

# Caracterização de uma Jornada Máxima em MANETs

Alex Novaes de Santana<sup>1</sup>, Fabíola Greve<sup>1</sup>, José Garcia Vivas Miranda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)  
Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

<sup>2</sup>Instituto de Física – Universidade Federal da Bahia (UFBA)  
CEP 40210-340 – Salvador – BA – Brazil

alex.santana@gmail.com, fabiola@dcc.ufba.br, vivas@ufba.br

**Resumo.** *Redes móveis ad-hoc (ou MANETs) exibem uma topologia dinâmica que pode ser modelada através de grafos que evoluem no tempo. Diversos protocolos distribuídos confiáveis, desenvolvidos para tais redes, fazem suposições quanto às características dos grafos necessárias para a satisfação das propriedades do sistema. Um delas diz respeito à difusão de mensagens para a rede, que só poderá ser garantida se, ao longo do tempo, existir um caminho entre cada par de nós do grafo, ou seja uma jornada. Estimar o tempo de uma jornada máxima é essencial para a configuração e qualidade de serviço do sistema. Esse trabalho apresenta um estudo analítico e experimental (através de simulação) para avaliar a conectividade de uma MANET e estimar o tempo de uma jornada máxima, dada as suas características, tais como densidade local e global. Como resultado, apresentamos uma equação probabilística do tempo de jornada máxima no grafo da MANET, em função da sua densidade.*

## 1. Introdução

As redes móveis ad hoc (ou MANETs) apresentam características e comportamentos que as distinguem das redes tradicionais, a saber: (i) a mobilidade dos dispositivos, bem como a sua dinamicidade (entrada e saída aleatória de dispositivos) ocasiona uma constante mudança topológica na rede, (ii) o grafo de comunicação entre os nós não é completo, o que exige dos nós um esforço colaborativo para transmitir as mensagens; (iii) a estimativa do tempo e condições em que mensagens serão recebidas é dificultada; (iv) ademais, a rede pode particionar em componentes que não se comunicam temporariamente; (v) finalmente, há uma dificuldade na identificação dos parâmetros globais da rede; (vi) o que faz com que cada nó tenha apenas um conhecimento parcial da sua topologia, do conjunto de nós que compõem o sistema e da sua cardinalidade.

Nesse novo cenário, de mobilidade, comunicação parcial e dinamicidade, diversos desafios precisam ser vencidos. Um deles diz respeito à confiança no funcionamento dos sistemas, que permite com que as aplicações móveis distribuídas mantenham a sua disponibilidade e consistência, apesar da ocorrência de falhas (de nós e canais de comunicação), saídas e entradas dos nós. No projeto de sistemas confiáveis, detectar a falha de um processo é um passo importante para garantir a segurança e continuidade correta dos serviços prestados pelo sistema. Em sistemas síncronos a detecção de uma falha é uma tarefa trivial, na medida em que os limites de tempo da rede são conhecidos e garantidos. Porém em redes assíncronas, é preciso projetar uma ferramenta que consiga detectar as falhas mesmo em um ambiente onde os limites de tempo para comunicação são desconhecidos.

Nesse contexto, a abstração de detectores de falhas não-confiáveis é fundamental [Chandra and Toueg 1996]. Informalmente, um detector de falhas é um conjunto de oráculos distribuídos que fornece dicas aos processos sobre quais deles estão falhos, através de uma lista de processos suspeitos. Eles são não-confiáveis porque podem se equivocar, suspeitando da falha de processos corretos ou indicando que processos falhos estão ativos. Os detectores são uma forma modular de tratar as falhas em sistemas assíncronos, isto é, sistemas que não atendam a restrições temporais, dado que separa o tratamento das falhas e os requisitos de sincronia do protocolo distribuído que o utiliza, de forma que este pode lidar apenas com a tarefa a que se propõe.

Em [Greve et al. 2011, Sens et al. 2008] é apresentado um detector de falhas para redes dinâmicas sem fio com mobilidade, tal como as MANETs. O detector proposto, utiliza uma estratégia livre de tempo para a detecção das falhas, baseada numa percepção local dos nós da rede e na troca de mensagens entre os nós vizinhos. Ele faz a suposição de que, apesar da dinamicidade, ao cabo de um tempo, existirá na rede um caminho entre cada par de nós. Essa suposição é importante para garantir que informações globais acerca das suspeitas de falhas sejam difundidas em toda a rede, de forma que suspeitas de falhas possam ser propagadas e suspeitas indevidas possam ser corrigidas. Além dos detectores de falhas, diversos outros protocolos distribuídos confiáveis apresentam tal requisito de conectividade da rede como forma de assegurar a consistência e terminação.

O modelo de grafos estáticos, comumente adotado para redes tradicionais, não representa adequadamente a topologia de redes dinâmicas como as MANETs, já que existe uma variação temporal na topologia da rede, que faz com que as ligações e os caminhos entre os nós sejam construídos ao longo do tempo. Nesse sentido, alguns trabalhos surgiram com o intuito de trazer modelos que melhor se adequem a esta realidade e que possam facilitar a busca e validação de soluções para os algoritmos distribuídos. Com este objetivo [Casteigts et al. 2010a] propuseram um arcabouço para servir como base teórica para o estudo de propriedades fundamentais de algoritmos distribuídos em redes dinâmicas. Este arcabouço permite a caracterização das condições necessárias e/ou suficientes que um algoritmo requer da conectividade da rede, explorando os conceitos de grafos evolutivos [Ferreira 2004, Casteigts et al. 2010b] e renomeação de rótulos [Litovsky and Sopena 1999].

Um outro arcabouço bastante promissor é a abstração de *Time-Varying Graphs* (ou TVG) proposto em [Casteigts et al. 2011a]. Neste, a existência de vértices e arestas é uma função do tempo. No caso de uma rede móvel não-estruturada, a ocorrência das arestas é frequente, mas não segue nenhum padrão definido. A partir dos requisitos apresentados pelos protocolos e aplicações, pode-se identificar classes de TVG que são baseadas nas propriedades temporais estabelecidas pelas entidades. As classes são importantes porque estabelecem condições necessárias (ou mínimas) e resultados de impossibilidade para a computação distribuída. Por exemplo, a classe 3 (conectividade ao longo do tempo) indica um requisito da aplicação que estabelece que o TVG deverá ser conexo ao longo do tempo. Através do uso dessas abordagens [Casteigts et al. 2010a, Casteigts et al. 2011a], pode-se melhor formalizar os algoritmos e protocolos distribuídos e identificar os parâmetros, requisitos mínimos e tipos de redes dinâmicas melhor apropriadas para a sua execução. Por exemplo, em [Casteigts et al. 2010b] foca-se numa análise do problema de difusão (*broadcast*) com detecção de terminação em redes móveis ad-hoc através de uma modelagem

em TVG. Já [Greve et al. 2011] tem como base o modelo do TVG e faz a suposição de que entre qualquer par de nós haverá sempre um *jornada* entre os mesmos. Uma jornada é a formação de um caminho ao longo do tempo entre dois nós.

O objetivo desse artigo é o de avaliar, analítica e empiricamente (através de experimentos de simulação), até que ponto tais suposições quanto à conectividade no tempo associados a uma rede MANET são realistas. Assim, advogamos o uso de um modelo de mobilidade para as MANETs inspirado no modelo de mobilidade humana que se fundamenta no padrão do voo de Levy [Mandelbrot 1983] e apresentamos uma análise do comportamento da MANET a partir de uma modelagem como um TVG. Com base nessa modelagem, balisou-se o grau de conectividade da MANET, através da caracterização do tempo máximo em que uma jornada se forma na rede, variando-se as suas densidades locais e globais. Como resultado, obteve-se uma equação característica do tempo de jornada máxima do TVG em função da sua densidade. A obtenção de tal função característica comprova que numa MANET, apesar da variação da densidade (retirada ou inserção de vértices), ainda existirá uma jornada no tempo entre quaisquer dois nós.

A equação característica obtida pode ser aplicada para aprimorar protocolos distribuídos confiáveis e melhor definir os seus parâmetros relativos à tempo de espera, tempo de difusão para as mensagens, tempo de suspeita, etc. No caso específico de detectores de falhas não-confiáveis, pode-se usar o resultado do nosso estudo para balizar o tempo de emissão de mensagens de *heartbeat* [Friedman and Tcharny 2005] ou tempo de emissão/recepção de mensagens de QUERY-RESPONSE adotadas em [Greve et al. 2011].

O restante do artigo contempla as seguintes seções. A Seção 2 apresenta o modelo de mobilidade e de grafos utilizados para a MANET; a Seção 3 descreve os fundamentos dos detectores de falhas; a Seção 4, descreve o modelo de simulação e cenários; a Seção 5 apresenta os resultados; a Seção 6 os trabalhos correlatos e finalmente a Seção 7 as principais conclusões.

## 2. Modelo para a MANET

### 2.1. Modelos de Mobilidade

Um fator importante no estudo, análise e simulação de protocolos e algoritmos para MANETs é o padrão de mobilidade utilizado na construção do modelo da rede. Os modelos de mobilidade são classificados em cinco classes com base em suas características [Khaledi et al. 2009]:

- Classe *Random Models*: Os modelos escolhem aleatoriamente cada novo destino, independente de qualquer interação com a vizinhança, como exemplos de modelos, temos: *Random Walk*, *Random Waypoint*, *Random Direction* e *Levy Flight*.
- Classe *Random Variants Models*: Se diferencia da classe anterior, pois os parâmetros de mobilidades como velocidade e direção são escolhido com base no movimento anterior, exemplos de modelos são: *Gauss-Markov*, *Smooth Random* e *Semi-Markov Smooth Model*.
- Classe *Group Models*: São modelos onde seus elementos se movimentam em grupo, tais como o *Reference Point Group Mobility Model*, *Column*, *Pursue* e *Nomadic Community*.

- Classe dos *Geographic Models*: Modelos que possuem o movimento limitado por caminhos pré-definidos ou obstáculos geográficos, como exemplo temos: *Manhattan*, *Freeway* e *Obstacle*.
- Classe dos *Social Models*: Apresentam um movimento baseado em lugares que concentram elementos por um tempo considerável, chamado ponto de contexto social. Tomando como exemplo uma sociedade real, esses pontos de contexto social seriam centros comerciais, centros de lazer, etc.. Como exemplo de modelos, temos: *CMM*, *Orbit* e *Slaw*.

Se considerarmos uma MANET onde parte dos elementos que constituem a rede são dispositivos associados a um humano (a exemplo de celulares, *smartphones*, *tablets*, *notebooks*, *gps*, etc.), podemos deduzir que o movimento dos dispositivos da rede é determinado pelo modelo de mobilidade humano. Os estudos de [Gonzalez et al. 2008] e [Rhee et al. 2011] demonstraram, através de experimentos reais em diversos cenários, que o modelo de mobilidade humana segue um padrão já observado na natureza, conhecido como voo de Levy [Mandelbrot 1983]. Nesse artigo, advogamos a adoção do modelo de Levy como o mais adequado para modelar as MANETs.

## 2.2. Modelo de Mobilidade de Levy

O *modelo de mobilidade de Levy* adota uma probabilidade  $Pr$  em lei de potência para definir o tamanho das caminhadas, de tal forma que  $Pr(x) = cx^{-\alpha}$ . Isto significa que, quanto maior o tamanho da caminhada  $x$ , menor é a probabilidade de sua ocorrência. Desta forma, existirá um número muito maior de pequenas caminhadas, se comparadas ao número de longas caminhadas. A título comparativo, enquanto no modelo de *Levy* as caminhadas de menor caminho possuem maior probabilidade, no *Random Waypoint*, a probabilidade é igual para todos os tamanhos de caminhadas. Na Figura 1 podemos observar uma comparação das trajetórias do voo de Levy (1b) com outros dois modelos de mobilidade conhecidos e mais comumente adotados, a saber, o *Random Walk* (1a) e o *Random Waypoint* (1c).

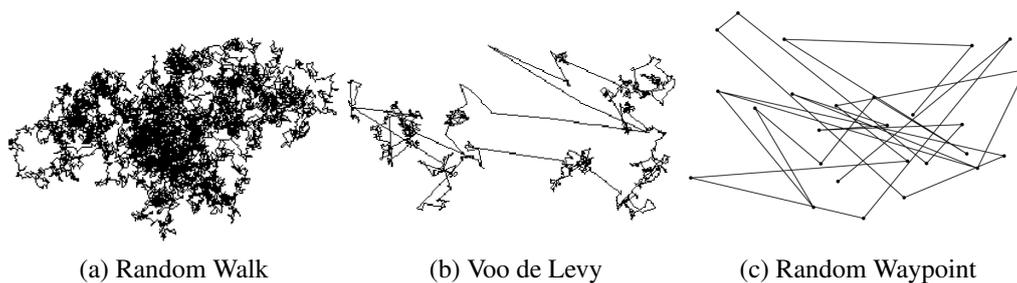


Figura 1. Trajetórias de Modelos de Mobilidade

## 2.3. Modelo de Grafos: TVG

A MANET é modelada através de um grafo cuja composição evolui no tempo. Ou seja, a MANET é um *Time-Varing Graph* (ou TVG) [Casteigts et al. 2011b].

Um TVG é representado por uma quintupla  $G = (V, E, T, \rho, \varsigma)$ , onde:

- $V = \Pi$  representa o conjunto de vértices;

- $E \subseteq V \times V$  representa as ligações (arestas) entre os vértices;
- $T$  é o tempo de vida do sistema;
- $\rho : E \times T \rightarrow 0, 1$  é a função de presença, que determina se uma aresta está disponível em um determinado instante de tempo;
- $\varsigma : E \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é a função de latência, que indica quanto tempo falta, a partir de um tempo  $t \in T$ , para que uma aresta  $e \in E$  esteja disponível.

Dado um TVG, seja  $\{(e_1), (e_2), \dots, (e_k)\}$  um caminho entre dois nós  $v$  e  $w$ , uma sequência de pares  $J = \{(e_1, t_1), (e_2, t_2), \dots, (e_k, t_k)\}$  é uma *jornada no tempo* entre  $v$  e  $w$ , se e somente se  $p(e_i, t_i) = 1$  e  $t_{i+1} \geq t_i + \varsigma(e_i, t_i)$  para todo  $i < k$ . Se esta jornada existe, então podemos afirmar que  $w$  está ao alcance (no tempo) de  $v$ , simplificando  $v \rightsquigarrow w$ .

### 3. Detectores de Falhas

Segundo [Chandra et al. 1996], um detector de falhas não confiável é uma espécie de oráculo, capaz de prover informações acerca de processos falhos. Cada nó ou processo possui um detector de falhas local que, quando solicitado, responde com uma lista de processos suspeitos de serem falhos. O detector é considerado não confiável porque lhe é permitido suspeitar de um processo correto ou indicar que um processo faltoso é correto. Porém, o detector também é capaz de corrigir um julgamento errado quando detectado. Um detector de falhas pode ser classificado de acordo com a sua completude e sua acurácia [Chandra et al. 1996]. Entende-se por completude como a capacidade de detectar a falha de um processo. A acurácia está relacionada com a capacidade de não suspeitar indevidamente de processos corretos.

Em [Chen et al. 2002] é apresentado um conjunto de métricas para medir a qualidade de serviço de um detector de falhas. Ela é calculada com base em três métricas: o tempo de detecção de uma falha, o tempo entre a ocorrência de suspeitas erradas e o tempo para a correção de uma suspeita errada.

Na literatura, trabalhos como o de [Friedman and Tcharny 2005, Sridhar 2006] apresentam detectores de falhas para redes móveis baseados em tempo. Em [Friedman and Tcharny 2005], é proposto um detector de falhas que utiliza uma estratégia de *heartbeat*. Nesse tipo de detector, cada processo da rede mantém, enquanto correto, o envio de uma mensagem periódica do tipo “*I am alive*”, os processos que ouvem essa mensagem passam a conhecer e não suspeitar do processo emissor. No momento em que um processo qualquer  $u$  deixa de ouvir uma mensagem do tipo “*I am alive*” de um processo  $v$ ,  $u$  passa a suspeitar que  $v$  falhou.

Em [Greve et al. 2011, Sens et al. 2008], é apresentado um novo tipo de detector de falhas para redes dinâmicas (como as MANETs) não baseado em tempo. Nesse detector, a estratégia utilizada é transmissão/recepção de um par de mensagens do tipo QUERY-RESPONSE. A cada mensagem do tipo QUERY enviada por um processo, este espera por uma quantidade  $\alpha_i$  de mensagens do tipo RESPONSE referentes à QUERY efetuada. As mensagens QUERY e RESPONSE carregam consigo duas listas: (i) uma lista de suspeitos e (ii) uma lista de equívocos, contendo suspeitas erradas. A cada troca de mensagens, os processos que respondem à QUERY emitida por  $v$  passam a fazer parte do conjunto de processos conhecidos por  $v$ , denominado  $known_v$ . Assim, um processo  $u$  em  $known_v$ , será suspeito no momento em que não responde a uma QUERY executada por

$v$ . A partir desse momento, a cada mensagem trocada,  $v$  repassa para os outros processos da rede (através da sua lista de suspeitos) a informação de que  $u$  é suspeito. Caso  $u$  continue sendo um processo correto e a suspeita de  $v$  esteja errada, em um determinado momento, a suspeita chegará até o processo  $u$ . Neste momento, o processo  $u$  detecta a suspeita indevida e repassa (através da sua lista de equívocos) uma nova informação indicando o erro de julgamento. Com isso, a suspeita errada é corrigida no momento em que  $u$  volta a responder a QUERY ou quando  $v$  recebe, anexo a uma mensagem *response* de outro processo, a informação de que a suspeita sobre  $u$  está errada. Finalmente, a difusão das informações ao longo de toda a rede, sejam estas de suspeita ou de equívocos, só será assegurada caso o TVG (que modela a MANET) esteja conexo no tempo. Ou seja, caso, entre cada par de processos da rede, exista sempre uma jornada no tempo.

Para os detectores de falhas, tanto os baseados em tempo [Friedman and Tcharny 2005, Sridhar 2006], quanto os assíncronos, baseados em emissão/recepção de QUERY-RESPONSE [Greve et al. 2011, Sens et al. 2008], uma ferramenta capaz de (i) identificar se, de fato, a rede dinâmica mantém uma conectividade no tempo, além de (ii) prover uma medição dos limites de comunicação (o tempo de uma jornada máxima) da rede é de grande importância para melhorar a capacidade de detecção de falhas, tornando-a mais rápida e diminuir a quantidade de suspeitas equivocadas, aumentando a sua qualidade de serviço. O modelo e concepção de uma tal ferramenta passa pela identificação de propriedades das MANETs quanto à conectividade, objeto de estudo desse artigo.

#### 4. Implementação do Modelo da MANET

Neste trabalho, o modelo proposto para análise das características de conectividade das MANETs fundamenta-se nos *Time-Varing Graphs* [Casteigts et al. 2011a] e no padrão de mobilidade a partir do voo de Levy [Mandelbrot 1983]. Nesta seção, descrevemos os principais aspectos da implementação deste modelo.

**TVG.** A rede MANET é um grafo  $G = (V, E, T, \rho, \varsigma)$  do tipo TVG, onde o conjunto de vértices  $V = \Pi$  representa um conjunto finito de dispositivos móveis, também chamados de nós ou processos. Cada dispositivo possui um identificador único, uma rádio omnidirecional e segue um padrão de mobilidade baseado no voo de Levy [Mandelbrot 1983]. A visão de cada dispositivo está limitada ao alcance do seu rádio de comunicação, ou seja, cada dispositivo conhece a composição da sua vizinhança, mas nenhum dispositivo possui necessariamente o conhecimento global da rede. Desta forma, as arestas em  $E$  interligam nós vizinhos. A função de presença  $\rho(e, t)$  retorna 1 se, e somente se, no tempo  $t$  a distância euclidiana entre os vértices ligados por  $e$  é menor que o alcance do rádio de comunicação. Seja  $R_v$  o raio de transmissão associado ao nó  $v$ , então todos os nós a uma distância máxima  $R_v$  de  $v$  são considerados seus vizinhos. Seja  $N_v^t$  o conjunto de vizinhos de  $v$  no tempo  $t \in T$ , então  $u \in N_v^t$  iff  $(v, u) \in E_v^t$ , e tal que  $\rho((v, u), t) = 1$ . A densidade local do nó  $v$  é representada pelo grau de  $v$  no tempo  $t$ , dividido por  $R_v$ . O grau de  $v$  no tempo  $t$  é definido por  $Deg_v^t = |E_v^t|$ .

Os dispositivos da rede estão inseridos em um ambiente em formato de *torus* com tamanho finito  $W$ . O formato de *torus* foi escolhido para que não exista, no movimento dos dispositivos, o efeito de tamanho finito [Barabási and Stanley 1995] que modifique

o modelo de voo de Levy. Com relação ao grafo de comunicação formado pelos dispositivos ao longo do tempo, este não necessariamente é conexo ou completamente conectado durante todo o tempo de execução do sistema. Devido à mobilidade, as arestas de comunicação são criadas e desfeitas a todo momento, sem seguir um padrão de ocorrência, o que ocasiona um constante mudança topológica.

**Cálculo do Tempo da Jornada.** Para calcular a jornada máxima no TVG foi utilizado um protocolo simples de troca de mensagens aliado a um conjunto de lista de identificadores. Cada vértice do TVG possui uma lista que armazena identificadores. Inicialmente, cada lista possui apenas o identificador do vértice ao qual pertence. Em seguida, cada dispositivo executa ciclicamente uma sequência de três fases: *send*, *receive* e *process*. Durante a fase *send*, o dispositivo envia para todos os seus vizinhos sua lista contendo os identificadores conhecidos. Na fase *receive*, as mensagens enviadas na fase anterior são retiradas do *buffer* de entrada e recebidas por cada dispositivo. Por fim, durante a fase *process*, o dispositivo aplica a operação de união no conjunto de identificadores recebidos e substitui sua lista interna por este conjunto. As listas crescem de forma monotônica à medida que novos nós são descobertos. Caso exista no TVG uma jornada entre cada par de nós da rede, ao cabo de um tempo, por transitividade, cada lista individual irá conter todos os nós da rede. Desta forma, o *tempo da jornada máxima* será o instante de tempo em que todas as listas de identificadores estão completas e contendo todos os nós da rede. Com o objetivo de isolar a influência da densidade na jornada máxima, para a troca das listas foi adotado um sistema de envio de mensagens sem falhas.

A Figura 2 ilustra os passos efetuados por um TVG de 4 nós. Em 2 (a), cada um deles apresenta uma lista contendo apenas os seus respectivos identificadores. Em 2 (b), os nós  $v_2$  e  $v_3$  tornam-se vizinhos, mesmo acontece entre  $v_1$  e  $v_4$ , e promovem a união das suas listas. Finalmente, em 2 (c) mostra-se o instante em que a jornada máxima é descoberta.

Para criar o modelo e TVG e Levy Flight, utilizamos a linguagem c++ para desenvolver o nosso próprio algoritmo.

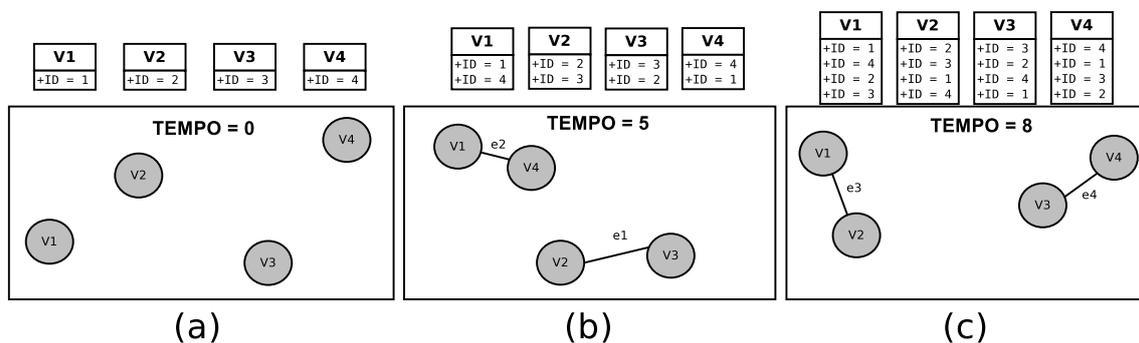


Figura 2. Troca de Listas entre Nós da Rede

#### 4.1. Parâmetros e Cenário de Simulação

**Parâmetros.** Os parâmetros considerados para implementação do modelo são três: *tamanho do ambiente*: correspondente a área do torus, *densidade global do ambiente*: equivalente ao total de dispositivos dividido pela área do torus e o *parâmetro*  $\alpha$  aplicado na

distribuição do voo de Levy. Para esse parâmetro utilizou-se o valor que foi obtido do trabalho de [Gonzalez et al. 2008]. Nesse trabalho, [Gonzalez et al. 2008] monitoraram a trajetória de 100.000 telefones móveis durante um período de seis meses. Ao final do estudo ficou demonstrado que as trajetórias dos usuários, dos telefones monitorados, apresentaram um modelo de voo de Levy com  $\alpha = 1.75$ . Com base neste trabalho, escolhemos o valor de  $\alpha = 1.75$  para as simulações do nosso modelo. Os outros dois parâmetros variaram de acordo com a Tabela 1.

Tamanho do ambiente (m <sup>2</sup> )	6.25x10 <sup>4</sup>	2.5x10 <sup>5</sup>	5.625x10 <sup>5</sup>	1.0x10 <sup>6</sup>		
Densidade global	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007
	0.0008	0.0009	0.0010	0.0011	0.0012	

Tabela 1. Parâmetros da Rede

**Métricas.** Em cada execução foi registrado o *tempo máximo da formação da jornada na rede*, ou seja, o tempo em que todos os dispositivos completaram suas listas de identificadores. Além disso, o número de conexões de cada dispositivo em cada iteração foi registrado para obtermos a *densidade local* de cada dispositivo  $v$  no tempo  $t$ . i.e.,  $Deg_v^t$ . Com o objetivo de avaliar a influência de cada parâmetro no cálculo da jornada, em cada combinação dos parâmetros iniciais, o modelo foi executado 300 vezes.

## 5. Resultados e Avaliação da Conectividade da MANET

**Densidade X Jornada Máxima.** Os parâmetros iniciais de tamanho do ambiente e densidade foram combinados com o objetivo de comparar a influência da densidade no tempo de jornada máximo em ambientes de tamanhos variados. Para cada combinação foram obtidas trezentas amostras da jornada máxima no TVG. De posse dessas amostras, o próximo passo foi verificar o comportamento característico da jornada máxima com relação à densidade. O gráfico da Figura 3 apresenta as jornadas máximas médias para cada condição inicial do modelo. As barras verticais em cada ponto representam o desvio padrão amostral da simulação de 300 amostras. Analisando os dados em um gráfico semi-log, os dados apresentam o formato de uma reta. Esse tipo de comportamento é ajustável somente com funções exponenciais. Neste caso especificamente, os dados se ajustam a uma função exponencial decrescente, esse comportamento é comprovado através de um ajuste não linear, veja a Figura 3. O ajuste de cada conjunto de dados é representado por uma linha contínua na figura 3. A função 1 foi utilizada no método de ajuste, o relatório com os valores do ajuste pode ser observado na Tabela 2. Na função 1,  $y_0$  representa a *offset*,  $A$  representa a sua amplitude e  $t$  representa a constante de decaimento.

Com base na função característica para o tempo de jornada máximo (Função 1), ao se aumentar o tamanho  $W$  temos algo equivalente a reduzir a densidade para zero. Neste caso, o limite da Função 1 com a densidade  $x$  tendendo a zero é igual a soma de duas constante  $y_0$  e  $A$ . Ou seja, mesmo num ambiente com uma esparsa quantidade de dispositivos, ainda assim, existirá uma jornada de tamanho máximo igual a  $y_0 + A$ .

Consideremos agora o caso contrário, onde a densidade do ambiente tende ao infinito. Neste caso a Função 1 tende para um valor igual a  $y_0$ . Ou seja, mesmo no caso

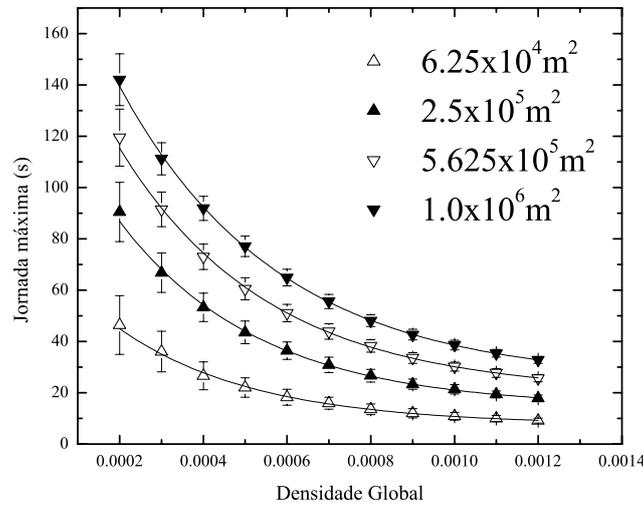


Figura 3. Densidade X Jornada Máxima

$W$	$y_0$	$A$	$t$
$6.25 \times 10^4 m^2$	$7.5074 \pm 0.24837$	$69.0738 \pm 2.98027$	$32.6698 \times 10^{-5} \pm 1.22$
$2.5 \times 10^5 m^2$	$14.40617 \pm 0.4075$	$131.5002 \pm 3.9395$	$335.013 \times 10^{-6} \pm 9.72683$
$5.625 \times 10^5 m^2$	$20.03765 \pm 0.56484$	$166.84008 \pm 4.0372$	$357.035 \times 10^{-6} \pm 9.55493$
$1.0 \times 10^6 m^2$	$24.54946 \pm 0.43951$	$194.43159 \pm 2.564$	$380.077 \times 10^{-6} \pm 6.09464$

Tabela 2. Relatório de Ajuste

de um ambiente extremamente denso, ainda existirá uma jornada entre dois vértices do TVG.

Esse resultado é importante para garantir a existência da propriedade de conectividade no tempo em redes MANETs, considerando-se um modelo de mobilidade humano. Isso é essencial para garantir o funcionamento correto de alguns dos detectores de falhas citados neste trabalho. Além disso, caracterizar o tempo da jornada máxima é importante para ajudar na escolha da estratégia de detecção durante o desenvolvimento detectores. Uma estratégia adequada diminui o tempo de detecção, recorrência/recuperação de falsas detecções, e finalmente aumenta a qualidade de serviço do detector.

$$y = f(x) = y_0 + Ae^{-\frac{x}{t}} \quad (1)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = y_0 + A \quad (2)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = y_0 \quad (3)$$

**Densidade Global X Densidade Local.** A Função 1 descreve o comportamento da jornada máxima com base na densidade global do ambiente. Porém, como os vértices da rede possuem apenas uma visão local do sistema, estes não possuem o conhecimento da densidade global. Sem o parâmetro da Função 1, é preciso obter uma relação entre a densidade global e a densidade local. Como densidade local adotamos a quantidade de dispositivos dentro do rádio de comunicação de um dispositivo dividido pela área de alcance do rádio.

Observando o Gráfico 4, que apresenta a média dos graus ao longo do tempo de cada vértices do TVG, podemos verificar que existe uma relação linear entre a densidade global do ambiente e a densidade local do dispositivo. Com isto podemos obter uma densidade global  $x$  a partir de uma densidade local  $x'$ , conforme a Função 4.

Substituindo na Função 1, o valor da densidade global  $x$  pela Função 4, obtemos uma relação entre a densidade local e a jornada máxima do TVG.

$$x = g(x') = ax' + b \quad (4)$$

$$f(g(x')) = y_0 + Ae^{\frac{-x}{t}} \quad (5)$$

$$f(x') = y_0 + Ae^{\frac{-(ax'+b)}{t}} \quad (6)$$

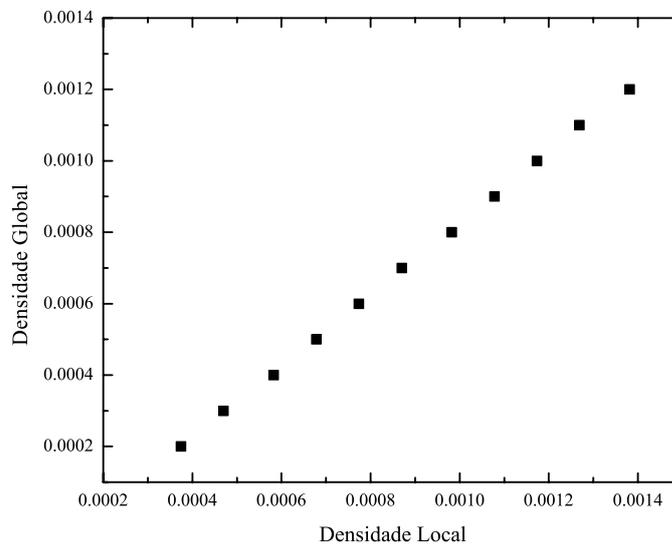


Figura 4. Densidade Global X Densidade Local

## 6. Trabalhos Relacionados

Alguns outros trabalhos [Ferreira 2004, Bui Xuan et al. 2002] propõem a utilização de grafos evolutivos para modelar as redes dinâmicas. Esta abordagem se diferencia um

pouco da TVG [Casteigts et al. 2011a, Casteigts et al. 2011b], dado que nesta os grafos evoluem com o tempo a partir de uma sequência de grafos estáticos. Vale destacar que o trabalho de [Ferreira 2004] também apresenta um conjunto de conceitos e métricas sobre jornadas em rede dinâmicas. Com base nessas métricas, [Bui Xuan et al. 2002] apresentam o cálculo de uma jornada mais curta e mais rápida numa rede dinâmica, como por exemplo, MANETs e sistemas de satélites em órbita terrestre baixa.

[Bettstetter 2002] aborda o problema de conectividade em redes sem fio. O autor investiga a distribuição espacial dos dispositivos da rede e o seu efeito na conectividade. O trabalho estima a quantidade necessária de dispositivos para cobrir uma área com o objetivo de obter uma rede  $k$ -conexa. Diferentemente do modelo adotado pelo nosso trabalho, baseado na mobilidade humana, os modelos de mobilidade analisados pelo autor foram os *Random Waypoint Model* e *Random Direction Model*.

[Xiang et al. 2010] também apresentam um trabalho analítico de investigação sobre a probabilidade de uma MANET ser  $k$ -conexa. Essa característica é importante em protocolos de tolerância a falhas, pois uma rede  $k$ -conexa suporta até  $k - 1$  falhas de nós sem que ocorra um particionamento da rede. Em [Xiang et al. 2010], foi utilizado o modelo de mobilidade *Random Way Point*.

[Desai and Manjunath 2002] apresentam um estudo sobre o efeito da quantidade de nós e do tamanho do ambiente na probabilidade da rede ser conexa. O estudo concentrou-se em redes ad-hoc de tamanho finito unidimensionais e foi estendido para redes bi-dimensionais.

[Bettstetter 2004] apresenta um estudo analítico sobre limites probabilístico da conectividade em MANETs. O modelo de rede ad-hoc estudada é formada por um conjunto de nós espalhados em uma área bi-dimensional de tamanho finito. Os nós da rede apresentam um modelo de mobilidade do tipo *Random Way Point*. Apresenta-se resultados sob três pontos de vista: (i) visão de um único nó, com o número de vizinhos de um nó; (ii) visão de dois nós, com a probabilidade de existir um caminho entre dois nós; e (iii) uma visão geral da rede, com a probabilidade de existir um caminho entre quaisquer dois nós, ou seja, a probabilidade da rede ser conexa.

[Clementi et al. 2010, Foh et al. 2005] apresentam um estudo sobre o tempo de alcance de um *flooding* em redes ad-hoc. Utilizando o modelo de mobilidade *Manhattan*, o trabalho de [Clementi et al. 2010] apresenta um estudo analítico sobre a propagação de dados numa MANET. Como resultado o trabalho demonstra que o tempo de propagação no “subúrbio”, região mais esparsa, é tão rápido quanto na “zona central”, região mais densa. Ou seja, no modelo proposto por [Clementi et al. 2010], o tempo de disseminação da informação não sofre alterações significativas em densidades diferentes.

[Foh et al. 2005] apresentam uma caracterização da conectividade em redes ad-hoc. Esse estudo utiliza um modelo de mobilidade do tipo *Random Way Point* sobre um ambiente unidimensional. Diferentemente, nosso trabalho faz um estudo sobre uma área bi-dimensional com um modelo de mobilidade de *Levy Flight* (observado no comportamento humano). [Foh et al. 2005] utilizou um ambiente unidimensional com *Random Way Point*, pois o foco do seu estudo são redes ad-hoc que representam ônibus urbanos andando sobre uma via exclusiva de ônibus com paradas em estações.

[Clementi et al. 2011] apresentam um estudo analítico sobre o limite máximo de

tempo para o espalhamento de informações em redes ad-hoc. Os autores representaram a rede através de um modelo de grafos evolutivos, onde a existência de uma aresta no tempo é determinada por uma cadeia de Markov. Esse tipo de modelo engloba modelos de mobilidade como o *Random Way Point* em uma esfera ou torus. Ele se diferencia do modelo proposto neste trabalho, por não adotar o Levy Flight como modelo de mobilidade.

[Srivastava et al. 2008] apresentam, a partir de dados reais, uma caracterização da topologia e do roteamento numa MANET. Os autores utilizaram dados reais obtidos durante o evento *Mobile Ad-hoc Network Interoperability and Cooperation* (MANIAC), que reúne um conjunto de universidades para o estudo da interoperabilidade e cooperação. Por se tratar de um experimento real, o número de nós em estudo foi relativamente pequeno, cerca de dezesseis nós. Como resultados, este trabalho demonstrou que as redes apresentam um alto grau de conexão e aglomeração, o que resulta em um diâmetro pequeno. Com relação ao roteamento, os dados indicaram uma grande quantidade de *churn* (entrada e saída aleatória de nós), com as rotas sofrendo modificações constantemente.

**Considerações.** O modelo de mobilidade utilizado pode interferir diretamente na dinâmica de criação e rompimento de novas arestas no grafo. Em comparação com o estudo proposto neste presente trabalho, os trabalhos relacionados abordam modelos de mobilidade diferentes do *Levy Flight*. Além disso, tomando-se por foco a conectividade, os trabalhos de [Bettstetter 2002, Xiang et al. 2010, Desai and Manjunath 2002] procuram descobrir ou definir características da rede necessárias para garantir uma  $k$ -conectividade. Por outro lado, nosso trabalho estuda a conectividade com o objetivo de investigar se a rede formada será conexa ao longo do tempo, sem que condições para garantir tal  $k$ -conectividade precisem ser impostas. Esses fatores demonstram que o presente trabalho apresenta uma linha de investigação com vários trabalhos relacionados, porém com uma abordagem inovadora, que faz uso de um modelo de mobilidade diferente do empregado usualmente nos trabalhos de investigação sobre redes móveis.

## 7. Conclusão

Este trabalho estudou o comportamento de uma MANET representada através de um *Time-Varying Graphs* (TVG), considerando-se um padrão de mobilidade baseado no voo de Levy. Acreditamos que, embora não usual, tal modelo de mobilidade seja mais adequado para uma MANET. O seu principal objetivo foi o de avaliar o grau de conectividade da MANET, através do cálculo de tempo das jornadas formadas entre os diversos dispositivos. Como resultados das simulações, obteve-se uma equação característica do tempo de jornada máxima do TVG em função da sua densidade. A obtenção de tal função característica comprova que numa MANET, apesar da variação da densidade (retirada ou inserção de vértices), ainda existirá uma jornada no tempo entre quaisquer dois vértices do TVG. Adicionalmente, a equação característica poderá ser usada como parâmetro para aprimorar protocolos distribuídos confiáveis, e mais particularmente, detectores de falhas não-confiáveis. Nesse caso específico, a equação poderá ser usada para balizar o tempo de emissão de mensagens de *heartbeat* ou tempo de emissão/recepção de mensagens de QUERY-RESPONSE, comumente adotados pelos protocolos de detecção. Como trabalhos futuros, pretendemos usar as medidas e equação obtidas para propor uma implementação eficiente do protocolo de detecção de falhas em [Greve et al. 2011].

## Referências

- Barabási, A. and Stanley, H. (1995). *Fractal concepts in surface growth*. Cambridge Univ Pr.
- Bettstetter, C. (2002). On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network. In *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 80–91. ACM.
- Bettstetter, C. (2004). On the connectivity of ad hoc networks. *The Computer Journal*, 47(4):432–447.
- Bui Xuan, B., Ferreira, A., and Jarry, A. (2002). Computing shortest, fastest, and foremost journeys in dynamic networks. Technical Report RR-4589, INRIA.
- Casteigts, A., Chaumette, S., and Ferreira, A. (2010a). Characterizing topological assumptions of distributed algorithms in dynamic networks. In *Structural Information and Communication Complexity Conf.*, pages 126–140.
- Casteigts, A., Flocchini, P., Mans, B., and Santoro, N. (2010b). Deterministic computations in time-varying graphs: Broadcasting under unstructured mobility.
- Casteigts, A., Flocchini, P., Quattrociocchi, W., and Santoro, N. (2011a). Time-varying graphs and dynamic networks. Technical report, University of Ottawa.
- Casteigts, A., Flocchini, P., Quattrociocchi, W., and Santoro, N. (2011b). Time-varying graphs and dynamic networks. *Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks*, pages 346–359.
- Chandra, T., Hadzilacos, V., and Toueg, S. (1996). The weakest failure detector for solving consensus. *Journal of the ACM (JACM)*, 43(4):685–722.
- Chandra, T. and Toueg, S. (1996). Unreliable failure detectors for reliable distributed systems. *Journal of the ACM*, 43(2):225–267.
- Chen, W., Toueg, S., and Aguilera, M. (2002). On the quality of service of failure detectors. *Computers, IEEE Transactions on*, 51(5):561–580.
- Clementi, A., Monti, A., Pasquale, F., and Silvestri, R. (2011). Information spreading in stationary markovian evolving graphs. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 22(9):1425–1432.
- Clementi, A., Monti, A., and Silvestri, R. (2010). Fast flooding over manhattan. *Arxiv preprint arXiv:1002.3757*.
- Desai, M. and Manjunath, D. (2002). On the connectivity in finite ad hoc networks. *Communications Letters, IEEE*, 6(10):437–439.
- Ferreira, A. (2004). Building a reference combinatorial model for manets. *Network, IEEE*, 18(5):24–29.
- Foh, C., Liu, G., Lee, B., Seet, B., Wong, K., and Fu, C. (2005). Network connectivity of one-dimensional manets with random waypoint movement. *Communications Letters, IEEE*, 9(1):31–33.
- Friedman, R. and Tcharny, G. (2005). Evaluating failure detection in mobile ad-hoc networks. *Int. Journal of Wireless and Mobile Computing*, 1(8).

- Gonzalez, M., Hidalgo, C., and Barabási, A. (2008). Understanding individual human mobility patterns. *Nature*, 453(7196):779–782.
- Greve, F., Sens, P., Arantes, L., and V.Simon (2011). A failure detector for wireless networks with unknown membership. In *Euro-Par Conference, LNCS 6853*, pages 27–38.
- Khaledi, M., Hemmatyar, A., Rabiee, H., Mousavi, S., and Khaledi, M. (2009). Mobility analyzer: a framework for analysis and recognition of mobility traces in mobile ad-hoc networks. In *New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2009 3rd International Conference on*, pages 1–5. IEEE.
- Litovsky, I. and Sopena, E. (1999). Graph relabelling systems and distributed algorithms. In *Handbook of Graph Grammars and Computing by Graph Transformation. Concurrency, Parallelism, and Distribution*, volume 3, pages 1–56.
- Mandelbrot, B. (1983). *The fractal geometry of nature*. Wh Freeman.
- Rhee, I., Shin, M., Hong, S., Lee, K., Kim, S., and Chong, S. (2011). On the levy-walk nature of human mobility. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 19(3):630–643.
- Sens, P., Greve, F., Arantes, L., Bouillaguet, M., and Simon, V. (2008). Um Detector de Falhas Assíncrono para Redes Móveis e Auto-Organizáveis. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- Sridhar, N. (2006). Decentralized local failure detection in dynamic distributed systems.
- Srivastava, V., Hilal, A., Thompson, M., Chattha, J., MacKenzie, A., and DaSilva, L. (2008). Characterizing mobile ad hoc networks: the maniac challenge experiment. In *Proceedings of the third ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation and characterization*, pages 65–72. ACM.
- Xiang, H., Liu, J., and Kuang, J. (2010). Minimum node degree and connectivity of two-dimensional manets under random waypoint mobility model. In *Computer and Information Technology (CIT), 2010 IEEE 10th International Conference on*, pages 2800–2805. IEEE.