

## AntRoP - Protocolo de Roteamento Bio-inspirado em Colônia de Formiga Tolerante a Falhas e Desconexões aplicado às Redes Emergenciais

Luiz H. A. Correia<sup>1</sup>, Daniel F. Macedo<sup>2</sup>, Michel A. S. Ribeiro<sup>1</sup>, Tales Heimfarth<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Lavras  
Lavras-MG, Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte-MG, Brasil

lcorreia,tales{@dcc.ufla.br}, damacedo@dcc.ufmg.br, michelsra@gmail.com

**Abstract.** *In emergency situations, communication is essential for decision making in rescue operations. In the event of natural disasters, generally the communication infrastructure is damaged, hence being necessary to deploy alternative networks. Emergency networks arise as an option for the restoration of communication, being composed of mobile devices like PDAs, smartphones, fixed and mobile stations, interconnected in an ad hoc manner. Such networks are susceptible to delays and disconnections during message delivery, hence are characterized as DTN networks (Delay Tolerant Network). This paper proposes and evaluates a bio-inspired routing protocol based on ant colony for emergency networks, called AntRoP (Ant Routing Protocol). Simulations assessed the performance of the proposed routing protocol in disaster scenarios. The results show that AntRoP has a delivery rate 41% higher than the Epidemic protocol and 9.5% higher than Prophet's, which are two of the most important routing protocols for DTNs.*

**Resumo.** *Em situações de emergência a comunicação é essencial para a tomada de decisão das equipes de resgate. Na ocorrência de desastres, geralmente a infraestrutura das redes de comunicação é danificada, sendo necessário implantar redes alternativas. As redes emergenciais surgem como uma opção para criar uma estrutura de comunicação, sendo compostas por dispositivos móveis interligados em modo ad hoc. Essas redes são susceptíveis a atrasos e desconexões na entrega de mensagens, o que as caracteriza como redes DTN (Delay Tolerant Network). Um dos maiores desafios de tais redes é o roteamento. Este artigo propõe e avalia um protocolo de roteamento bio-inspirado em colônia de formigas, tolerante a falhas e desconexões de nós e enlaces, para redes emergenciais, denominado AntRoP (Ant Routing Protocol). Simulações de desempenho avaliaram três protocolos de roteamento em cenários de desastre. Os resultados mostraram que o AntRoP possui, em média, uma taxa de entrega 41% maior que o protocolo Epidêmico e 9,5% maior que o PROPHET, dois dos principais protocolos de roteamento DTN da literatura.*

## 1. Introdução

Os desastres, tanto naturais, humanos ou tecnológicos, trazem transtornos e prejuízos à sociedade. Em desastres, as redes de comunicação de voz e dados podem ser totalmente destruídas ou danificadas, ou não podem ser utilizadas de forma confiável, pois se encontram congestionadas. A falta de uma infraestrutura de comunicação pode tornar a situação de desastre ainda mais caótica, dificultando a coordenação das equipes de resgate e o pronto atendimento às vítimas. Nesse caso, uma rede emergencial deve ser rapidamente implantada para restabelecer a comunicação e dar suporte aos serviços de voz e transmissão de dados [Schmitt et al. 2007]. Muitos governos estão cada vez mais conscientes da importância e dos benefícios que as redes emergenciais podem oferecer ao serem utilizadas em situações críticas e de crise [Hinton et al. 2005].

As redes emergenciais de comunicação não necessitam de uma infraestrutura fixa. Essas redes são compostas de nós, que são dispositivos como PDAs, *smartphones* e estações móveis, trazidos pela equipe de resgate que podem ser interligados em modo ad hoc. Esses nós tendem a se movimentarem em grupos e, em geral, existe uma maior densidade de nós em pontos de interesse, como o centro de controle de incidentes (que eventualmente pode possuir uma estação fixa) e as regiões de busca e resgate.

Um grande desafio nos cenários de desastre é a baixa capacidade de armazenamento de energia dos dispositivos móveis. Neste caso, o problema não está em somente transmitir os dados necessários de forma correta, mas também em economizar energia dos dispositivos móveis. Além das restrições de recursos, a conexão entre os nós está sujeita a severas atenuações dos sinais transmitidos, seja por obstáculos, interferências ou pela distância entre os nós. Finalmente, a mobilidade dos nós torna a topologia da rede dinâmica e altamente esparsa. As frequentes desconexões impostas pela dinamicidade da topologia da rede impedem que os protocolos de roteamento tradicionais possam ser aplicados nas redes de emergência. Essas redes possuem características de atrasos e desconexões similares às redes DTN (*Delay Tolerant Networks*). Os protocolos de roteamento empregados nas redes DTN são baseados em replicação ou encaminhamento de mensagens, e têm sido testados nas redes emergenciais.

As redes DTN suportam desconexões frequentes e longos atrasos na entrega de mensagens, que podem ser de horas e até mesmo dias. As desconexões podem ocorrer pela alta mobilidade dos nós, por péssimas condições de comunicação e/ou por economia de recursos. Esses eventos podem resultar em uma conectividade intermitente da rede durante um período, ou ainda, pode ser que um caminho entre a origem e o destino nunca chegue a ficar completamente estabelecido [de Oliveira 2008]. Dessa forma, os protocolos de roteamento empregados nas redes móveis ad hoc (MANET - *Mobile Ad Hoc Networks*) são ineficientes nas redes DTN, já que necessitam estabelecer um caminho fim-a-fim para comunicação entre os nós [Jain et al. 2004].

As heurísticas baseadas em colônia de formigas têm sido usadas para encontrar soluções ótimas em problemas computacionais, como o do caixeiro viajante, buscas em grafos e roteamento em redes móveis [Stutzle et al. 1999, Dorigo et al. 2006, Caro et al. 2004]. Neste trabalho propomos um protocolo de roteamento bio-inspirado em colônia de formigas denominado AntRoP (*Ant Routing Protocol*) para as redes emergenciais. Esse protocolo é baseado no comportamento de auto-organização observado em colônias de formigas, utilizando a descoberta de caminhos mais curtos por meio de rastros

de feromônio. O objetivo é encontrar uma maneira eficiente de estabelecer uma conexão entre os envolvidos e rotear as mensagens em uma rede móvel sem fio em cenários de emergência, visando reduzir a latência e a quantidade de mensagens enviadas, bem como melhorar a taxa de entrega.

O desempenho do protocolo AntRoP foi avaliado e comparado por simulação com duas soluções clássicas da literatura, os protocolos Epidêmico [Vahdat and Becker 2000] e PRoPHET [Lindgren et al. 2003]. Foram avaliadas as métricas de taxa de entrega, latência e overhead de comunicação. Os resultados mostram que o AntRoP possui, em média, uma taxa de entrega 41% maior que o protocolo Epidêmico e 9,5% maior que o PRoPHET.

Este trabalho está organizado como descrito a seguir. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. O algoritmo proposto é descrito na Seção 3. A Seção 4 apresenta a avaliação experimental e os resultados encontrados. Finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Segundo [Schmitt et al. 2007] as redes emergenciais são redes construídas sobre cenários de desastres e tem a propriedade de estabelecer uma comunicação robusta. Elas não são necessariamente infraestruturadas e oferecem comunicação de dados e de voz. As redes emergenciais são uma das várias aplicações típicas de redes ad hoc [Boukerche 2008]. A comunicação durante o incidente é estabelecida através de dispositivos móveis sem fio, trazidos pelas equipes de resgate (policiais, bombeiros, defesa civil). Esses dispositivos são conectados de forma ad hoc e formam uma rede que visa a comunicação e a transmissão de dados entre as equipes de resgate.

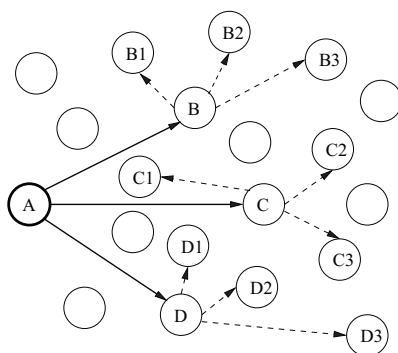
Na literatura encontramos diversas redes emergenciais que empregam redes MANETs, entre elas os projetos Sahana e DUMBO. O Sahana é um sistema Web de código livre que visa ajudar em vários problemas de coordenação que ocorrem após e durante um desastre [Careem et al. 2007]. Essa ferramenta disponibiliza na Web informações que auxiliam a encontrar pessoas desaparecidas, gerenciar a ajuda e acompanhar a situação de acampamentos para desabrigados. O sistema foi utilizado no Tsunami da Ásia em 2004 e também no terremoto do Haiti no início de 2010. Apesar disso, o Sahana não investiga a intercomunicação entre os dispositivos móveis empregados no local de desastre.

O projeto DUMBO [Kanchanasut et al. 2008] (*Digital Ubiquitous Mobile Broadband OLSR*) implanta uma MANET para situações pós-desastre, na qual a infraestrutura de rede fixa não está disponível, assim uma rede de emergência deve ser instalada com urgência. Redes DUMBO suportam dispositivos heterogêneos e possibilitam a transmissão de *streaming* de vídeo, VoIP e mensagens curtas. Apesar disso, neste projeto é assumido que a infraestrutura de comunicação pode ser parcialmente restaurada e que existe acesso à Internet. Além disso, somente o protocolo de roteamento OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) foi considerado no projeto.

As redes emergenciais, consideradas um caso particular de uma rede DTN (*Delay Tolerant Network*), podem ser classificadas em determinísticas ou estocásticas [Zhang 2006]. Um cenário é dito determinístico quando a informação dos instantes de contato entre os nós da rede e a capacidade de armazenamento dos mesmos é previsível, caso contrário, esse cenário é considerado estocástico. Dessa forma, os protocolos de ro-

teamento nas redes DTN são divididos em dois grupos: os baseados em replicação, que mantêm a mensagem em *buffer* durante a transmissão (empregados em redes estocásticas) e os baseados em encaminhamento (utilizados em redes determinísticas), que apagam a mensagem após encaminhá-la. Redes de emergência são normalmente estocásticas.

O protocolo de roteamento Epidêmico visa maximizar a taxa de entrega e a latência por meio de repasses de mensagens a cada nó contatado que possua espaço em *buffer*. O funcionamento desse protocolo é semelhante a uma doença epidêmica: enquanto houver espaço em *buffer* as mensagens são repassadas a cada contato entre os nós. Cada nó da rede possui uma lista com as mensagens que ele armazena. Essa lista é trocada entre vizinhos que estão no mesmo alcance de transmissão para determinar quais mensagens serão solicitadas. Esse processo se repete sempre que um nó entra em contato com um novo vizinho. Na Figura 1 é mostrado o funcionamento do Epidêmico para uma rede com 20 nós. O protocolo Epidêmico possui um tempo ótimo de propagação de dados, pois explora todos os caminhos ao mesmo tempo. Além disso, apesar do roteamento Epidêmico não detectar falhas, a redundância e aleatoriedade na disseminação de mensagens contornam potenciais falhas de nós ou enlaces [Gupta et al. 2002]. Entretanto, o protocolo Epidêmico consome uma alta quantidade de mensagens e rapidamente ocupa todo o *buffer* dos nós.



**Figura 1. Protocolo Epidêmico.**

Devido ao alto custo do Epidêmico, novos protocolos foram propostos tentando minimizar a quantidade de mensagens enquanto mantendo uma entrega rápida e confiável. Em [Spyropoulos 2007] foi proposta uma família de protocolos de múltiplas cópias chamada de *Spray*. A ideia central é que a origem gere um pequeno número de cópias das mensagens, assegurando que o número de transmissões seja reduzido e controlado. Um dos esquemas propostos é chamado de *Spray and Wait*, no qual o nó origem repassa todas as cópias para os primeiros  $N$  nós distintos que ele encontra. Uma vez que as cópias são distribuídas é realizada a transmissão direta. Segundo os autores o roteamento *Spray and Wait* não tem um bom desempenho para cenários onde a mobilidade é pequena e localizada, pois depende fortemente da mobilidade para que a mensagem seja entregue.

Outra abordagem é o uso de métricas de redes sociais, tais como histórico de contatos, mobilidade e número de nós na vizinhança. O protocolo MV (*Meeting Visit*) mantém um modelo de movimento dos participantes em uma rede DTN e usa essa informação para executar o encaminhamento de mensagens na rede. Este protocolo aprende a frequência de contatos entre pares de nós e suas visitas em certas regiões geo-

gráficas. Essas frequências de contato são usadas para classificar cada mensagem de acordo com sua probabilidade de entrega através de um caminho específico.

O PROPHET (*Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity*), também utiliza métodos de análise de conectividade da rede para entregar de forma eficiente uma mensagem ao destinatário [Lindgren et al. 2003]. O PROPHET assume a não aleatoriedade de movimento dos nós da rede para melhorar a entrega das mensagens. Assim, o protocolo procura identificar os nós que mais se encontram com outros nós, para que sejam escolhidos prioritariamente para o repasse de mensagem. Dessa forma, quando dois nós se encontram, uma mensagem é transmitida para o outro nó se a probabilidade de entrega ao destino for mais alta no outro nó. Porém, como o nó que repassou a mensagem pode encontrar em seu caminho outro nó que possua melhor probabilidade que o anterior, ou até mesmo encontrar o nó destino, a mensagem não é removida imediatamente de seu *buffer* se este ainda possui espaço disponível.

No PROPHET, quando um nó encontra outro nó, eles trocam informações sobre a probabilidade de encontrar um certo destino e decidem se trocam ou não mensagens entre eles. Essa probabilidade de encontrar um determinado destino é dado por  $P \in [0, 1]$ . A probabilidade  $P(a, b)$  de um nó  $a$  encontrar um nó  $b$ , aumenta sempre que esses nós se encontram, e é reduzida periodicamente, de forma a evitar que nós que se encontravam frequentemente, mas que agora não se encontram mais, continuem possuindo uma alta probabilidade. A entrega de mensagens se baseia na transitividade: se um nó  $a$  encontra frequentemente um nó  $b$ , e o nó  $b$  encontra frequentemente um nó  $c$ , logo o nó  $c$  possui uma grande probabilidade de entregar mensagens destinadas ao nó  $a$ . Os resultados das simulações demonstram que o PROPHET apresenta um bom desempenho em redes com alta mobilidade ou que possuem nós com grandes alcances de comunicação, já que estes fatores permitem um maior número de encontros de nós, o que conseqüentemente permite que mais informações sobre a rede sejam trocadas.

O protocolo de roteamento AntHocNet (*Ant Colony Optimization*), baseado em sistemas biológicos, foi desenvolvido para redes MANET [Caro et al. 2004]. Esse protocolo é baseado no comportamento de auto-organização observado em colônias de formigas, sendo que a ideia central é fornecer componentes reativos e pró-ativos para o roteamento. As formigas, ou agentes, amostram continuamente possíveis caminhos e registram a qualidade do enlace em variáveis que representam o rastro de feromônio deixado pelas formigas. Dessa forma, múltiplos caminhos são descobertos e armazenados em tabelas dos nós da rede. Esses caminhos são classificados de acordo com a quantidade de feromônio registrado. Para encontrar uma rota entre um nó de origem e outro de destino, os pacotes de dados são distribuídos estocasticamente sobre os nós da rede. A escolha do próximo salto é baseada em uma probabilidade proporcional à quantidade de feromônio, o que limita a quantidade de pacotes enviados em difusão na rede. Apesar disso, esse protocolo não considera as características de falhas e desconexões comuns nas redes emergenciais.

O protocolo de roteamento AntRoP, proposto neste trabalho, também é bioinspirado em colônia de formigas, com a diferença de ser desenvolvido para redes de emergência. Dessa forma, o AntRoP considera as falhas e desconexões da rede, sendo comparado e avaliado com outros protocolos desenvolvidos para redes DTN.

Recentemente outros protocolos de roteamento para redes de emergência baseados



em contexto têm sido desenvolvidos, como os protocolos *3D routing* [Jacinto et al. 2010] e *Modified CAR*. Esses protocolos não foram avaliados neste trabalho, sendo que o AntRoP foi comparado somente aos protocolos de roteamento clássicos Epidêmico e PРоPHET.

### 3. Protocolo de Roteamento AntRoP

O protocolo de roteamento bio-inspirado AntRoP (Ant Routing Protocol) foi desenvolvido baseado no comportamento de auto-organização observado em colônias de formigas. Segundo [Caro et al. 2004] as heurísticas baseadas em colônia de formigas têm sido usadas com sucesso no roteamento de redes móveis. O AntRoP foi desenvolvido para ser usado em redes DTN, visando reduzir a latência e melhorar a taxa de entrega. Essas melhorias são baseadas na hipótese de encontrar um caminho mais curto entre a origem e o destino para a entrega de mensagens.

As formigas andam de forma aleatória até encontrar o alimento e, quando retornam ao formigueiro, deixam nesse caminho rastros de uma substância química volátil conhecida como feromônio. Caso não encontrem alimento, as formigas, ao retornarem ao formigueiro, informam que naquele caminho não existe alimento. Nas próximas buscas as formigas seguirão o rastro de feromônio de maior intensidade que possui alimento, ao invés de saírem em buscas aleatórias.

A trilha de feromônio pode evaporar com o tempo se nenhuma formiga seguir esse caminho novamente, ou pode ser reforçada quando outras formigas seguem o mesmo rastro. A ideia é que se o rastro de feromônio tem alta intensidade, as formigas irão seguir por este caminho mais rapidamente e este será o menor caminho entre o formigueiro (origem) e o alimento (destino). A redução da intensidade de feromônio no tempo tem como vantagem a convergência para encontrar o caminho mais curto, sendo uma solução ótima local. Se o feromônio não evaporasse, todos os caminhos encontrados pelas primeiras formigas seriam considerados os de menor distância. Como o feromônio é volátil e evapora, as formigas ao saírem do formigueiro irão escolher o caminho com o rastro de feromônio mais forte, que indica o menor caminho.

De forma análoga, os nós da rede de emergência ao se movimentarem buscam um caminho para entregar mensagens de uma origem até um destino. Os nós seguem diferentes caminhos, que são armazenados em suas tabelas de rotas, e transportam as mensagens que são repassadas entre os nós da origem até o ponto de interesse no destino.

Se um nó  $s$  tem uma mensagem para ser enviada a um destino  $d$ , então ele verifica na sua tabela de rotas se este nó pode ser alcançado diretamente e, em caso afirmativo, entrega a mensagem para ele. Caso contrário, o nó  $s$  deve repassar a mensagem para algum nó que conheça um caminho até o destino. Se os nós vizinhos de  $s$  não possuem uma rota para o destino  $d$ , a mensagem é enviada em difusão para a rede até que encontre algum nó que possua uma rota válida ou que encontre o nó de destino  $d$ . Os nós que recebem a mensagem armazenam o caminho de volta, o número de saltos e o atraso fim-a-fim, para que no futuro possam repassar mensagens para  $s$ . As rotas são armazenadas somente por um período de tempo, já que os nós dessa rede se movimentam e a rota pode ficar defasada.

O nó  $s$  ao encontrar um vizinho  $b$ , que tenha uma rota válida para  $d$ , repassa a mensagem para esse nó, atualiza a sua tabela de rotas e descarta a mensagem de seu buffer. O nó  $b$  que transporta a mensagem, ao contatar outros nós no caminho, compara

as rotas de suas tabelas, a validade dessas tabelas (intensidade de feromônio) e calcula a probabilidade de entrega da mensagem para cada um dos nós vizinhos. Se a probabilidade de entrega de um outro nó é maior que a de  $b$ , e se tabela é válida, a mensagem é repassada para o outro nó. A troca dessas informações de rotas entre os nós reduz o número de saltos para a entrega da mensagem. Caso o nó  $b$  não encontre no caminho outros nós que possuem rotas para  $d$ , ou com probabilidade de entrega maior, a mensagem é enviada novamente em difusão para a rede. Isso evita aumento do atraso na entrega da mensagem e prováveis falhas e desconexões de enlaces e nós.

Um nó, ao encontrar o destino  $d$ , entrega a mensagem e atualiza a tabela de  $d$  informando a rota seguida. O nó  $d$ , ao enviar uma mensagem de resposta para o nó  $s$ , possui uma rota de retorno válida por um curto período de tempo e com probabilidade de entrega proporcional ao número de saltos e à velocidade de movimentação dos nós. Dessa forma, quanto maior o número de saltos necessários para a entrega da mensagem, maior será a probabilidade das rotas armazenadas nos nós serem inválidas. Isso também pode ocorrer se os nós da rede se movimentam rapidamente e a mensagem não encontrar mais os vizinhos que estão na sua tabela de rotas. Nos dois casos, para entregar a mensagem repete-se o processo anterior.

A quantidade de feromônio indica a valorização dos caminhos utilizados recentemente e a desvalorização dos demais caminhos. As atualizações de feromônio são responsáveis pela manutenção das rotas durante o movimento dos nós. A equação 1 apresenta o cálculo da evaporação do feromônio em cada nó [Gunes et al. 2002]. O parâmetro  $\tau$  indica a atualização do feromônio sobre o enlace  $i, j$  para o destino  $d$ , tal que  $0 \leq \tau \leq 1$ . O cálculo é efetuado considerando a quantidade anterior de feromônio armazenada pelo nó  $\tau_{i,j(t-1)}$  e o intervalo de tempo  $t$  transcorrido na transferência da mensagem.

$$\tau_{i,j}^d = \frac{2}{\tau_{i,j(t-1)} + t} \quad (1)$$

A probabilidade de entrega das mensagens é calculada a cada interação entre os nós, comparando as rotas e as suas validades pela intensidade de feromônio. O nó que possui maior quantidade de feromônio terá maior probabilidade de entregar as mensagens. A equação 2 mostra o cálculo da probabilidade de uma mensagem ser transferida do nó  $i$  para o nó  $j$  com destino ao nó  $d$ , na qual  $N_i$  representa o conjunto de vizinhos e  $k$  é o expoente de seleção de rotas e determina a sensibilidade da mensagem encontrar um caminho e alterar o valor do feromônio:

$$P_{i,j}^d = \begin{cases} \frac{\tau_{i,j}^k}{\sum_{j \in N_i} \tau_{i,j}^k}, & \text{se } j \in N_i \\ 0, & \text{se } j \notin N_i \end{cases} \quad (2)$$

O incremento do feromônio é dado por um parâmetro  $\Delta\tau$  quando a mensagem encontra uma rota para o destino  $d$  sobre o enlace  $i, j$ , mostrado pela equação 3.

$$\tau_{i,j}^d = \tau_{i,j}^d + \Delta\tau, \text{ para } 0 \leq \tau \leq 1 \quad (3)$$

O funcionamento do AntRoP é apresentado pelo Algoritmo 1. Inicialmente um nó de origem cria uma mensagem que deve ser enviada para um nó destino  $d$ . Em cada nó  $i$  que recebe a mensagem durante a sua propagação, os parâmetros do protocolo são ajustados, como o valor do do tempo  $t$  e a sensibilidade da mensagem encontrar uma rota e alterar o valor do feromônio  $k$  (linhas 1 a 3). O nó  $i$  verifica em sua vizinhança se  $d$  pode

ser alcançado diretamente, caso seja possível,  $i$  repassa a mensagem para  $d$ , atualiza o valor do feromônio e retira a mensagem de seu buffer (linhas 7 a 9). Se  $d$  não é alcançável diretamente, a probabilidade de entrega da mensagem é calculada e comparada para todos os nós vizinhos de  $i$  (linha 11). O nó com maior probabilidade de entregar a mensagem é registrado (linhas 12 a 14). Se a probabilidade de entrega calculada é zero, a mensagem será enviada em difusão para a rede (linha 16). Caso contrário, se a probabilidade é maior que zero para o nó registrado,  $i$  repassa a mensagem para o nó  $j$ , atualiza a sua tabela de rota e descarta a mensagem de seu buffer (linhas 18 a 20). O feromônio decai com o tempo  $t$  transcorrido, assim as rotas de  $i$  para  $j$  devem ser atualizadas, de forma a emular a evaporação do feromônio (linha 22).

---

**Algoritmo 1** Pseudo-código do AntRoP.
 

---

```

1:  $k \leftarrow 3$ ;  $t \leftarrow 0$ ;  $\Delta\tau \leftarrow 0.1$  // Setup inicial dos parâmetros
2: for  $\{(i, j) \mid j \in N_i\}$  do
3:    $\tau_{i,j} \leftarrow 0$  // Inicialização do feromônio
Require:  $Send(Message)$  to  $N_d$  // Nó  $i$  envia mensagem para  $d$ 
4:  $Maior \leftarrow null$ 
5:  $P^d \leftarrow 0$ 
6: for  $\{j \mid i \in N_j\}$  do
7:   if  $(N_j = N_d)$  then // se  $d$  é alcançado diretamente por  $i$ 
8:      $Maior \leftarrow N_d$ 
9:      $P^d \leftarrow 1$ 
10:  else
11:     $P_{i,j}^d = \frac{\tau_{i,j}^k}{\sum_{i \in N_i} \tau_{i,j}^k}$  // calcula a probabilidade de entrega para os nós vizinhos
12:    if  $(P_{i,j}^d > P^d)$  then
13:       $Maior \leftarrow N_j$  // identifica a maior probabilidade de entrega
14:       $P^d \leftarrow P_{i,j}^d$ 
15:  if  $(Maior = null)$  then // probabilidade igual a zero, uso de difusão
16:     $Broadcast(Message)$ 
17:  else
18:     $Send(Message)$  to  $Maior$ 
19:     $\tau_{i,Maior} \leftarrow \tau_{i,Maior} + \Delta\tau$  // atualiza valor do feromônio
20:     $N_i.Message \leftarrow null$  //  $i$  retira mensagem do buffer
21:  for  $\{(i, j) \mid j \in N_i\}$  do
22:     $\tau_{i,j}^d = \frac{2}{\tau_{i,j}(t-1) + t}$  // evaporação do feromônio

```

---

Os protocolos de roteamento Epidêmico, PRoPHET e AntRoP foram avaliados e comparados em um cenário de desastre fictício. Os resultados são apresentados e discutidos a seguir.

#### 4. Resultados e Discussão

Os protocolos de roteamento Epidêmico, PRoPHET e AntRoP foram avaliados em um simulador para redes DTN chamado *The One* [Keränen et al. 2009]. Esse simulador tem como características: gerar concomitantemente diferentes modelos de movimento para diferentes nós da rede, rotear mensagens entre nós heterogêneos e fornecer uma



interface de visualização gráfica de cenários que apresentam o movimento dos nós e a entrega de mensagens em tempo real.

Para a simulação foi adicionado um mapa de representação dos pontos de interesse de um cenário real. O mapa foi criado no *OpenJUMP*, e representa ruas e avenidas da cidade de Lavras-MG, incluindo a UFLA (Universidade Federal de Lavras) [Vivid Solutions 2009]. Foram considerados um ponto de desastre na Reitoria e dois pontos de interesse, um centralizado na polícia militar e outro em um Hospital, no qual se concentra o atendimento às vítimas, como mostra a Figura 2. Os parâmetros utilizados são os mesmos empregados nos artigos originais dos protocolos Epidêmico e PRoPHET. Os parâmetros de inicialização para os protocolos de roteamento são ajustados com os valores da Tabela 1.

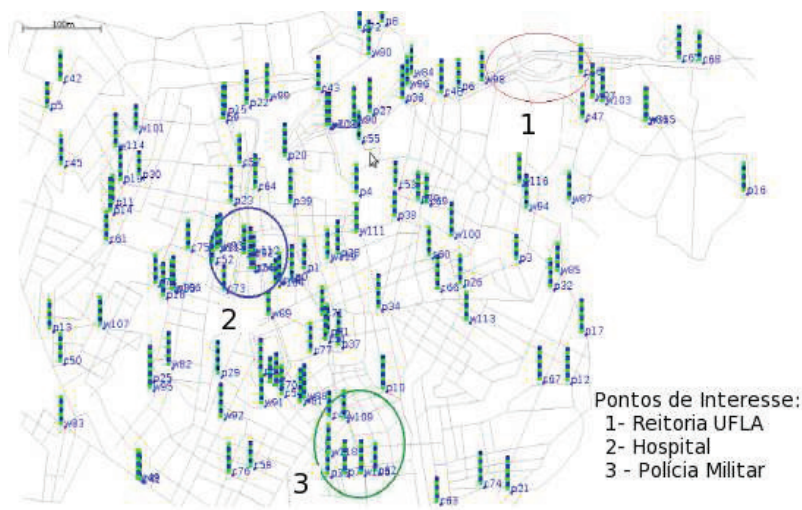


Figura 2. Cenário de simulação.

Tabela 1. Parâmetros iniciais dos protocolos de roteamento.

| Parâmetros         | Epidêmico          | PRoPHET            | AntRoP             |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| TTL                | $\infty$           | —                  | —                  |
| Fanout             | $\infty$           | —                  | —                  |
| Buffer             | Variável/simulação | Variável/simulação | Variável/simulação |
| K (desvanecimento) | —                  | Tempo da simulação | —                  |
| $P_{init}$         | —                  | 0,75               | —                  |
| $\gamma$           | —                  | 0,98               | —                  |
| $\tau_{i,j}$       | —                  | —                  | 0                  |
| $\Delta\tau$       | —                  | —                  | 0.1                |

Os parâmetros dos dispositivos móveis nas simulações foram ajustados próximos de suas especificações reais. Para a simulação foi considerado o modelo de movimento baseado em mapa (*Shortest Path Map Based Movement*), uma adaptação do algoritmo de Dijkstra para encontrar o caminho mais curto na área do mapa. Esse modelo de movimento pode conter pontos de interesse (POI), onde os nós costumam movimentar com mais frequência. Os parâmetros utilizados na simulação estão sumariados na Tabela 2.

**Tabela 2. Parâmetros da simulação.**

|                                    |                |
|------------------------------------|----------------|
| Modelo de Movimento                | SPMBM          |
| Tamanho do buffer                  | Variável       |
| Velocidade dos pedestres (agentes) | 1,8 – 5,4 Km/h |
| Velocidade dos carros (viaturas)   | 10 – 50 Km/h   |
| Tempo de simulação                 | ~ 6 horas      |
| Mensagens criadas                  | 678            |
| Velocidade de Transmissão          | 2 Mbps         |
| Tamanho das mensagens              | 500 KB – 1 MB  |
| Área da simulação                  | 4500 x 3400 m  |

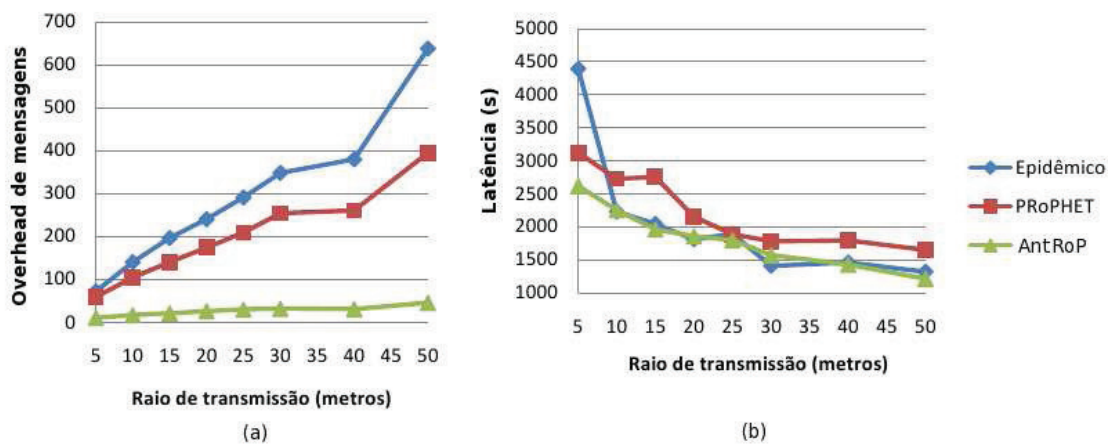
As métricas escolhidas para avaliar a simulação no *The One* no cenário proposto foram: Taxa de entrega, Latência, *Overhead* de Transmissão e Número de saltos. O cálculo do *Overhead* de transmissão é dado pela equação 4.

$$\text{Overhead de transmissão} = \frac{\text{Mensagens Transmitidas} - \text{Mensagens Entregues}}{\text{Total de Mensagens}} \quad (4)$$

As métricas dos protocolos foram avaliadas considerando-se alcance de transmissão, escalabilidade da rede e capacidade de armazenamento dos nós. O consumo de energia não foi considerado neste trabalho, mas apesar disso, pode-se inferir a redução do consumo de energia pela redução de mensagens transmitidas ou retransmitidas na rede.

#### 4.1. Alcance de Transmissão

O alcance de transmissão dos dispositivos móveis usados pela equipe de resgate e por veículos em movimento foi variado de 5 a 50m. Nesta análise a quantidade de nós foi fixada em 90, representando por três grupos: 30 pedestres, 30 veículos e mais 30 pedestres com velocidade diferenciada. Foram avaliadas as métricas de *Overhead* de transmissão e Latência. O *Overhead* de transmissão é uma métrica que fornece a percepção de quantas mensagens estão sendo retransmitidas para cada mensagem entregue ao seu destino. A Figura 3 (a) e (b) apresentam o *Overhead* de transmissão e a latência quando o alcance transmissão é variado.



**Figura 3. Alcance de transmissão: (a) *Overhead* de transmissão (b) Latência.**

Os resultados mostram que o protocolo AntRoP obteve o menor *Overhead* de

transmissão para todas as variações do raio de transmissão. Em média o protocolo AntRoP obteve resultados 10 vezes menor que o protocolo Epidêmico e 6 vezes menor que o protocolo PRoPHET. Esses resultados demonstram que o AntRoP entrega as mensagens com menos retransmissões. O protocolo Epidêmico transmite as mensagens em *flooding* para muitos nós da rede, o que gera uma maior quantidade de mensagens retransmitidas mesmo quando o alcance de transmissão é expandido. A expansão do alcance de transmissão para o protocolo PRoPHET reduz o seu *Overhead* de transmissão, mas mesmo assim este ainda utiliza um mecanismo baseado em probabilidades que não garante a entrega da mensagem. O protocolo AntRoP não foi sensível à variação do alcance de transmissão para a entrega das mensagens, já que na atualização dos rastros de feromônio deixado pelos nós as mensagens são removidas do buffers dos nós.

A latência foi semelhante entre os protocolos Epidêmico e AntRoP, sendo a maior diferença no alcance de 5 m. Para os alcances de 10m a 50m esses dois protocolos possuem uma ligeira diferença nos tempos, chegando o AntRoP a ser melhor em 12%. O protocolo PRoPHET foi o que apresentou a maior latência, sendo inferior em 21% em relação ao AntRoP. O desempenho do AntRoP se justifica pela escolha da rota mais curta devido à intensidade de feromônio.

#### 4.2. Escalabilidade da rede

A quantidade de agentes de resgate que estão inseridos em uma região de desastre varia em função do tipo de incidente, da quantidade de vítimas e da sua área de abrangência. Portanto, é essencial verificar o comportamento dos protocolos de roteamento quando a quantidade de nós é incrementada. Para a simulação da escalabilidade da rede, foi considerado que os dispositivos móveis dos agentes têm um alcance de transmissão fixado em 50 m. A escalabilidade da rede é simulada de 20 a 140 nós considerando as métricas: taxa de entrega, *Overhead* de transmissão, latência e número de saltos. A Figura 4 apresenta os resultados das métricas considerando a variação do número de nós. A Figura 4(a) apresenta a taxa de entrega, e o protocolo AntRoP obteve a melhor Taxa de Entrega, cerca de 40,3% e 9,5% superior aos protocolos Epidêmico e PRoPHET respectivamente. O protocolo Epidêmico obteve o pior *Overhead* de transmissão cerca de 6379 retransmissões, como mostra a Figura 4(b). Isso é porque o protocolo Epidêmico envia de forma aleatória as mensagens para todos os seus nós vizinhos, e os vizinhos também as reenviam para os próximos nós. O protocolo PRoPHET obteve o valor médio de 863,25 mensagens retransmitidas, próximo do AntRoP, que foi de 679. O protocolo PRoPHET limita as retransmissões dos vizinhos, enquanto o AntRoP baseia-se na intensidade de feromônio.

O comportamento dos três protocolos demonstra que a latência diminui à medida que a quantidade de nós aumenta, como mostra a Figura 4(c). Os protocolos Epidêmico e AntRoP obtiveram em média uma latência similar, enquanto o PRoPHET foi 44% mais lento. Vale salientar que o protocolo Epidêmico apresenta a latência próxima da ótima, pois emprega o método de inundação para a disseminação das suas mensagens. Isso mostra que a latência do AntRoP se aproxima da latência ótima.

O protocolo AntRoP encontra o destino em média com apenas dois saltos, enquanto os protocolos Epidêmico e PRoPHET gastam cerca de 5 e 4 saltos respectivamente (Figura 4(b)). O desvanecimento do feromônio permite ao protocolo AntRoP atualizar as tabelas de rotas e encontrar o menor caminho até o destino.

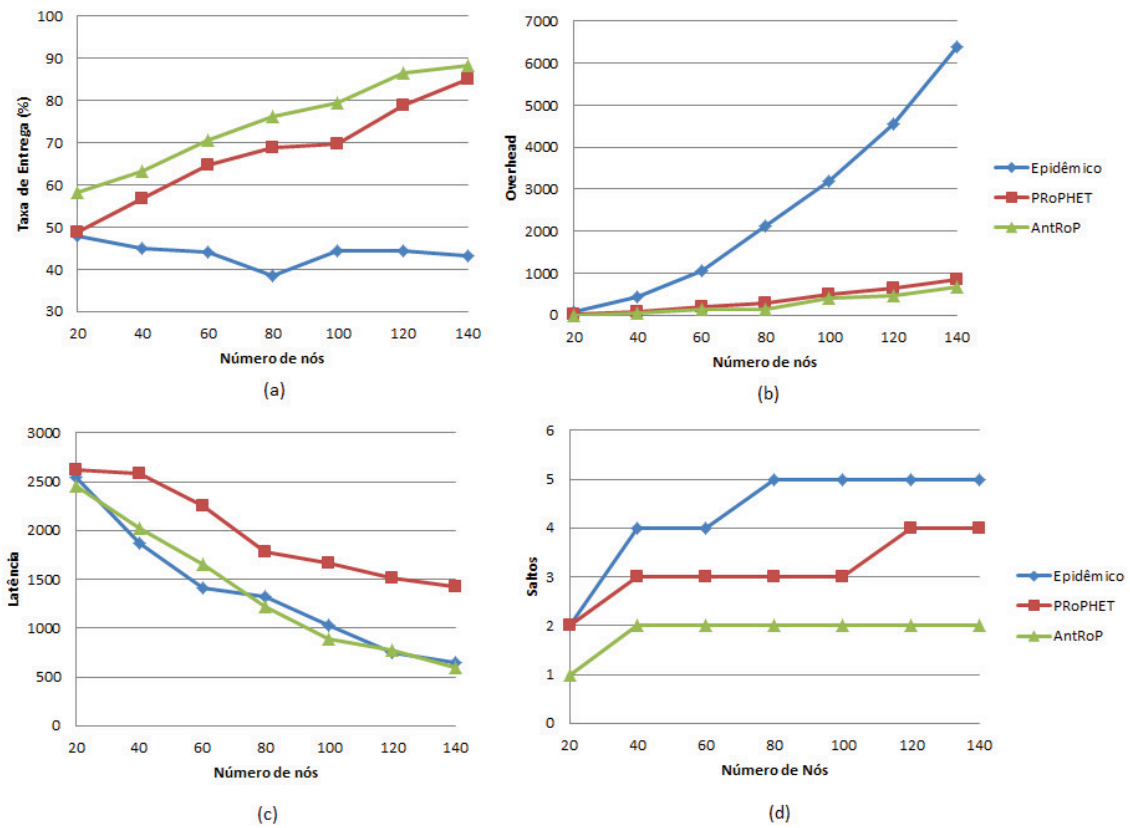


Figura 4. Escalabilidade: (a) Taxa de entrega (b) *Overhead* de transmissão (c) Latência (d) Número de Saltos

### 4.3. Tamanho do buffer

A capacidade de armazenamento dos dispositivos móveis interfere no envio das mensagens e na avaliação dos protocolos utilizados. Na simulação a capacidade de buffer dos dispositivos móveis utilizados foi variada em 25, 50, 75 e 100 Mbytes. Essa variação se aplica tanto para os pedestres quanto para as viaturas, e o alcance de transmissão foi fixado em 50 metros. Os outros parâmetros de simulação foram os mesmos mostrados na Tabela 2. A Figura 5 apresenta os resultados para o *Overhead* de transmissão e a taxa de entrega ao variarmos o tamanho de buffer.

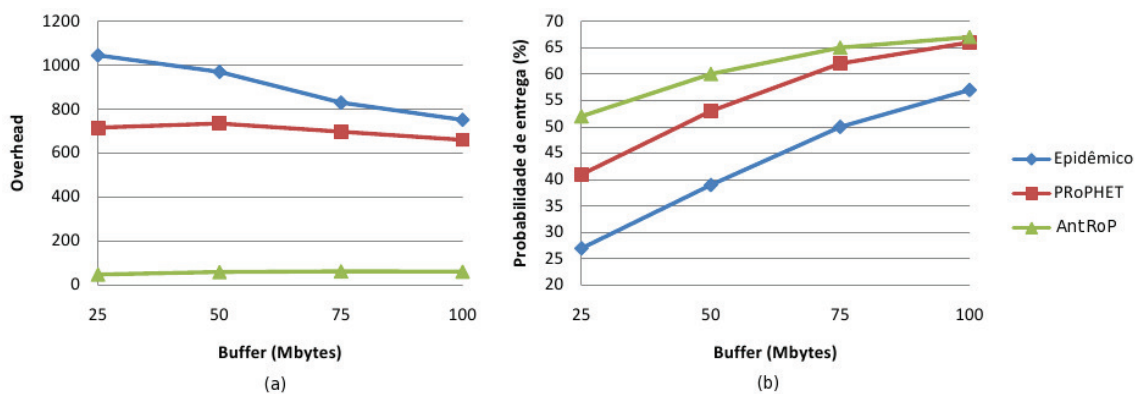


Figura 5. Tamanho do buffer: (a) *Overhead* de transmissão (b) Taxa de entrega.

O protocolo Epidêmico reduziu o *Overhead* de transmissão com um buffer maior, porque pode transportar mais mensagens e trocá-las com seus vizinhos. Isso incrementou a sua taxa de entrega em cerca de 11,5%. O protocolo P<sub>Ro</sub>PHET manteve o mesmo *Overhead* de transmissão porque, ao contatar seus vizinhos, calcula a probabilidade de encontrar o destino e retira a mensagem trocada de seu buffer. Apesar disso, com o aumento do buffer, os nós conseguem ter uma lista de entrega de mensagens maior e por isso incrementa sua taxa de entrega. O protocolo AntRoP manteve o *Overhead* de transmissão pelo mesmo motivo do P<sub>Ro</sub>PHET, mas sua taxa de entrega foi a melhor, cerca de 1% acima do P<sub>Ro</sub>PHET e 19% melhor do que o protocolo Epidêmico.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este artigo analisou protocolos de roteamento empregados em redes de emergência. Foi proposto a utilização de um algoritmo de roteamento bio-inspirado em colônia de formigas, chamado AntRoP. O protocolo AntRoP mostrou-se tolerante a falhas e desconexões de nós e de enlaces por utilizar uma marcação de caminhos baseada em feromônio. Foram avaliadas as métricas *Overhead* de transmissão, Taxa de Entrega, Latência e Número de Saltos, considerando-se a variação do alcance de transmissão, a escalabilidade da rede e o tamanho do buffer dos nós. O protocolo AntRoP apresentou um *Overhead* de transmissão até 10 vezes menor ao obtido por protocolos de referência da literatura, enquanto ao mesmo tempo apresentou latência próxima da latência ótima. Isso mostra que a utilização de rastros de feromônio obtém uma otimização das rotas, entregando mais mensagens e com uma latência reduzida. Nas próximas etapas desse trabalho pretende-se avaliar outros protocolos de roteamento empregados em redes DTN, considerar cenários maiores, analisar o consumo de energia, utilizar outros modelos de movimento e de tráfego, além de investigar como melhorar a latência do protocolo AntRoP.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências FAPEMIG e CNPq.

## Referências

- Boukerche, A. (2008). *Algorithms and protocols for wireless and mobile ad hoc networks*. Wiley - IEEE Press.
- Careem, M., de Silva, C., Silva, R. D., Raschid, L., and Weerawarana, S. (2007). Demonstration of sahana: free and open source disaster management. In *DG.O*, pages 266–267.
- Caro, G. D., Ducatelle, F., and Gambardella, L. M. (2004). Anthocnet: an ant-based hybrid routing algorithm for mobile ad hoc networks. In *In Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature (PPSN) VIII*, pages 461–470. Springer-Verlag.
- de Oliveira, C. T. (2008). Uma proposta de roteamento probabilístico para redes tolerantes a atrasos e desconexões. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE.
- Dorigo, M., Birattari, M., and Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization – artificial ants as a computational intelligence technique. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1:28–39.



- Gunes, M., Sorges, U., and Bouazizi, I. (2002). ARA - The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs.
- Gupta, I., Birman, K. P., and van Renesse, R. (2002). Fighting fire with fire: using randomized gossip to combat stochastic scalability limits. *Quality and Reliability Engineering International*, 18(3):165–184.
- Hinton, D., Klein, T. E., and Haner, M. (2005). An architectural proposal for future wireless emergency response networks with broadband services. *Bell Labs Technical Journal*, 10(2):121–138.
- Jacinto, B., Vilaça, L., Kelner, J., Sadok, D., and Souto, E. (2010). 3d routing: a protocol for emergency scenarios. In *Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC '10*, pages 519–523, New York, NY, USA. ACM.
- Jain, S., Fall, K., and Patra, R. (2004). Routing in a delay tolerant network. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 34:145–158.
- Kanchanasut, K., Wongsardsakul, T., Chansutthirangkool, M., Laouiti, A., Tazaki, H., and Arefin, K. R. (2008). Dumbo ii: a v-2-i emergency network. In *Proceedings of the 4th Asian Conference on Internet Engineering, AINTEC '08*, pages 37–38, New York, NY, USA. ACM.
- 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, Simutools '09*, pages 55:1–55:10, ICST, Brussels, Belgium, Belgium. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- Lindgren, A., Doria, A., and Schelén, O. (2003). Poster: Probabilistic routing in intermittently connected networks. In *SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*, page 2003.
- Schmitt, T., , R.Rao, R., and Eisenberg, J. (2007). *Improving Disaster Management: The Role of IT in Mitigation, Preparedness, Response, and Recovery*. National Academy Press, Washington, DC, USA.
- Spyropoulos, T. (2007). Spray and focus: Efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility. In *In Proceedings of IEEE PerCom Workshop on Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks*.
- Stutzle, T., Utzle, T. S., and Dorigo, M. (1999). Aco algorithms for the traveling salesman problem.
- Vahdat, A. and Becker, D. (2000). Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. Technical report, Duke University.
- Vivid Solutions (2009). OpenJump - The free, Java based and open source Geographic Information System for the World. <http://www.openjump.org>, Data de acesso 01/04/2011.
- Zhang, Z. (2006). Routing in Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks and Delay Tolerant Networks: Overview and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 8(1):24–37.