

Avaliação do Protocolo PSONET em Redes Oportunistas com Modelo de Mobilidade Aleatória

Alex Rosch de Faria*, Ana Cristina B. Kochem Vendramin[§], Anelise Munaretto*[§] e Myriam Regattieri Delgado*[§]

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)

[§]Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PPGCA)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba-PR, Brasil

alex@alexfaria.eti.br, {criskochem, anelise, myriamdelg}@utfpr.edu.br

Resumo—Em Redes Oportunistas (OPNETs - *Opportunistic Networks*), um caminho fim a fim entre dois nós pode não existir devido ao padrão de mobilidade dos nós e as condições variáveis dos meios de comunicação sem fio, como a escassez de recursos. As OPNETs usufruem da capacidade de um nó se comunicar localmente com os seus vizinhos para encaminhar à estes as mensagens armazenadas em seu *buffer* de modo que estas mensagens alcancem eventualmente os nós destinos que estão fora do seu alcance. Entretanto, armazenar mensagens de outros nós pode ser um problema devido ao *buffer* limitado dos nós da rede. Tais premissas requerem o uso de um protocolo de roteamento que assegure a robustez na comunicação entre os nós e limite o número de mensagens replicadas na rede. O presente artigo apresenta em detalhes o protocolo de roteamento PSONET que emprega a meta-heurística de Otimização por Enxame de Partículas em OPNETs. O desempenho do PSONET é comparado com o desempenho de dois protocolos de roteamento comumente conhecidos na literatura, o Epidêmico e o PROPHET. Os resultados mostram que o PSONET obtém ganhos em termos da taxa de entrega de mensagens e relação de redundância de mensagens se comparado com os protocolos Epidêmico e PROPHET.

Keywords—Redes Ad Hoc Oportunistas, Otimização por Enxame de Partículas, Protocolo de Roteamento.

I. INTRODUÇÃO

As redes de comunicação modernas estão em constante evolução. O aumento do número de dispositivos móveis alterou a forma de utilização das mesmas. Algoritmos centralizados não são escaláveis, algoritmos estáticos têm dificuldades de manterem-se atualizados com as mudanças de rede. Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de protocolos para lidar de forma eficiente com o novo tipo de tráfego e topologia de rede [1].

Uma Rede Oportunista (OPNET-*Opportunistic Network*) é um tipo de rede tolerante a atrasos (do inglês *Delay Tolerant Network* - DTN) na qual a mobilidade e a conectividade dos nós são utilizadas para determinar as oportunidades de comunicação. Este tipo de rede tem como principal objetivo suportar a mobilidade de usuários entre um grupo de redes heterogêneas. Para isso, as OPNETs precisam lidar com uma série de dificuldades como conectividade intermitente, mudança constante de topologia devido à alta mobilidade dos nós e atrasos longos [2], [3]. Um desafio para este ambiente é realizar o roteamento de mensagens, uma vez que a topologia da rede muda frequentemente. Os protocolos de roteamento para OPNETs podem ser classificados como: baseados no

encaminhamento de mensagens (*Forwarding-based*), baseados em contexto (*Context-Based Forwarding*) e baseados em inundação (*Flooding-based*) [2].

Protocolos baseados em encaminhamento de mensagens direcionam a mensagem somente para um único nó a cada etapa do roteamento. Esta abordagem reduz a utilização do *buffer* dos nós e o número de mensagens transferidas na rede, porém podem ocorrer longos atrasos e uma baixa taxa de entrega de mensagens. *Minimum Estimated Expected Delay* (MEED) [4] é um exemplo de protocolo de roteamento que se enquadra neste grupo. Nos protocolos baseados em contexto, as decisões de roteamento são baseadas em informações obtidas da rede. O protocolo PROPHET [5] é o protocolo mais conhecido desta categoria, pois ele se baseia no histórico de encontros dos nós para estimar a probabilidade de entrega das mensagens. Por fim, protocolos baseados em inundação geram múltiplas cópias de uma mesma mensagem e as distribuem na rede na tentativa de se obter alta taxa de entrega de mensagens. Essa abordagem proporciona uma maior probabilidade de entrega das mensagens, entretanto, implica em um alto custo em relação à quantidade de mensagens que são transmitidas na rede e à capacidade de armazenamento dos nós. O protocolo de roteamento Epidêmico [6] utiliza esta abordagem.

Protocolos inspirados na natureza têm surgido nos últimos tempos. Uma atenção especial é dada aos protocolos baseados em inteligência coletiva ou inteligência de enxames [7]–[9]. Este termo é utilizado para definir um conjunto de agentes que cooperam entre si e operam com um determinado padrão de comportamento para atingir uma meta pré-determinada [10]. Com base na cooperação entre seus agentes, esse paradigma evolutivo oferece um novo conceito na busca de uma ou mais soluções para problemas complexos onde não existe um controle centralizado. Protocolos que utilizam inteligência coletiva são capazes de encontrar soluções de modo paralelo e iterativo devido ao método ser baseado em uma população de indivíduos [11].

Um exemplo de técnica baseada em inteligência de enxames é a Otimização por Enxame de Partículas (PSO do inglês *Particle Swarm Optimization*). O PSO é uma técnica de otimização estocástica, baseada em uma população de indivíduos, na qual simula-se o processo comportamental de interação entre esses indivíduos, chamados de partículas. Inspirado no comportamento social encontrado em bando de pássaros, o PSO foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart [12].

A proposta original do PSONET (*PSO for Opportunistic Networks*), apresentada em [13], revela bons resultados em um

cenário formado por um grupo de pessoas que se movimentam utilizando o padrão de movimentação baseado em Pontos de Interesse (PIs). O cenário é composto por grupos de pessoas em suas comunidades que eventualmente entrarão em contato com outras pessoas em pontos em comum para realizar a troca de informações. No entanto, identifica-se a necessidade de avaliar o desempenho do PSONET em outros cenários de simulação.

Portanto, a proposta apresentada nesse trabalho avalia o desempenho do PSONET em um cenário com padrão de mobilidade aleatória (RWP - *RandomWaypoint*) [14]. São utilizados os mesmos parâmetros de configuração do protocolo utilizado em [13] para o encaminhamento de mensagens em OPNETs sujeitas a constantes mudanças de topologia devido à mobilidade de seus usuários e/ou recursos limitados. Os resultados mostram que o PSONET obtém ganhos em termos da taxa de entrega de mensagens e relação de redundância de mensagens se comparado com os protocolos Epidêmico e PROPHET.

II. PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PSONET

O protocolo PSONET utiliza a técnica de otimização por enxame de partículas para direcionar o tráfego da rede através de um subconjunto de bons encaminhadores de mensagens. O funcionamento do PSONET está dividido em 3 fases descritas nas próximas seções: (i) Descoberta da Topologia de Rede; (ii) Definição do Modo de Operação; (iii) Encaminhamento de Mensagens, conforme descrito no Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Pseudocódigo do PSONET.

```

1 Fase 1: Descoberta da Topologia de Rede;
2 Registra as conexões no Histórico de Contatos;
3 Troca Histórico de Contatos com os vizinhos;
4 Fase 2: Definição do Modo de Operação;
5 se  $Nr.conexões \geq limiarConexõesPSO$  então
6 |  $modoOperacao = \text{"denso"}$ 
7 senão
8 |  $modoOperacao = \text{"esparso"}$ 
9 fim
10 Fase 3: Encaminhamento de Mensagens;
11 se  $modoOperacao == \text{"esparso"}$  então
12 | Replica a mensagem para todos os nós;
13 senão
14 | Encaminha a mensagem para um subconjunto de
    | nós via PSO;
15 fim

```

A. Descoberta da Topologia da Rede

No PSONET, o nó adquire as informações sobre a sua vizinhança através da troca do registro de encontros (*Histórico de Contatos*) de cada nó. Essa troca ocorre no encontro entre cada par de nós. No *Histórico de Contatos* são armazenadas informações referentes às conexões realizadas por cada nó: (i) identificação da conexão; (ii) identificação do nó encontrado; (iii) tempo de início da conexão; e (iv) tempo final da conexão. O número de registros armazenados no *Histórico de Contatos* é limitado, quando o limite é atingindo e um novo registro precisa ser armazenado, o registro mais antigo será descartado.

De acordo com as informações recebidas, cada nó cria uma tabela contendo as métricas de avaliação do custo de entrega da mensagem do nó atual para cada nó já conhecido. Conforme apresentado na Tabela I, as métricas de avaliação são: (i) idade do contato ($t_e(i, j)$); (ii) frequência de contatos ($f(i, j)$); e (iii) duração do contato ($d(i, j)$).

Tabela I. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

Conexão	Métricas		
	t_e	f	d
$Con_1(i, j)$	$t_{e1}(i, j)$	$f_1(i, j)$	$d_1(i, j)$
$Con_2(i, j)$	$t_{e2}(i, j)$	$f_2(i, j)$	$d_2(i, j)$
...
$Con_n(i, j)$	$t_{en}(i, j)$	$f_n(i, j)$	$d_n(i, j)$

A métrica $t_e(i, j)$ entre dois nós i e j representa o tempo decorrido desde o último encontro entre i e j . Esta métrica possibilita que o protocolo possa dar preferência para conexões mais recentes. O número de encontros ocorridos entre os nós i e j é definido em $f(i, j)$, permitindo-se assim identificar as oportunidades de conexões. Por fim, $d(i, j)$ representa o tempo total das conexões entre i e j . Estas métricas são agregadas conforme apresentado em (2) para a geração do valor de *fitness*.

B. Definição do Modo de Operação

O PSONET obtém informações sobre a conectividade dos nós com a finalidade de se adaptar às condições de comunicação da rede. Portanto, o número de nós vizinhos no alcance de cada nó da rede será utilizado como parâmetro de definição do modo de operação do PSONET.

Nos casos em que a rede esteja esparsa, torna-se necessário estabelecer mecanismos que garantam a replicação das mensagens para todos (ou quase todos) os nós, mesmo que esse procedimento resulte em uma sobrecarga de mensagens na rede. Já nos casos de alta densidade de nós, o protocolo verifica a probabilidade de contato entre o nó vizinho e o destino pretendido com base no *Histórico de Contatos*, para então selecionar o(s) melhor(es) encaminhador(es) para cada mensagem. Esse último modo de operação do PSONET resulta em uma maior economia de recursos da rede.

A execução do PSONET é iniciada quando um nó A encontra seus nós vizinhos. Nesse momento, é analisado o número de nós na área de alcance do nó A para definir o modo de operação do protocolo: esparso ou denso.

No modo de operação esparso, cada nó transmite as suas mensagens para todos os nós alcançáveis atuando como o protocolo Epidêmico. A cada novo contato entre os nós, ocorre uma troca de vetores com o resumo das mensagens contidas em cada *buffer*. Ao receber este vetor, cada nó solicita ao outro nó as mensagens que ainda não possui em seu *buffer*.

No modo de operação denso, cada nó transmite suas mensagens para o nó com maior probabilidade de contato com o nó destino da mensagem. Nesse modo são executadas ações com um nível maior de complexidade, envolvendo o uso do PSO, para a escolha do(s) nó(s) encaminhador(es) da mensagem. Utilizam-se informações sobre os encontros já realizados pelos nós de modo a determinar os nós que possuem a maior probabilidade de encontro com o nó destino da mensagem. Esse processo visa reduzir a replicação de mensagens na rede.

C. Encaminhamento de Mensagens via Enxame de Partículas

Para a solução do problema de encaminhamento de mensagens foi necessário realizar algumas alterações no algoritmo tradicional do PSO. Estas alterações foram feitas com a finalidade de codificar uma partícula para a resolução de um problema de otimização combinatória, no qual cada solução, ou partícula, identifica um caminho específica no contexto de um problema de roteamento em OPNETs, e é representada por um vetor em um espaço com dimensão diferente (isto é, caminhos são identificados por conjuntos de nós com cardinalidades diferentes).

A seguir são apresentados os passos adotados para otimização dos caminhos durante o modo denso do PSONET.

Na inicialização das partículas, quando o nó S deseja enviar uma mensagem para um destino D , ele gera os k melhores caminhos entre o nó S e o nó D para cada métrica de avaliação. A geração dos caminhos é realizada com base no algoritmo *KShortestPaths* [15] e no conhecimento adquirido através do *Histórico de Contatos* transformado em um grafo $G(V, A)$, onde: V representa um conjunto finito não vazio de vértices ou nós; A representa um conjunto de arestas ou enlaces conectando os nós em V . O algoritmo *KShortestPaths* determina os k melhores caminhos por ordem de peso crescente em cada aresta. O algoritmo é uma variante do algoritmo *Bellman Ford* [16], mas em vez de apenas armazenar o melhor caminho, ele armazena os k melhores caminhos em cada passo de execução. Em (1), apresenta-se um exemplo de enxame formado por três partículas C_p (caminhos), inicializadas pelo algoritmo *KShortestPaths*, onde $S_1, B_1, E_1, D_1, A_3, B_2$, e C_2 representam nós de uma rede.

$$Enxame = \begin{bmatrix} C_p [1] \\ C_p [2] \\ C_p [3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & B_1 & E_1 & D_1 \\ S_1 & A_3 & D_1 & D_1 \\ S_1 & B_2 & C_2 & D_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Após a geração das partículas iniciais, estas são avaliadas e posteriormente combinadas gerando novas soluções (caminhos) para o problema de roteamento em OPNETs. Calcula-se, então, o *fitness* de cada nova partícula de acordo com as métricas definidas na Tabela I (valores normalizados). Optou-se pela utilização de uma função de agregação de métricas de forma a simplificar o processo de otimização. Sendo assim, a análise multiobjetivo foi excluída do escopo do artigo e poderá ser tratada em pesquisas futuras. Para avaliação do *fitness* de cada nova partícula, somam-se os valores das arestas que compõem o caminho para cada métrica definida e o valor resultante da soma é dividido pelo número de saltos, conforme (2).

$$fitness = \frac{f(i, j) + d(i, j) + \frac{1}{t_e(i, j)}}{Nr_{saltos}} \quad (2)$$

Cada partícula armazena a sua melhor posição encontrada até o momento em P_{best}^n . Após avaliação de todas as partículas, define-se a melhor partícula encontrada pelo enxame (melhor valor de *fitness* encontrado) como o G_{best} . No exemplo mostrado em (1) a melhor partícula, avaliada conforme (2), é mostrada em (3).

$$G_{best} = [S_1 \ B_2 \ C_2 \ D_1] \quad (3)$$

A melhor partícula encontrada G_{best} será utilizada como uma partícula atratora no processo de atualização das demais partículas (movimentação das partículas).

No PSONET, a movimentação das partículas segue o método apresentado em [17]. Nesse método, calcula-se a diferença das posições entre a melhor solução encontrada por todas as partículas (G_{best}) e a melhor posição da partícula até o momento (P_{best}^n), conforme apresentado em (4). Isto é, verifica-se quais os nós que estão presentes no G_{best} que não fazem parte da melhor posição encontrada pela partícula P_{best}^n . Essa diferença de posições resultará na velocidade da partícula V_p .

$$\begin{aligned} V_p [1] &= G_{best} - P_{best}^1 \\ V_p [1] &= \{S_1 \ B_2 \ C_2 \ D_1\} - \{S_1 \ B_1 \ E_1 \ D_1\} \\ V_p [1] &= \{B_2 \ C_2\} \end{aligned} \quad (4)$$

Para cada partícula que será atualizada, gera-se um grafo temporário $G_{Temp}(V, A)$ contendo o caminho do nó até o destino da mensagem. Adicionam-se a este grafo os nós contidos na velocidade da partícula, respeitando as informações de vizinhança contidas no *Histórico de Contatos*. Com base nas informações contidas no grafo temporário geram-se novas partículas na tentativa de se encontrar melhores soluções.

Movimenta-se cada partícula gerando um novo caminho, conforme (5).

$$\begin{aligned} C_p [] &= C_p^{t-1} [] + V_p [] \\ C_p [n] &= \{S_1 \ B_1 \ E_1 \ D_1\} + \{B_2 \ C_2\} \\ C_p [n] &= \{S_1 \ B_2 \ C_2 \ E_1 \ D_1\} \end{aligned} \quad (5)$$

Avalia-se cada nova partícula e caso seja um caminho válido e seu valor de *fitness* seja melhor do que o *fitness* do G_{best} , atualiza-se o G_{best} (o mesmo procedimento é aplicado para o P_{best}). Repete-se o processo de movimentação das partículas (atualização dos caminhos) até que o critério de parada seja atingido. As melhores soluções apresentadas representam os possíveis nós encaminhadores de mensagem, isto é, os nós que foram melhores avaliados em todas as métricas utilizadas.

De acordo com as soluções apresentadas pelo PSO, avalia-se a quantidade de vezes em que os nós que estão no alcance do nó portador da mensagem fizeram parte do(s) melhor(es) caminho(s) retornado(s) pelo PSO. Encaminha-se a mensagem para o nó que obtiver o maior número de ocorrências.

D. Trabalhos Relacionados

Como exemplos de protocolos de roteamento que utilizam inteligência coletiva pode-se citar [7]–[9], [17]–[19]. Em [7] e [18] os autores utilizam a Otimização por Colônia de Formigas (ACO do inglês *Ant Colony Optimization*) para roteamento em redes móveis *ad hoc* com conectividade limitada. Em [8] emprega-se o ACO para a obtenção de informações sobre a dinâmica de uma DTN e para o auxílio no roteamento,

escalonamento e gerenciamento de *buffer*. Em [19], os autores utilizam ACO e Algoritmos Culturais para prover qualidade de serviço no roteamento de uma topologia fixa de nós. Em [9] propõe-se o uso de ACO e Algoritmos Culturais para prover roteamento, escalonamento e gerenciamento de *buffer* em DTNs.

Por fim, em [17] é proposto o uso do PSO em uma rede estática com topologia pequena de nós, onde as partículas são inicializadas de forma aleatória. A codificação e a movimentação das partículas utilizadas no PSONET foi inspirada nessa proposta.

III. EXPERIMENTOS

O ambiente de simulação escolhido para a avaliação de desempenho do protocolo proposto foi o simulador para ambientes de redes oportunistas The ONE (do inglês *The Opportunistic Network Environment*) na versão 1.5. O The ONE é um simulador projetado para avaliar protocolos de roteamento para DTNs e permite que os usuários criem cenários com base em diferentes padrões de mobilidade [20]. Foram variados o tamanho do *buffer* dos nós e o TTL (*Time to Live*) das mensagens.

O cenário utilizado consiste em uma área 4500x73400m dividida em duas comunidades, que simula grupos de pessoas em movimento, utilizando o padrão de mobilidade chamado *RandomWaypoint*. Neste cenário, nos pontos de parada, o nó (pessoa) escolhe um destino aleatoriamente, e, com base nas restrições do mapa, se move até este destino utilizando o menor caminho encontrado, através do algoritmo de Dijkstra.

O cenário é composto por três grupos de nós: 02 grupos de pessoas cada um com 1600 nós aleatoriamente inseridos e 1 grupo com 2 bondes para a simulação do transporte público. Nós selecionam um destino e uma velocidade entre 0,5-1,5 m/s, se move até lá, esperam por um período de tempo de 100-200 segundos e, em seguida, selecionam o próximo destino. Os bondes utilizam caminhos pré-determinados dentro da área do mapa (*MapRouteMovement*) utilizando uma velocidade entre 7-10 m/s. Ao chegar ao seu destino, os bondes esperam por um período de tempo de 10-30 segundos e, em seguida, encontram o caminho para o próximo ponto de parada.

Mensagens são configuradas com TTL de 600 minutos e tem tamanho igual a 500 kB. A cada 5-10 segundos uma nova mensagem é gerada. Todos os nós estão habilitados a gerar e receber mensagens. O alcance da comunicação é de 10 metros e a velocidade de transmissão é de 250 kbps. A simulação tem duração de 432.000 segundos, correspondendo a um período de 05 dias.

A. Protocolos de Comparação

Neste trabalho duas categorias de protocolos para OPNETs são considerados na comparação de desempenho com o PSONET: o protocolo Epidêmico baseado na inundação de mensagens e o PROPHET baseado em contexto. Estes protocolos foram escolhidos porque podem operar em vários ambientes com diferentes modelos de mobilidade dos nós e estão disponíveis no simulador The ONE utilizado para a obtenção dos resultados mostrados na Seção IV.

Com base em informações locais e globais o protocolo PSONET é capaz de analisar a utilidade de cada contato como encaminhador de mensagens e limitar o número de mensagens replicadas na rede. Nos experimentos realizados, foram variados o tamanho do *buffer* dos nós e o TTL das mensagens.

B. Configuração do protocolo PSONET

Os principais parâmetros do PSONET são: número de registros do histórico (*nrRegistroHistorico*), número de conexões para ativar o PSO (*limiarConexõesPSO*), número de caminhos fixos (*nrCaminhosFixos*) e número de iterações (*nrIteracao*).

O parâmetro *nrRegistroHistorico* diz respeito a quantidade de registros que podem ser armazenados na tabela de histórico de contatos dos nós durante a fase de descoberta da topologia da rede. Simulações realizadas demonstraram que o aumento do número de registros ocasiona em *overhead* na geração dos k melhores caminhos. Assim, o parâmetro *nrRegistroHistorico* foi configurado inicialmente para 100 registros.

A solução via enxame de partículas é aplicada somente no modo de operação denso. A aplicação desta solução no módulo esparso pode causar uma sobrecarga indesejável e desnecessária, pois trata-se de um ambiente com poucas opções de encaminhamento. Assim, para evitar este tipo de problema foi inserido o parâmetro *limiarConexõesPSO*. Este parâmetro é responsável por definir o modo de operação do protocolo com a finalidade de controlar a sobrecarga na rede. Desta forma, o parâmetro *limiarConexõesPSO* foi configurado inicialmente para 4. Simulações realizadas demonstraram que o aumento deste valor faz com que o PSONET tenha um comportamento similar ao protocolo Epidêmico.

O parâmetro *nrCaminhosFixos* define o número de partículas utilizadas na inicialização do PSO, ou seja, o número de soluções geradas para cada métrica utilizada. O parâmetro foi definido inicialmente em 5.

Por fim, definiu-se como critério de parada do PSO o número de iterações *nrIteracao*. O parâmetro foi definido inicialmente em 5. Verificou-se que o aumento dos valores dos parâmetros *nrCaminhosFixos* e *nrIteracao* ocasiona em um tempo maior na otimização dos melhores caminhos, ocasionando assim a perda de oportunidades de envio da mensagem.

IV. RESULTADOS

Os resultados apresentados mostram valores médios de 30 execuções e intervalos de confiança em um nível de 95%. A Fig. 1 apresenta a taxa de entrega das mensagens em relação à variação do tamanho de *buffer* calculada de acordo com (6) para os três protocolos.

$$Entrega = \frac{M_{entregues}}{M_{criadas}} * 100, \quad (6)$$

onde $M_{entregues}$ representa o número de mensagens entregues ao seu destino final e $M_{criadas}$ o número de mensagens criadas durante a simulação.

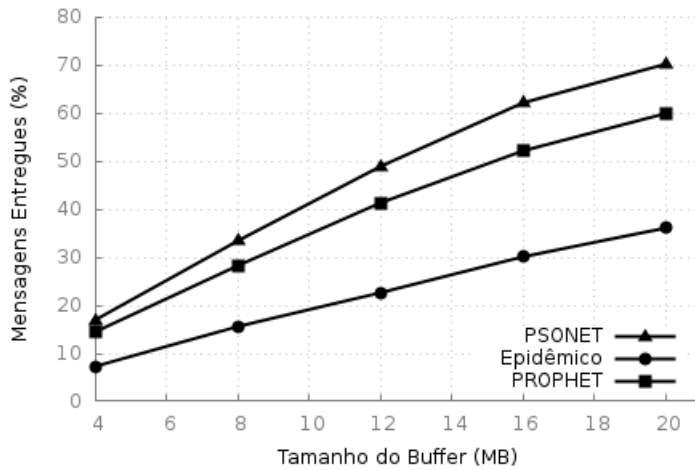


Figura 1. Taxa de Entrega de Mensagens Variando o Tamanho do Buffer.

Conforme o tamanho do *buffer* é incrementado, aumenta-se também o número de mensagens entregues com sucesso para os três protocolos. Isso porque quanto maior o tamanho do *buffer*, mais mensagens são armazenadas, reduzindo assim o risco de descarte de mensagens. O PSONET provê os melhores resultados devido à utilização do seu conhecimento da rede obtido através do *Histórico de Contatos*. Através do *Histórico de Contatos* foi possível a geração dos k melhores caminhos entre um nó e o destino da mensagem, que por sua vez são otimizados através do PSO. A otimização dos caminhos iniciais via PSO é possível uma vez que a meta-heurística considera as três métricas simultaneamente, ao contrário do método utilizado pelo algoritmo *KShortestPaths*.

Para todos os tamanhos de *buffer*, o PSONET obteve um desempenho superior ao dos outros protocolos. Por exemplo, em um *buffer* de 20MB, o PSONET entrega praticamente $70\% \pm 0,45\%$ das mensagens contra $60\% \pm 0,43\%$ do PROPHET e $36\% \pm 0,47\%$ do Epidêmico.

A Fig. 2 apresenta a relação de redundância de mensagens calculada de acordo com (7) para os três protocolos,

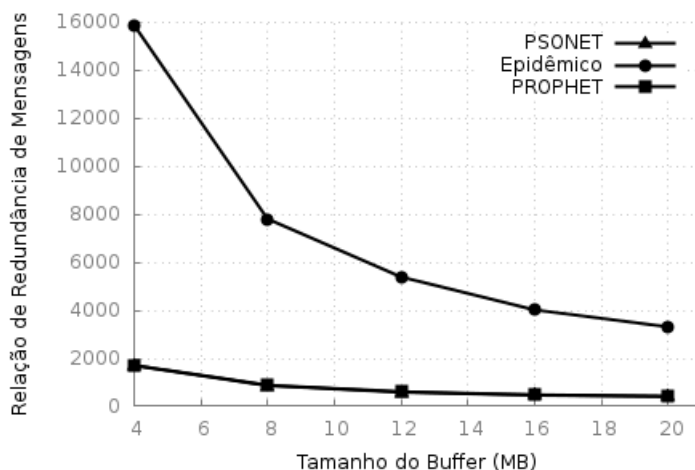


Figura 2. Relação de Redundância de Mensagens Variando o Tamanho do Buffer.

$$Redundância = \frac{M_{replicadas} - M_{entregues}}{M_{entregues}} \quad (7)$$

onde $M_{replicadas}$ representa o número de mensagens replicadas e $M_{entregues}$ o número de mensagens entregues.

O PSONET gerou uma relação menor de redundância de mensagens comparado com os protocolos PROPHET e Epidêmico. Por exemplo, em um *buffer* de 20MB, o PSONET gerou uma relação de redundância de $411,13 \pm 1,28\%$ mensagens contra $418,2170 \pm 0,07\%$ do PROPHET e $3309,59 \pm 12,76\%$ do Epidêmico. A maior similaridade com os resultados do PROPHET pode ser explicada pelo fato de que tanto o PROPHET quanto o PSONET buscam selecionar o(s) melhor(es) contato(s) antes de encaminhar as mensagens. De forma diferente, o protocolo Epidêmico encaminha ou replica para todos os nós encontrados.

As Fig. 3 e 4 mostram, respectivamente, a taxa de entrega de mensagens e a relação de redundância de mensagens em relação à variação do TTL das mensagens, com um tamanho de *buffer* de 4 MB.

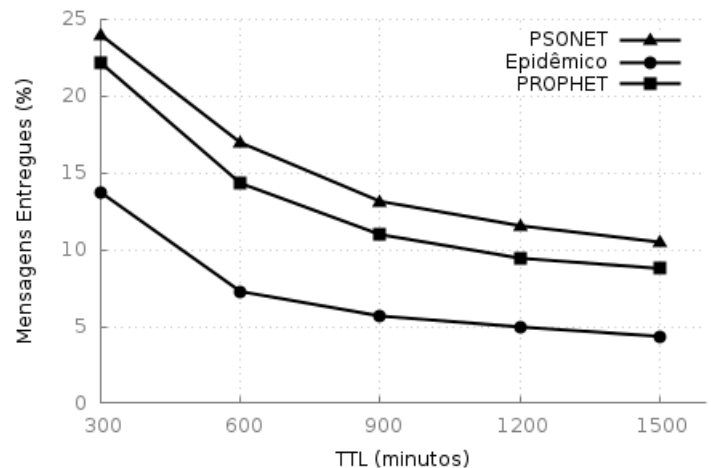


Figura 3. Taxa de Entrega de Mensagens Variando o TTL das Mensagens.

Para todos os protocolos avaliados, quanto maior o TTL, menor a taxa de entrega das mensagens. Isso pode ser explicado pelo fato de que quando o TTL das mensagens cresce, essas mensagens permanecem por mais tempo no *buffer* dos nós, impedindo que outras mensagens que ainda não foram entregues cheguem em seus destinos. O PSONET obteve um desempenho superior ao dos outros protocolos. Por exemplo, com um TTL de 300 (minutos), o PSONET entrega praticamente $24\% \pm 0,28\%$ das mensagens contra $22\% \pm 0,12\%$ do PROPHET e $14\% \pm 0,36\%$ do Epidêmico.

O PSONET gerou uma relação menor de redundância de mensagens. Por exemplo, com um TTL de 600 minutos, o PSONET gerou uma relação de redundância de $1.695,88 \pm 0,13\%$ mensagens contra $1.719,60 \pm 0,15\%$ do PROPHET e $15.888,54 \pm 39,05\%$ do Epidêmico. Isso pode ser explicado pelo fato do PSONET utilizar um conjunto de métricas que permitem identificar de forma automática se a rede está mais densa ou esparsa e, então, selecionar melhor o(s) encaminhador(es) de mensagens.

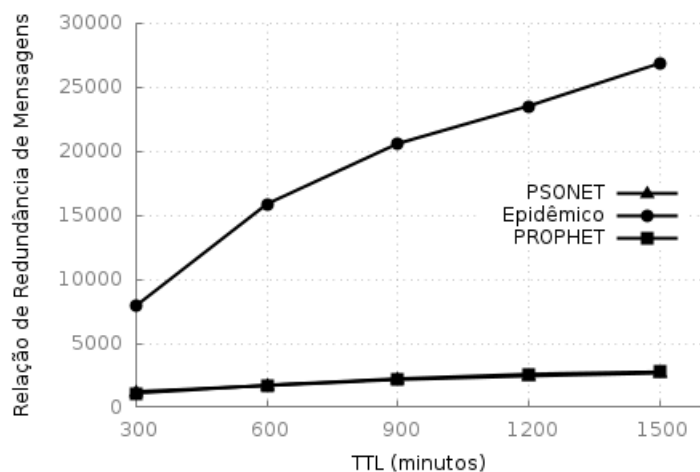


Figura 4. Relação de Redundância de Mensagens Variando o TTL das Mensagens.

V. CONCLUSÕES

O presente artigo avaliou o desempenho do protocolo de roteamento PSONET em redes oportunistas com modelo de mobilidade aleatória. As simulações mostraram que o PSONET é capaz de alcançar uma taxa de entrega de mensagens superior e uma menor relação de redundância de mensagens se comparado aos protocolos Epidêmico e PROPHET. Isso se deve ao fato do PSONET analisar as condições de comunicação da rede, detectando se cada nó possui conexões esparsas ou densas e, portanto, tomar decisões melhores quanto ao encaminhamento de mensagens. Como trabalhos futuros, pretende-se analisar o desempenho do PSONET em relação ao aumento do número de partículas (caminhos) na inicialização do algoritmo e tratar o problema de roteamento em OPNETs como um problema de otimização multiobjetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela estrutura, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao CNPq pelas concessões de bolsas de estudo e pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Kassabalidis, M. El-Sharkawi, I. Marks, R.J., P. Arabshahi, and A. Gray, "Swarm intelligence for routing in communication networks," in *Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. IEEE*, vol. 6, 2001, pp. 3613–3617 vol.6.
- [2] L. Pelusi, A. Passarella, and M. Conti, "Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 44, no. 11, pp. 134–141, November 2006.
- [3] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," in *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, ser. SIGCOMM '03. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 27–34.
- [4] E. Jones, L. Li, J. Schmidtke, and P. Ward, "Practical routing in delay-tolerant networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 8, pp. 943–959, Aug 2007.
- [5] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén, "Probabilistic routing in intermittently connected networks," *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 7, no. 3, pp. 19–20, Jul. 2003.
- [6] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks," Tech. Rep., 2000.

- [7] L. Rosati, M. Berlioli, and G. Reali, "On ant routing algorithms in ad hoc networks with critical connectivity," *Ad Hoc Networks*, vol. 6, no. 6, pp. 827–859, 2008.
- [8] A. C. K. Vendramin, A. Munaretto, M. R. Delgado, and A. C. Viana, "Grant: Inferring best forwarders from complex networks' dynamics through a greedy ant colony optimization," *Comput. Netw.*, vol. 56, no. 3, pp. 997–1015, Feb. 2012.
- [9] A. C. B. K. Vendramin, A. Munaretto, M. Delgado, and A. C. Viana, "Cgrant: A swarm intelligence-based routing protocol for delay tolerant networks," in *Proceedings of the 2012 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Philadelphia, USA, 2012, pp. 33–40.
- [10] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc., 1999.
- [11] L. N. De Castro, *Fundamentals of natural computing: basic concepts, algorithms, and applications*, ser. Computer and Information Science Series. Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall/CRC, 2006.
- [12] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948 vol.4.
- [13] A. R. de Faria, A. C. B. K. Vendramin, A. Munaretto, and M. R. Delgado, "Utilização de enxame de partículas para roteamento em redes oportunistas," in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT)*, 2015.
- [14] D. Johnson and D. Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks," in *Mobile Computing*, ser. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, T. Imielinski and H. Korth, Eds. Springer US, 1996, vol. 353, pp. 153–181.
- [15] D. Eppstein, "Finding the k shortest paths," in *Foundations of Computer Science, 1994 Proceedings., 35th Annual Symposium on*, Nov 1994, pp. 154–165.
- [16] R. Bellman, "On a routing problem," *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 16, pp. 87–90, 1958.
- [17] A. Toofani, "Article: Solving routing problem using particle swarm optimization," *International Journal of Computer Applications*, vol. 52, no. 18, pp. 16–18, August 2012, published by Foundation of Computer Science, New York, USA.
- [18] R. J. La and P. Ranjan, "Ant-based adaptive message forwarding scheme for challenged networks with sparse connectivity," in *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Military Communications*. Boston, Massachusetts, USA: IEEE, 2009, pp. 1–7.
- [19] M.-W. Zhang, X.-M. Sun, and X.-Y. Lv, "A QoS routing algorithm based on culture-ant colony algorithm," in *Proceedings of the International Conference on Computer Application and System Modeling*. Taiyuan, China: IEEE, 2010, pp. V12–198–V12–201.
- [20] A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, "The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation," in *SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*. New York, NY, USA: ICST, 2009.