

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

ALEX ROSCH DE FARIA

**PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES OPORTUNISTAS
UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2015

ALEX ROSCH DE FARIA

**PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES OPORTUNISTAS
UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia da Computação.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Anelise Munaretto
Fonseca

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Myriam Regattieri
Delgado

CURITIBA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

F224p
2015

Faria, Alex Rosch de

Protocolo de roteamento para redes oportunistas utilizando otimização por enxame de partículas / Alex Rosch de Faria.- 2015.

72 f. : il. ; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2015.

Bibliografia: f. 60-64.

1. Protocolos de roteamento (Protocolos de redes de computadores). 2. Computação tolerante a falhas. 3. Otimização matemática. 4. Partículas (Física nuclear). 5. Inteligência artificial. 6. Sistemas de comunicação sem fio. 7. Métodos de simulação. 8. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Fonseca, Anelise Munaretto, orient. II. Delgado, Myriam Regattieri De Biase da Silva, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação Nº. 698

Protocolo de Roteamento para Redes Oportunistas Utilizando Otimização por Enxame de Partículas

por

Alex Rosch de Faria

Orientadora: Profa. Dra. Anelise Munaretto Fonseca

Coorientadora: Profa. Dra. Myriam Regattieri de Biase da Silva Delgado

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **Engenharia de Computação** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **14:0h** do dia **28 de setembro de 2015**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Profa. Dra. Anelise Munaretto Fonseca
(Presidente – UTFPR)

Profa. Dra. Carolina Paula de Almeida
(UNICENTRO)

Prof. Dr. Mauro Sérgio Pereira Fonseca
(UTFPR)

Profa. Dra. Ana Cristina Kochem Vendramin
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos a todos que, das mais variadas formas, contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

aos meus pais Sivaldo e Ivone, aos meus irmãos, Fernando, Geovana e Mariá, meus avós Ivo e Lurdes e os demais familiares pela motivação, carinho e apoio;

à Ellen Caroline Baettker, minha grande companheira por absolutamente tudo;

às professoras Anelise Munaretto Fonseca e Myriam Regattieri Delgado, pela paciência, dedicação e profissionalismo na orientação desta dissertação;

à professora Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin pelas inúmeras sugestões oferecidas para o aprimoramento desta dissertação;

a todos os professores do programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), pela convivência e os conhecimentos transmitidos;

aos amigos que fiz durante este processo de aprendizado na Universidade, e aos que permaneceram meus amigos e souberam compreender minha ausência e distância durante este processo.

RESUMO

FARIA, Alex Rosch. PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES OPORTUNISTAS UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS. 72 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Nesta dissertação, um novo protocolo de roteamento voltado para Redes Oportunistas é apresentado. O protocolo proposto chama-se PSONET (do inglês *PSO for Opportunistic Networks*), uma vez que este utiliza um algoritmo adaptativo baseado no algoritmo de otimização por enxame de partículas (do inglês *PSO - Particle Swarm Optimization*). A principal motivação para a utilização do PSO é tirar proveito da sua busca baseada em população de indivíduos e da adaptação da sua estrutura de aprendizado. O 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 PSONET analisa as condições de comunicação da rede, detectando se cada nó possui conexões esparsas ou densas e, portanto, toma melhores decisões quanto ao encaminhamento de mensagens. O protocolo PSONET é comparado com os protocolos Epidêmico e PROPHET em três modelos de mobilidades distintos: um modelo de mobilidade baseado em atividades, onde simula-se o dia a dia das pessoas em suas atividades de trabalho, lazer e descanso; um modelo de mobilidade baseado em comunidade de pessoas, onde simula-se um grupo de pessoas em suas comunidades, que eventualmente entrarão em contato com outras pessoas, que podem ou não fazer parte de sua comunidade, para realizar a troca de informações; e um modelo de mobilidade aleatória, onde simula-se um cenário dividido em comunidades, onde as pessoas escolhem um destino aleatoriamente, e, com base nas restrições do mapa, se movem até este destino utilizando o menor caminho encontrado. Os resultados, obtidos através do simulador The ONE, mostram que nos cenários com modelo de mobilidade baseado em comunidade de pessoas e no modelo de mobilidade aleatória, o protocolo PSONET alcança uma maior taxa de entrega de mensagens e uma menor replicação de mensagens, se comparado com os protocolos Epidêmico e PROPHET.

Palavras-chave: Redes Oportunistas, Redes Tolerantes a Atraso, Protocolo de Roteamento, Otimização por Exame de Partículas.

ABSTRACT

FARIA, Alex Rosch. ROUTING PROTOCOL FOR OPPORTUNISTIC NETWORKS USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION. 72 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

In this research work, a new routing protocol for Opportunistic Networks is presented. The proposed protocol is called PSONET (PSO for Opportunistic Networks) since the protocol use an adaptive algorithm based on Particle Swarm Optimization algorithm (PSO). The main motivation for using the PSO is to take advantage of its search based on individuals and their learning adaptation. The PSONET uses the Particle Swarm Optimization meta-heuristic to drive the network traffic through of a good subset of message forwarders. The PSONET gathers the information about the connectivity of network nodes and interprets the conditions of connections, adapting to the available resources. Therefore, the variation of the number of nodes within range of each node may be used as the parameter setting of the operation mode. The PSONET protocol is compared with the Epidemic and PROPHET protocols in three different scenarios of mobility: an activity-based movement model, which simulates the daily lives of people in their work, leisure and rest activities; a community-based movement model, which simulates a group of people in their communities, which eventually will contact other people who may or may not be part of your community, to exchange information; and a random movement pattern, which simulates a scenario divided into communities where people choose a destination random, and based on the restriction map, move to this destination using the shortest path. The simulation results, obtained through The ONE simulator, show that in scenarios where the movement model is based on a community of people and where the movement model is random, the PSONET protocol achieves a higher messages delivery rate and a lower message replication ratio when compared with the Epidemic and PROPHET protocols.

Keywords: Opportunistic Networks, Delay Tolerant Networks, Routing Protocols, Particle Swarm Optimization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Comunicação de dispositivos sem fio	16
FIGURA 2	– Mobilidade dos nós em OPNETs	19
FIGURA 3	– Taxonomia dos protocolos de roteamento em OPNETs	22
FIGURA 4	– Roteamento simples de um único salto	23
FIGURA 5	– Estrutura de funcionamento do simulador The ONE	46
FIGURA 6	– Tempo de Simulação vs <i>nrRegistroHistorico</i>	50
FIGURA 7	– Taxa de Entrega de mensagens - <i>Buffer</i>	52
FIGURA 8	– Relação de Redundância de Mensagens - <i>Buffer</i>	53
FIGURA 9	– Relação de Redundância de Mensagens (PSONET-PROPHET)- <i>Buffer</i> ...	54
FIGURA 10	– Taxa de Entrega de mensagens - TTL	55
FIGURA 11	– Relação de Redundância - TTL	56
FIGURA 12	– Relação de Redundância (PSONET-PROPHET) - TTL	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Histórico de contatos do PSONET	37
TABELA 2	–	Métricas de avaliação utilizadas pelo PSONET	37
TABELA 3	–	Parâmetros do protocolo PSONET	43
TABELA 4	–	Cenário POI: Probabilidades de seleção de destino	48
TABELA 5	–	Cenário WD: Parâmetros utilizados	49
TABELA 6	–	Cenário RWP: Parâmetros utilizados	49
TABELA 7	–	Parâmetros utilizados para os cenários RWP, PoI e WD	51
TABELA 8	–	Cenário POI: Resultados completos (<i>Buffer</i>)	67
TABELA 9	–	Cenário POI: Resultados completos (TTL)	68
TABELA 10	–	Cenário WD: Resultados completos (<i>Buffer</i>)	69
TABELA 11	–	Cenário WD: Resultados completos (TTL)	70
TABELA 12	–	Cenário RWP: Resultados completos (<i>Buffer</i>)	71
TABELA 13	–	Cenário RWP: Resultados completos (TTL)	72

LISTA DE SIGLAS

AC	Algoritmo Cultural
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
CAR	<i>Context-aware Adaptive Routing</i>
CGrAnt	<i>Cultural Greedy Ant</i>
DTN	<i>Delay Tolerant Network</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IPN	<i>InterPlanetary Network</i>
IRTF	Internet Research Task Force
MANETs	<i>Mobile Ad Hoc Networks</i>
MEED	<i>Minimum Estimated Expected Delay</i>
MoVe	<i>Motion Vector</i>
MV	<i>Meetings and Visits</i>
OPNET	<i>Opportunistic Network</i>
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
PDA's	<i>Personal digital assistant</i>
PoI	<i>Point of Interest</i>
PROPHET	<i>Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity</i>
PSN	<i>Pocket Switched Networks</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PSONET	<i>PSO for Opportunistic Networks</i>
RSSFs	Redes de Sensores Sem Fio
RWP	<i>Random Waypoint</i>
SCF	<i>Store-carry-forward</i>
SI	<i>Swarm intelligence</i>
SPMBM	<i>Shortest Path Map-Based</i>
The ONE	<i>The Opportunistic Network Environment</i>
TTL	<i>Time to Live</i>
VANETs	<i>Veicular Ad Hoc Networks</i>
WD	<i>Working Day</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.2	MOTIVAÇÃO	13
1.3	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4	CONTRIBUIÇÕES	15
1.5	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO	16
2.1	EVOLUÇÃO DAS REDES SEM FIO	16
2.2	REDES MÓVEIS	17
2.3	REDES TOLERANTES A ATRASOS E INTERRUPÇÕES	17
2.4	REDES SEM FIO OPORTUNISTAS	18
2.4.1	Conceitos Básicos	19
2.4.2	Aplicações das Redes Oportunistas	20
3	ROTEAMENTO EM REDES OPORTUNISTAS	21
3.1	PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO	21
3.2	ABORDAGEM DE ENCAMINHAMENTO DE MENSAGENS	22
3.2.1	Transmissão direta	22
3.2.2	Baseada em Contexto	23
3.2.2.1	Encaminhamento baseado em dados históricos	23
3.2.2.2	Encaminhamento baseado em localização	25
3.2.2.3	Encaminhamento baseado na mobilidade dos nós	25
3.3	BASEADAS EM REPLICAÇÃO DE MENSAGENS	26
3.3.1	Abordagem Epidêmica	26
3.4	BASEADO EM INFORMAÇÕES SOCIAIS	27
3.5	ABORDAGENS HÍBRIDAS	28
4	INTELIGÊNCIA DE COLETIVA	30
4.1	DEFINIÇÃO	30
4.2	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	31
4.3	INTELIGÊNCIA COLETIVA APLICADA EM ROTEAMENTO	33
5	PSONET	35
5.1	VISÃO GERAL DO PROTOCOLO	35
5.1.1	Descoberta da Topologia da Rede	36
5.1.2	Definição do Modo de Operação	37
5.2	ENCAMINHAMENTO DE MENSAGENS VIA ENXAME DE PARTÍCULAS	38
5.2.1	Análise dos contatos	41
5.2.2	Processo de otimização	41
5.3	CONFIGURAÇÃO DO PROTOCOLO PSONET	43
6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	45
6.1	MEDIDAS DE DESEMPENHO	45
6.2	THE ONE: AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	46
6.3	MODELOS DE MOBILIDADES	47

6.3.1 Cenário baseado em Comunidades	47
6.3.2 Cenário Baseado em Atividades	48
6.3.3 Cenário Aleatório	49
6.4 PARÂMETROS GERAIS DE SIMULAÇÃO	50
6.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO PSONET	52
6.5.1 Análise de desempenho para variação no tamanho do <i>buffer</i>	52
6.5.2 Análise de desempenho para variação do TTL das Mensagens	55
7 CONCLUSÕES	58
7.1 TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS	60
Apêndice A – RESULTADOS COMPLETOS	65
A.1 DESCRIÇÃO DAS MÉTRICAS DO RELATÓRIO DO THE ONE	65
A.2 CENÁRIO POI - <i>BUFFER</i>	67
A.3 CENÁRIO POI - TTL	68
A.4 CENÁRIO WD- <i>BUFFER</i>	69
A.5 CENÁRIO WD- TTL	70
A.6 CENÁRIO RWP- <i>BUFFER</i>	71
A.7 CENÁRIO RWP- TTL	72

1 INTRODUÇÃO

As pessoas estão cada vez mais utilizando dispositivos de comunicação sem fio, como telefones celulares, *tablets*, para as suas atividades diárias. Atualmente, a comunicação entre estes dispositivos depende de uma infraestrutura centralizada, como redes de telefonia móvel ou pontos de acessos *Wi-Fi*. Assim, nesses casos a comunicação é dependente da infraestrutura disponível.

Uma alternativa para a comunicação entre dispositivos é o modo *Ad-Hoc*, onde dois dispositivos podem trocar mensagens diretamente quando estão fisicamente próximos, dentro da área de cobertura, utilizando protocolos de comunicação sem fio, como *Bluetooth* (HAARTSEN et al., 1998) ou *Wi-Fi* (ALLIANCE, 2010), sem a necessidade de uma infraestrutura centralizada. Existe ainda a possibilidade dos dispositivos, atuando como nós da rede, cooperarem entre si carregando as mensagens uns dos outros formando uma rede oportunista descentralizada. As Redes Oportunistas (OPNET - *Opportunistic Network*) reforçam esta visão considerando as características das redes móveis como, por exemplo, mobilidade dos nós, a desconexão e a formação de áreas isoladas para explorar as oportunidades de conexão.

De acordo com Pelusi et al. (2006), uma OPNET tem como principal objetivo suportar a mobilidade de usuários entre um grupo de redes heterogêneas para solucionar desafios como conectividade intermitente, mudança constante de topologia e atrasos longos. Vários conceitos por trás das OPNETs são originados a partir de trabalhos de pesquisa sobre Redes Tolerantes a Atrasos (DTN - *Delay Tolerant Network*). Para operar nessas redes, a transferência de custódia de mensagens é fornecida por nós intermediários até que o destino destas seja alcançado. Até a ocorrência de uma oportunidade de contato, o nó poderá manter as mensagens de outros nós em seu *buffer* por um longo tempo (HUANG et al., 2008).

As OPNETs são compostas por redes de nós sem fio auto-organizáveis, formando assim um ambiente tolerante a falhas sem a limitação de conectividade fim a fim. A comunicação ocorre de forma local, ou seja, decisões de roteamento são feitas por dispositivos

com base em informações locais. O termo “oportunista” em relação às redes sem fio implica na tendência de seus dispositivos em explorar os recursos disponíveis, tirando proveito de informações globais acessíveis localmente. Assim, os dispositivos transmitem informações globais através de interações locais com outros dispositivos (PHANSE; NYKVIST, 2006), tais premissas caracterizam um ambiente favorável para a aplicação de paradigmas baseados em população de soluções, como a meta-heurística de otimização por Enxame de Partículas (do inglês PSO - *Particle Swarm Optimization*) (KENNEDY; EBERHART, 1995).

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com Dhurandher et al. (2013), as OPNETs estão emergindo como um importante meio de comunicação entre dispositivos heterogêneos devido à sua portabilidade e flexibilidade de operação/computação. Protocolos para redes *Ad-Hoc* e protocolos de roteamento para a internet realizam o encaminhamento da mensagem através da seleção do melhor caminho entre a origem e o destino, uma vez que o caminho entre o emissor e o destino esteja estabelecido. Portanto, estes protocolos não apresentam um bom desempenho em OPNETs, uma vez que as oportunidades de comunicação são intermitentes e um caminho fim-a-fim entre um nó origem e um nó destino pode não existir.

Estas redes 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.

Essas características de rede tornam o roteamento um dos grandes desafios em OPNETs, pois a probabilidade de entrega de cada mensagem depende de uma seleção apropriada de um ou mais nós candidato(s) a encaminhador(es) de mensagens.

1.2 MOTIVAÇÃO

Na medida em que as redes se tornam cada vez mais complexas surge a necessidade de auto-organização e auto-configuração, permitindo assim a adaptação às novas situações em termos de tráfego, serviços, e conectividade de rede. Segundo Kephart e Chess (2003), estes novos tipos de redes requerem algoritmos de roteamentos robustos, que trabalhem de uma forma distribuída observando as alterações na rede e se adaptando à elas. Algoritmos centralizados não

são escaláveis, por outro lado, algoritmos estáticos têm dificuldades de manter-se atualizados com as mudanças de rede. Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de novos protocolos para lidar de forma eficiente com os novos padrões de conectividade de rede.

Embora muitos trabalhos tenham sido desenvolvidos no âmbito de redes adaptativas, não foram encontrados trabalhos onde a utilização da técnica de otimização por enxame de partículas é aplicada em encaminhamento de mensagens em OPNETs. De acordo com Kulkarni e Venayagamoorthy (2011), a utilização do PSO é aplicada para tratamento de questões de redes de sensores sem fio, como implantação ideal, localização do nó, clusterização e agregação de dados .

Na presente dissertação, a técnica de otimização por exame de partículas é utilizada com a finalidade de direcionar o tráfego OPNET através de um subconjunto de bons encaminhadores de modo a melhorar a taxa de entrega de mensagens enquanto reduz o número de mensagens replicadas na rede.

1.3 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta dissertação é apresentar um novo protocolo de roteamento para OPNETs, onde a conectividade dos nós será utilizada para inferir os melhores encaminhadores de modo que a mensagem alcance o seu destino. O protocolo proposto é chamado PSONET (*PSO for Opportunistic Networks*), uma vez que este utiliza um algoritmo adaptativo baseado no algoritmo PSO.

Em particular, a presente dissertação propõem os seguintes objetivos específicos:

- Implementar a técnica de otimização PSO em um ambiente discreto com a finalidade de obter ganhos de desempenho considerando os diversos aspectos inerentes ao processo de roteamento;
- Investigar o desempenho de métricas associadas às redes oportunistas. Através do uso dessas métricas pretende-se analisar as informações, locais de cada contato, para obter ganho no processo de classificação dos nós;
- Realizar simulações para avaliar o desempenho do protocolo em diferentes modelos de mobilidade.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

Os resultados do trabalho foram disseminados através das seguintes publicações:

- Utilização de Enxame de Partículas para Roteamento em Redes Oportunistas. Artigo apresentado no SBRT 2015 - 33º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Juiz de Fora-MG;
- Avaliação do Protocolo PSONET em Redes Oportunistas com Modelo de Mobilidade Aleatória. Artigo apresentado no CBIC 2015 - 12º Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional, Curitiba - PR.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A presente dissertação está organizada em sete capítulos. Após esta introdução, o segundo capítulo descreve as principais características e desafios enfrentados em redes oportunistas, e as principais pesquisas relacionadas com a área. O terceiro capítulo apresenta em detalhe as características, funcionamento e aplicações dos principais protocolos de roteamento para redes oportunistas. O quarto capítulo apresenta uma breve introdução sobre inteligência coletiva e o algoritmo aplicado neste trabalho: Otimização por Enxame de Partículas (PSO). O quinto capítulo descreve o protocolo PSONET proposto nessa dissertação. O sexto capítulo apresenta o ambiente de simulação seguido pela avaliação de desempenho dos protocolos para OPNETs. Finalmente, conclusões e trabalhos futuros são apresentados no sétimo capítulo.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Neste capítulo, será apresentada uma revisão da literatura sobre OPNETs. A seguir serão apresentados a evolução das redes sem-fio, conceitos relacionados à redes móveis e DTNs. Conclui-se o capítulo com a apresentação dos tipos de aplicações que podem ser realizadas em OPNETs.

2.1 EVOLUÇÃO DAS REDES SEM FIO

Segundo Chakchouk (2015), os grandes avanços realizados nas tecnologias sem fio permitiram uma expansão da utilização de dispositivos sem fio como *smartphones*, *tablets*, e *laptops*. A grande maioria dos dispositivos, utilizam redes sem fio e requerem um determinado tipo de infraestrutura fixa. Por exemplo, dispositivos que fazem o uso de redes celulares requerem uma torre de celular fixa ou dispositivos que utilizem a rede *Wi-fi* (i.e.IEEE 802.11), no modo infraestrutura, requerem pontos de acessos fixos, conforme Figura 1a.

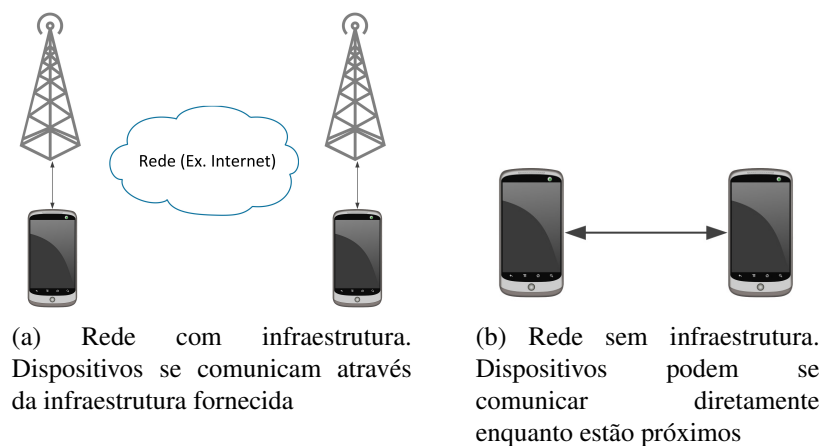


Figura 1: Dispositivos sem fio se comunicando com e sem infraestrutura.

Uma alternativa para a comunicação entre estes dispositivos em cenários onde não exista esta infraestrutura é a utilização da comunicação direta entre os dispositivos (*peer-to-peer*). Desta forma, os dispositivos podem trocar mensagens diretamente quando estão fisicamente próximos utilizando protocolos de comunicação sem fio, como *Bluetooth*

(HAARTSEN et al., 1998) ou *Wi-Fi Direct* (ALLIANCE, 2010), conforme apresentado na Figura 1b.

2.2 REDES MÓVEIS

As MANETs, são redes sem fio autoconfiguráveis, onde os dispositivos conectados são capazes de trocar informações e formar uma rede entre eles (PATEL et al., 2014). Esse tipo de rede não tem infraestrutura pré-definida, pois é formada por nós móveis que podem funcionar tanto como roteadores ou como origem/destino das mensagens. A comunicação entre os nós é possível somente quando os nós se encontram dentro do mesmo raio de alcance de transmissão.

De acordo com Patel et al. (2014), protocolos de roteamento para MANETs tendem a manter rotas fim a fim entre todos os nós conectados da rede conforme a topologia evolui, são classificados em duas categorias: protocolos proativos e protocolos reativos. Nos protocolos proativos, as informações são avaliadas continuamente, fazendo a manutenção das rotas, de modo que quando um pacote necessitar de encaminhamento a rota já seja conhecida e possa ser utilizada imediatamente. Este tipo de protocolo exige que seja mantida uma ou mais tabelas de informações referentes à rede e que as alterações da topologia sejam propagadas na rede para manter a consistência dos dados. Nos protocolos reativos as rotas são determinadas sob demanda, ou seja, quando uma rota é necessária, é iniciado um procedimento de descoberta da rota. Uma vez que a rota é descoberta, utiliza-se um processo de manutenção de rota para que ela continue ativa.

Protocolos de roteamento para MANETs necessitam que pelo menos um caminho entre a origem e o destino seja válido. Caso este caminho não exista, a rede é considerada particionada e a comunicação entre esses dois nós não é possível. A necessidade de comunicação mesmo em casos onde um caminho entre dois nós seja intermitente, levou a criação de uma abordagem diferente chamada de redes tolerantes a atrasos e interrupções.

2.3 REDES TOLERANTES A ATRASOS E INTERRUPÇÕES

As DTNs (FALL, 2003) caracterizam uma arquitetura inovadora na área das redes de computadores. Essas redes procuram solucionar os cenários em que os nós são conectados ocasionalmente e que podem sofrer desconexões frequentes. Foram inicialmente propostas para comunicações Interplanetárias (IPN - *InterPlanetary Network*) (BURLEIGH et al., 2003) onde este tipo de conexão envolve grandes atrasos e os contatos podem ocorrer apenas em determinados momentos.

Uma DTN é caracterizada como uma rede que não possui uma infraestrutura fixa e pode aceitar atrasos longos e variáveis, altas taxas de erros, conexões intermitentes e a possibilidade de não haver um caminho completo entre um nó origem e um nó destino (CERF et al., 2007). As frequentes interrupções e alterações de topologias em uma DTN exigem que os nós envolvidos no processo de comunicação utilizem o paradigma armazena-carrega-encaminha (SCF - *Store-Carry-Forward*) até alcançar o nó destino. As mensagens são armazenadas em um *buffer* por um período de tempo até que uma oportunidade de contato exista para o encaminhamento das mesmas (MASSRI et al., 2012).

Neste tipo de rede as rotas são geralmente construídas de forma dinâmica. Qualquer contato pode ser usado de modo oportunista como um próximo salto, objetivando que este contato eventualmente encaminhe a mensagem ao seu destino final. Visando aumentar a probabilidade de entrega de uma mensagem é utilizado um método conhecido como encaminhamento de réplicas de mensagens (PELUSI et al., 2006), onde duas ou mais cópias de cada mensagem são encaminhadas.

2.4 REDES SEM FIO OPORTUNISTAS

As OPNETs são redes que tomam proveito de conexões oportunistas de redes *Ad Hoc*, P2P (*Peer-to-Peer*) e RSSFs (Redes de Sensores Sem Fio). Essas redes têm como principal objetivo suportar a mobilidade de usuários entre um grupo de redes heterogêneas para solucionar desafios como conectividade intermitente, mudança constante de topologia e atrasos longos (PELUSI et al., 2006). As OPNETs podem ser definidas como MANETs desconectadas que utilizam o paradigma SCF. Normalmente são compostas por redes de nós sem fio auto-organizáveis, caracterizadas pela sua falta de conectividade o que resulta na inexistência de caminhos fim a fim entre a origem e o destino. A comunicação ocorre de forma local, ou seja, decisões de roteamento são feitas por dispositivos com base em informações locais, salto a salto.

A Figura 2 ilustra um exemplo de como as oportunidades de comunicação são alteradas com o tempo de acordo com a movimentação dos nós. Pode-se observar que não existe um caminho direto entre o nó *S* (origem) e o nó *D* (destino) até um determinado momento. As mensagens podem ser encaminhadas do nó *S* para o nó *D* através de nós intermediários de acordo com a sequência: no tempo T_1 , o nó *S* encaminha a mensagem para o nó 2; em $T_2 \leq T_1$, o nó 2 encaminha a mensagem para o nó 3; e em $T_3 \leq T_2 \leq T_1$, o nó 3 encaminha a mensagem para o nó *D*.

Em uma OPNET, a topologia de rede pode mudar enquanto cada mensagem está sendo

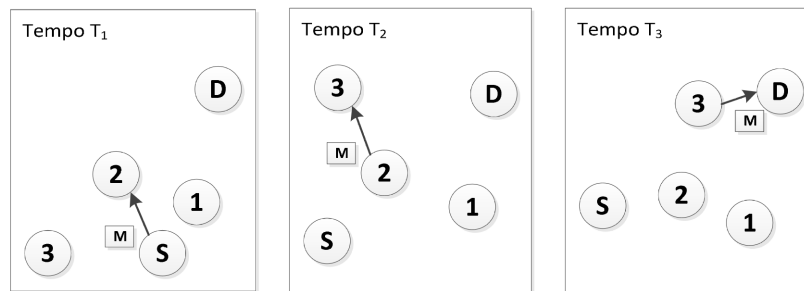


Figura 2: Exemplo de como a mobilidade dos nós cria oportunidades de comunicação em OPNETs.

Fonte: Mitra e Poellabauer (2013)

repassada de um nó para o outro. Como consequência disto, não há o conhecimento global da topologia da rede. Portanto, cada nó deve confiar apenas em seu conhecimento local, a fim de tomar decisões de roteamento, ou seja, para escolher se deve ou não transmitir a mensagem em cada encontro oportunista com outro nó.

2.4.1 CONCEITOS BÁSICOS

Vários conceitos por trás das OPNETs são originados a partir de trabalhos de investigação sobre DTNs, que tem sido realizadas no IRTF (*Internet Research Task Force*). Não há uma clara separação de conceitos entre OPNETs e DTNs. No entanto, OPNETs correspondem a um conceito mais abrangente que engloba DTNs. Segundo Pelusi et al. (2006), assume-se que em DTNs a topologia é conhecida a priori, onde conexões entre os *gateways* que podem estar ou não disponíveis apenas em determinados períodos de tempo. As rotas são normalmente calculadas através de técnicas legadas de redes tradicionais, levando em consideração a disponibilidade e o custo do *link*. Por outro lado, em OPNETs a priori não é necessário que exista conhecimento sobre a topologia de rede, as rotas são calculadas a cada salto (*hop*) antes da mensagem ser encaminhada.

As MANETs e as OPNETs diferem das redes tradicionais na mobilidade dos nós e na topologia dinâmica da rede. A comunicação entre os nós é possível somente quando os nós se encontram dentro do mesmo raio de alcance de transmissão. Entretanto, protocolos de roteamento para MANETs tendem a manter rotas fim a fim entre todos os nós da rede conforme evolução da topologia. Falhas de comunicações são classificadas como anomalias e tratadas através da utilização de estratégias de gestão de rotas e recuperação.

Por outro lado, as OPNETs são formadas por grupos anônimos de dispositivos, o que altera consideravelmente o roteamento das informações, já que novos nós podem ser

adicionados ou removidos da rede, impossibilitando assim manter rotas fim a fim para a realização do roteamento. As frequentes desconexões e a alta taxa de dinamicidade dos nós são características de redes oportunistas (HUANG et al., 2008).

2.4.2 APLICAÇÕES DAS REDES OPORTUNISTAS

De acordo com Huang et al. (2008), as OPNETs geralmente são particionadas formando regiões. Aplicações tradicionais não se adaptam a este tipo de ambiente, pois geralmente necessitam de uma conexão fim a fim entre a origem e o destino. Este tipo de ambiente requer aplicações assíncronas tolerantes a longos atrasos e a taxas de erro elevadas. Exemplos de aplicações de redes oportunistas incluem:

- Conectividade (*Internet*): áreas rurais em desenvolvimento onde não existem redes de acesso convencionais. Por exemplo, *DakNet Project* (PENTLAND et al., 2004) e *Saami Network Connectivity* (SNC) (DORIA, 2002).
- Redes Veiculares (VANETs): os veículos podem conter dispositivos embarcados, capazes de se comunicar uns com os outros de forma oportunista (BURGESS et al., 2006).
- Monitoramento de animais selvagens: exemplos de aplicações nessa área seriam rastreamento de espécies selvagens para entender o seu comportamento, interações entre os indivíduos, entre outras. Pesquisadores utilizam OPNETs como um meio não intrusivo para o monitoramento de grandes populações de animais em grandes regiões. Estes sistemas de monitoramento utilizam *tags* especiais com capacidade de detecção e uma ou mais estações bases para a coleta dos dados. Dentre os estudos apresentados neste domínio podemos destacar o projeto *Zebranet* (JUANG et al., 2002), onde os pesquisadores examinam o comportamento das zebras em seu habitat e o estudo apresentado em (SMALL; HAAS, 2003), onde as baleias são monitoradas.

Segundo Fall (2003), um dos grandes desafios das OPNETs está relacionado ao roteamento das mensagens. Protocolos de roteamento utilizados em redes tradicionais não foram projetados para operar em redes com conexões intermitentes. Assim, novos protocolos e algoritmos precisam ser desenvolvidos para esses novos cenários.

3 ROTEAMENTO EM REDES OPORTUNISTAS

A eficiência e o desempenho de uma OPNET depende da precisão em determinar a utilidade dos nós encontrados para o encaminhamento das mensagens. Nesta seção, são apresentadas as principais estratégias de encaminhamento de mensagens em OPNETs.

3.1 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO

Conforme descrito anteriormente, o roteamento é o um dos principais desafios em OPNETs devido a conectividade intermitente, a frequente alteração da topologia de rede e a restrições de recursos dos dispositivos móveis. A Figura 3 apresenta uma possível taxonomia dos algoritmos de roteamento em OPNETs no que diz respeito à forma como eles difundem os dados aos destinos. Com base no número de cópias de uma mensagem de dados transmitida por cada nó, os algoritmos de roteamento podem ser classificados em quatro categorias: abordagens baseadas no encaminhamento de mensagens (*Forwarding-based*) (uma única cópia), abordagens baseadas em inundação (*Flooding-based*) (múltiplas cópias), abordagens baseadas no comportamento social (*Social behavior-based*) e abordagens híbridas (*Hybrid approach*).

Protocolos que utilizam a abordagem de 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 a um custo de possíveis longos atrasos e baixa taxa de entrega de mensagens. Por outro lado os protocolos que utilizam a abordagem de inundação, distribuem múltiplas cópias da mesma mensagem na rede na tentativa de se obter alta taxa de entrega de mensagens. Este tipo de abordagem possibilita o protocolo alcançar um baixo atraso e uma alta taxa de entrega das mensagens. No entanto, há um aumento da taxa de armazenamento devido ao alto número mensagens que são transmitidas na rede.

Na abordagem baseada em comportamentos sociais os protocolos tomam decisões de encaminhamento usando padrões observados localmente sobre elos sociais entre os nós

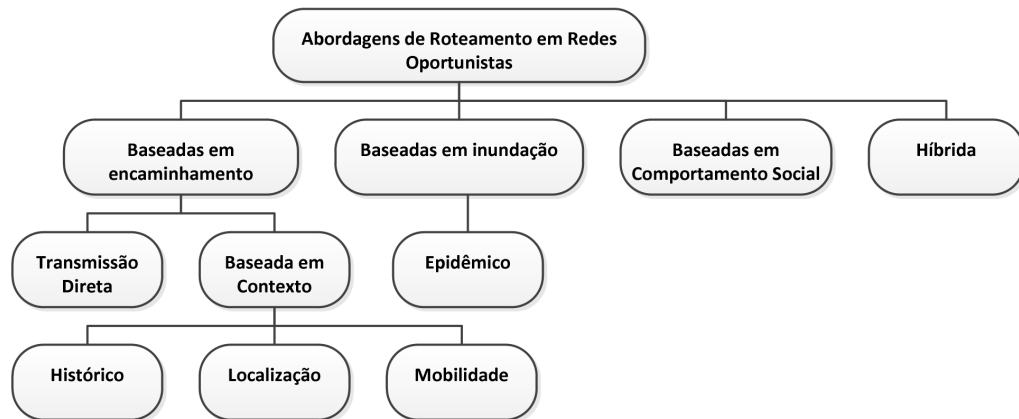


Figura 3: Taxonomia dos protocolos de roteamento em OPNETs.

Fonte: Adaptado de Mitra e Poellabauer (2013)

para prever futuras oportunidades de contato. Por fim, a abordagem híbrida combina as características das abordagens de encaminhamento e inundação na tentativa de limitar o *overhead* da rede enquanto tenta alcançar um baixo atraso na entrega das mensagens

3.2 ABORDAGEM DE ENCAMINHAMENTO DE MENSAGENS

Esta abordagem pode ser dividida em duas subcategorias: transmissão direta (*direct transmission-based forwarding*), onde protocolos desta categoria limitam o número de saltos (*hops*) de uma mensagem, e baseadas em contexto (*context-based forwarding*), no qual protocolos desta categoria exploram o contexto em que os nós estão operando para realizar a decisão de encaminhar a mensagem ou aguardar até que seja encontrado um nó melhor em termos de maior probabilidade de entrega da mensagem.

3.2.1 TRANSMISSÃO DIRETA

A transmissão direta é uma abordagem de roteamento que minimiza o número de transmissões de mensagens através da limitação do número de saltos que a mensagem pode realizar entre a origem e o destino. Em Spyropoulos et al. (2004) é proposto o roteamento simples e de 1 salto, onde depois de enviar uma cópia da mensagem, o nó de origem espera que o nó destino esteja em seu raio de alcance para realizar a entrega da mensagem, conforme apresentado na Figura 4.

Como a entrega da mensagem depende de um contato direto entre origem e destino, o

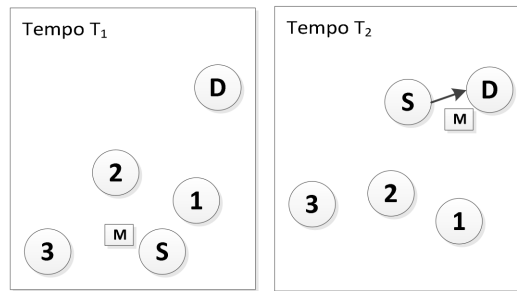


Figura 4: Exemplo de roteamento simples de 01 salto (SPYROPOULOS et al., 2004).

Fonte: Adaptado de Mitra e Poellabauer (2013)

atraso na entrega pode se tornar ilimitado. Contudo, sua principal vantagem é a quantidade mínima de transferências de mensagens. Em Grossglauser e Tse (2002) é proposta uma abordagem de encaminhamento de 2 saltos.

3.2.2 BASEADA EM CONTEXTO

Abordagens baseadas em contexto exploram as informações referentes ao comportamento dos nós para identificar possíveis encaminhadores de acordo com o destino das mensagens. Este tipo de abordagem pode ser dividida em três subcategorias: encaminhamento baseado em dados históricos (*history/estimation-based forwarding*), encaminhamento baseado na localização (*location-based forwarding*) e encaminhamento baseado em mobilidade (*mobility-based forwarding*).

3.2.2.1 ENCAMINHAMENTO BASEADO EM DADOS HISTÓRICOS

A abordagem de encaminhamento baseada em dados históricos (*history/estimation-based forwarding*) permite ao nó realizar a melhor decisão de encaminhamento através da avaliação da probabilidade de seus vizinhos encaminharem mensagens para o destino baseando-se em uma base histórica. A diferenciação entre os protocolos desta categoria se dá pelos parâmetros utilizados para a realização da estimativa. Utiliza-se como parâmetros: registros de conexões e desconexões entre os nós, utilização de recursos, taxa de mobilidade e o número de mensagens encaminhadas para os nós vizinhos.

Em Jain et al. (2004) diferentes tipos e quantidades de informação sobre a topologia da rede são classificados e modelados por “oráculos”. Cada oráculo representa um conhecimento particular da rede, por exemplo, o tamanho do *buffer* de um nó qualquer da rede. No trabalho

apresentado por Jones et al. (2007) foi proposto o MEED - (*Minimum Estimated Expected Delay*), protocolo que utiliza como métrica o menor atraso fim-a-fim. Tal métrica é calculada utilizando o histórico dos contatos observados pelos nós da rede, que registram o tempo das conexões e desconexões de acordo com uma janela de históricos.

No protocolo CAR (*Context-aware Adaptive Routing*) (MUSOLESI et al., 2005), cada nó da rede é responsável pela produção de suas próprias probabilidades de entrega para cada nó destino conhecido. Os melhores encaminhadores são calculados com base em uma métrica multi-atributo aplicada aos atributos genéricos de contexto do nó, como por exemplo, o nível residual da bateria, a taxa de conectividade, a probabilidade de encontro com o nó destino e o grau de mobilidade.

Em Burns et al. (2005) é proposto o protocolo MV (*Meetings and Visits*) cujo o objetivo é aprender a frequência de encontro entre pares de nós e suas visitas em certas regiões geográficas. As informações referentes à frequência de encontro dos nós são utilizadas para classificar cada mensagem de acordo com sua probabilidade de entrega através de um caminho específico. Assume-se que a probabilidade de visita a uma determinada região está fortemente relacionada com o histórico de visitas já realizadas pelo nó na região analisada.

Uma abordagem similar chamada PROPHET (*Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity*) é proposta em Lindgren et al. (2003). Esse protocolo utiliza um histórico de encontros e transitividade dos nós. Vetores de informações são trocados entre os nós da rede indicando a probabilidade de cada nó a entregar as mensagens armazenadas em seu *buffer* para cada destino conhecido b . Essa probabilidade aumenta cada vez que esses dois nós a e b se encontram (1), onde P_{Inic} é uma constante de inicialização para a previsão de entrega. O valor da probabilidade diminui quando eles deixam de se encontrar com frequência, conforme apresentado em (2), onde γ é a constante de redução da previsão de entrega e $TUnid$ é o número de unidades de tempo que se passou desde a última vez em que a métrica foi reduzida.

$$P(a,b) = P(a,b)_{antiga} + (1 - P(a,b)_{antiga}) \times P_{Inic} \quad (1)$$

$$P(a,b) = P(a,b)_{antiga} \times \gamma^{TUnid} \quad (2)$$

Como estratégia de encaminhamento, quando um nó a encontra um nó b , uma mensagem é enviada para b se a previsão de entrega da mensagem para o destino que este nó possui for maior se comparada à previsão de a . Uma vez que o nó a ainda pode encontrar um nó melhor ou até mesmo o destino final da mensagem, a mensagem não é excluída do seu *buffer* enquanto existir capacidade de armazenamento disponível. Caso o *buffer* esteja cheio

quando uma nova mensagem for recebida, a mensagem mais antiga deve ser excluída de acordo com o sistema de gerenciamento de fila usado. Nesse trabalho, o sistema usado foi o FIFO (*First In First Out*).

A probabilidade de entrega também possui uma propriedade transitiva (3), onde φ é uma constante de dimensionamento da propriedade de transitividade.

$$P(a, c) = P(a, c)_{antiga} + (1 - P(a, c)_{antiga}) \times P(a, c) \times P(a, c) \times \varphi \quad (3)$$

A propriedade transitiva é baseada na seguinte observação: se um nó a encontra um nó b com uma determinada frequência e este nó b encontra frequentemente o nó c , então o nó c provavelmente é um bom encaminhador de mensagens destinadas ao nó a .

3.2.2.2 ENCAMINHAMENTO BASEADO EM LOCALIZAÇÃO

Em abordagens baseadas em localização (*location-based forwarding*), a escolha do nó vizinho será realizada através do cálculo de probabilidade de entrega da mensagem baseado no nó mais próximo do destino final.

LeBrun et al. (2005) apresenta um método que utiliza um vetor de mobilidade dos nós (MoVe - *Motion Vector*) para prever suas futuras localizações. O protocolo MoVe utiliza o conhecimento relativo à velocidade dos nós e de seus vizinhos para prever as distâncias mais curtas entre dois nós. Após o cálculo das localizações futuras, as mensagens serão repassadas para os nós que estarão mais próximos do destino final.

3.2.2.3 ENCAMINHAMENTO BASEADO NA MOBILIDADE DOS NÓS

Abordagens baseadas na mobilidade dos nós (*mobility-based forwarding*) utilizam as informações sobre os movimentos dos nós para determinar o encaminhamento das mensagens.

No protocolo MobySpace (LEGUAY et al., 2006), os padrões de mobilidade dos nós são as informações de contexto que o nó fonte utiliza para efetuar o roteamento das mensagens. Assume-se que um nó é um bom candidato para repassar a mensagem quando ele possuir um padrão de mobilidade similar ao padrão do destino da mensagem.

3.3 BASEADAS EM REPLICAÇÃO DE MENSAGENS

Em relação à quantidade de cópias de mensagens que são trocadas entre os nós, alguns protocolos de roteamentos podem ser classificados como replicadores. Nessa abordagem, todos os nós que recebem uma mensagem a repassam para todos os seus vizinhos. Esta abordagem é empregada quando os nós não possuem informações sobre o estado da rede, impossibilitando o cálculo dos melhores caminhos para o encaminhamento da mensagem.

De acordo com Pelusi et al. (2006), embora esta abordagem possa ter uma alta taxa de entrega e baixo atraso, ela requer que os nós tenham um grande espaço em *buffer*, pois pode ocorrer um *overhead* de mensagens transferidas. Utilizam-se abordagens alternativas para controlar esse *flooding* como por exemplo: definir um número máximo de saltos para cada mensagem de dados, ou ainda, limitar o número total de cópias de cada mensagem.

3.3.1 ABORDAGEM EPIDÊMICA

O funcionamento dos protocolos desta categoria é semelhante a uma doença epidêmica, enquanto houver espaço em *buffer*, as mensagens vão sendo espalhadas pela rede como se fosse uma epidemia, ou seja, por meio de contatos entre os nós. Um nó só irá receber a mensagem (infecção), caso não a tenha ainda recebido.

Vahdat e Becker (2000) propõem o primeiro protocolo da categoria, intitulado como “Epidêmico”, com o objetivo de rotear mensagens em DTNs maximizando a taxa de entrega e minimizando a latência na entrega das mensagens. Cada nó armazena um vetor de *bits*, chamado de *summary vector*, que é uma versão compacta de todas as mensagens armazenadas.

A cada novo contato, os nós trocam seus *summary vectors* para determinar quais mensagens armazenadas remotamente ainda não foram recebidas pelo nó local. Assim cada nó requisita uma cópia da mensagem que ele ainda não possui. Dessa forma, o *buffer* de mensagens dos nós são “espelhados”, a não ser que a capacidade de armazenamento de algum nó atinga seu limite. Conforme mencionado anteriormente, quanto mais nós existirem na rede, maior será a probabilidade do destino ser alcançado, porém a um custo alto em relação à replicação de mensagens e ao consumo de recursos.

De acordo com Spyropoulos et al. (2005), o roteamento de muitas cópias em paralelo pode afetar o desempenho da rede. Em relação ao grande número de transmissões de mensagens, abordagens baseadas em inundação não são consideradas escaláveis quando a carga do tráfego da rede aumenta e seu atraso cresce rapidamente. Embora o roteamento epidêmico

possa ter uma alta taxa de entrega e baixo atraso, ele requer que os nós tenham um espaço em *buffer* suficientemente grande e pode ocorrer um *overhead* muito grande de mensagens transferidas. Portanto, existem abordagens alternativas para controlar esse *flooding*.

Em Spyropoulos et al. (2005) é apresentado o protocolo de roteamento *Spray and Wait*. Seu objetivo é gerar um pequeno número de cópias a fim de assegurar que o número de transmissões seja pequeno e controlado. Nesse protocolo, para cada mensagem originada em um nó, cópias desta são replicadas para os vizinhos desse nó (fase *spray*) e na sequência espera-se até que um dos nós vizinhos encontre o destino da mensagem e retorne uma confirmação (fase *wait*). A ideia do protocolo *Spray and Wait* é repassar um número suficiente de cópias das mensagens de forma que garanta que, no mínimo, uma delas alcance o destino.

3.4 BASEADO EM INFORMAÇÕES SOCIAIS

Protocolos que utilizam informações sociais exploram os aspectos sociais nos quais os nós estão envolvidos para aumentar a eficiência de roteamento. Portanto, o comportamento social dos portadores dos dispositivos tem um papel importante na forma em que os nós podem se encontrar. Esta abordagem é aplicada em redes PSN - *Pocket Switched Networks* (HUI et al., 2005), onde os dispositivos utilizam as oportunidades de contatos para que os seus portadores tenham a possibilidade de comunicação com a ausência de uma infraestrutura. Para permitir este tipo de comunicação, os protocolos utilizam métricas sociais derivadas dos contatos entre os dispositivos para realizar as tomadas de decisões de encaminhamento das mensagens.

Daly e Haahr (2007) propõe o protocolo *Simbet* que avalia a semelhança de vizinhança entre dois nós com a finalidade de detectar os nós que fazem parte da mesma comunidade. A centralidade de intermediação¹ (*"betweenness centrality"*) é utilizada para identificar os nós considerados como pontes, isto é, os nós que possuem a capacidade de repassar informações para diferentes comunidades. A decisão de encaminhamento do protocolo é realizada através da semelhança de nós vizinhos e os valores de centralidade do nó encontrado em relação ao nó atual. Caso o nó encontrado possua uma semelhança de vizinhança com o destino, a mensagem é encaminhada para ele, caso contrário, a mensagem permanece com o nó mais central. O objetivo desta estratégia é encaminhar as mensagens primeiramente para os nós centrais de cada comunidade e em seguida usar a semelhança de vizinhança para a entrega da mensagem para o destino.

¹Considera que as interações entre dois nós não adjacentes dependem de nós intermediários que se localizam no caminho mais curto entre eles. Portanto, centralidade de intermediação é a fração de caminhos mais curtos entre cada par possível de nós passando por um determinado nó.

O protocolo *Bubble Rap* (HUI et al., 2011) utiliza padrões de contatos entre os nós com a finalidade de classificar os nós em várias comunidades sociais distintas, que por sua vez serão utilizadas no contexto de roteamento. O protocolo dá preferência de encaminhamento para os nós pertencentes a mesma comunidade que o nó destino da mensagem. Caso os nós não sejam encontrados, o *Bubble Rap* encaminhará a mensagem para os nós que possuam a maior probabilidade de encontrar a comunidade do destino.

O protocolo Cultural CGrAnt (do inglês *Cultural Greedy Ant*) (VENDRAMIN et al., 2012a) utiliza um sistema híbrido composto por um Algoritmo Cultural (AC) e a meta-heurística de Otimização por Colônia de Formigas (ACO). No Cultural GrAnt as métricas utilizadas pelo ACO para avaliação dos caminhos são baseadas na popularidade dos nós ou centralidade de grau, proximidade social com cada outro nó, utilidade de intermediação e grau de estagnação.

Em Moreira et al. (2013) é apresentado uma SocialDTN, uma implementação de uma arquitetura DTN para dispositivos móveis com a finalidade de analisar a proximidade social dos nós através de sua rotina diária. O objetivo principal do protocolo é identificar os nós socialmente bem relacionados com a finalidade de aumentar a probabilidade de entrega de mensagens, evitando assim o desperdício de recursos de rede.

3.5 ABORDAGENS HÍBRIDAS

As abordagens híbridas combinam características das estratégias baseadas em encaminhamento com as estratégias baseadas em replicação. O objetivo é obter um bom desempenho na entrega das mensagens sem utilizar muitos recursos de rede. A abordagem baseada em encaminhamento é utilizada para a entrega da mensagem o mais próximo possível do seu destino. Uma vez que a mensagem já se encontra mais próxima do seu destino utiliza-se a abordagem baseada em replicação para a divulgação da mensagem em torno de cada destino.

Em Tchakountio e Ramanathan (2004) é proposto um protocolo de roteamento que integra a localização do nó e uma abordagem de encaminhamento de mensagens. O protocolo de roteamento utiliza informações da última localização conhecida do destino para realizar o encaminhamento da mensagem para os nós vizinhos. A ideia por trás deste protocolo é utilizar um histórico limitado de localizações do destino da mensagem para prever suas futuras localizações.

O protocolo PSONET proposto nesta dissertação interpreta as condições de comunicação da rede, adaptando-se aos recursos disponíveis. A variação na quantidade de nós no alcance de cada nó da rede poderá ser utilizada como parâmetro de definição do modo

de operação do protocolo. Nos casos em que a rede esteja bastante esparsa, serão estabelecidos mecanismos que garantam a replicação das mensagens para todos (ou quase todos) os nós. Já nos casos de alta densidade de nós, o protocolo verificará a maior probabilidade de cada candidato a encaminhador entregar as mensagens ao destino pretendido, para então definir o(s) melhor(es) encaminhador(es) utilizando um algoritmo baseado em otimização por enxame de partículas.

O presente capítulo apresentou as principais estratégias de encaminhamento de mensagens em OPNETs. Analisando as características de uma OPNET e seu estado da arte é possível constatar a necessidade de encontrar uma alternativa aos protocolos replicadores que otimize o uso de recursos, minimizando o número de mensagens replicadas e o número de mensagens descartadas por falta de espaço em *buffer*, ainda que maximizando ou mantendo um desempenho aceitável em relação a taxa de entrega das mensagens. No próximo capítulo serão apresentadas técnicas de inteligência coletiva que podem ser aplicadas em roteamento para encontrar soluções ao problema mencionado anteriormente.

4 INTELIGÊNCIA DE COLETIVA

Segundo Bonabeau et al. (1999), inteligência de coletiva ou de enxame (do inglês SI - *Swarm intelligence*) pode ser definida como um conjunto de agentes que cooperam com um determinado padrão de comportamento para atingir uma determinada meta. Com base na cooperação dos nós, a SI oferece um novo conceito em busca da solução de problemas complexos com a ausência de um controle centralizado. Nesta seção, examinam-se dois modelos da abordagem SI aplicados em roteamento.

4.1 DEFINIÇÃO

Em Kennedy et al. (2001), a inteligência coletiva é definida como o comportamento de entidades, não inteligentes, alcançado através de um grupo ou colônia, onde há cooperação entre os elementos para a resolução de problemas complexos de forma distribuída. A inteligência coletiva inclui qualquer tentativa de projetar algoritmos ou dispositivos distribuídos de solução de problemas inspirados pelo comportamento coletivo de insetos sociais e outras sociedades animais.

A SI tem por objetivo modelar o comportamento coletivo de simples agentes que interagem localmente, diretamente ou indiretamente, em seu ambiente dando origem a comportamentos globais emergentes. A comunicação entre os agentes é realizada de maneira distribuída sem um mecanismo centralizado. Estas características tornam os modelos de inteligência de coletiva simples de ser implementados e expandidos, alcançando assim um alto grau de robustez (BONABEAU et al., 2000).

De acordo com Millonas (1994), as propriedades principais de um SI são:

- Proximidade: os agentes devem ser capazes de interagir;
- Qualidade: os agentes devem ser capazes de avaliar seus comportamentos;
- Diversidade: permite ao sistema reagir a situações inesperadas;

- Estabilidade: nem todas as variações ambientais devem afetar o comportamento de um agente;

A SI possui inspiração biológica, pois baseia-se no comportamento coletivo de sociedades de insetos como formigas, cupins, abelhas e vespas, bem como de outras sociedades de animais como bando de pássaros e cardumes, dentre outros. Um grande número de modelos de inteligência coletiva tem sido proposto e investigado na literatura. Dois dos modelos mais populares e bem-sucedidos da abordagem SI são otimização por colônia de formigas, do inglês ACO (*Ant Colony Optimization*) (COLORNI et al., 1992; DORIGO et al., 1996) e otimização por enxame de partículas, do inglês PSO (*Particle Swarm Optimization*) (KENNEDY; EBERHART, 1995).

O ACO tem inspiração nas características do comportamento adaptativo e coletivo de formigas reais que procuram encontrar o menor caminho entre uma fonte de alimento e seu ninho. Sua meta-heurística é baseada em agentes com comunicação que utiliza o conceito de stigmergia¹ artificial (DORIGO et al., 1999). O PSO traduz o comportamento social dos bandos de pássaros e cardumes em uma estrutura baseada em compartilhamento de informação entre os agentes “partículas” para encontrar os pontos extremos em problemas de otimização.

As próximas seções apresentam a meta-heurísticas PSO com destaque ao uso da inteligência coletiva em roteamento.

4.2 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Otimização por Enxame de Partículas é uma técnica de otimização estocástica baseada em uma população de indivíduos (partículas), na qual simula-se o processo comportamental de interação entre partículas de um grupo. Inspirado no comportamento social encontrado em bando de pássaros, o PSO foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart (1995).

A população no PSO, denominada nuvem ou enxame, é composta por partículas, cujas posições representam as potenciais soluções para um problema estudado. Cada partícula k possui uma velocidade v'_k responsável por comandar o processo de otimização no tempo t . A velocidade de uma partícula determina a direção na qual a partícula se movimentará, com objetivo de melhorar sua posição atual. A busca pela melhor posição (solução) é realizada através de um processo iterativo onde a posição de cada partícula é alterada adicionando-se

¹O termo stigmergia foi formalmente instituído por Grassé (1959) como uma forma de comunicação indireta entre os indivíduos mediada pelas modificações do ambiente. Posteriormente, em Deneubourg et al. (1990) estudou-se um exemplo de stigmergia chamado comunicação feromonal

uma velocidade à sua posição corrente, fazendo com que a partícula se movimente sobre o espaço em busca de melhores soluções.

A cada iteração, uma função de avaliação (*fitness*) avalia a qualidade de cada posição ocupada pela partícula no espaço de busca. Cada partícula k armazena na memória a sua melhor posição já alcançada $pbest_k$ e a melhor posição já alcançada entre todas as partículas da nuvem $gbest$. Estes dois componentes em adição ao fator de inércia resultam na velocidade v de movimentação e direção da partícula k no tempo t (4), como definido por Kennedy e Eberhart (1995):

$$v_k^t = w.v_k^{t-1} + c_1.r_1(pbest_k - x_k^{t-1}) + c_2.r_2(gbest - x_k^{t-1}), \quad (4)$$

onde w é o fator de inércia que força a partícula a mover-se na mesma direção da iteração anterior, c_1 é o fator cognitivo que indica a auto-confiança da partícula, c_2 é o fator social que força a partícula a seguir na direção da melhor partícula da nuvem, r_1 e r_2 são números aleatórios entre $[0,1]$ que ajudam a evitar que a nuvem de partículas fique presa em um ótimo local, x^{t-1} é a posição da partícula na iteração anterior, $pbest_k$ é a posição com o melhor *fitness* encontrado pela partícula k , e $gbest$ é a posição do espaço de busca onde foi encontrado o melhor *fitness* entre todas as partículas da população.

A atualização da posição da partícula k no tempo t (5) é definida por Kennedy e Eberhart (1995):

$$x_k^t = x_k^{t-1} + v_k^t. \quad (5)$$

A movimentação da partícula consiste simplesmente em adicionar velocidade à sua posição atual. O processo é repetido até que uma condição de parada seja satisfeita: (i) encontrar um valor aceitável para uma solução ótima; ou (ii) executar um número máximo de iterações.

O Algoritmo 1 detalha o funcionamento do algoritmo tradicional do PSO, considerando um problema de minimização.

Algoritmo 1: Pseudocódigo do algoritmo de PSO Kennedy e Eberhart (1995).

```

1  para  $i=0$  até o tamanho do enxame faça
2  |   Inicia  $\vec{x}_i$  como uma solução aleatória para o problema;
3  |   Inicia  $\vec{v}_i$  com uma velocidade aleatória  $< v_{max}$ ;
4  fim
5  enquanto Condição de parada faça
6  |   para Para cada partícula i faça
7  |   |   Calcula a velocidade da partícula  $\vec{v}_i$  (Eq.(4));
8  |   |   Atualiza a posição das partículas (Eq.(5));
9  |   |   Avalia a nova partícula  $f(\vec{x}_i)$ ;
10 |   |   se  $x_i < pbest_i$  então
11 |   |   |    $pbest_i \leftarrow x_i$ ;
12 |   |   fim
13 |   |   se  $pbest_i < gbest$  então
14 |   |   |    $gbest \leftarrow pbest_i$ ;
15 |   |   fim
16 |   fim
17 fim

```

A nuvem de partículas é inicializada através da distribuição aleatória das partículas dentro do espaço de busca (linha 2). Em seguida, inicia-se um processo iterativo onde a posição de cada partícula é alterada adicionando-se uma velocidade a sua posição corrente (linha 8), fazendo com que a partícula se movimente sobre o espaço em busca de melhores soluções. Realiza-se o procedimento para verificar se houve melhora da solução da partícula e do enxame. Este procedimento é realizado através do cálculo do *fitness* (linha 9), o qual é dependente da aplicação. Em caso de afirmativo, os valores de *pbest* e *gbest* são atualizados, conforme linhas 11 e 14. Por fim, o algoritmo é encerrado caso o critério de parada seja atendido.

4.3 INTELIGÊNCIA COLETIVA APLICADA EM ROTEAMENTO

A SI permite a implementação de redes adaptativas e a geração de vários caminhos para o roteamento. Os algoritmos inspirados em SI são capazes de se adaptar as constantes mudanças de topologia da rede e de tráfego. O comportamento que emerge é o de um grupo de indivíduos que interagem através regras simples e dinamicamente se auto-organizam mantendo as suas posições ao redor de localizações ótimas (CASTRO, 2006). A presente seção apresenta protocolos de roteamento que utilizam SI em redes de computadores.

Em Rosati et al. (2008) e La e Ranjan (2009), são propostos o uso de ACO para roteamento em redes móveis *ad hoc* com conectividade limitada. Rosati et al. (2008) apresenta o protocolo DAR (*Distributed Ant Routing*). La e Ranjan (2009) propõem o encaminhamento de mensagem ABMF (*Ant-Based Message Forwarding*), onde nós capturam as propriedades estatísticas de conectividade da rede a um salto. Vendramin et al. (2012a) apresentam o protocolo CGrAnt que utiliza ACO e Algoritmos Culturais para prover roteamento, escalonamento e gerenciamento de *buffer* e em DTNs. Em Zhang et al. (2010) utiliza ACO e Algoritmos Culturais para prover qualidade de serviço no roteamento de uma topologia fixa de nós. Vendramin et al. (2012b), propõem o protocolo GrAnt que emprega a técnica de ACO para obter informações sobre a dinâmica de uma DTN e para auxiliar no roteamento, escalonamento e gerenciamento de *buffer*.

Omidvar e Mohammadi (2014) propõem um algoritmo de roteamento para DTN chamado PSODTN. A proposta do algoritmo é a redução da sobrecarga da rede através da redução do número de cópias de mensagens encaminhadas enquanto mantém a taxa de entrega superior a 90%.

Em Toofani (2012) a técnica de otimização PSO é utilizada para a resolução do problema do caminho ótimo em grafos. Neste trabalho as equações do PSO foram adaptadas para permitir a codificação das partículas (soluções) de uma forma discreta. O grafo analisado no estudo era composto por 10 nós. Para a inicialização das partículas foram gerados caminhos aleatórios entre o nó de origem e destino da mensagem. A aleatoriedade na escolha dos caminhos tem por objetivo particionar a rede em redes menores, dividindo assim o espaço de busca. A solução ótima é encontrada partir de um conjunto de nós ao invés de de uma busca em toda rede. A codificação e a movimentação das partículas utilizadas no PSONET (protocolo proposto nessa dissertação) foi inspirada nessa proposta;

O protocolo PSONET proposto nesta dissertação utiliza a meta-heurística PSO para solucionar o problema de encaminhamento de mensagens em uma OPNET. Diferente dos trabalhos descritos anteriormente, o PSONET analisa as condições de comunicação da rede e o histórico das conexões dos nós para tomar melhores decisões quanto ao encaminhamento das mensagens. Detalhes do funcionamento do protocolo PSONET são fornecidos no próximo capítulo.

5 PSONET

Este capítulo apresenta o protocolo PSONET proposto nesta dissertação. Primeiramente, a Seção 5.1 traz uma visão geral do protocolo. Na sequência, as Seções 5.2 e 5.3 descrevem o método de encaminhamento utilizado pelo protocolo e a sua configuração.

5.1 VISÃO GERAL DO PROTOCOLO

Conforme discutido na seção 3.1, dois dos quatro grandes grupos de protocolos para OPNETs apresentam limitações evidentes.

Nos protocolos de roteamento baseados em encaminhamento há o direcionamento da mensagem somente para um único nó a cada etapa do roteamento. Se por um lado existe um baixo número de mensagens replicadas na rede e, conseqüentemente, um baixo consumo dos recursos de rede, por outro lado, há longos atrasos e uma baixa taxa de entrega de mensagens. 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 intermediários.

Assim, a abordagem híbrida se mostrou bastante eficiente, na medida em que ela combina características de estratégias baseadas em encaminhamento com estratégias baseadas em replicação, com o objetivo de alcançar uma baixa taxa de atraso com o mínimo consumo de recursos da rede.

O protocolo PSONET cria um mecanismo de encaminhamento de mensagem que supera os problemas acima descritos. Ele utiliza um esquema híbrido de roteamento que utiliza um algoritmo baseado em otimização por enxame de partículas. O protocolo proposto direciona o tráfego em OPNETs através de um subconjunto de bons encaminhadores, de modo a melhorar a taxa de entrega de mensagens e diminuir a latência da rede e o atraso fim a fim.

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 e (iii) Encaminhamento de Mensagens, conforme descrito no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: Pseudocódigo do PSONET.

```

1 Fase 1: Descoberta da Topologia de Rede;
2 Registra as conexões (Histórico de Contatos);
3 Troca Histórico de Contatos com os vizinhos;
4 Fase 2: Definição do Modo de Operação;
5 se  $Nr.conexoes \geq limiarConexoesPSO$  então
6   | modoOperacao="denso"
7 senão
8   | modoOperacao="esparso"
9 fim
10 Fase 3: Encaminhamento de Mensagens;
11 se modoOperacao=="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

```

Nos casos em que a rede seja esparso, ou seja, baixa densidade da rede, 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, ou seja, rede densa, o protocolo verificará a probabilidade de cada candidato a encaminhador encontrar o nó destino da mensagem, o que ocasionará uma maior economia de recursos da rede.

5.1.1 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. O número de registros armazenados no *Histórico de Contatos* possui um limite, quando esse limite é atingido e um novo registro precisa ser armazenado, o registro mais antigo será descartado. O *Histórico de Contatos* armazena 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, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Histórico de contatos do PSONET.

Campo	Descrição
<i>idConexao</i>	Identificação da conexão;
<i>idNo</i>	Identificação do nó encontrado;
<i>inicioConexao</i>	Tempo de início da conexão;
<i>fimConexao</i>	Tempo final da conexão.

De acordo com as informações recebidas, cada nó cria uma tabela contendo métricas de avaliação da probabilidade de contato com o nó destino do nó atual para cada nó já conhecido. Conforme apresentado na Tabela 2, 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 2: Métricas de avaliação utilizadas pelo PSONET.

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 para a geração do valor de *fitness* que será detalhada nas seções seguintes.

5.1.2 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.

Conforme explicado na seção 5.1, nos casos de uma rede esparsa, torna-se necessário estabelecer mecanismos que garantam a replicação das mensagens para todos os nós. Já nos casos de uma rede densa, o protocolo verifica a probabilidade de contato entre o nó vizinho e o destino pretendido com base no *Historico 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.

5.2 ENCAMINHAMENTO DE MENSAGENS VIA ENXAME DE PARTÍCULAS

O problema de roteamento em DTNs pode ser modelado como um problema de otimização multimodal tentando encontrar não apenas uma solução, mas um conjunto de soluções (ou seja, múltiplos caminhos entre dois nós). O conjunto finito de soluções possíveis (isto é, caminhos formados por uma sequência de nós, em que cada permutação do nó gera uma nova solução) caracteriza o roteamento em DTNs como um problema combinatório. O problema também pode ser modelado como um estado dinâmico, porque as características do espaço de busca e o valor das soluções sofrem alterações ao longo do tempo.

Originalmente, o PSO foi concebido para ser aplicado em problemas de natureza contínua, com espaço de busca dado por números reais. Entretanto, muitos problemas práticos tratados na atualidade podem ser representados por problemas de otimização combinatória e suas variáveis de decisão precisam ser codificadas de maneira discreta.

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

O funcionamento do algoritmo de otimização dos caminhos durante o modo denso do PSONET está dividido em 2 fases descritas nas próximas seções: (i) Análise dos contatos e (ii) Processo de otimização. O algoritmo do PSONET no modo denso está apresentado em Algoritmo 3.

Algoritmo 3: Pseudocódigo do PSonet: Modo Denso.

```

1  para  $i=0$  até o número de mensagens armazenadas no buffer faça
2    Fase 1: Análise dos contatos;
3    Verifica se os nós no alcance possuem a mensagem;
4    se  $Nr.conexoes \geq limiarConexoesPSO$  então
5      Cria o grafo de conectividade com base no Histórico de Contatos;
6      se Existe registro de conectividade então
7        Fase 2: Processo de otimização, considerando um problema de
8        maximização;
9        Inicializa as Partículas conforme Equação (6);
10       para  $it=0$  até o número de iterações faça
11         Calcula o fitness ( $f$ ) de cada partícula  $k$  conforme Equação (7);
12         Define  $G_{best}$  ;
13         Calcula a velocidade das partículas conforme Equação (9);
14         Atualiza as partículas conforme Equação (10);
15         Avalia a nova partícula  $k$  ;
16         se  $fC_{part}^k > fP_{best}^k$  então
17           |  $P_{best}^k \leftarrow C_k$ ;
18         fim
19         se  $fP_{best}^{part} > fG_{best}$  então
20           |  $G_{best} \leftarrow P_{best}^{part}$ ;
21         fim
22       Encaminhamento da mensagem para o nó que obtiver o maior número
23       de ocorrências nos melhor(es) caminho(s) retornado(s) pelo PSO;
24     senão
25       | Replica a mensagem para todos os nós no raio de alcance;
26     fim
27   senão
28     | Replica a mensagem para todos os nós que não possuem a mensagem;
29   fim

```

5.2.1 ANÁLISE DOS CONTATOS

Todas as mensagens armazenadas no *buffer* serão analisadas. Inicialmente é verificado se os nós que estão no alcance do nó portador da mensagem já possuem uma cópia da mensagem (linha 3 do Algoritmo 3). Caso todos os nós já possuam a cópia da mensagem, a próxima mensagem armazenada em *buffer* é selecionada. Quando o número de nós ao alcance (*Nr.conexoes*) for menor que um limiar de conexões estabelecido no início da otimização via exame de partículas (*limiarConexoesPSO*) (linha 4), realiza-se a replicação da mensagem apenas para os nós que ainda não possuem a mensagem (linha 27).

Caso contrário verifica-se a existência de um ou mais caminhos entre o nó candidato e nó destino da mensagem (linha 6) através do conhecimento adquirido através do *HistoricodeContatos*. Caso exista o registro de conectividade inicia-se o processo de otimização dos caminhos (linha 7), caso contrário, replica-se a mensagem para os nós que estão ao seu alcance (linha 24).

5.2.2 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Na inicialização das partículas (linha 8), quando um nó S deseja enviar uma mensagem para um destino D , ele gera os p melhores caminhos entre o nó S e o nó D para cada métrica de avaliação apresentada na Tabela 2. A geração dos caminhos é realizada com base no algoritmo *KShortestPaths* (EPPSTEIN, 1994) e no conhecimento adquirido através do *HistoricodeContatos*. Essa otimização pode ser representada como um grafo $G(V,A)$, onde: V representa um conjunto finito não vazio de vértices ou nós e A representa um conjunto de arestas ou enlaces conectando os nós em V .

O algoritmo *KShortestPaths* determina os p melhores caminhos por ordem de peso crescente em cada aresta. O algoritmo é uma variante do algoritmo *Bellman Ford* (BELLMAN, 1958). Em vez de apenas armazenar o melhor caminho, ele armazena os p melhores caminhos em cada passo de execução. Na Equação (6) é apresentado um exemplo de enxame formado por três partículas $C^k[p]$ (caminhos), inicializadas pelo algoritmo *KShortestPaths*, onde $S_1, B_1, E_1, D_1, A_3, B_2, e C_2$ representam os nós de uma rede.

$$Enxame = \begin{bmatrix} C^k [1] \\ C^k [2] \\ C^k [3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & B_1 & E_1 & D_1 \\ S_1 & A_3 & D_1 & \\ S_1 & B_2 & C_2 & D_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Após a geração das partículas, calcula-se o *fitness* de cada partícula k (linha 10) de

acordo com as métricas definidas na Tabela 2, onde os valores das métricas são normalizados. Neste processo, somam-se os valores das arestas que interligam os nós que compõem a rota para cada métrica definida. O valor obtido é dividido pelo número de saltos conforme Equação (7).

Neste processo, somam-se os valores das arestas que interligam os nós que compõem a rota para cada métrica definida. O valor obtido é dividido pelo número de saltos conforme Equação (7).

$$fitness = \sum_{\forall(i,j) \in C^k} \frac{f(i,j) + d(i,j) + \frac{1}{t_e(i,j)}}{Nr_{saltos}} \quad (7)$$

Cada partícula armazena a sua melhor posição encontrada até o momento em P_{best}^k . Após avaliação de todas as partículas, define-se a melhor partícula encontrada pelo enxame (melhor valor de *fitness* encontrado) como o G_{best} (linha 11). No exemplo mostrado na Equação (6) a melhor partícula, avaliada conforme Equação (7), é mostrada na Equação (8).

$$G_{best} = [S_1 \quad B_2 \quad C_2 \quad D_1] \quad (8)$$

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

A movimentação das partículas segue o modelo apresentado em (TOOFANI, 2012). 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}^k), conforme apresentado na Equação (9). 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}^k . Essa diferença de posições resultará na velocidade da partícula (linha 12).

$$\begin{aligned} V^k [1] &= G_{best} - P_{best}^1 \\ V^k [1] &= \{S_1 \quad B_2 \quad C_2 \quad D_1\} - \{S_1 \quad B_1 \quad E_1 \quad D_1\} \\ V^k [1] &= \{B_2 \quad C_2\} \end{aligned} \quad (9)$$

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 (V^k), respeitando as informações de vizinhança contidas no *HistoricodeContatos*. Com base nas informações contidas no grafo temporário geram-se

novas partículas na tentativa de se encontrar melhores soluções (linha 13).

Movimenta-se cada partícula gerando uma nova rota, conforme Equação (10).

$$\begin{aligned}
 C^k [] &= C^k [] + V^k [] \\
 C^k [1] &= \left\{ S_1 \quad B_1 \quad E_1 \quad D_1 \right\} + \left\{ B_2 \quad C_2 \right\} \\
 C^k [1] &= \left\{ S_1 \quad B_2 \quad C_2 \quad E_1 \quad D_1 \right\}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Avalia-se cada nova partícula (linha 14) e caso seja uma rota válida e ainda seu valor de *fitness* for melhor do que o *fitness* do G_{best} , atualiza-se o G_{best} (linhas 15-20), o mesmo procedimento é aplicado para o P_{best} (linhas 15-17). Considera-se uma rota válida, uma rota que seja possível ser alcançada através do conhecimento armazenado no *Historico de Contatos*.

Repete-se o processo de movimentação das partículas (atualização das rotas) até que o critério de parada seja atingido. As melhores soluções apresentadas pelas partículas (P_{best}) 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 como segundo salto. Encaminha-se a mensagem para o nó que obtiver o maior número de ocorrências (linha 22).

5.3 CONFIGURAÇÃO DO PROTOCOLO PSONET

Os principais parâmetros do PSONET são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do protocolo PSONET.

Parâmetro	Descrição
<i>nrRegistroHistorico</i>	Número de registros que podem ser armazenados no <i>Historico de Contatos</i> .
<i>limiarConexoesPSO</i>	Número mínimo de nós que precisam estar no raio de alcance do nó que a mensagem de modo ativar o modo denso do PSONET.
<i>nrCaminhos</i>	Número de partículas utilizadas na inicialização do PSO, ou seja, o número de soluções geradas para cada métrica utilizada.
<i>nrIteracao</i>	Critério de parada da execução da solução via enxame de partículas, isto é, numero de iterações do PSONET no modo denso.

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.

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 *limiarConexoesPSO*. Este parâmetro é responsável por definir o modo de operação do protocolo com a finalidade de controlar a sobrecarga na rede.

O parâmetro *nrCaminhos* define o número de partículas utilizadas na inicialização do PSO, ou seja, o número de soluções geradas para cada métrica utilizada. Por fim, definiu-se como critério de parada do PSO o número de iterações *nrIteracao*.

6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O protocolo proposto nessa dissertação, PSONET, será comparado dois protocolos de roteamento que podem operar em vários ambientes com diferentes modelos de mobilidade dos nós: o protocolo Epidêmico baseado na inundação de mensagens (VAHDAT; BECKER, 2000) e o protocolo PROPHET baseado em contexto (LINDGREN et al., 2003).

O ambiente de simulação escolhido para a avaliação de desempenho do PSONET foi o simulador para ambientes de redes oportunistas The ONE (do inglês *The Opportunistic Network Environment*) na versão 1.5. Dentre os mapas disponíveis no simulador foi escolhido o mapa da cidade de Helsinki na Finlândia. Os resultados completos das simulações são apresentados no Apêndice A.

Este capítulo está subdividido nas seguintes seções: a Seção 6.1 apresenta a definição das medidas de desempenho consideradas para a avaliação do protocolo PSONET. A Seção 6.2 descreve o ambiente de simulação utilizado para a avaliação do protocolo. A Seção 6.3 apresenta os modelos de mobilidades utilizados nas simulações. A Seção 6.4 descreve os parâmetros de simulação utilizados e finalmente a Seção 6.5 apresenta dos resultados obtidos.

6.1 MEDIDAS DE DESEMPENHO

Para avaliar o desempenho dos protocolos, as seguintes medidas são consideradas:

1. Taxa de entrega de mensagens, que representa o percentual de mensagens criadas ($M_{criadas}$) que o protocolo é capaz de entregar ao seu destino ($M_{entregues}$) durante a simulação. Na Equação (11) é apresentado o cálculo da Taxa de Entrega de mensagens.

$$Taxa\ de\ Entrega = \frac{M_{entregues}}{M_{criadas}} * 100, \quad (11)$$

2. Relação de redundância de mensagens ou sobrecarga, que apresenta a relação entre o número de réplicas de mensagens propagadas na rede ($M_{replicadas}$) e o número de

mensagens entregues ao destino final ($M_{entregues}$). Na Equação (12) é apresentado o cálculo da Relação de Redundância.

$$Redundância = \frac{M_{replicadas} - M_{entregues}}{M_{entregues}} \quad (12)$$

6.2 THE ONE: AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Visando tornar a simulação de ambientes DTNs complexas mais viável e compreensível, foi criado um ambiente de simulação The ONE. O Simulador é baseado em eventos discretos e combina modelos de movimentação, simulação de roteamento, visualização e apresentação de relatórios (KERÄNEN et al., 2009).

O simulador é implementado usando a linguagem de programação Java e dividido em módulos, o que facilita as alterações e manutenção do mesmo. Possui módulos de mobilidade para áreas sem obstáculos e com obstáculos, como áreas baseadas em mapas. No simulador já se encontram implementados vários protocolos de roteamento (PROPHET, Epidemic, Spray and Wait, MaxProp, entre outros). A estrutura de funcionamento do simulador é apresentada na Figura 5.

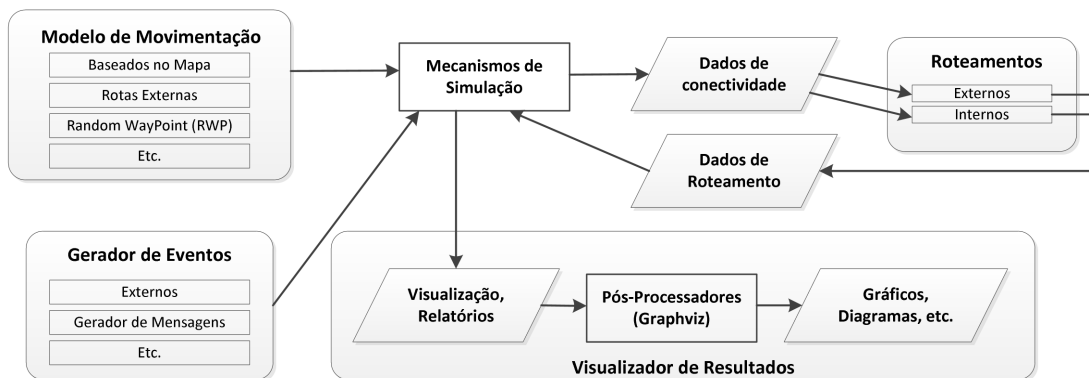


Figura 5: Estrutura de funcionamento do simulador The ONE.

Fonte: Adaptado de Keränen et al. (2009)

A simulação do movimento dos nós pode ser realizada utilizando os modelos de movimentação implementados no simulador (ex.: *CarMovement*, *BusMovement*, *ShortestPath*, e *RandomWaypoint*) ou a partir de dados de movimentação que podem ser importados a partir de uma fonte externa. A posição dos nós, fornecida pelo modelo de movimentação, é utilizada para determinar se dois nós podem comunicar e trocar mensagens. Estas informações podem ser exportadas para mecanismos de simulação de roteamento externos ou processadas por

módulos de roteamento internos que implementam diferentes algoritmos de roteamentos para DTNs. A criação das mensagens podem ser realizadas através de geradores de eventos internos, implementados nos módulos de roteamento ou por geradores externos.

A visualização da mobilidade e a troca de mensagens dos nós em tempo real pode ser realizada de forma interativa através da GUI - *Graphical User Interface*. Os dados das simulações podem ser coletados para análise posterior ou interação com outros programas, por exemplo Graphviz (KERÄNEN et al., 2009).

6.3 MODELOS DE MOBILIDADES

Nesta seção são apresentados os cenários utilizados para a avaliação do protocolo proposto. Cada cenário utiliza como base um modelo de mobilidade específico que descreve um padrão de mobilidade utilizado pelos nós. Cada padrão possui a sua particularidade e define atributos como velocidade, aceleração, localização, que se modificam de acordo com o tempo (JAYAKUMAR; GANAPATHI, 2008).

Assim, nesta dissertação o desempenho do protocolo PSONET é avaliado em três cenários de mobilidade distintos para melhor refletir o seu comportamento: cenário baseado em comunidades de nós (PoI - *Point of Interest*), cenário baseado em atividades dos nós no dia a dia (WD - *Working day*) e um cenário aleatório (RWP - *Random Waypoint*).

6.3.1 CENÁRIO BASEADO EM COMUNIDADES

O cenário PoI simula um grupo de pessoas em suas comunidades, que eventualmente entrarão em contato com outras pessoas, que podem ou não fazer parte de sua comunidade, para realizar a troca de informações.

De acordo com Keränen et al. (2010), o cenário consiste em uma área dividida em cinco comunidades (ou PoIs - *Pontos de Interesse*) classificadas como “homes” para representar os PoIs de A a D, e “shops” para representar os PoIs em comum E. O modelo de mobilidade utilizado pelos nós para o deslocamento entre os PoIs é o SPMBM (*Shortest Path Map-Based*) que emprega o algoritmo Dijkstra para encontrar o caminho mais curto entre os PoIs. Assume-se que todos os nós são pedestres e que cada nó tem um PoI domiciliar.

Há uma probabilidade alta de um nó escolher um destino no seu PoI domiciliar, uma probabilidade média de visitar PoIs em comum e uma probabilidade baixa ou nula de visitar outros PoIs. A Tabela 4 sumariza as probabilidades de seleção de destino para cada grupo de

nós onde o *PoI E* representa o ponto de interesse em comum entre todos os grupos.

Tabela 4: Cenário POI: Probabilidades de seleção de destino.

Grupo de Nós	Destino <i>PoI A</i>	Destino <i>PoI B</i>	Destino <i>PoI C</i>	Destino <i>PoI D</i>	Destino <i>PoI E</i>
A	0.6	0.05	0.05	0	0.3
B	0.05	0.6	0	0.05	0.3
C	0	0.05	0.6	0.05	0.3
D	0.05	0	0.05	0.6	0.3

6.3.2 CENÁRIO BASEADO EM ATIVIDADES

O cenário WD (EKMAN et al., 2008) representa um cenário baseado em atividades do dia a dia das pessoas. O modelo simula um dia comum na vida de pessoas que acordam pela manhã, seguem para o trabalho onde permanecem até o fim da tarde, quando então, possuem a possibilidade de ir para um lugar público ou retornarem para suas casas. Essas pessoas levam consigo dispositivos portáteis capazes de realizar conexões, como celulares e PDAs (*Personal digital assistant*).

Segundo Hossmann et al. (2011), o modelo representa um elemento importante da mobilidade humana definido como contextos. Essas informações simples de contexto (casas, escritórios, pontos de encontro de lazer) são úteis para a caracterização da estrutura social dos nós. Cada pessoa possui o seu horário de acordar definido, onde esta definição pode ocorrer de forma aleatória ou seguir alguma distribuição estatística. Nesse horário, as pessoas saem de casa e seguem para o trabalho de carro, ônibus ou mesmo a pé.

A duração do período trabalhado é configurável e durante esse tempo a movimentação das pessoas dentro do escritório é simulada, de forma que elas experimentem maiores oportunidades de conexão. Ao fim do dia, elas escolhem, a partir de uma probabilidade pré-definida, se seguem direto para casa ou para algum ponto de atividades noturnas. Ao final, elas seguem para casa. Em casa, não há simulação de movimentação o início de um novo dia, quando todo o ciclo se repete. Os parâmetros utilizados no cenário WD são apresentados na Tabela 5.

Todas as movimentações propostas pelo modelo acontecem dentro de um mapa. O cenário é dividido em pontos de encontros, ônibus, casas, escritórios e ruas. As relações sociais são formadas quando um grupo de pessoas esta realizando uma mesma atividade em um mesmo local. Pessoas que possuem carro utilizam somente esse meio de transporte durante todo o tempo simulado. Para o caso das demais pessoas, elas fazem o percurso de ônibus

Tabela 5: Parâmetros utilizados no cenário WD.

Parâmetros	A	B	C	D	E	F	G
Quantidade de Nós	50	15	30	30	30	50	50
Ônibus				2			
Tempo de parada/pausa dos ônibus nos pontos				10 a 30 (s)			
Probabilidade de cada nó possuir um carro				0,5			
Probabilidade de um nó fazer atividade de lazer após o trabalho				10 a 30 (s)			
Tamanho do grupo de atividade de lazer				1 a 10			
Tempo de trabalho diário				28800 (s)			
Tempo de pausa nos escritórios				10 a 100.000 (s)			
Tamanho do escritório				100X100 (m)			

caso a distância Euclidiana entre o ponto de origem e o ponto de ônibus mais perto, somado com a distância Euclidiana entre o destino e o ponto de ônibus mais perto seja menor que a distância Euclidiana entre origem e destino. Caso contrário, elas decidem realizar o percurso caminhando.

6.3.3 CENÁRIO ALEATÓRIO

Cenário que simula grupos de pessoas em movimento utilizando o padrão de mobilidade aleatório (ou RWP *RandomWaypoint*) (JOHNSON; MALTZ, 1996). O cenário está dividido em duas comunidades. Nos pontos de decisões, 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. Após chegar ao seu destino, o nó aguarda um período de tempo para, posteriormente, selecionar um novo destino e iniciar novamente o seu deslocamento. Este processo se repete até o término da simulação.

Os parâmetros utilizados no cenário RWP são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros utilizados no cenário RWP.

Parâmetros	A	B
Área	4500x73400m	
Quantidade de Nós	1600	
Bondes	2	

Nós selecionam um destino e uma velocidade entre 0,5-1,5 m/s, se movem até lá, esperam por um período de tempo de 100-200 segundos e, em seguida, selecionam o próximo

destino. Os bondes utilizam o modelo de mobilidade baseado em mapa que usa caminhos pré-determinados dentro da área do mapa (*MapRouteMovement*,) utilizando uma velocidade entre 7-10 m/s. Ao chegar ao seu destino, os trens esperam por um período de tempo de 10-30 segundos e, em seguida, encontram o caminho para o próximo ponto de passagem.

6.4 PARÂMETROS GERAIS DE SIMULAÇÃO

Para todos os cenários descritos anteriormente, as mensagens são configuradas com (TTL - *Time to Live*) de 600 minutos e têm tamanho igual a 500 kB. O alcance da comunicação é de 10 metros (*bluetooth*) e a velocidade de transmissão é de 250 kbps. A simulação tem duração de 800.000 segundos. Os primeiros 5.000 segundos de cada simulação representam o seu período transiente. Quando uma conexão nova for estabelecida, os protocolos cujos desempenhos estão sendo comparados tentam enviar suas mensagens de acordo com a sua política de roteamento.

Para a definição dos valores dos parâmetros do protocolo PSONET, foram realizadas simulações onde avaliou-se o desempenho tanto do simulador quando do novo protocolo. O parâmetro *nrRegistroHistorico* foi configurado para 100. O aumento deste parâmetro ocasiona em *overhead* na geração dos *p* melhores caminhos e conseqüentemente um *overhead* no processo de simulação de cada cenário, conforme apresentado na Figura 6.

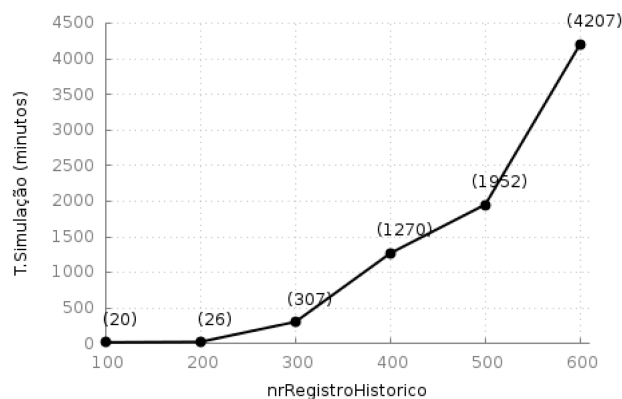


Figura 6: Tempo de duração de uma simulação de acordo com o *nrRegistroHistorico*.

Fonte: Autoria própria

Por exemplo, em uma simulação onde o parâmetro *nrRegistroHistorico* foi configurado para 100 registros o tempo de execução é ≈ 20 minutos, com 200 registros o tempo de execução de cada cenário foi de ≈ 26 minutos, para 300 registros ≈ 307 minutos (5 horas), 400 registros ≈ 1270 minutos (21 horas), 500 registros ≈ 1953 minutos (32 horas) e para 600

registros \approx 4207 minutos (70 horas).

O parâmetro *limiarConexoesPSO* foi configurado para 4 (contatos simultâneos) com base nas características dos modelos de mobilidade. O aumento deste valor faz com que o PSONET tenha um comportamento similar ao protocolo Epidêmico. Por fim, os parâmetros *nrCaminhos* e *nrIteracao* foram configurados para 5. O aumento dos valores dos parâmetros ocasiona em um tempo maior na otimização dos melhores caminhos, ocasionando assim a perda de oportunidades de envio de cada mensagem.

A Tabela 7 resume os principais parâmetros de simulação utilizados nos cenários PoI, WD e RWP. Os parâmetros de simulação do PROPHET foram obtidos de (LINDGREN et al., 2003).

Tabela 7: Parâmetros utilizados para os cenários RWP, PoI e WD.

Protocolo	Parâmetros	PoI	WD	RWP
Todos	Número de Nós	160	339	3202
	Área (m^2)	8.800X7.800	10.000X8.000	4.500X3.400
	Velocidade dos Nós (metros/segundos)	0,5-1,5	0,8-1,4 (pedestres), 7-10 (carros e ônibus)	7-10 (Bonde), 0,5-1,5 (pedestres)
	Tempo de pausa nos destinos (segundos)	100-200(Grupos A1 a D2), 4000-5000 (Grupos A2 a D2)	300-500 (Grupo H), 10-30(Ônibus)	100-200(Pedestres) , 10-30(Bonde)
	Taxa de geração de mensagens (segundos)	50-90	100-150	25-35
	TTL das mensagens (minutos)	{300,600,900,1200,1500}		
	Tamanho do <i>Buffer</i> (MB)	{4,8,12,16,20}		
	Duração da simulação (segundos)	800000		
	Período Transiente	5000		
	Número de simulações	30		
PSONET	Números de Registros do Histórico (nrRegistroHistorico)	100		
	Número de Iterações (nrIteracao)	5		
	Números de Conexões (limiarConexoesPSO)	4		
	Número de Caminhos PSO (<i>nrCaminhos</i>)	5		
PROPHET	P_{mic}	0,75		
	γ	0,98		
	Uma unidade de tempo (<i>Unit</i>) (segundos)	30		
	ϕ	0,25		

Os resultados apresentados mostram valores médios de 30 execuções e intervalo de confiança de 95%.

6.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO PSONET

A presente seção analisa o desempenho do protocolo PSONET nos cenários PoI, WD e RWP. Os resultados obtidos são comparados com os resultados dos protocolos Epidêmico e PROPHET. Nestes experimentos são considerados tamanhos diferentes de *buffer* e valores diferentes para o TTL das mensagens.

6.5.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO PARA VARIAÇÃO NO TAMANHO DO *BUFFER*

A Figura 7 mostra a Taxa de Entrega das mensagens em relação à variação do tamanho de *buffer* para os três protocolos com o valor de TTL de 600 minutos.

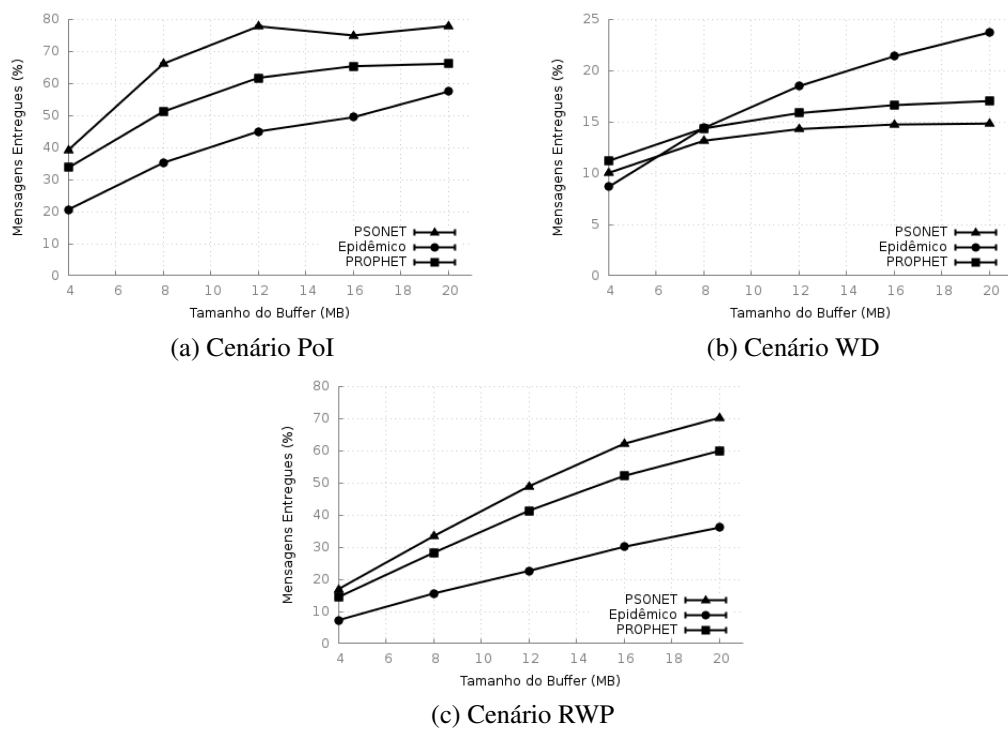


Figura 7: Taxa de Entrega de mensagens variando o tamanho do *Buffer*.

Observa-se que todos os protocolos apresentam melhor desempenho conforme o tamanho do *buffer* é incrementado em todos os cenários simulados. Isso ocorre porque quanto maior o tamanho do *buffer*, mais mensagens podem ser armazenadas, reduzindo assim o risco de descarte de mensagens.

Por exemplo, no cenário PoI para o tamanho de *buffer* de 20MB, o PSONET alcançou a Taxa de Entrega de $78\% \pm 0,05\%$. O protocolo PROPHET apresentou a Taxa de Entrega de $67\% \pm 0,01\%$ e o Epidêmico $58\% \pm 0,03\%$, conforme apresentado na Figura 7a. No cenário RWP para o tamanho *buffer* de 20MB, o PSONET alcançou a Taxa de Entrega de

70% \pm 0,01%. O protocolo PROPHET apresentou a Taxa de Entrega de 60% \pm 0,02% e o Epidêmico 36% \pm 0,06%, conforme apresentado na Figura 7c. Por fim, no cenário WD para o tamanho *buffer* de 20MB, o PSONET alcançou a Taxa de Entrega de 15% \pm 0,02%. O protocolo PROPHET apresentou a Taxa de Entrega de 17% \pm 0,03% e o Epidêmico 24% \pm 0,02%, conforme apresentado na Figura 7b. Neste cenário todos os protocolos apresentaram um baixo desempenho quando comparado com os resultados apresentados no cenário anterior (PoI) devido ao particionamento da rede, isto é, a quantidade de nós utilizados na simulação não foi o suficiente para cobrir a área utilizada, formando assim “ilhas” de conexões. Como consequência, observa-se na Tabela 10 (Apêndice A.4) um baixo número de Transmissões Iniciadas.

Destaca-se que os resultados alcançados pelo PSONET nos cenários PoI e RWP são atribuídos à utilização do conhecimento da rede obtido através do *Histórico de Contatos*. Como mencionado nas seções anteriores, a utilização do *Histórico de Contatos* possibilita ao protocolo a geração dos k melhores caminhos entre o nó e o destino da mensagem quando há uma oportunidade de envio de mensagem. Estes caminhos por sua vez são otimizados através da técnica de otimização de partículas (PSO), selecionando assim apenas os melhores encaminhadores de mensagens.

As Figuras 8 e 9 apresentam a Relação de Redundância em relação à variação do tamanho do *buffer* das mensagens com o valor de TTL de 600 minutos.

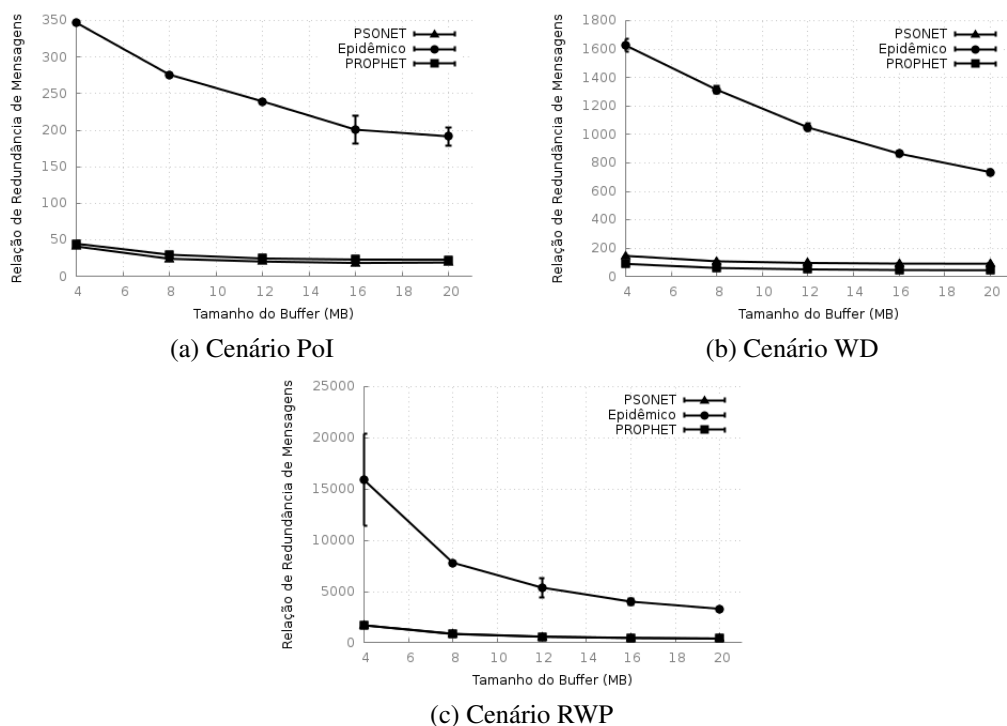


Figura 8: Relação de Redundância de Mensagens Variando o Tamanho do Buffer.

Observa-se que quanto maior o tamanho do *buffer*, menor a Relação de Redundância obtida pelos protocolos. Isso ocorre porque quanto maior o tamanho do *buffer*, maior o número de mensagens armazenadas, reduzindo assim o risco de descarte de mensagens. Um número maior de mensagens são entregues, diminuindo assim a necessidade de replicação de mensagens.

Por exemplo, no cenário PoI com tamanho de *buffer* de 20MB, o PSONET apresentou a Relação de Redundância de $19,33 \pm 1,28\%$. O protocolo PROPHET gerou a Relação de Redundância de $23,08 \pm 0,07\%$ e o Epidêmico $191,74 \pm 12,76\%$, conforme apresentado na Figura 8a. No cenário WD para o tamanho de *buffer* de 20MB, o PSONET apresentou a Relação de Redundância de $91,97 \pm 1,01\%$. O protocolo PROPHET gerou a Relação de Redundância de $46,10 \pm 0,45\%$ e o Epidêmico $735,89 \pm 16,86\%$, conforme apresentado na Figura 8b. Por fim, no cenário RWP para o tamanho de *buffer* de 20MB, o PSONET apresentou a Relação de Redundância de $411,13 \pm 9,34\%$. O protocolo PROPHET gerou a Relação de Redundância de $418,21 \pm 14,16\%$ e o Epidêmico $3309,59 \pm 53,54\%$, conforme apresentado na Figura 8c.

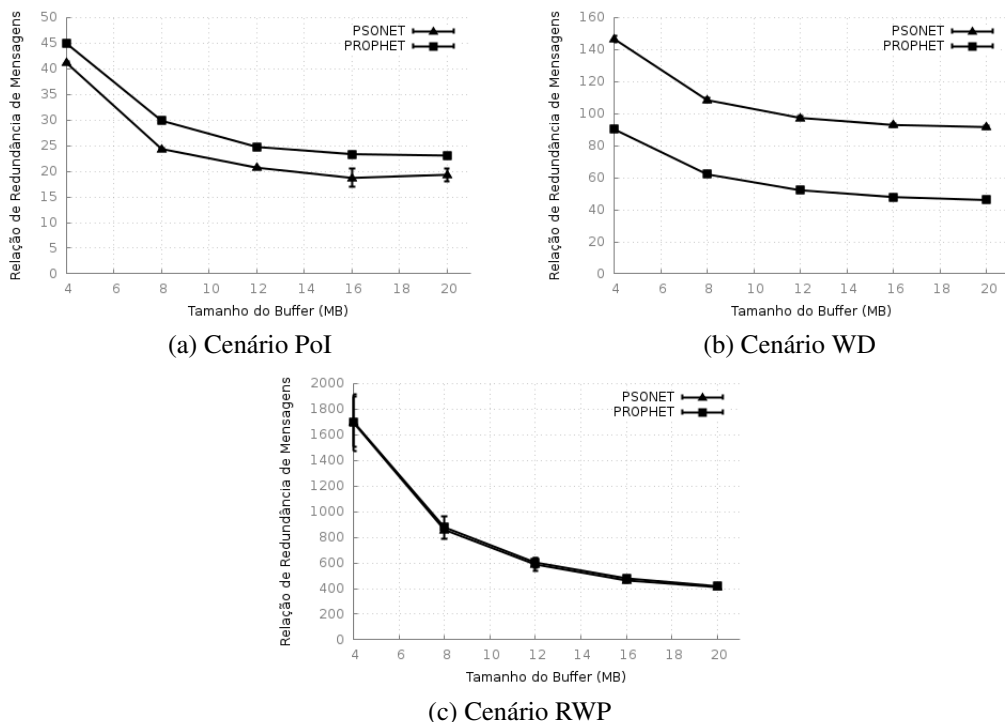


Figura 9: Relação de Redundância de Mensagens PSONET e PROPHET.

Os protocolos PSONET e PROPHET apresentaram uma relação menor de redundância de mensagens comparado com o protocolo Epidêmico devido ao 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. A Figura 9 apresenta a Relação de Redundância entre protocolos PSONET e

PROPHET, os valores apresentados são os mesmos já exibidos na Figura 8, porém excluindo os valores do protocolo Epidêmico.

Observa-se que o PSONET gerou uma baixa relação de redundância de mensagens nos cenários PoI e RWP. 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.

6.5.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO PARA VARIAÇÃO DO TTL DAS MENSAGENS

A Figura 10 apresenta a Taxa de Entrega de mensagens em relação à variação do TTL das mensagens, com um tamanho de *buffer* de 4 MB.

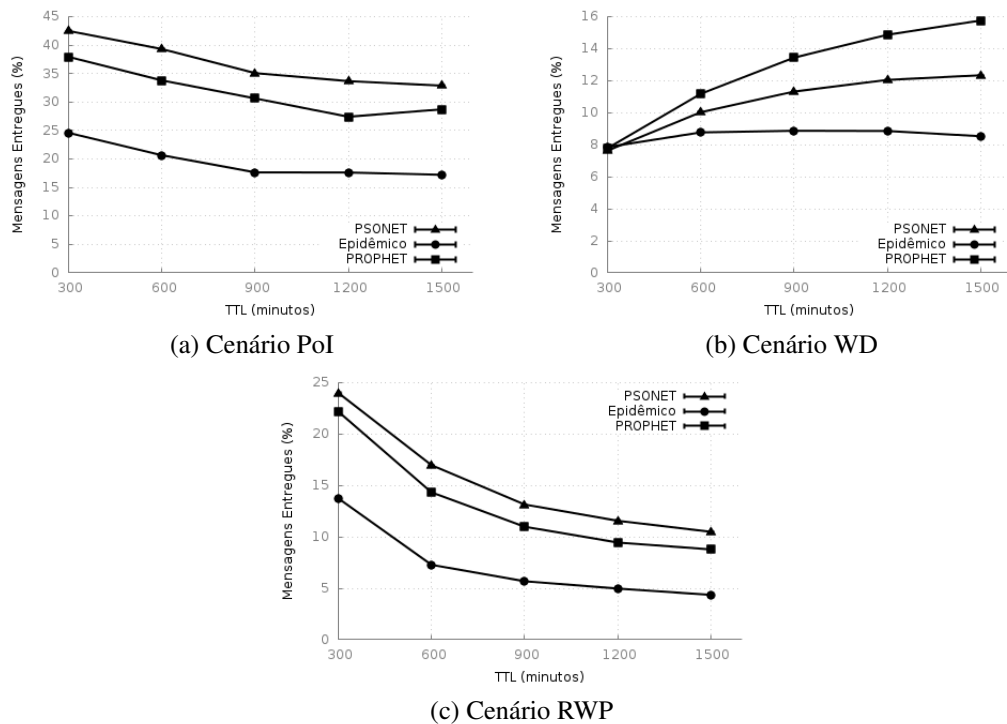


Figura 10: Taxa de Entrega de mensagens variando o TTL das mensagens.

Nos cenários PoI e RWP, quanto maior o TTL da mensagem, menor a Taxa de Entrega. Isso pode ser explicado pelo fato de que o aumento do TTL das mensagens permite um tempo maior de armazenamento das mesmas no *buffer*, impedindo que outras mensagens que ainda não foram entregues cheguem em seus destinos. No cenário WD, ocorre um comportamento contrário devido a falta de conectividade já discutida anteriormente, neste caso o aumento do TTL permite um tempo maior de espera até o surgimento de uma oportunidade de envio da mensagem.

Por exemplo, no cenário PoI para o TTL de 300 minutos, o PSONET alcançou a

Taxa de Entrega de $43\% \pm 0,001\%$. O protocolo PROPHET apresentou a Taxa de Entrega de $38\% \pm 0,001\%$ e o Epidêmico $25\% \pm 0,01\%$, conforme apresentado na Figura 10a. No cenário WD para para o TTL de 1500 minutos, o PSONET alcançou a Taxa de Entrega de $13\% \pm 0,01\%$. O protocolo PROPHET apresentou a Taxa de Entrega de $16\% \pm 0,01\%$ e o Epidêmico $8\% \pm 0,01\%$, conforme apresentado na Figura 10b. Por fim, no cenário RWP para o TTL de 300 minutos, o PSONET alcançou a Taxa de Entrega de $24\% \pm 0,02\%$. O protocolo PROPHET apresentou a Taxa de Entrega de $22\% \pm 0,01\%$ e o Epidêmico $14\% \pm 0,03\%$, conforme apresentado na Figura 10c.

Novamente, os resultados alcançados pelo PSONET nos cenários PoI e RWP são atribuídos à utilização do conhecimento da rede obtido através do *Histórico de Contatos*.

A Figura 11 apresenta a Relação de Redundância em relação à variação do TTL das mensagens, com um tamanho de *buffer* de 4 MB.

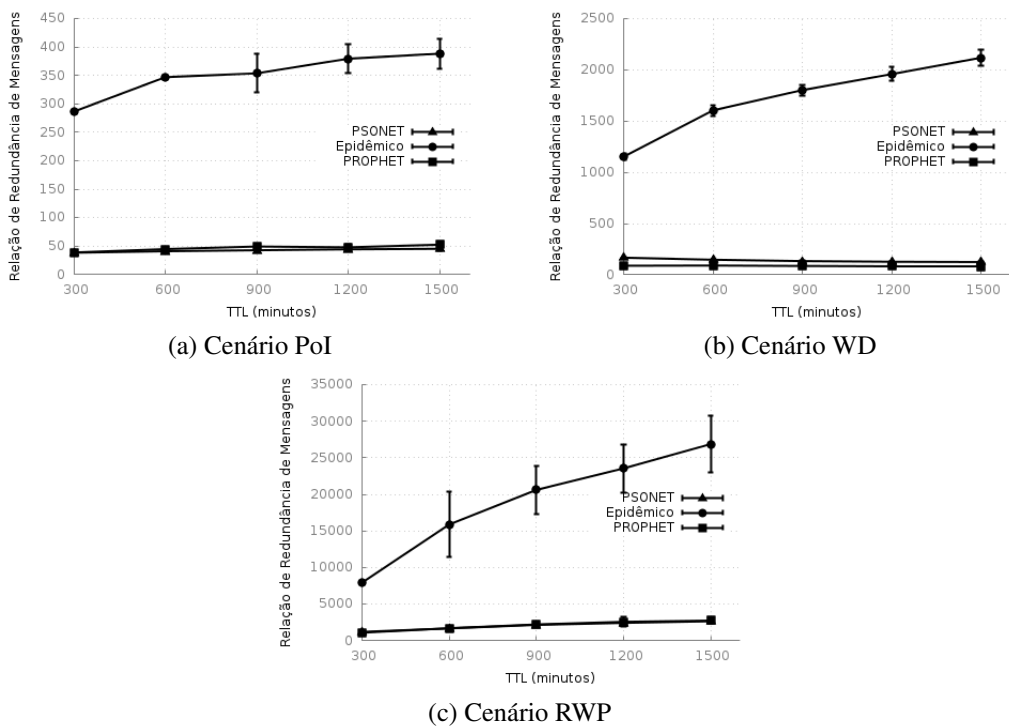


Figura 11: Relação de Redundância variando o TTL das mensagens.

A medida que o TTL das mensagens aumenta, a Relação de Redundância tende a se manter constante para os protocolos PSONET e PROPHET.

Por exemplo, no cenário PoI para o TTL de 1500 minutos, o PSONET gerou uma Relação de Redundância de $45,43 \pm 3,02\%$. O protocolo PROPHET gerou uma Relação de Redundância de $52,59 \pm 0,23$ e o Epidêmico $388,15 \pm 25,92$, conforme apresentado na Figura 11a. No cenário WD para o TTL de 1500 minutos, o PSONET gerou uma Relação de

Redundância de $124,81 \pm 2,36\%$. O protocolo PROPHET gerou uma Relação de Redundância de $81,92 \pm 1,08$ e o Epidêmico $2118,32 \pm 75,64$ conforme apresentado na Figura 11b. Por fim, no cenário RWP para o TTL de 1500 minutos, o PSONET gerou uma Relação de Redundância de $2678,92 \pm 2,34\%$. O protocolo PROPHET gerou uma Relação de Redundância de $2760,73 \pm 1,19$ e o Epidêmico $26877,41 \pm 20,33$, conforme apresentado na Figura 11c.

A Figura 12 apresenta a Relação de Redundância em relação à variação do TTL das mensagens para os protocolos PSONET e PROPHET, os valores apresentados são os mesmos já exibidos na Figura 11, porém excluindo os valores do protocolo Epidêmico.

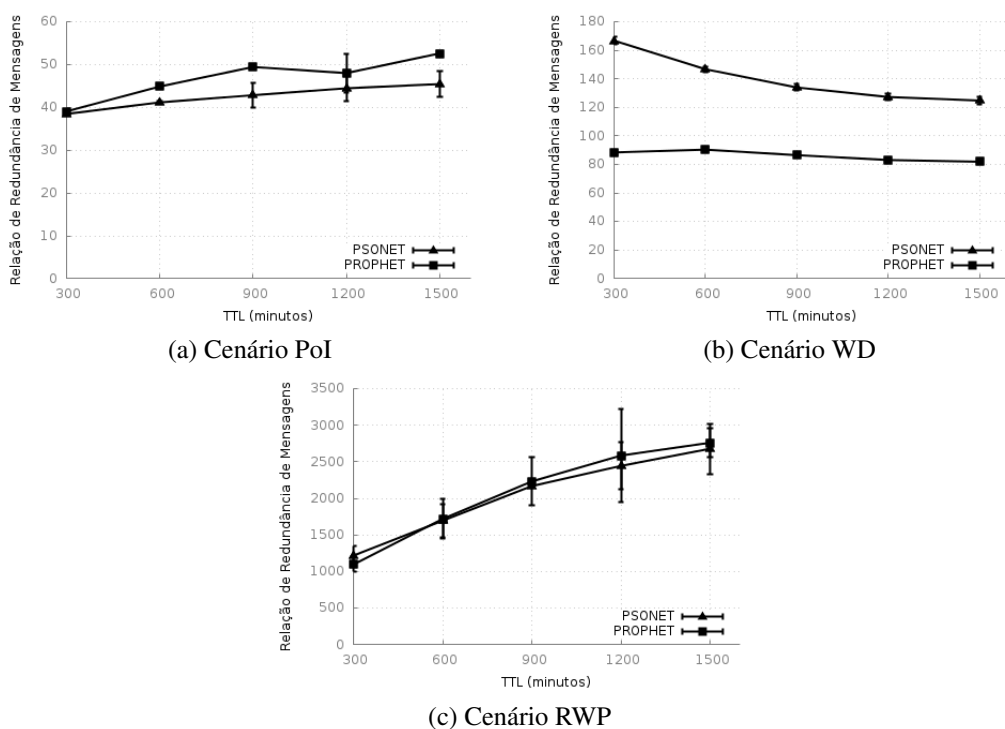


Figura 12: Relação de Redundância entre PSONET e PROPHET.

O PSONET gerou uma menor Relação de Redundância para os cenários PoI e RWP. Isso pode ser explicado pelo fato do PSONET utilizar um conjunto de métricas que permitam identificar se a rede está densa ou esparsa e, então, selecionar melhor o(s) encaminhador(es) de mensagens.

7 CONCLUSÕES

Essa dissertação apresentou um novo protocolo de roteamento para OPNETs no qual as previsões de conectividade dos nós são utilizadas para determinar os melhores encaminhadores de mensagens. O protocolo apresentado é chamado PSONET (*PSO for Opportunistic Networks*), uma vez que faz uso de um sistema adaptativo que agrega vantagens de um algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) e um conjunto de métricas associadas às redes oportunistas. O objetivo é realizar buscas locais e globais em um ambiente dinâmico por meio da análise e coleta de informações sobre os contatos realizados pelos nós. Com estas informações é possível encaminhar as mensagens para os nós mais promissores melhorando o percentual de entrega de mensagens e limitando o número de réplicas de mensagens.

As simulações realizadas mostraram que o protocolo proposto supera os protocolos PROPHET e Epidêmico em termos de percentual de entrega de mensagens e relação de mensagens replicadas nos cenários de simulação PoIs (*Points of Interest*) e RWP (*Random Waypoint*). No modelo PoI com *buffer* de 20 MB e TTL de 600 minutos, por exemplo, o protocolo PSONET é capaz de atingir um maior percentual de entrega de mensagens (ganho de 11% quando comparado ao protocolo PROPHET e 20% quando comparado como o Epidêmico) e replicar menos mensagens (2% menos que o PROPHET e 88% menos que o Epidêmico). Já no modelo RWP com *buffer* de 20 MB e TTL de 600 minutos, o protocolo PSONET é capaz de atingir um maior percentual de entrega de mensagens (ganho de 10% quando comparado ao protocolo PROPHET e 34% quando comparado como o Epidêmico) e replicar menos mensagens (1% menos que o PROPHET e 87% menos que o Epidêmico).

Esse desempenho nos dois ambientes de simulação é devido à capacidade do protocolo obter informações sobre a conectividade dos nós e se adaptar às condições de comunicação da rede, caracterizando assim um comportamento adaptativo. Ao fazer uso das informações armazenadas no *HistoricodeContatos*, como idade do contato, frequência de contatos e duração do contato, o protocolo PSONET é capaz de identificar os melhores caminhos para envio das mensagens. Por isso, ao otimizar estas informações através do PSO o protocolo PSONET é capaz de otimizar o encaminhamento de mensagens na rede.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

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.

Outro aspecto importante a ser estudado é a análise do custo de operação do protocolo, isto é, avaliar o custo da troca do *Histórico de Contatos* e a criação/atualização dos grafos de conectividades para a inicialização das partículas do PSO.

Por fim, sugere-se a avaliação de desempenho do protocolo em cenários que utilizem traços reais.

REFERÊNCIAS

- AGUSSALIM; TSURU, M. **Metric description of The One Simulator reports**. 2015. Disponível em: <<http://agoes.web.id/metric-description-from-simulator/>>.
- ALLIANCE, W. **Wi-Fi peer-to-peer (P2P) technical specification**. [S.l.], 2010. Disponível em: <www.wi-fi.org/Wi-Fi_Direct.php>.
- BELLMAN, R. On a routing problem. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 16, p. 87–90, 1958.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. **Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems**. New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc., 1999. ISBN 0-19-513159-2.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. Inspiration for optimization from social insect behavior. **Nature**, v. 406, p. 39–42, 2000.
- BURGESS, J. et al. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In: **INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–11. ISSN 0743-166X.
- BURLEIGH, S. et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary internet. **Communications Magazine, IEEE**, v. 41, n. 6, p. 128–136, June 2003. ISSN 0163-6804.
- BURNS, B.; BROCK, O.; LEVINE, B. Mv routing and capacity building in disruption tolerant networks. In: **INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 398–408 vol. 1. ISSN 0743-166X.
- CASTRO, L. N. D. **Fundamentals of natural computing: basic concepts, algorithms, and applications**. Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall/CRC, 2006. (Computer and Information Science Series). ISBN 1-58488-643-9.
- CERF, V. et al. **Delay-Tolerant Networking Architecture**. IETF, April 2007. RFC 4838 (Informational). (Request for Comments, 4838). Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc4838.txt>>.
- CHAKCHOUK, N. A survey on opportunistic routing in wireless communication networks. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, PP, n. 99, p. 1–1, 2015. ISSN 1553-877X.
- COLORNI, A.; DORIGO, M.; MANIEZZO, V. Distributed optimization by ant colonies. In: VARELA, F. J.; BOURGINE, P. (Ed.). **Towards a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life**. Cambridge, MA: MIT Press, 1992. p. 134–142.

DALY, E. M.; HAAHR, M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant manets. In: **Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing**. New York, NY, USA: ACM, 2007. (MobiHoc '07), p. 32–40. ISBN 978-1-59593-684-4.

DENEUBOURG, J.-L. et al. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. **Journal of Insect Behavior**, Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, v. 3, n. 2, p. 159–168, 1990. ISSN 0892-7553.

DHURANDHER, S. et al. Routing protocols in infrastructure-less opportunistic networks. In: WOUNGANG, I. et al. (Ed.). **Routing in Opportunistic Networks**. [S.l.]: Springer New York, 2013. p. 353–382. ISBN 978-1-4614-3513-6.

DORIA, A. Providing connectivity to the saami nomadic community. In: **In Proc. 2nd Int. Conf. on Open Collaborative Design for Sustainable Innovation**. [S.l.: s.n.], 2002.

DORIGO, M.; CARO, G. D.; GAMBARDELLA, L. M. Ant algorithms for discrete optimization. **Artif. Life**, MIT Press, Cambridge, MA, USA, v. 5, n. 2, p. 137–172, abr. 1999. ISSN 1064-5462.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS-PART B**, v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996.

EKMAN, F. et al. Working day movement model. In: **Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE Workshop on Mobility Models**. New York, NY, USA: ACM, 2008. (MobilityModels '08), p. 33–40. ISBN 978-1-60558-111-8.

EPPSTEIN, D. Finding the k shortest paths. In: **Foundations of Computer Science, 1994 Proceedings., 35th Annual Symposium on**. [S.l.: s.n.], 1994. p. 154–165.

FALL, K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In: **Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications**. New York, NY, USA: ACM, 2003. (SIGCOMM '03), p. 27–34. ISBN 1-58113-735-4.

GRASSÉ, P. P. La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *Bellicositermes Natalensis* et *Cubitermes* sp. La théorie de la stigmergie: essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. **Insectes Sociaux**, v. 6, p. 41–81, 1959.

GROSSGLAUSER, M.; TSE, D. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. **Networking, IEEE/ACM Transactions on**, v. 10, n. 4, p. 477–486, Aug 2002. ISSN 1063-6692.

HAARTSEN, J. et al. Bluetooth: Vision, goals, and architecture. **SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 2, n. 4, p. 38–45, out. 1998. ISSN 1559-1662.

HOSSMANN, T.; SPYROPOULOS, T.; LEGENDRE, F. Putting contacts into context: Mobility modeling beyond inter-contact times. In: **Proceedings of the Twelfth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing**. New York, NY, USA: ACM, 2011. (MobiHoc '11), p. 18:1–18:11. ISBN 978-1-4503-0722-2.

HUANG, C.-M.; LAN, K.-c.; TSAI, C.-Z. A survey of opportunistic networks. In: **Proceedings of the 22Nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications - Workshops**. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008. (AINAW '08), p. 1672–1677. ISBN 978-0-7695-3096-3.

HUI, P. et al. Pocket switched networks and human mobility in conference environments. In: **Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking**. New York, NY, USA: ACM, 2005. (WDTN '05), p. 244–251. ISBN 1-59593-026-4.

HUI, P.; CROWCROFT, J.; YONEKI, E. Bubble rap: Social-based forwarding in delay-tolerant networks. **Mobile Computing, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 11, p. 1576–1589, Nov 2011. ISSN 1536-1233.

JAIN, S.; FALL, K.; PATRA, R. Routing in a delay tolerant network. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 34, n. 4, p. 145–158, ago. 2004. ISSN 0146-4833.

JAYAKUMAR, G.; GANAPATHI, G. Reference point group mobility and random waypoint models in performance evaluation of manet routing protocols. **J. Comp. Sys., Netw., and Comm.**, Hindawi Publishing Corp., New York, NY, United States, v. 2008, p. 13:1–13:10, jan. 2008. ISSN 1687-7381.

JOHNSON, D.; MALTZ, D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: IMIELINSKI, T.; KORTH, H. (Ed.). **Mobile Computing**. [S.l.]: Springer US, 1996, (The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, v. 353). p. 153–181. ISBN 978-0-7923-9697-0.

JONES, E. et al. Practical routing in delay-tolerant networks. **Mobile Computing, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 8, p. 943–959, Aug 2007. ISSN 1536-1233.

JUANG, P. et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with zebrantet. **SIGARCH Comput. Archit. News**, ACM, New York, NY, USA, v. 30, n. 5, p. 96–107, out. 2002. ISSN 0163-5964.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: **Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948 vol.4.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C.; SHI, Y. **Swarm Intelligence**. San Francisco: Morgan Kaufman, 2001. (Evolutionary Computation Series).

KEPHART, J.; CHESS, D. The vision of autonomic computing. **Computer**, v. 36, n. 1, p. 41–50, Jan 2003. ISSN 0018-9162.

KERÄNEN, A.; OTT, J.; KÄRKKÄINEN, T. 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. ISBN 978-963-9799-45-5.

KERÄNEN, A.; OTT, J.; KÄRKKÄINEN, T. Simulating mobility and dtns with the one (invited paper). **Journal of Communications**, v. 5, n. 2, 2010.

KULKARNI, R.; VENAYAGAMOORTHY, G. Particle swarm optimization in wireless-sensor networks: A brief survey. **Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on**, v. 41, n. 2, p. 262–267, March 2011. ISSN 1094-6977.

- LA, R. J.; RANJAN, P. 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. p. 1–7.
- LEBRUN, J. et al. Knowledge-based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks. In: **Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring, 2005 IEEE 61st**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 4, p. 2289–2293 Vol. 4. ISSN 1550-2252.
- LEGUAY, J. et al. Opportunistic content distribution in an urban setting. In: **Proceedings of the 2006 SIGCOMM Workshop on Challenged Networks**. New York, NY, USA: ACM, 2006. (CHANTS '06), p. 205–212. ISBN 1-59593-572-X.
- LINDGREN, A.; DORIA, A.; SCHELÉN, O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. **SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 7, n. 3, p. 19–20, jul. 2003. ISSN 1559-1662.
- MASSRI, K.; VERNATA, A.; VITALETTI, A. Routing protocols for delay tolerant networks: A quantitative evaluation. In: **Proceedings of the 7th ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks**. New York, NY, USA: ACM, 2012. (PM2HW2N '12), p. 107–114. ISBN 978-1-4503-1626-2.
- MILLONAS, M. M. Swarms, phase transitions, and collective intelligence. **Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity**, Addison-Wesley Publishing, v. 17, p. 417–417, 1994.
- MITRA, P.; POELLABAUER, C. Opportunistic routing in mobile ad hoc networks. In: WOUNGANG, I. et al. (Ed.). **Routing in Opportunistic Networks**. [S.l.]: Springer New York, 2013. p. 145–178. ISBN 978-1-4614-3513-6.
- MOREIRA, W. et al. Socialdtn: A dtn implementation for digital and social inclusion. In: **in Proc. of ACM LCDNET**. [S.l.: s.n.], 2013.
- MUSOLESI, M.; HAILES, S.; MASCOLO, C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks. In: **World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005. Sixth IEEE International Symposium on a**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 183–189.
- OMIDVAR, A.; MOHAMMADI, K. Particle swarm optimization in intelligent routing of delay-tolerant network routing. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, Springer International Publishing, v. 2014, n. 1, 2014.
- PATEL, D. et al. A survey of reactive routing protocols in manet. In: **Information Communication and Embedded Systems (ICICES), 2014 International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- PELUSI, L.; PASSARELLA, A.; CONTI, M. Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks. **Communications Magazine, IEEE**, v. 44, n. 11, p. 134–141, November 2006. ISSN 0163-6804.
- PENTLAND, A.; FLETCHER, R.; HASSON, A. Daknet: rethinking connectivity in developing nations. **Computer**, v. 37, n. 1, p. 78–83, Jan 2004. ISSN 0018-9162.
- PHANSE, K. S.; NYKVIST, J. Opportunistic wireless access networks. In: **Proceedings of the 1st International Conference on Access Networks**. New York, NY, USA: ACM, 2006. (AccessNets '06). ISBN 1-59593-513-4.

ROSATI, L.; BERIOLI, M.; REALI, G. On ant routing algorithms in ad hoc networks with critical connectivity. **Ad Hoc Networks**, v. 6, n. 6, p. 827–859, 2008.

SMALL, T.; HAAS, Z. J. The shared wireless infostation model: A new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way). In: **Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing**. New York, NY, USA: ACM, 2003. (MobiHoc '03), p. 233–244. ISBN 1-58113-684-6.

SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K.; RAGHAVENDRA, C. Single-copy routing in intermittently connected mobile networks. In: **Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 235–244.

SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K.; RAGHAVENDRA, C. S. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: **Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking**. New York, NY, USA: ACM, 2005. (WDTN '05), p. 252–259. ISBN 1-59593-026-4.

TCHAKOUNTIO, F.; RAMANATHAN, R. Anticipatory routing for highly mobile endpoints. In: **Mobile Computing Systems and Applications, 2004. WMCSA 2004. Sixth IEEE Workshop on**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 94–100. ISSN 1550-6193.

TOOFANI, A. Article: Solving routing problem using particle swarm optimization. **International Journal of Computer Applications**, v. 52, n. 18, p. 16–18, August 2012. Published by Foundation of Computer Science, New York, USA.

VAHDAT, A.; BECKER, D. **Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks**. [S.l.], 2000.

VENDRAMIN, A. C. B. K. et al. CGrAnt: a swarm intelligence-based routing protocol for delay tolerant networks. In: **Proceedings of the 2012 Genetic and Evolutionary Computation Conference**. Philadelphia, USA: [s.n.], 2012. p. 33–40.

VENDRAMIN, A. C. K. et al. GrAnt: inferring best forwarders from complex networks' dynamics through a greedy ant colony optimization. **Comput. Netw.**, Elsevier North-Holland, Inc., New York, NY, USA, v. 56, n. 3, p. 997–1015, 2012. ISSN 1389-1286.

ZHANG, M.-W.; SUN, X.-M.; LV, X.-Y. 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. p. V12–198–V12–201.

APÊNDICE A – RESULTADOS COMPLETOS

A.1 DESCRIÇÃO DAS MÉTRICAS DO RELATÓRIO DO THE ONE

Os relatórios são os agrupamentos de dados gerados a partir da simulação. Eles fornecem estatísticas essenciais para a interpretação e análise dos diferentes cenários construídos. A avaliação dos protocolos apresentados nesta dissertação foi realizada com base nos dados fornecidos pelo relatório MessageStatsReport disponível no simulador. Segundo Agussalim e Tsuru (2015) as métricas apresentadas pelo relatório podem ser definidas como:

- **Mensagens criadas:** número de mensagens criadas durante a simulação, não inclui mensagens replicadas;
- **Transmissões iniciadas:** número de transmissões iniciadas entre os nós da rede conforme a Equação (13).

$$T_{iniciadas} = T_{concluidas} + T_{abortadas}, \quad (13)$$

onde, $T_{iniciadas}$ refere-se ao número de transmissões que ocorreram independente do sucesso, isto é inclui o número de mensagens encaminhadas com sucesso ($T_{concluidas}$) e o número de mensagens com falha de entrega $T_{abortadas}$;

- **Transmissões concluídas:** número de transmissões com sucesso entre os nós;
- **Transmissões abortadas:** número de transmissões abortadas entre os nós devido a desconexão durante o processo de encaminhamento;
- **Mensagens descartadas:** número de mensagens descartadas quando o *buffer* está cheio. O descarte ocorre quando uma nova mensagem chega;
- **Mensagens apagadas:** mensagens removidas do *buffer* por alguma razão definida pelo protocolo, exemplo a entrega da mensagem ao seu destino final;

- **Mensagens entregues:** número de mensagens entregues ao destino final da mensagem;
- **Probabilidade de entrega:** taxa de entrega de mensagens ou probabilidade de entrega da mensagem, representa o percentual de mensagens criadas ($M_{criadas}$) que o protocolo é capaz de entregar ao seu destino ($M_{entregues}$) durante a simulação de acordo com a Equação (14).

$$Prob. Entregue = \frac{1.0 * M_{entregues}}{M_{criadas}}; \quad (14)$$

- **Redundância:** relação de redundância de mensagens ou sobrecarga, apresenta a relação entre o número de réplicas de mensagens propagadas na rede ($M_{replicadas}$) e o número de mensagens entregues ao destino final ($M_{entregues}$), definido pela Equação (15).

$$Redundância = \frac{M_{replicadas} - M_{entregues}}{M_{entregues}} \quad (15)$$

- **Latência \bar{X} :** tempo médio entre a criação e a entrega da mensagem;
- **Latência m :** mediana do tempo médio;
- **Nr.Saltos \bar{X} :** média do número de saltos (*hops*) percorridos por uma mensagem para alcançar o destino final;
- **Nr.Saltos m :** mediana do Nr.Saltos;
- **buffertime \bar{X} :** tempo médio que uma mensagem fica no *buffer* de um nó;
- **buffertime m :** mediana do tempo médio que uma mensagem fica no *buffer*;

A.2 CENÁRIO POI - *BUFFER*

Tabela 8: Cenário POI: Resultados completos (*Buffer*).

Protocolo	Buffer	Mensagens criadas	Transmissões iniciadas	Transmissões concluídas	Transmissões abortadas	Mensagens descartadas	Mensagens apagadas	Mensagens entregues	Prob. Entrega(%)	Redundância	Latência \bar{X}	Latência m	Nr.Saltos \bar{X}	Nr.Saltos m	buffertime \bar{X}	buffertime m
PSOINET	4MB	11.451	192.504	189.051	3.453	180.774	14064	4486	39,18	41,14	12.293,72	10.189,90	4,22	3,00	4.752,68	3.699,90
	8MB	11.451	195.005	191.554	3.451	166.821	26467	7574	66,14	24,29	15.474,62	14.386,00	2,81	2,00	8.496,33	7.100,90
	12MB	11.451	196.160	192.708	3.451	160.311	32343	8875	77,50	20,71	16.719,11	16.307,45	2,38	2,00	10.440,71	8.406,40
	16MB	11.451	196.463	193.016	3.447	158.744	33721	9187	80,23	20,01	17.093,29	16.801,80	2,29	2,00	10.948,81	8.371,25
	20MB	11.451	196.602	193.156	3.446	158.620	34035	9216	80,48	19,96	17.210,85	17.044,25	2,29	2,00	11.063,80	8.387,55
EpidemicRouter	4MB	11.451	922.537	820.334	102.201	814.911	13328	2327	20,32	351,54	10.325,64	7.864,65	10,77	8,00	1.108,68	603,75
	8MB	11.451	1.260.468	1.115.200	145.265	1.092.203	28030	4059	35,45	273,72	12.025,91	9.970,80	9,30	7,00	1.604,92	935,75
	12MB	11.451	1.386.083	1.233.539	152.541	1.194.055	42303	5132	44,82	239,34	12.734,87	11.195,15	7,71	6,00	2.165,88	1.351,30
	16MB	11.451	1.460.694	1.304.762	155.929	1.248.196	57392	6052	52,86	214,57	12.976,28	11.657,45	6,58	6,00	2.718,72	1.785,45
	20MB	11.451	1.507.876	1.350.256	157.616	1.277.586	71631	6764	59,07	198,63	13.239,93	12.087,25	5,84	5,00	3.257,84	2.232,10
ProphetRouter	4MB	11.451	179.117	177.154	1.962	161.942	21649	3852	33,64	44,99	11.147,42	9.132,40	2,38	2,00	4.872,40	3.329,10
	8MB	11.451	182.848	180.738	2.110	146.060	38158	5908	51,59	29,59	14.023,91	12.442,00	2,02	2,00	8.496,42	6.480,20
	12MB	11.451	183.939	181.766	2.173	137.302	46307	7075	61,79	24,69	15.480,16	14.329,70	1,85	2,00	10.448,96	7.913,95
	16MB	11.451	184.141	181.937	2.204	134.893	48392	7457	65,12	23,40	16.006,53	15.125,65	1,81	2,00	11.063,64	8.117,80
	20MB	11.451	184.103	181.919	2.184	134.687	48512	7538	65,83	23,13	16.120,98	15.246,10	1,81	2,00	11.171,65	8.101,75

A.3 CENÁRIO POI - TTL

Tabela 9: Cenário POI: Resultados completos (TTL).

Protocolo	TTL	Mensagens criadas	Transmissões iniciadas	Transmissões concluídas	Transmissões abortadas	Mensagens descartadas	Mensagens apagadas	Mensagens entregues	Prob. Entrega(%)	Redundância	Latência \bar{X}	Latência m	Nr.Saltos \bar{X}	Nr.Saltos m	buffertime \bar{X}	buffertime m
PSOINET	300	11.451	194.807	191.319	3.488	183.650	13.280	4.809	42,00	38,78	8.925,65	8.831,60	3,41	3,00	4.027,85	3.102,05
	600	11.451	192.504	189.051	3.453	180.774	14.064	4.486	39,18	41,14	12.293,72	10.189,90	4,22	3,00	4.752,68	3.699,90
	900	11.451	191.057	187.627	3.430	179.523	14.197	4.126	36,04	44,47	12.983,90	9.811,05	4,44	3,00	4.894,59	3.856,70
	1200	11.451	190.290	186.876	3.414	179.213	13.892	3.965	34,62	46,14	12.941,82	9.395,10	4,48	3,00	4.943,78	3.912,05
	1500	11.451	189.773	186.366	3.407	178.623	14.053	3.873	33,83	47,11	12.930,48	9.377,10	4,46	3,00	4.957,13	3.931,80
EpidemicRouter	300	11.451	902.496	805.160	97.334	798.863	13.833	2.777	24,25	288,88	7.865,50	7.354,50	8,92	7,00	1.091,19	617,45
	600	11.451	922.537	820.334	102.201	814.911	13.328	2.327	20,32	351,54	10.325,64	7.864,65	10,77	8,00	1.108,68	603,75
	900	11.451	922.624	819.866	102.756	814.713	13.239	2.150	18,78	380,26	10.996,32	7.516,30	11,25	7,50	1.113,80	601,90
	1200	11.451	921.994	818.968	103.024	813.460	13.672	2.079	18,16	392,95	10.880,53	7.134,00	11,14	7,50	1.115,56	599,75
	1500	11.451	920.342	817.425	102.915	812.491	13.147	2.029	17,72	401,97	11.063,41	7.333,90	11,29	7,00	1.117,06	599,25
ProphetRouter	300	11.451	175.430	173.564	1.865	163.941	15.771	4.358	38,06	38,83	8.565,23	8.298,10	2,29	2,00	4.073,51	2.820,70
	600	11.451	179.057	177.108	1.949	161.582	21.965	3.865	33,76	44,83	10.999,78	9.159,35	2,36	2,00	4.874,64	3.332,10
	900	11.451	178.764	176.765	1.998	159.587	23.880	3.524	30,77	49,16	11.048,23	8.456,35	2,32	2,00	5.087,30	3.527,75
	1200	11.451	178.292	176.328	1.963	158.702	24.486	3.372	29,45	51,29	10.716,62	8.314,95	2,30	2,00	5.164,30	3.597,55
	1500	11.451	178.296	176.344	1.952	158.317	24.954	3.272	28,57	52,90	10.485,02	8.038,80	2,28	2,00	5.194,98	3.630,85

A.4 CENÁRIO WD- *BUFFER*

Tabela 10: Cenário WD: Resultados completos (*Buffer*).

Protocolo	<i>Buffer</i>	Mensagens criadas	Transmissões iniciadas	Transmissões concluídas	Transmissões abortadas	Mensagens descartadas	Mensagens apagadas	Mensagens entregues	Prob. Entrega(%)	Redundância	Latência \bar{X}	Latência m	Nr.Saltos \bar{X}	Nr.Saltos m	<i>buffertime</i> \bar{X}	<i>buffertime</i> m
PSOINET	4MB	6371	117.197	94.323	22.873	96.831	2013	638	10,03	146,72	19.526,11	20.728,22	4,31	3,20	8.115,47	4.488,42
	8MB	6371	115.360	91.770	23.589	92.703	3006	838	13,17	108,49	20.634,13	22.202,54	3,51	3,00	11.655,21	8.460,70
	12MB	6371	113.747	89.643	24.103	89.620	3667	911	14,31	97,35	20.902,22	22.469,14	3,31	3,00	13.468,67	10.863,23
	16MB	6371	112.844	88.284	24.558	87.825	3982	940	14,76	92,96	21.026,70	22.657,25	3,24	3,00	14.292,60	11.938,84
	20MB	6371	112.489	87.606	24.882	86.980	4102	946	14,85	91,67	20.979,39	22.583,64	3,22	3,00	14.633,16	12.330,11
EpidemicRouter	4MB	6371	943.203	898.039	45.159	900.401	1986	552	8,67	1.626,13	19.231,62	20.091,14	10,03	6,80	1.120,20	16,74
	8MB	6371	1.259.374	1.207.977	51.389	1.207.223	3641	918	14,41	1.314,66	20.337,13	21.565,34	9,29	6,67	1.440,95	34,38
	12MB	6371	1.289.687	1.237.910	51.770	1.234.455	5117	1178	18,50	1.049,72	20.819,35	22.131,88	8,34	6,03	1.897,51	55,58
	16MB	6371	1.233.440	1.182.103	51.330	1.176.181	6570	1363	21,41	865,74	21.018,67	22.392,91	7,62	5,70	2.413,19	91,24
	20MB	6371	1.164.766	1.114.135	50.624	1.105.848	8082	1512	23,73	735,89	21.141,27	22.541,38	7,07	5,30	2.943,33	150,07
ProphetRouter	4MB	6371	83.485	65.099	18.386	66.934	2953	713	11,20	90,28	18.736,27	19.143,26	3,17	3,00	8.985,23	3.680,35
	8MB	6371	75.792	57.729	18.062	57.946	4164	915	14,37	62,09	19.296,23	19.891,95	3,00	3,00	12.993,26	8.370,70
	12MB	6371	71.550	53.750	17.799	53.274	4667	1011	15,87	52,18	19.549,86	20.254,35	2,90	3,00	15.168,27	11.939,65
	16MB	6371	69.457	51.841	17.615	51.052	4880	1060	16,65	47,88	19.717,08	20.479,46	2,85	3,00	16.286,11	13.957,59
	20MB	6371	68.627	51.102	17.524	50.149	4999	1085	17,04	46,10	19.788,52	20.569,21	2,82	2,97	16.778,12	14.864,63

A.5 CENÁRIO WD- TTL

Tabela 11: Cenário WD: Resultados completos (TTL).

Protocolo	TTL	Mensagens criadas	Transmissões iniciadas	Transmissões concluídas	Transmissões abortadas	Mensagens descartadas	Mensagens apagadas	Mensagens entregues	Prob. Entrega(%)	Redundância	Latência \bar{X}	Latência m	Nr.Saltos \bar{X}	Nr.Saltos m	buffertime \bar{X}	buffertime m
PSOINET	300	6.371	103.693	81.352	22.341	84.611	1.932	485	7,63	166,71	10.062,60	10.865,47	3,78	3,13	5.788,53	4.095,49
	600	6.371	117.197	94.323	22.873	96.831	2.013	638	10,03	146,72	19.526,11	20.728,22	4,31	3,20	8.115,47	4.488,42
	900	6.371	119.904	97.131	22.772	99.186	2.088	721	11,32	133,92	28.078,87	29.447,24	4,59	3,13	9.841,36	4.656,24
	1200	6.371	120.876	98.310	22.565	100.132	2.149	767	12,05	127,27	35.562,43	36.241,53	4,86	3,37	11.170,88	4.745,30
	1500	6.371	121.155	98.735	22.420	100.397	2.189	786	12,34	124,81	41.765,24	41.172,29	5,09	3,53	12.178,16	4.803,41
EpidemicRouter	300	6.371	616.659	576.155	40.501	579.002	2.012	500	7,85	1.152,23	10.054,73	10.763,60	7,67	7,67	5,77	1.201,33
	600	6.371	941.418	896.299	45.113	898.607	2.025	558	8,77	1.604,28	19.060,62	19.948,93	9,97	9,97	6,77	1.123,62
	900	6.371	1.063.840	1.017.654	46.180	1.019.686	2.019	565	8,87	1.802,42	27.591,94	28.361,94	11,53	11,53	7,37	1.146,84
	1200	6.371	1.150.443	1.104.159	46.279	1.106.104	2.003	564	8,86	1.958,19	34.890,91	35.291,33	13,01	13,01	8,30	1.146,87
	1500	6.371	1.196.027	1.149.597	46.424	1.151.544	1.973	543	8,53	2.118,32	39.554,93	37.832,42	14,22	14,22	8,70	1.166,22
ProphetRouter	300	6.371	59.164	44.331	14.832	47.949	1.800	495	7,78	88,44	9.636,03	10.023,60	3,04	3,00	6.851,89	4.505,80
	600	6.371	83.472	65.087	18.384	66.939	2.938	712	11,18	90,41	18.744,55	19.183,20	3,17	3,00	8.988,72	3.681,97
	900	6.371	94.379	74.898	19.481	75.395	3.880	856	13,44	86,53	27.515,22	28.078,56	3,21	3,00	10.523,64	3.423,39
	1200	6.371	99.745	79.685	20.059	79.179	4.638	947	14,87	83,13	35.619,98	35.861,67	3,26	3,00	11.915,43	3.364,76
	1500	6.371	103.554	83.202	20.351	81.719	5.331	1.003	15,76	81,92	43.016,38	42.532,87	3,30	3,00	12.808,02	3.301,33

A.6 CENÁRIO RWP- *BUFFER*

Tabela 12: Cenário RWP: Resultados completos (*Buffer*).

Protocolo	Buffer	Mensagens criadas	Transmissões iniciadas	Transmissões concluídas	Transmissões abortadas	Mensagens descartadas	Mensagens apagadas	Mensagens entregues	Prob. Entrega(%)	Redundância	Latência \bar{X}	Latência m	Nr.Saltos \bar{X}	Nr.Saltos m	buffertime \bar{X}	buffertime m
PSOINET	4MB	14.618	4.491.936	4.211.551	280.361	4.196.440	11.583,00	2.482,00	16,98	1.695,88	17.039,72	16.569,30	18,07	17,50	1.537,44	1.292,30
	8MB	14.618	4.494.992	4.206.655	288.312	4.159.930	24.807,00	4.893,00	33,48	858,64	19.757,40	20.177,80	10,66	11,00	3.083,14	2.816,60
	12MB	14.618	4.506.033	4.213.900	292.106	4.139.364	36.424,00	7.157,00	48,96	587,83	21.505,99	22.283,30	7,47	7,00	4.476,88	4.165,70
	16MB	14.618	4.518.592	4.223.578	294.987	4.126.331	46.402,00	9.094,00	62,21	463,44	22.508,87	23.396,25	5,71	6,00	5.589,32	4.975,10
	20MB	14.618	4.531.180	4.234.355	296.799	4.120.982	52.748,00	10.274,00	70,28	411,13	23.128,53	24.105,85	4,86	5,00	6.304,08	5.108,05
EpidemicRouter	4MB	14.618	19.788.838	16.898.245	2.890.493	16.875.617	16.231,00	1.064,00	7,28	15.888,54	11.517,34	10.560,95	27,62	25,50	473,12	322,70
	8MB	14.618	21.625.866	17.811.078	3.814.664	17.757.440	30.009,00	2.281,00	15,60	7.807,47	13.261,85	12.602,55	22,02	20,50	828,40	636,20
	12MB	14.618	21.765.232	17.816.629	3.948.475	17.728.644	44.586,00	3.306,00	22,62	5.389,42	14.451,96	13.849,95	17,59	17,00	1.240,74	1.012,30
	16MB	14.618	21.675.612	17.685.575	3.989.908	17.566.543	58.885,00	4.403,00	30,12	4.015,92	15.584,60	15.070,10	14,89	14,50	1.661,44	1.409,15
	20MB	14.618	21.471.109	17.463.279	4.007.701	17.311.417	73.242,00	5.275,00	36,09	3.309,59	16.187,88	15.823,70	12,69	12,00	2.083,22	1.816,30
ProphetRouter	4MB	14.618	3.801.688	3.606.434	195.230	3.593.060	10.938,00	2.118,00	14,49	1.701,88	16.057,51	15.503,90	7,97	8,00	1.722,10	1.141,00
	8MB	14.618	3.836.908	3.634.713	202.170	3.592.771	22.093,00	4.135,00	28,29	878,09	19.004,54	19.136,05	6,68	6,50	3.427,39	2.738,00
	12MB	14.618	3.857.043	3.653.686	203.333	3.588.301	31.375,00	6.046,00	41,36	603,35	20.596,41	21.191,45	5,61	5,00	4.886,41	4.075,85
	16MB	14.618	3.870.809	3.666.160	204.623	3.581.545	39.093,00	7.630,00	52,20	479,49	21.737,18	22.461,60	4,90	5,00	6.021,89	5.031,05
	20MB	14.618	3.874.045	3.668.865	205.158	3.572.786	43.698,00	8.719,00	59,65	419,79	22.367,74	23.320,00	4,43	4,00	6.785,18	5.579,00

A.7 CENÁRIO RWP- TTL

Tabela 13: Cenário RWP: Resultados completos (TTL).

Protocolo	TTL	Mensagens criadas	Transmissões iniciadas	Transmissões concluídas	Transmissões abortadas	Mensagens descartadas	Mensagens apagadas	Mensagens entregues	Prob. Entrega(%)	Redundância	Latência \bar{X}	Latência m	Nr.Saltos \bar{X}	Nr.Saltos m	buffertime \bar{X}	buffertime m
PSOINET	300	14.618	4.574.157	4.279.349	294.784	4.265.069	10.869	3.509	24,00	1.218,72	11.280,12	11.755,10	12,53	12,50	1.400,02	1.156,00
	600	14.618	4.491.936	4.211.551	280.361	4.196.440	11.583	2.482	16,98	1.695,88	17.039,72	16.569,30	18,07	17,50	1.537,44	1.292,30
	900	14.618	4.441.205	4.170.787	270.392	4.155.305	11.903	1.922	13,15	2.168,46	18.930,44	17.293,40	19,87	18,50	1.588,13	1.348,10
	1200	14.618	4.399.735	4.135.469	264.241	4.119.596	12.006	1.691	11,57	2.444,42	19.689,64	17.365,55	20,61	18,50	1.616,00	1.378,35
	1500	14.618	4.366.754	4.108.755	257.975	4.092.031	12.283	1.533	10,49	2.678,92	19.570,80	16.689,25	20,35	17,50	1.641,95	1.405,10
EpidemicRouter	300	14.618	18.811.889	15.942.722	2.869.068	15.922.832	14.981	2.008	13,74	7.936,68	9.280,60	9.244,85	24,12	24,00	460,54	317,75
	600	14.618	19.788.838	16.898.245	2.890.493	16.875.617	16.231	1.064	7,28	15.888,54	11.517,34	10.560,95	27,62	25,50	473,12	322,70
	900	14.618	20.018.487	17.115.341	2.903.042	17.091.934	16.725	830	5,68	20.614,23	12.268,16	10.386,30	28,35	25,50	475,33	322,90
	1200	14.618	19.998.472	17.108.086	2.890.284	17.084.814	16.736	726	4,97	23.554,40	13.217,08	10.503,35	28,22	24,50	474,95	322,05
	1500	14.618	19.968.980	17.089.441	2.879.435	17.066.109	16.667	636	4,35	26.877,41	13.296,82	10.008,75	28,79	24,00	474,71	321,90
ProphetRouter	300	14.618	3.749.551	3.557.435	192.092	3.546.698	8.395	3.243	22,18	1.096,02	11.168,43	11.685,05	6,13	6,00	1.534,89	1.017,80
	600	14.618	3.801.541	3.605.650	195.866	3.592.204	11.018	2.096	14,33	1.719,60	16.063,66	15.239,30	7,99	8,00	1.720,23	1.139,05
	900	14.618	3.781.897	3.587.827	194.047	3.573.639	11.873	1.607	10,99	2.231,96	17.118,20	15.282,05	8,52	8,00	1.786,48	1.190,80
	1200	14.618	3.761.575	3.569.863	191.690	3.554.853	12.150	1.380	9,45	2.586,38	17.829,50	15.150,25	8,70	8,00	1.816,92	1.215,95
	1500	14.618	3.737.373	3.546.058	191.291	3.530.379	12.328	1.284	8,78	2.760,73	17.219,97	14.559,40	8,51	7,00	1.824,73	1.222,70