulações foram realizadas utilizando a parametrização padrão deste trabalho (*Epidemic*, 600 nós, mensagens de 1KB, tecnologia *Bluetooth*, 5 repetições do experimento) e tiveram como enfoque o número de encontros entre nós da rede. As médias dos resultados obtidos são apresentadas na Figura 1.

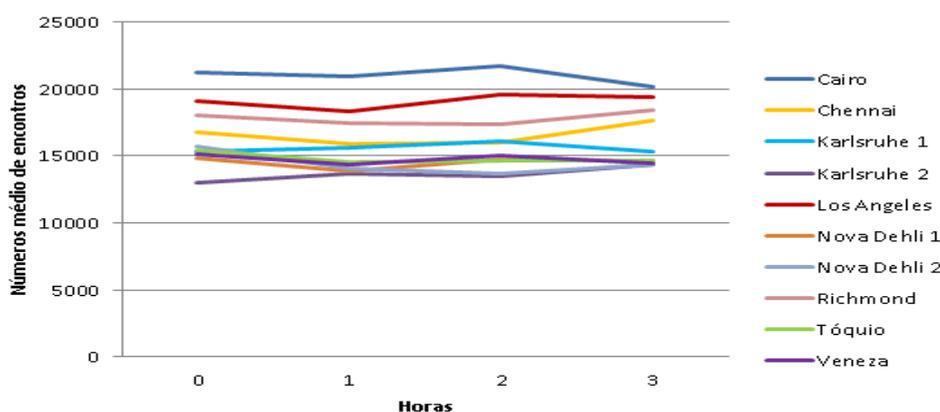


Figura 1. Número médio de encontros para 3 horas de simulação.

A Figura 1 mostra que as cidades do Cairo e Los Angeles são as que tiveram o maior número de encontros entre os experimentos. Por sua vez, os mapas de Karlsruhe 2 e Nova Dehli 2 são os que apresentam o menor número de encontros. Entretanto, vê-se que esses mapas não apresentam comportamento semelhante entre si, o que motivou a escolha de Veneza e Tóquio como os representantes contendo um menor número de encontros. Os mapas das cidades selecionadas são apresentados na Figura 2.

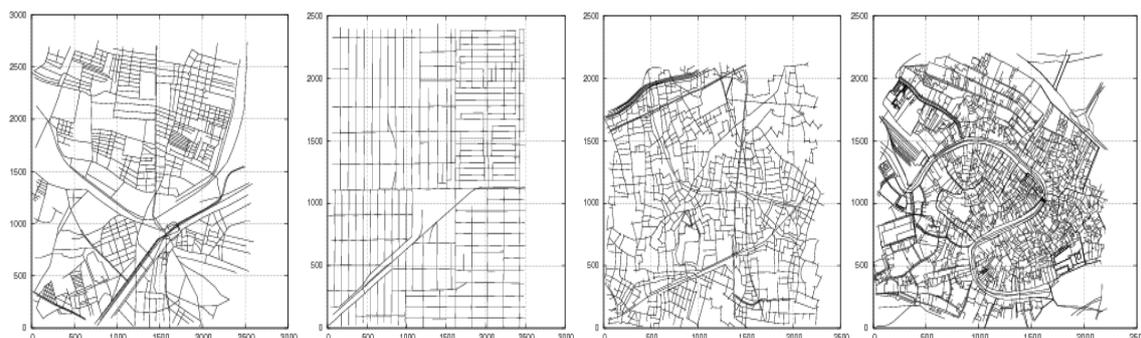


Figura 2. Mapas parciais das cidades do Cairo, Los Angeles, Tóquio e Veneza [Mayer 2010].

Como é possível observar a partir da Figura 2, os mapas das cidades do Cairo e Los Angeles aparentam visualmente possuir um número menor de ruas e interconexões quando comparados com Tóquio e Veneza. Tal constatação pode ser confirmada gerando-se um grafo de interconexão de ruas para cada mapa. Posteriormente, avaliou-se o número total de interconexões (pontos de um *linestring* do mapa, o que geral corresponde a cruzamentos) e seus graus de conectividade (número de ruas conectadas a um ponto de um *linestring* do mapa). A Tabela 2 e o gráfico da Figura 3 apresentam, respectivamente, o número de interconexões que compõem cada mapa e a distribuição segundo o grau de conectividade dos mesmos.

Tabela 2. Número de interconexões que compõem cada mapa

	Cairo	Los Angeles	Tóquio	Veneza
Número de interconexões	1464	573	3655	7982

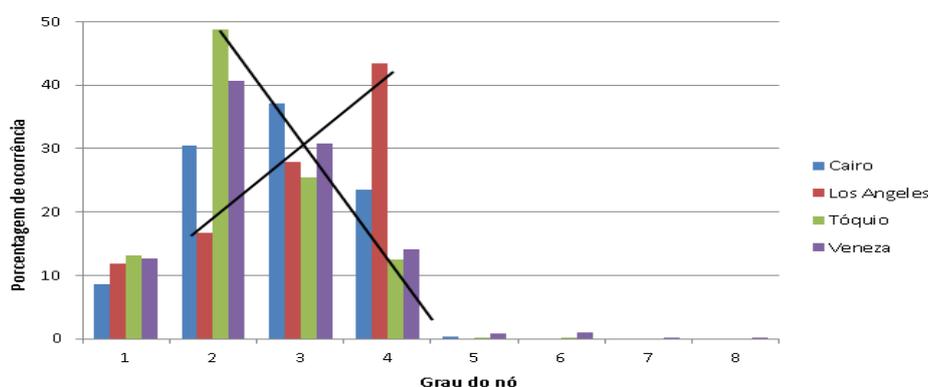


Figura 3. Distribuição segundo o grau de conectividade.

A Tabela 2 mostra que as cidades do Cairo e Los Angeles apresentam um número inferior de interconexões em relação às cidades de Tóquio e Veneza, o que subjetivamente pode significar um menor número de possibilidades de movimentação.

Adicionalmente, a Figura 3 mostra pela reta ascendente que a cidade de Los Angeles apresenta uma conectividade crescente, embora com um número menor de interconexões. Em outras palavras, são poucas interconexões com grau elevado. Já a reta descendente mostra que a cidade de Tóquio apresenta uma conectividade decrescente, com um número elevado de interconexões com grau mais baixo. Apenas as cidades de Tóquio e Veneza apresentam nós com grau superior a 4 e a cidade de Veneza é a única com nós de grau 7 e 8.

Os resultados apresentados permitem criar critérios de classificação que poderiam ser utilizados no futuro para determinar cidades com diferentes taxas de encontro. Além disso, pode-se supor que, baseado no número de encontros, as cidades de Tóquio e Veneza devem apresentar probabilidades de entrega inferiores às das cidades do Cairo e Los Angeles, independente de outros parâmetros. A fim de confirmar essa suposição, é apresentada na seção 6 a parte principal do conjunto de testes.

6. Análise da Capacidade de Transmissão de Redes DTN de Pessoas

Tendo selecionado os mapas a serem utilizados no estudo apresentado neste trabalho e realizado análises preliminares, foram conduzidas simulações visando avaliar a influência de alguns parâmetros na capacidade de entrega de mensagens.

Cada simulação foi repetida 5 vezes, considerando a transmissão de mensagens de tamanho entre 500KB a 1MB por meio da tecnologia *Bluetooth*. O tempo de cada simulação foi de 4,5h. As variáveis avaliadas consistiram no tamanho do *buffer* local dos nós, na densidade dos nós em relação às áreas dos mapas e no algoritmo de roteamento utilizado. Os resultados obtidos são apresentados nas subseções a seguir.

6.1. Estudo da influência do *buffer*

O tamanho do *buffer* local de cada nó pode influenciar na probabilidade de entrega de mensagens de uma rede DTN se um grande número de mensagens for descartado precipitadamente. Por exemplo, o algoritmo *Epidemic* gera diversas cópias de uma mensagem a ser transmitida a fim de ampliar a probabilidade de entrega, necessitando, portanto, de mais espaço em *buffer* para evitar um número elevado de descartes de mensagens.

A fim de avaliar um tamanho de *buffer* ideal a ser utilizado com o protocolo *Epidemic*, de modo que os resultados obtidos a partir dele não sofram influência da capacidade de armazenamento local, um conjunto de testes foi realizado. Como a cidade do Cairo apresenta um maior número de encontros e, conseqüentemente, uma maior possibilidade de transmissões, ela foi escolhida como cenário para os testes. Os resultados das simulações são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados variando o tamanho do *buffer* em uma rede com 600 nós.

Probabilidade de entrega										
<i>Buffer</i> (MB)	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
Média	5.91%	10.25%	21.15%	28.93%	40.46%	51.30%	65.02%	75.54%	86.17%	86.17%
Desvio	0.99%	0.88%	1.03%	0.47%	2.17%	1.57%	5.06%	1.55%	0.74%	0.74%
Média de atraso em segundos										
<i>Buffer</i> (MB)	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
Média	3889	3843	3713	3567	3418	3309	2846	2404	2283	2283
Desvio	553.46	454.00	459.43	211.87	164.33	87.67	231.28	76.42	70.16	70.16

Os resultados da Tabela 3 mostram que a probabilidade de entrega aumenta à medida que o tamanho do *buffer* cresce e se mantém estável a partir de 512 MB, mostrando que, a partir desse valor, o tamanho do *buffer* não influencia na probabilidade de entrega e no atraso médio de entrega.

6.2. Estudo da influência da densidade dos nós

Considerando que a entrega de mensagens em uma rede DTN de pessoas está condicionada aos encontros dos nós, buscou-se avaliar a influência da densidade da rede em cada cenário considerado nesse estudo. Assim, foram realizadas simulações considerando densidades de 200, 400 e 600 nós, cada um apresentando *buffers* locais de 1 GB, considerando o exposto na 6.1. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.

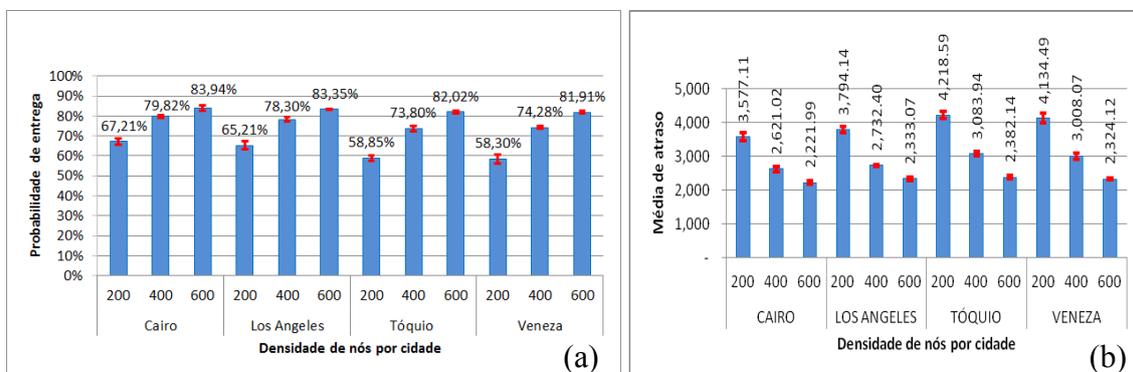


Figura 4. Probabilidade de entrega (a) e média de atraso segundo a densidade de nós (b).

Os resultados da Figura 4(a) mostram que, mesmo para densidades pequenas, as probabilidades de entrega são superiores a 50%. Além disso, nota-se que, à medida que a densidade aumenta, a probabilidade de entrega também se torna maior, chegando a resultados superiores de até 24 pontos percentuais.

Comparando os resultados obtidos em cada cidade, nota-se que a cidade do Cairo apresentou as melhores probabilidades de entrega e os menores atrasos para todas as densidades avaliadas, sendo seguida pelas cidades de Los Angeles, Tóquio e Veneza. Estes resultados permitem observar a influência da topologia das cidades na capacidade de entrega, pois mantendo-se as mesmas configurações para a rede e considerando um tempo de transmissão razoável, a cidade do Cairo apresentou melhores resultados. Por outro lado, nota-se também que, à medida que a densidade aumenta, as probabilidades de entrega obtidas e o atraso médio tornam-se muito próximos para todas as cidades analisadas, mostrando que a topologia passa a exercer menor influência.

Buscando complementar a análise realizada, a Figura 5 apresenta o número de encontros entre os nós da rede para cada densidade avaliada.

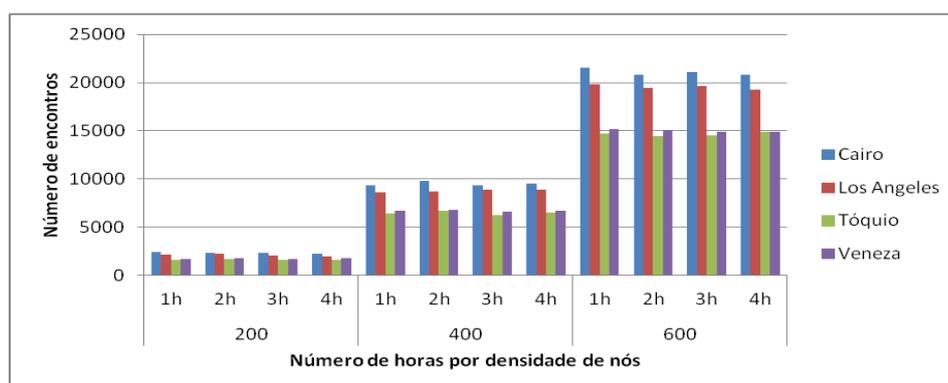


Figura 5. Número de encontros segundo a densidade de nós.

Como é possível observar na Figura 5, o número de encontros aumenta à medida que a densidade dos nós também cresce. Para todas as densidades avaliadas, vê-se que as cidades do Cairo e Los Angeles possibilitam mais encontros entre os nós, o que contribui para um maior número de entregas.

6.3. Estudo da influência do protocolo de roteamento

A fim de investigar se o protocolo de roteamento utilizado pode atenuar o impacto da topologia dos mapas no número de transmissões e de entregas, foram realizadas simulações utilizando os algoritmos *Epidemic* e *PROPHET* [Lindgren et al. 2003]. As simulações consideraram uma rede DTN formada por 200, 400 ou 600 nós, com os parâmetros definidos nas seções anteriores.

Os resultados das simulações são apresentados na Figura 6, a qual mostra que o protocolo *Epidemic* apresentou melhores probabilidades de entrega que o protocolo *PROPHET* para todos os cenários estudados, diferentemente dos resultados apresentados em [Oliveira et al. 2011], onde demonstra-se que, para uma rede com limitações de recursos (ex: tamanho de *buffer*), o protocolo *PROPHET* tende a proporcionar melhores resultados. Convém lembrar que, no contexto deste trabalho, limitações como o tamanho de *buffer* tiveram seu impacto atenuado, o que contribui para um melhor resultado do *Epidemic*.

Analisando as probabilidades de entrega obtidas para as quatro cidades do estudo, nota-se que ambos os protocolos de roteamento avaliados possibilitaram melhores resultados nos cenários das cidades do Cairo e de Los Angeles, com variações que chegam a até 10 pontos percentuais (comparação entre Cairo e Tóquio para 200 nós e protocolo *PROPHET*).

Considerando que os parâmetros de configuração utilizados foram os mesmos, vê-se que diferenças na topologia dos mapas acabam propiciando melhores ou piores probabilidades de entrega, embora seja visível que, à medida que a densidade dos nós aumenta, a influência da topologia tende a ser atenuada.

Como elemento de comparação adicional, é possível utilizar também a métrica *goodput* (*gp*), que mede a proporção de mensagens entregues aos destinatários em relação ao volume total de mensagens transmitidas. Para os testes realizados, por exemplo, na cidade de Veneza com 200 nós, o protocolo *PROPHET* obteve $gp = 1,02 * 10^{-2}$, enquanto o protocolo *Epidemic* obteve $gp = 0,84 * 10^{-2}$, o que representa uma variação de mais de 20%.

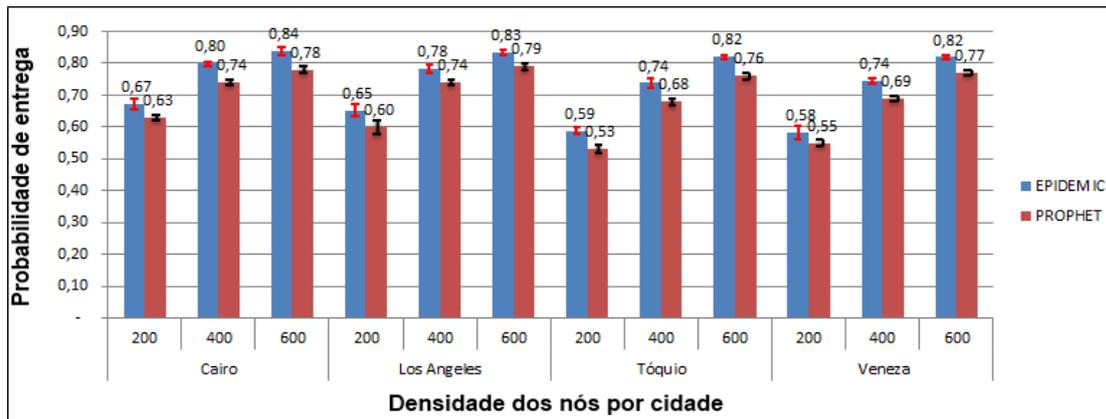


Figura 6. Probabilidade de entrega usando *Epidemic* e *PROPHET*.

7. Influência de alterações na topologia dos mapas

Com o objetivo de analisar a influência dos elementos de mobilidade urbana na capacidade das redes DTN formadas por pessoas, foram realizadas algumas modificações na topologia de uma das cidades estudadas. A cidade escolhida foi a do Cairo, a qual apresenta poucas vias de acesso entre os extremos superior e inferior de seu mapa. Essa característica aparentemente faz com que as pessoas tenham poucas opções de mobilidade, ficando mais propensas a se encontrarem e, conseqüentemente encaminharem mensagens entre si.

Para avaliar essa suposição, foram feitas novas simulações considerando alterações no mapa que consistiram na adição de pontos de transição entre as duas grandes áreas da cidade. As simulações utilizaram os mesmos parâmetros definidos nas seções anteriores. A Figura 7 mostra as modificações feitas ao mapa do Cairo e os graus de conectividade de suas interconexões.

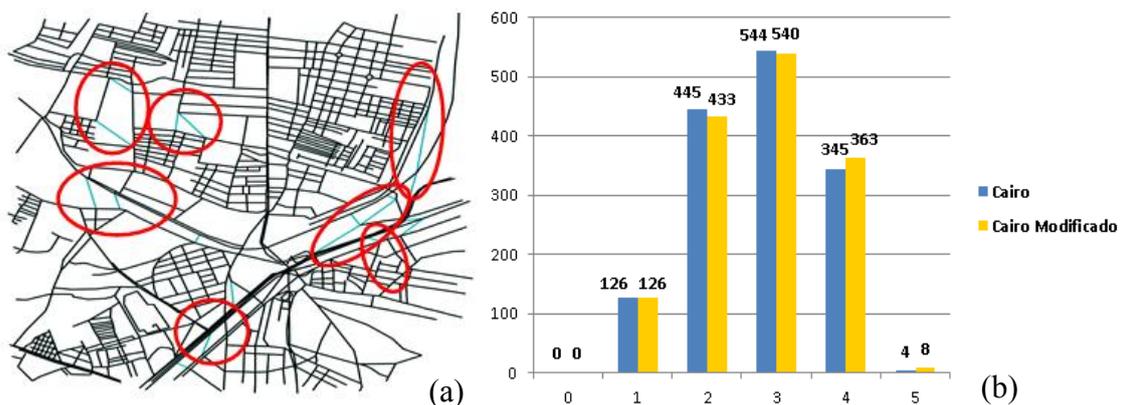


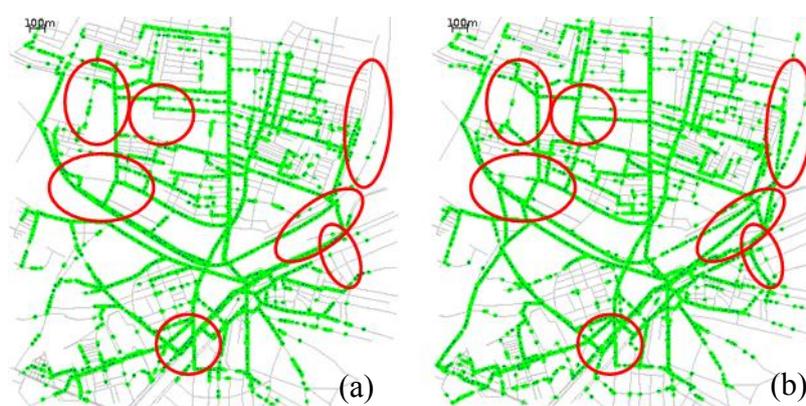
Figura 7. Mapa do Cairo modificado (a) e distribuição dos nós segundo o grau (b).

Na Figura 7(a), é possível observar que foram adicionadas algumas interconexões de trechos do mapa pouco conectados. Observando a Figura 7(b), vê-se também que as modificações feitas geraram poucas alterações nos graus de conectividade das interconexões, o que indica que os dois mapas ainda são bastante semelhantes. Os resultados das simulações para este estudo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Simulações feitas com os mapas do Cairo e Cairo Modificado

	Cairo		Cairo Modificado	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Número de Encontros	21095	902	16970	994
Prob. de entrega	84%	1,4%	81%	1%

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram uma diminuição no número de encontros e na probabilidade de entrega nas simulações realizadas com o mapa do Cairo modificado. Nota-se pelos resultados que o número de encontros diminuiu cerca de 19% e a probabilidade de entrega teve queda de 3%, mostrando que pequenas modificações na topologia podem influenciar nos resultados obtidos em uma rede DTN de pessoas. A fim de observar o uso dos novos caminhos gerados, a Figura 8 apresenta o mapa do Cairo original e sua versão modificada com destaque nos locais onde ocorreram encontros entre os nós da rede.

**Figura 8. Mapas da cidade do Cairo original (a) e modificado (b).**

Na Figura 8(b), observa-se que os nós utilizaram os caminhos inseridos no mapa. Os pontos verdes indicam as localizações em que ocorreram as trocas de mensagens. A diferença na movimentação é causada pela criação de rotas mais curtas entre diferentes pontos de interesse, as quais passam a ser utilizadas pelo algoritmo SPMBM. Essa maior possibilidade de movimentação influencia nos resultados obtidos pela rede DTN.

8. Conclusão e Trabalhos Futuros

Redes DTN de pessoas são uma alternativa viável para o encaminhamento de mensagens em um ambiente urbano. Diversas aplicações podem beneficiar-se dessa forma de comunicação, como alertas, jogos, anúncios publicitários e compartilhamentos de conteúdo. Entretanto, a eficiência da rede pode ser influenciada pela restrição de mobilidade ocasionada pela topologia da área de movimentação.

Este artigo analisa esta influência utilizando simulações. Os resultados obtidos mostram que a disposição dos elementos de mobilidade urbana (ruas, avenidas, etc.) é um aspecto importante a ser considerado, dada a limitação das possibilidades de movimentação. Tal limitação influencia na probabilidade de encontros entre seres humanos, podendo trazer consequências para eventuais redes DTN.

Diferentes algoritmos estão disponíveis para o encaminhamento de mensagem, com graus distintos de consumo de recursos, como espaço de armazenamento, e

estratégias de replicação de mensagens. Considerando o caso em que armazenamento nos nós não era um fator crítico e usando algoritmos de encaminhamento bem estabelecidos (Epidemic e PROPHET), as avaliações realizadas nesse trabalho mostraram que a topologia tem influência no encaminhamento. Isso pode ser observado neutralizando os efeitos gerados por limitações de armazenamento intermediário e tempo de entrega.

Nos testes, quando a densidade da rede DTN é pequena (cerca de 200 pessoas em uma área de alguns quilômetros quadrados), a influência da topologia e suas nuances é mais significativa, variando em função do grau de conectividade das ruas e caminhos preferenciais. Para os cenários avaliados nesse estudo, notou-se uma variação de até 10% na probabilidade de entrega em função da mudança da topologia da cidade.

Por outro lado, quando o número de possíveis retransmissores em uma região (densidade da rede) é alto, a probabilidade de entrega não sofre influência significativa da topologia. Nos testes realizados a variação observada foi menor que 2%.

Para redes DTN em que o número de possíveis intermediários é limitado, restrito à afinidade pessoal, a probabilidade de entrega torna-se mais dependente da topologia.

Assim, mecanismos de entrega mais e menos agressivos em termos de replicação de mensagens podem ser parametrizados com o conhecimento do grau de conectividade da topologia da região de movimentação. Do mesmo modo, o consumo energético pode ser reduzido, evitando-se encaminhamentos desnecessários.

Uma vez identificada a influência da topologia nas transmissões, é possível estender este trabalho realizando uma análise mais detalhada de algoritmos tradicionais (ex: Epidemic, PROPHET, Spread and Wait) ou que consideram relacionamentos sociais entre as pessoas nas decisões de encaminhamento na rede DTN.

Um mecanismo de seleção dinâmica, baseado na estrutura de cada cidade ou microrregião, pode ser utilizado no processo de seleção do algoritmo de encaminhamento mais adequado. Um exemplo de aplicação dessa estratégia seria a extração do grau de conectividade de mapas a partir de serviços *online* para a escolha do algoritmo apropriado. A alteração dinâmica de parâmetros de algoritmos tradicionais, considerando a conectividade da área de movimentação, também é possível, o que estende os resultados obtidos por [Oliveira et al. 2011].

9. Referências

- Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D., and Levine, B. N. (2006) “MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks”, In: Proceedings of 25th IEEE INFOCOM, pages 1–11, Barcelona, Spain, <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOM.2006.228>.
- Crowdad. “Crowdad - A Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth” <http://crowdad.cs.dartmouth.edu/data.php>, Março de 2012.
- Fall, K. and Farrell, S. (2008) “DTN: an architectural retrospective”, In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, volume 26, pages 828-836, <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2008.080609>.
- Garetto, M., Giaccone, P., Leonardi, E. (2009) “On the Capacity Region of MANET: Scheduling and Routing Strategy”, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, volume 58, pages 1930-1941, <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2008.2004621>.

- Hanbali, A. A., Haan, R., Boucherie, R. J., and Ommeren, J. K. (2008) "A Tandem Queueing Model for Delay Analysis in Disconnected Ad Hoc Networks", In: Proceedings of 15th international conference on Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications, pages 189-205, Nicosia, Cyprus, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68982-9_14.
- Juang, P. et al. (2002), "Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet", In: Proceedings of International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS), volume 30, pages 96-107, San Jose, CA, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/635506.605411>.
- Keränen, A., Ott, J., and Kärkkäinen, T. (2009) "The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation", In: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, pages 55:1–55:10, Rome, Italy <http://dx.doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2009.5674>.
- Lindgren, A., Doria, A., Schelén, O. (2003) "Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks", In: ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, volume 7, pages 19-20, <http://dx.doi.org/10.1145/961268.961272>.
- Mayer, C. P. (2010) "osm2wkt - OpenStreetMap to WKT Conversion", <http://www.tm.kit.edu/~mayer/osm2wkt/>, Novembro de 2011.
- Oliveira, E., Silva, E., Albuquerque, C. V. N. (2011) "Promovendo adaptação a contextos em DTNs", In: Proceedings of Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Campo Grande, MS, Brazil, http://sbrc2011.facom.ufms.br/files/main/ST03_1.pdf
- Piorkowski, M. (2008) "Mobility-centric geocasting for mobile partitioned networks", In: Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols, pages 228-237, Orlando, FL, USA, <http://dx.doi.org/10.1109/ICNP.2008.4697041>.
- Rhee, I., Shin, M., Hong, S., Lee, K., Kim, S. J. and Chong, S. (2011) "On the Levy-walk Nature of Human Mobility", In: IEEE/ACM Transactions on Networking, pages 630-643, <http://dx.doi.org/10.1109/TNET.2011.2120618>.
- Saltzer, J. H., Reed, D. P., and Clark, D. D. (1984) "End-to-end arguments in system design". In: ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), volume 2 n.4, pages 277-288, <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=357401.357402>.
- Sandulescu, G., Schaffer, P., Nadjm-Tehrani, S. (2010) "Vicinity resource cartography for delay-tolerant networks: A holistic perspective", In: Proceedings of Wireless Days (WD), 2010 IFIP, pages 1-7, Venice, Italy, <http://dx.doi.org/10.1109/WD.2010.5657725>.
- Shah, R.; Roy, S.; Jain, S.; Brunette, W. (2003), "Data MULEs: Modeling a Three-tier Architecture for Sparse Sensor Networks", In: Proceedings of 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, pages 30-41, Anchorage, AK, USA, <http://dx.doi.org/10.1109/SNPA.2003.1203354>.
- Spyropoulos, T., Fdida, S., and Kirkpatrick, S. (2007) "Future Internet: fundamentals and measurement", In: Proceedings of ACM SIGCOMM Computer Communication Review, pages 101-106, Tokyo, Japan, <http://doi.acm.org/10.1145/1232919.1232934>.
- Vahdat, A. and Becker, D. (2000) "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks", Technical Report CS-2000-06, Duke University, <http://issg.cs.duke.edu/epidemic/epidemic.pdf>.