Universidade Federal Fluminense

ETIENNE CÉSAR RIBEIRO DE OLIVEIRA

Roteamento Adaptativo a Contextos para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões

NITERÓI

2011

ETIENNE CÉSAR RIBEIRO DE OLIVEIRA

Roteamento Adaptativo a Contextos para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões

Orientador:

Célio Vinicius Neves de Albuquerque

Universidade Federal Fluminense

NITERÓI

2011

Roteamento Adaptativo a Contextos para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões

Etienne César Ribeiro de Oliveira

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Computação.
Área de Concentração: Redes e Sistemas Distribuídos e Paralelos.

Aprovada por:

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque / IC-UFF(Presidente)

Prof^a. Débora Christina Muchaluat Saade / IC-UFF

Prof. Eugene Francis Vinod Rebello / IC-UFF

Prof. José Marcos Silva Nogueira / DCC-UFMG

Prof^a. Morganna Carmem Diniz / UNIRIO

Niterói, 15 de setembro de 2011.

Dedicatórias

*Aos meus pais **Paulo** e **Ignez**, por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que eu me sentia totalmente incapaz e, principalmente, por me ensinarem, com toda paciência, simplicidade e sabedoria, as lições mais importantes da minha vida.*

*À minha irmã **Ana Paula**, pelo carinho, preocupação e incentivos.*

*À minha avó **Eurydice** (in memoriam), pelas doces lembranças da infância.*

*À minha amada esposa **Simone**, pelo amor e incentivo, pelo carinho e compreensão, por conviver e aceitar as minhas limitações, e por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis da vida.*

*Aos meus filhos **Giovanna** e **Bruno**, minhas preciosidades eternas, por me ensinarem, com um simples sorriso, o quanto é a vida é maravilhosa.*

Agradecimentos

A **Deus**, pela dádiva desta existência maravilhosa e por permitir, todos os dias, que eu procure ser uma pessoa melhor para meus semelhantes. Obrigado por me dar a oportunidade de realizar os meus sonhos, por estar ao meu lado nos momentos de fraqueza, por iluminar o meu caminho, por me socorrer tantas e tantas vezes, por sua bondade infinita, e, principalmente, por me presentear com uma família maravilhosa e com amigos verdadeiros. Continuo sem saber o que fiz para merecer tanto.

Ao **Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque**, que me conduziu de forma brilhante ao longo do doutorado, assim como o fez ao longo do mestrado. Agradeço pelos anos de convivência, por estar sempre disposto a compartilhar o conhecimento, pelos incentivos constantes, pelo profissionalismo, pela dedicação, pela preocupação com toda a minha família e, finalmente, por acreditar em mim. Suas palavras sempre soaram como uma grande motivação para a conclusão desta jornada. **Célio**, o que você fez por mim foi muito além da sua responsabilidade como orientador, portanto, tenha certeza que, independente dos rumos que nossas vidas terão, o carinho e amizade por você e pela sua família perdurarão ao longo desta existência.

Aos membros da banca examinadora, **Prof^a. Débora Christina Muchaluat Saade**, **Prof. Eugene Francis Vinod Rebello**, **Prof. José Marcos Silva Nogueira** e **Prof^a. Morganna Carmem Diniz** que gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta tese de doutorado. À **Prof^a. Débora Christina Muchaluat Saade** agradeço, ainda, pelas palavras sempre amáveis, pelo incentivo e pela constante preocupação.

Aos **professores do IC** pela dedicação, pela competência e pela disposição em compartilhar tanto conhecimento. À **Prof^a. Helena Cristina da Gama Leitão** por, voluntariamente, defender a minha aceitação durante o processo de seleção para este curso de Doutorado em Computação. À **Prof^a. Anna Dolejsi Santos**, pela oportunidade de cursar uma disciplina tão interessante e pela grande empatia. À **Prof^a. Simone de Lima Martins**, pela competência e pela paciência com que sempre me atendeu nas inúmeras vezes em que a procurei. À **Prof^a. Aura Conci**, pela grande empatia e pela

oportunidade de apresentar meu trabalho aos seus alunos. À **Profª. Lúcia Maria de Assumpção Drummond**, pela participação na defesa da proposta de tese e pelas inúmeras sugestões relevantes. À **Profª. Maria Cristina Silva Boeres**, pela forma tão gentil com que sempre me tratou. Ao **Prof. Michael Stanton**, pelas tantas disciplinas cursadas, e pelo interesse demonstrado em discussões após as aulas. À **Marister**, pelo bom humor incondicional. À **Angela**, **Maria**, **Teresa** e **Viviane**, muito mais que secretárias.

Aos companheiros **Tiago Neves**, **Edelberto Silva**, **Jacques Silva**, **Diego Passos** e **Juliano Kazienko** pelos anos de convivência, pelas conversas tão amigáveis, e pelos trabalhos realizados em conjunto. A todos os demais **colegas do IC**, obrigado pelo companheirismo.

Ao **IBGE**, em especial aos diretores da DI **Luiz Fernando (Dom)**, pelo grande respeito mútuo e por autorizar a minha licença para o doutorado às vésperas da realização de um grande censo, e ao **Paulo Simões**, por todo apoio no processo de extensão da minha licença, pelo interesse em relação aos meus objetivos, pelo grande respeito mútuo e pela amizade dos últimos anos. Ao **Nelson Rezende**, meu primeiro e atual gestor, por permitir que eu continuasse a me dedicar ao doutorado após o término da licença de afastamento e pela sinergia em tantos trabalhos realizados. À **Martha Seixas** e ao **Robson Vaz**, verdadeiros e únicos amigos que tanto me ajudaram durante o período em que estive afastado e ao longo desses 25 anos de IBGE.

Aos meus anjos da guarda, **Martha Seixas**, **Lúcia Castro** e **Andrea London**, que pacientemente se propuseram a ler e reler tantas vezes os capítulos desta tese que foram escritos, muitas vezes, no meio da madrugada. Em especial, à **Lúcia Castro**, que tanto me auxilou na intangível tarefa de produzir um texto sem erros e, também, pelas discussões e questionamentos sempre tão produtivos.

Aos amigos **Luis Eduardo (Maluco)** e **Sydney**, amigos leais de uma vida inteira. A correria do dia a dia não nos permite mais estar juntos com fazíamos na adolescência, mas a nossa amizade é uma prova real de que sentimentos verdadeiros são atemporais. Tenho certeza de que, antes de precisarmos de um geriatra, vamos reviver nossos áureos tempos.

Aos amigos **Marcelo e Paula**, **Marcelo e Andrea**, **Edinei e Letícia**, **Carlinhos e Paula**, **Luis e Inês**, e **Zé Afonso e Déborah**, pela amizade, pela preocupação, pelo companheirismo e pelos infinitos momentos da mais pura diversão dos últimos anos. Agradeço pelas lembranças dos passeios aos inúmeros hotéis fazenda, pelas nossas viagens

à Disney e a tantos outros lugares, pelos nossos encontros com e sem as crianças, pelas nossas confraternizações de final de ano, pelos churrascos nas sedes campestres do Grajaú, de Jacarepaguá e, antecipadamente, pela sede campestre da Barra da Tijuca que, em breve, será inaugurada. Vocês são, com toda sinceridade, parte da família.

À minha família, tios(as), primos(as), cunhados(as), sobrinhos(as), afilhados(as) e aos meus sogros **Carlos** e **Ligia**, pelo apoio, pela preocupação, pelo incentivo ao longo desses anos de estudo e pela compreensão em função do isolamento tantas vezes necessário. Em especial, à **Angélica** e **Gustavo**, pelas conversas sobre artigos, congressos, problemas da tese e pelo apoio na hora derradeira.

À minha mãe **Ignez** e ao meu pai **Paulo**, que tanto fizeram e ainda fazem para a minha felicidade. Tenho certeza que jamais serei capaz de agradecer e retribuir a tanto amor, abnegação, preocupação e carinho demonstrados ao longo desta vida. Sinto-me um filho abençoado por ter nascido de um amor tão puro e incondicional, e eternamente grato pelos ensinamentos que ainda tento pôr em prática na minha vida. Vocês são, e sempre serão, uma referência para mim de tudo de bom que uma vida correta é capaz de proporcionar. À minha querida irmã **Ana Paula**, pela preocupação e incetivos.

À minha princesa **Giovanna**, filha maravilhosa, amiga, meiga, amorosa, dona de uma alegria inconfundível e contagiante, companheira nos dias de futebol, e tão preocupada com a vida do papai. **Gi**, não tenho a menor dúvida de que ter você como filha é o presente mais precioso de Deus. Ao meu príncipe **Bruno**, filho brincalhão, carinhoso e tão amigo do papai. **Bruninho**, agradeço eternamente a Deus pela benção de ter um filho tão maravilhoso que me ensina todos os dias a ter paciência e a respeitar os limites individuais, que me faz vibrar de felicidade com gestos e palavras tão simples, e que, a cada sorriso, prova o quanto a perseverança é fundamental para a felicidade. Meus filhos, vocês são a energia fundamental que alimenta a minha vida, a presença que se traduz na mais intensa felicidade, e a perfeita concretização da existência de Deus.

À minha amada esposa **Simone**, pelo amor, pelo carinho, pelos incentivos, por acordar ao meu lado todos os dias, e pela forma encantadora com que estamos construindo a nossa família. Obrigado por acreditar em mim, por enfrentar os problemas ao meu lado, por preencher as nossas vidas com tanto amor e pelas surpresas que sempre resultam em momentos inesquecíveis da mais plena felicidade. Sem você, eu nada seria.

Por fim, obrigado a todos que, de alguma forma, contribuíram para que esse sonho se realizasse.

Resumo

O cenário de uma Rede Tolerante a Atrasos e Desconexões é constituído de diversos contextos dessemelhantes, que se formam em diferentes regiões ao longo da existência de uma rede. As variações impostas à configuração padrão de protocolos de roteamento, em conjunto com as variações provenientes de características de contextos, são responsáveis por oscilações expressivas no desempenho de métricas como mensagens entregues e atraso. Essa constatação ratifica o caráter indispensável da adoção de componentes com a habilidade para prover uma adaptação dinâmica ao contexto. Como consequência, foram identificados, nesta tese de doutorado, dois grandes problemas: o Problema de Detecção de Contexto (PDC) e o Problema de Roteamento Adaptativo (PRA).

O PDC envolve o estabelecimento de regras bem definidas que possibilitam aos nós da rede examinar o contexto de um cenário. Logo, coube ao PDC determinar as características do contexto com base em um conjunto de atributos de rede, limitados à densidade, percentual de ocupação da capacidade de armazenamento e periodicidade de contato. O PRA abrange a análise das informações produzidas pelas heurísticas descritas para o PDC e a adaptação dinâmica do protocolo de roteamento, o que culminou com a proposta, implementação e avaliação do protocolo de roteamento CARTOON (*Context-Aware Routing Protocol for Opportunistic Networks*).

Para a análise do desempenho do protocolo CARTOON foram selecionados, nesta tese de doutorado, cinco cenários com características distintas e foram implementados, em um simulador, os protocolos CARTOON, *Epidemic*, NECTAR e PROPHET. O oráculo do pleno conhecimento também foi implementado, o que possibilitou a normalização dos resultados. O protocolo CARTOON demonstrou um desempenho próximo do ótimo em relação à métrica mensagens entregues, alcançando uma média, em termos globais, de 95,04% do ótimo. Nas demais métricas avaliadas, o protocolo CARTOON também apresentou um desempenho satisfatório, pois coube ao protocolo CARTOON a menor taxa de *overhead*, a menor quantidade de descartes e o menor atraso. O excelente desempenho demonstrado durante a análise das oscilações deve-se aos componentes adaptativos, cuja participação no desempenho global em relação à métrica mensagens entregues foi de 34,95%.

Os resultados demonstram que o protocolo CARTOON atendeu aos objetivos propostos, apresentando um desempenho próximo do ótimo em relação à métrica mensagens entregues, exibindo oscilações mínimas de desempenho, apesar das características contrastantes dos cenários, e, principalmente, comprovando a eficiência da adoção de componentes adaptativos.

Abstract

A Delay and Disruption Tolerant Network scenario is formed by several diverse contexts, which vary, both throughout different regions and during the network's lifetime. The variations imposed on standard configurations of various routing protocols, along with the ones inherent to context features, leads to significant oscillations in performance of metrics, like message delivery rates and delay. This emphasizes how essential it is to use components that can provide dynamic context adaptation. Consequently, this thesis addresses two relevant problems, the Context Detection Problem (CDP) and the Adaptive Routing Problem (ARP).

The CDP includes the creation of well-defined rules that allow network nodes to analyze the context of a given scenario. Thus, in this work, CDP performs context detection, based on a set of network attributes: local density, buffer capacity and contact frequency. The ARP, on the other hand, involves the analysis of the information produced by the heuristics created for the CDP and performs the routing protocol dynamic adaptation, leading to the proposal, implementation and evaluation of the CARTOON (Context-Aware Routing Protocol for Opportunistic Networks) routing protocol.

In order to evaluate the performance of the CARTOON protocol, this thesis selected five distinct scenarios, for which the protocols CARTOON, Epidemic, NECTAR and PROPHET were implemented in a simulator. The complete-knowledge oracle was also implemented, allowing the generation of normalized results. The CARTOON protocol exhibits a near optimum performance in terms of message delivery rate, with a global average of 95.04%. In terms of the other evaluated metrics, the CARTOON protocol presents a remarkable performance, providing the lowest overhead, the lowest discard rate and the lowest delay. CARTOON's excellent performance in various scenarios is due to its adaptive components, whose share in the global performance in terms of the message delivery rate was 34.95%.

Simulation Results show that the CARTOON protocol met its primary objectives, since it had a near optimum performance in relation to the message delivery rate metric, presented minimal performance oscillations despite the contrasting scenarios in which it was tested, and, most importantly, proved the efficiency of adaptive components.

Palavras-chave

1. Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (DTN)
2. Protocolos de Roteamento Adaptativo
3. Detecção de Cenários
4. Adaptação Dinâmica a Contextos

Glossário

3G	:	Terceira geração
4G	:	Quarta geração
AODV	:	Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol
APRP	:	Adaptive Potential Routing Protocol
BP	:	Bundle Protocol
CAR	:	Context-Aware Routing
CARNIVORE	:	Carnivore Adaptive Research Network in Varied Outdoor Remote Environments
CARTOON	:	Context-Aware Routing Protocol for Opportunistic Networks
CDF	:	Cumulative Distribution Function
CGR	:	Contact Graph Routing
CONDOR	:	C2 On-the-move Network Digital Over-the-horizon Relay
DFD	:	Diagrama de Fluxo de Dados
DSDV	:	Destination Sequenced Distance Vector
DSL	:	Digital Subscriber Line
DTLSR	:	Delay Tolerant Link State Routing
DTMN	:	Delay Tolerant Mobile Networks
DTN	:	Delay and Disruption Tolerant Network
EBR	:	Encounter-Based Routing
EDIFY	:	Enhanced Disruption/Fault Tolerant Bundle Delivery
FIFO	:	First In, First Out
FTTH	:	Fiber To The Home
GPS	:	Global Positioning System
H-EC	:	Hybrid Erasure Coding
HiBOp	:	History Based Routing Protocol for Opportunist Networks
IP	:	Internet Protocol
MANET	:	Mobile Ad-hoc Network

Mbps	:	Milhões de bits por segundo
MULE	:	Mobile Ubiquitous LAN Extensions
NECTAR	:	Neighborhood Contact History Routing
ONE	:	Opportunistic Network Environment Simulator
ORWAR	:	Opportunistic Routing with Window-Aware Replication
PDA	:	Personal Digital Assistant
PDC	:	Problema de Detecção de Contexto
PRA	:	Problema de Roteamento Adaptativo
PREP	:	Prioritized Epidemic Routing
PROPHET	:	Probabilistic Routing using History of Encounters and Transitivity
RAPID	:	Resource Allocation Protocol for Intentional DTN
RCM	:	Routing in Cyclic MobiSpace
SeNDT	:	Sensor Networking with Delay Tolerance
SNC	:	Sámi Network Connectivity
SSID	:	Service Set Identifier
SWIM	:	Shared Wireless Infostation Model
TCP	:	Transmission Control Protocol
VANET	:	Vehicular Ad-Hoc Network
WDM	:	Working Day Movement Model
WWW	:	World Wide Web

Sumário

Lista de Figuras **xv**

Lista de Tabelas **xvii**

1 Introdução **1**

1.1 Objetivo 3

1.2 Metodologia e Padronização 4

1.3 Contribuições 5

1.4 Organização 6

2 Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões **7**

2.1 Arquitetura DTN 8

2.1.1 Tipos de Contato 10

2.1.1.1 Contatos Persistentes 11

2.1.1.2 Contatos Sob Demanda 11

2.1.1.3 Contatos Programados 11

2.1.1.4 Contatos Oportunistas 11

2.1.1.5 Contatos Previsíveis 11

2.1.2 Camada de Agregação 12

2.1.3 Transferência de Custódia 13

2.1.4 Modos de Disseminação 14

2.2 Aplicações 15

2.3 Considerações Finais 16

3 Motivação **18**

3.1 Protocolos Avaliados 20

3.1.1 MaxProp 20

3.1.2 PROPHET 22

3.1.3 Spray and Wait 23

3.2 Cenários 24

3.3 Desempenho dos Protocolos Avaliados 27

3.4 PROPHET Adaptativo 31

3.5 Trabalhos Relacionados 34

3.6 Considerações Finais 40

4 O Problema de Detecção de Contexto **42**

4.1 Dimensões para Detecção de Contexto 43

4.2 Densidade 45

4.2.1 Impacto da Densidade 45

4.2.2 Determinação do Grau de Densidade 46

4.2.3 Cálculo da Densidade 48

4.3 Capacidade de Armazenamento 49

4.3.1 Impacto da Capacidade de Armazenamento 51

4.3.2 Percentual de Ocupação da Capacidade de Armazenamento 52

4.3.3 Cálculo do Percentual de Ocupação da Capacidade de Armazenamento 53

4.4 Periodicidade do Contato 56

4.4.1 Impacto da Periodicidade de Contato 58

4.4.2 Determinação da Periodicidade do Contato 59

4.4.3 Cálculo da Periodicidade de Contato 60

4.5 Análise de Outros Atributos de Rede 64

4.6 Considerações Finais 65

5 CARTOON: Proposta de um Protocolo de Roteamento Adaptativo 66

5.1 Constantes e Variáveis do Protocolo CARTOON 68

5.2 Processo de Envio de Mensagens 68

5.2.1 Modo de Disseminação Probabilística 71

5.2.1.1 Processo de Escalonamento de Mensagens para Disseminação Probabilística 74

5.2.1.2 Reconhecimento de Mensagens Entregues 75

5.2.1.3 Cálculo da Janela Deslizante 76

5.2.1.4 Cálculo do Índice de Roteamento 77

5.2.1.5 Envelhecimento do Índice de Roteamento 80

5.2.1.6 Estimativa de Contato 80

5.2.1.7 Estimativa do Percentual de Ocupação da Capacidade de Armazenamento 83

5.2.1.8 Estimativa da Densidade 84

5.2.1.9 Tempo de Vida e Transferência de Custódia 85

5.2.2 Modo de Disseminação Epidêmica 85

5.2.3 Modo de Determinação de Disseminação 89

5.3 Processo de Recebimento de Mensagens 90

5.3.1 Processo de Descarte de Mensagens 92

5.4 Estruturas de Dados 93

5.4.1 Repositório para Armazenamento de Mensagens 93

5.4.2 Tabela de Roteamento 93

5.4.3 Repositório para Armazenamento de Reconhecimento Passivo . . . 95

5.4.4 Repositórios para Adaptação Dinâmica ao Contexto 95

5.5 Considerações Finais 96

6 Avaliação da Proposta 99

6.1 Características dos Cenários 100

6.2 Ambiente de Simulação 102

6.3 Avaliação dos Resultados 105

6.3.1 1ª Dimensão: Avaliação do Desempenho 106

6.3.2 2ª Dimensão: Oscilações do protocolo CARTOON 117

6.3.3 3ª Dimensão: Análise da Adaptação ao Contexto 119

6.4 Considerações Finais 125

7 Conclusão 128

7.1 Contribuições 129

7.2 Considerações Finais 130

7.3 Trabalhos Futuros 130

Referências 132

Apêndice A – Características dos Cenários 140

A.1 Dartmouth College 140

A.2 UMass DieselNet 142

A.3 Infocom 2006 iMotes 145

A.4 Helsinki WDM 147

A.5 Princeton ZebraNet 149

Apêndice B – Lista de Publicações 152

Lista de Figuras

2.1 Operação *store-carry-and-forward* 9

2.2 Camada de agregação 12

3.1 Cálculo do custo de rotas - Protocolo MaxProp 21

3.2 Modos de Operação - Protocolo *Spray and Wait* 24

3.3 Quantidade de mensagens entregues - Cenário Dartmouth 34

4.1 Disposição de nós não sobrepostos e adjacentes cobrindo a totalidade da rede 47

4.2 Identificação de vizinhos diretos e indiretos não sobrepostos e adjacentes em uma rede 47

4.3 Observação da densidade considerando a existência de regiões desconexas . 48

4.4 Intervalo entre o último contato e o contato atual 54

4.5 Roteamento sem aplicação do histórico da periodicidade de contato 60

4.6 Roteamento com aplicação do histórico da periodicidade de contato 60

4.7 Deslocamento da janela de tempo $Tjanela_max_base$ 61

4.8 Determinação de amostras para o cálculo da periodicidade de contato . . . 62

5.1 DFD do modo de disseminação probabilística 72

5.2 Aplicação da propriedade da transitividade e construção da tabela de roteamento do protocolo CARTOON 79

5.3 Aplicação do processo de estimativa de contato 82

5.4 DFD do modo de disseminação epidêmica 86

5.5 DFD do modo de recebimento de mensagens 90

6.1 Mensagens entregues, *overhead* e atraso do oráculo do pleno conhecimento 106

6.2 Mensagens entregues - Capacidade de armazenamento B10% e B25% . . . 108

6.3 Mensagens entregues - Capacidade de armazenamento B50% e B100% . . . 109

6.4 Transmissões sob custódia do protocolo CARTOON nos cenários Dartmouth, DieselNet, iMotes, WDM e ZebraNet 110

6.5 Média global do percentual de mensagens entregues por protocolo 111

6.6 *Overhead* - Capacidade de armazenamento B10% e B100% 112

6.7 *Overhead* do protocolo CARTOON - Capacidade de armazenamento B10% e B100% 113

6.8 Descartes - Capacidade de armazenamento B10% 115

6.9 Atraso - Capacidade de armazenamento B10% e B100% 116

6.10 Mensagens entregues - Capacidade de armazenamento B10% e B100% . . . 121

6.11 Mensagens entregues com protocolo PURE - Capacidade de armazenamento B10% e B100% 122

6.12 Evolução da variável Densidade 124

A.1 Avaliação do cenário Dartmouth College 142

A.2 Avaliação do cenário UMass DieselNet 144

A.3 Avaliação do cenário Infocom 2006 iMotes 146

A.4 Avaliação do cenário Helsinki WDM 148

A.5 Avaliação do cenário Princeton ZebraNet 150

Lista de Tabelas

3.1 Características dos cenários 25

3.2 Características dos contextos 25

3.3 Valores da configuração padrão dos parâmetros 26

3.4 Intervalo de valores dos parâmetros 26

3.5 Sumário da quantidade simulações por protocolo e cenário 27

3.6 Percentual de mensagens entregues do PROPHET - Configuração com melhor desempenho 28

3.7 Percentual de mensagens entregues do PROPHET - Configuração padrão e Configuração com pior desempenho 29

3.8 Percentual de deficiência dos protocolos - Latência média 30

3.9 Desempenho da configuração padrão 31

3.10 Relação entre (γ e β) X (densidade local e percentual de ocupação) 32

3.11 Parâmetros e variáveis do protocolo NECTAR) 38

4.1 Características dos cenários para definição de valores para $Tjanela_ini_base$ e $Tjanela_max_base$ 55

5.1 Tabela de constantes do protocolo CARTOON 69

5.2 Tabela de variáveis locais ao protocolo CARTOON 69

5.3 Tabela de variáveis específicas de um par de nós e das mensagens 70

5.4 Evolução de $Dcontato_idx$ durante o processo de estimativa de contato . . 83

5.5 Repositório para armazenamento de mensagens 93

5.6 Tabela de roteamento 94

5.7 Repositório para armazenamento de reconhecimento passivo 95

5.8 Repositório para armazenamento de descartes 96

5.9 Repositório para armazenamento de contatos 96

6.1 Características sumarizadas dos cenários 100

6.2 Características específicas dos cenários 101

6.3 Intervalo de tempo médio entre mensagens 104

6.4 Quantificação dos cenários 104

6.5 Configuração dos protocolos selecionados para avaliação 105

6.6 Comparação do atraso entre os Protocolos CARTOON e *Epidemic* - Cenário DieselNet com 16 nós e B10% 117

6.7 Oscilações do protocolo CARTOON em relação à métrica mensagens entregues 118

6.8 Oscilações dos protocolos CARTOON e NECTAR em relação à métrica mensagens entregues no cenário ZebraNet 119

6.9 Participação no desempenho dos componentes do protocolo CARTOON em relação à métrica mensagens entregues com sucesso 121

6.10 Avaliação do componente adaptativo estimativa de contato 123

6.11 Média do percentual de mensagens entregues em relação à quantidade de mensagens transmitidas pelo modo de disseminação epidêmica 124

6.12 Consumo em segundos de recursos do processador 125

A.1 Arquivos de movimento - Cenário Dartmouth College 141

A.2 Arquivos de movimento - Cenário UMass DieselNet 143

A.3 Arquivos de movimento - Cenário Infocom 2006 iMotes 145

A.4 Arquivos de movimento - Helsinki WDM 147

A.5 Arquivos de movimento - Princeton ZebraNet 150

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, uma grande fatia da população faz uso de recursos de comunicação como ferramentas de uso cotidiano, seja para fins de entretenimento, seja para rotinas de trabalho. Entretanto, para usufruir dos serviços disponíveis é imprescindível que os usuários estejam conectados através de alguma de rede de comunicação de dados. Nos grandes centros urbanos de países desenvolvidos, ou em desenvolvimento, há uma quantidade significativa de redes de comunicação de dados que oferecem serviços através de tecnologias como xDSL (*Digital Subscriber Line*), *cable modem*, FTTH (*Fiber To The Home*), rede celular 3G e 4G etc. Observa-se, todavia, que a oferta de redes de comunicação de dados é mais restrita à medida que a população se afasta dos grandes centros urbanos em direção a áreas rurais, ou quando essa população reside em países subdesenvolvidos. Esse fato decorre, primordialmente, da ausência de infraestrutura, ou da existência de uma infraestrutura inadequada devido a empecilhos comerciais e geográficos. No entanto, com a popularização dos serviços de comunicação de dados, os usuários têm interesse, e algumas vezes necessidade, de persistirem conectados independentemente do local em que se encontrem, da hora do dia, e do fato de estarem ou não em movimento.

O acesso aos serviços disponíveis na Internet é um exemplo do quanto as redes de comunicação de dados atuais necessitam ser ubíquas a fim de atenderem às demandas de seus usuários. Na realidade, existem inúmeros outros cenários desafiadores, tais como redes interplanetárias, redes construídas provisoriamente em áreas de desastres ou em campos de batalha, redes dinâmicas de pedestres, redes de veículos em estradas inteligentes, redes de monitoramento de animais e de condições ambientais etc., que estabeleceram uma nova categoria de redes de comunicação denominada Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões.

Uma Rede Tolerante a Atrasos e Desconexões, ou simplesmente DTN (*Delay and Dis-*

ruption Tolerant Network), pode ser definida como uma rede formada por redes regionais[1] que apresentam características particulares, tais como atrasos longos e/ou variáveis, frequentes desconexões, habilidade para operar em cenários onde a conectividade fim-a-fim pode jamais existir, entre outras [27, 36, 79, 93, 13]. Da mesma forma, os cenários típicos de DTNs possuem atributos próprios e excessivamente variáveis. Logo, o tipo, a duração e a periodicidade de contato[2], a proporção de nós no cenário (se os cenários encontram-se densos ou esparsos), a velocidade de deslocamento, a taxa de transmissão, o padrão de mobilidade, a capacidade de armazenamento de dados, a quantidade de energia disponível, o alcance do sinal de transmissão etc. interferem diretamente no comportamento dos protocolos de roteamento.

Em função da diversidade de peculiaridades e do dinamismo comum aos cenários de DTNs, diversos protocolos de roteamento têm sido propostos. Entretanto, as propostas encontradas na literatura são, em sua maioria, elaboradas para atender a um problema ou cenário específico. Como constatação, uma parcela significativa das propostas ostenta resultados satisfatórios quando avaliadas nos cenários para as quais foram elaboradas. No entanto, quando comparadas com outras propostas em cenários distintos dos originais, o desempenho demonstrado normalmente fica aquém do esperado ou exibe resultados que oscilam drasticamente [65]. Para corroborar essa afirmativa, apenas como exemplo, é possível atentar para a variação do desempenho dos protocolos *Epidemic* e PROPHET em três cenários distintos, observando os resultados relatados por Vahdat e Becker em [85], Lindgren *et al.* em [49] e Balasubramanian *et al.* em [1].

De fato, um cenário de uma DTN é constituído de diversos contextos dessemelhantes que se formam em diferentes regiões ao longo da existência da rede. Por conseguinte, o termo contexto será utilizado nesta tese de doutorado como referência às variações dos atributos de uma DTN, tais como densidade, velocidade de deslocamento dos nós, tempo de contato etc., que ocorrem ao longo da existência de um cenário e que retratam um momento específico. A oscilação no desempenho dos protocolos de roteamento para DTNs decorre, principalmente, da formação dos referidos contextos. Assim, uma proposta de protocolo de roteamento para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões deveria contemplar, necessariamente, a habilidade de identificar as características do contexto e de adaptar-se conforme a condição observada.

[1] conjunto de nós que formam uma sub-rede.

[2] contato pode ser entendido como uma oportunidade para que dois nós possam comunicar-se e encontra-se descrito na Seção 2.1

1.1 Objetivo

É factível observar um crescente interesse da comunidade acadêmica em áreas de pesquisa emergentes, tais como Redes *Ad hoc* com Conectividade Intermitente, Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões, entre outras. Em relação às Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões, a questão do protocolo de roteamento ainda é avaliada como um ponto de suma importância para a arquitetura DTN [13], pois a escolha do protocolo de roteamento mais adequado depende, fundamentalmente, de características próprias do cenário. Essa constatação pode ser comprovada em função da quantidade de protocolos de roteamento propostos nos últimos anos, entre os quais é razoável citar APRP [60, 61], ARGH [56], CAR [57, 58], CGR [8], DRAIN [67], DTLSR [21], DTMN [34, 33], EBR [59], *Epidemic Routing Protocol* [85], *Erasure Coding* [86], H-EC [14], MaxProp [7], *Message Ferrying* [94, 95, 84, 15], NECTAR [64, 63], PREP [70], PROPHET [49], PROPHET+ [35], PR_CD [47], RAPID [1, 2], *Spray and Focus* [82, 83], *Spray and Wait* [81], SWIM [79] etc. Apesar dessa quantidade significativa de propostas, não foi possível localizar na literatura, até o presente momento, um protocolo capaz de apresentar, independente do cenário e de forma concomitante, um desempenho competitivo em relação a diversas métricas, como taxa de mensagens entregues, atraso, latência, proporção de mensagens transmitidas por mensagens entregues etc.

O estudo realizado por esta tese de doutorado acerca do comportamento dos protocolos e das características dos cenários, presente no Capítulo 3, possibilitou a identificação de dois grandes problemas intitulados Problema de Detecção de Contexto e Problema de Roteamento Adaptativo, que serão abordados, respectivamente, nos Capítulos 4 e 5. A partir deste momento o primeiro problema será referenciado simplesmente como PDC (Problema de Detecção de Contexto), e o segundo problema será referenciado pelo acrônimo PRA (Problema de Roteamento Adaptativo).

O PDC aborda a necessidade de detectar e classificar o contexto de uma DTN, analisando três entre as principais características inerentes às DTNs, identificadas por densidade, capacidade de armazenamento e periodicidade do contato. A solução desse problema requer um conhecimento do contexto, o que implica a necessidade de os dispositivos de comunicação, ou simplesmente nós, capturarem informações provenientes de seus vizinhos diretos (nós que se encontrem dentro do raio de alcance). Deve-se ressaltar que a capacidade de detectar e classificar o contexto com acuidade é determinante para a solução do segundo problema (PRA).

O PRA está relacionado ao fato de que os principais protocolos de roteamento para as DTNs são propostos para cenários com características específicas. Consequentemente, quando avaliados em cenários com características diferentes, apresentam um desempenho que não é competitivo. A solução para esse problema passa pela proposta de um protocolo de roteamento que seja capaz de adaptar-se às características momentâneas do cenário e, dessa forma, apresentar um desempenho competitivo, independente do cenário em questão. O uso alternado das formas de transmissão epidêmica e probabilística, demonstrado com sucesso na proposta do protocolo NECTAR [64, 63], associado à definição de uma função utilidade que inclua parâmetros que possam ser variados serão empregados na abordagem do PRA.

Em função dessas considerações, esta tese de doutorado objetiva fundamentalmente demonstrar a necessidade de adaptação dinâmica às características de contextos de DTNs, mensurando a amplitude das variações do desempenho dos principais protocolos de roteamento parametrizáveis para DTNs em cenários com características distintas; estabelecer métricas para uma camada de adaptação que seja capaz de identificar características do contexto e de alimentar um protocolo de roteamento; propor um protocolo de roteamento para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões que apresente a habilidade de modificar o seu comportamento, adaptando-se de modo instantâneo e automático conforme as informações provenientes da camada de adaptação e/ou da camada de rede; e, por fim, quantificar o desempenho do protocolo proposto em relação a valores ótimos.

1.2 Metodologia e Padronização

A metodologia empregada no desenvolvimento desta tese de doutorado foi a metodologia dedutiva, fundamentada por pesquisas bibliográficas, experimentos baseados em simulações, e na produção de contrastes e semelhanças através do processo de análise.

O estado da arte de propostas que objetivam a detecção de características de contextos em Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões foi revisado, assim como as propostas de protocolos de roteamento que apresentam capacidade de adaptar-se de alguma forma à variação dessas características. Somente foram consideradas propostas que podiam ser aplicadas em experimentos reais, e que fossem fundamentadas por informações reunidas localmente. A validação das propostas presente nesta tese de doutorado foi baseada em simulações com bases de dados extraídas principalmente de experimentos reais. Todavia, com o intuito de contemplar a maior quantidade possível de contextos, as bases de dados

foram complementadas com modelos sintéticos.

Para uma perfeita compreensão das propostas elaboradas por esta tese de doutorado, deve-se ressaltar que as constantes utilizadas nos algoritmos encontram-se representadas por letras maiúsculas, e que, nas expressões matemáticas, os conjuntos são retratados por letras maiúsculas e os elementos dos conjuntos por letras minúsculas.

1.3 Contribuições

As contribuições desta tese de doutorado encontram-se elencadas a seguir:

- um estudo do comportamento de três entre os principais protocolos de roteamento parametrizáveis para DTNs visando, essencialmente, quantificar a influência das variações de características dos contextos no desempenho de métricas como taxa de mensagens entregues e latência (Capítulo 3);
- a comprovação de que a inclusão de uma camada simplificada de adaptação dinâmica, com a habilidade de ajustar valores parametrizados às características do contexto, apresenta a capacidade de incrementar o desempenho de um protocolo de roteamento parametrizável para DTNs (Capítulo 3, Seção 3.4);
- a elaboração de heurísticas com o objetivo de detectar e quantificar características de contextos de DTNs baseadas em três dimensões de rede, identificadas por Densidade, Capacidade de Armazenamento e Periodicidade de Contato (Capítulo 4);
- a proposta de um protocolo de roteamento parametrizável capaz de adaptar-se dinamicamente às particularidades dos diversos contextos que se formam ao longo das DTNs (Capítulo 5);
- uma avaliação minuciosa do protocolo de roteamento proposto (Capítulo 6);
- uma análise detalhada de cinco cenários típicos de DTNs (Apêndice A).

Espera-se que as contribuições desta tese de doutorado possam favorecer a elaboração de novas propostas de protocolos de roteamento para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões que compreendam as benfeitorias provenientes da capacidade de detecção de contexto e, com isso, desenvolvam a habilidade de promover dinamicamente a adaptação de seus valores parametrizáveis. Cabe destacar que o Apêndice B contém uma lista das publicações do autor desta tese de doutorado.

1.4 Organização

Esta tese de doutorado encontra-se estruturada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta, resumidamente, características imprescindíveis para a compreensão da arquitetura DTN, classifica e descreve os tipos de contato, e sintetiza aplicações reais; o Capítulo 3 fundamenta a motivação para esta tese de doutorado, comprovando, através da análise de resultados de simulações, a real necessidade de um mecanismo que proveja aos protocolos de roteamento para DTNs a capacidade de adaptação às características dos contextos; o Capítulo 4 define e justifica quais dimensões serão analisadas para resolução do PDC, analisa o impacto das informações provenientes de cada dimensão, determina regras para o cálculo do grau das dimensões e estabelece parâmetros para implementação da camada de adaptação; o Capítulo 5 descreve as funcionalidades, os mecanismos de adaptação dinâmica ao contexto e o modo de operação do protocolo CARTOON (*Context-Aware Routing Protocol for Opportunistic Networks*), projetado para atender aos requisitos do PRA; o Capítulo 6 elabora uma metodologia para avaliação da proposta e analisa o desempenho do protocolo proposto e dos componentes dinamicamente adaptativos em função de diversas métricas, tais como mensagens entregues com sucesso, *overhead*, atraso, descarte, oscilação do desempenho devido às particularidades dos cenários etc.; e, por fim, o Capítulo 7 apresenta a conclusão desta tese de doutorado e relaciona alguns trabalhos futuros.

Capítulo 2

Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões

A arquitetura Internet transformou-se em um dos maiores casos de sucesso da área de computação, conectando inúmeros tipos de dispositivos e provocando uma mudança notável na vida da população com suas aplicações revolucionárias. No entanto, para que a arquitetura Internet possa operar de forma apropriada, algumas características básicas devem ser garantidas, como baixo atraso, baixa taxa de erro, estabelecimento e manutenção de um caminho fim a fim entre origem e destino, caminho reverso disponível etc.

Existem, não obstante, cenários que não se adequam às premissas da arquitetura Internet. Entre tantos, o cenário de uma Internet Interplanetária pode ser utilizado para exemplificar essa realidade, pois, em contraste com as características da arquitetura Internet, apresenta atraso de propagação do sinal e taxa de erro significativamente superiores, conectividade ocasional e taxa de transmissão assimétrica.

Diversos autores [9, 89, 27, 20, 93, 19] entendem que uma arquitetura de comunicação com características distintas da arquitetura Internet deve ser utilizada para operar em cenários como em uma Internet Interplanetária e em outros cenários que apresentem particularidades semelhantes. Para esses cenários, ditos desafiadores, foi proposta uma arquitetura para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões denominada arquitetura DTN (*Delay and Disruption Tolerant Network*) [13]. Logo, torna-se imprescindível para a perfeita compreensão dos objetivos desta tese de doutorado que o detalhamento da arquitetura DTN seja efetuado nesse capítulo.

Aplicações e protocolos desenvolvidos para a arquitetura DTN devem partir da premissa que, em função dos atrasos longos e variáveis, é totalmente desaconselhável a negociação de parâmetros de conversação, assim como a troca contínua de mensagens baseadas em perguntas e respostas, ou qualquer outra forma de diálogo que possa requerer a troca

de mensagens em curtos intervalos de tempo. Ou seja, os dados transmitidos devem ser autossuficientes, contendo informações fundamentais para serem tratados pelo destinatário, sem que haja necessidade de aguardar por novas mensagens. Além disso, as aplicações devem tratar as mensagens de forma assíncrona, sem ter que esperar pela resposta de uma mensagem enviada anteriormente para enviar a próxima mensagem [12, 25, 9, 89, 62, 13].

Diferentemente da arquitetura TCP/IP, onde se presume que todos os nós da rede estão disponíveis e podem ser acessados a qualquer instante, na arquitetura DTN esse formalismo não existe em função do particionamento das redes e da comunicação intermitente. Na arquitetura DTN a comunicação entre os nós somente é efetivada quando ocorre um contato. Cerf *et al.* [13] descrevem a ocorrência de um contato como uma oportunidade para que dois nós possam comunicar-se e, tipicamente, os contatos podem ser classificados em função da previsibilidade, e se alguma ação é necessária para que um contato possa ocorrer. Os principais tipos de contatos encontram-se categorizados como persistentes, sob demanda, programados, oportunistas e previsíveis. Fall [27] acrescenta que os contatos podem ser parametrizados pelo tempo de início e término, capacidade, latência e direção.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: a Seção 2.1 apresenta, resumidamente, as principais características da arquitetura DTN; na Seção 2.2 algumas das aplicações mais comuns são expostas; A Seção 2.1.4 descreve os modos de disseminação de mensagens; e, por fim, a Seção 2.3 tece considerações finais a respeito das DTNs.

2.1 Arquitetura DTN

A disseminação da tecnologia que possibilita a comunicação sem fio para dispositivos móveis proporcionou o surgimento de redes de comunicação em cenários atípicos, como o monitoramento de animais terrestres e aquáticos, a comunicação interplanetária, a organização de um ambiente de comunicação provisória em áreas de desastres ou em campos de batalha, a comunicação dinâmica de pedestres e de veículos em estradas inteligentes, entre tantos outros. Todos esses cenários apresentam características peculiares, tais como atrasos longos e/ou variáveis, ocorrência contínua de particionamentos, mobilidade, taxas de transmissão assimétricas, altas taxas de erro etc. Logo, a arquitetura DTN apresenta funcionalidades diferenciadas, como a habilidade para operar em cenários onde a conectividade fim a fim entre uma origem e um destino pode permanecer indisponível por horas, dias, semanas ou pode jamais existir, além de fazer uso da capacidade de ar-

mazenamento da rede com intuito de prover a operação *store-and-forward*, entre outras [27, 89, 36, 79, 93, 62, 13].

Nos cenários típicos de DTNs verifica-se, frequentemente, a ocorrência de particionamentos ou a formação de redes regionais, conforme pode ser observado na Figura 2.1. Por conseguinte, para que as mensagens possam ser transmitidas com sucesso de um nó de origem para um nó de destino, torna-se imperativo o uso do paradigma *store-carry-and-forward*. A aplicação do paradigma *store-carry-and-forward* requer que os nós da rede tenham competência para armazenar as mensagens de forma persistente, que os nós se desloquem para outras regiões carregando as mensagens armazenadas e, por fim, dependendo da política do protocolo de roteamento implementado, que os nós efetuem o encaminhamento das mensagens para outros nós da rede ou somente para o nó de destino.

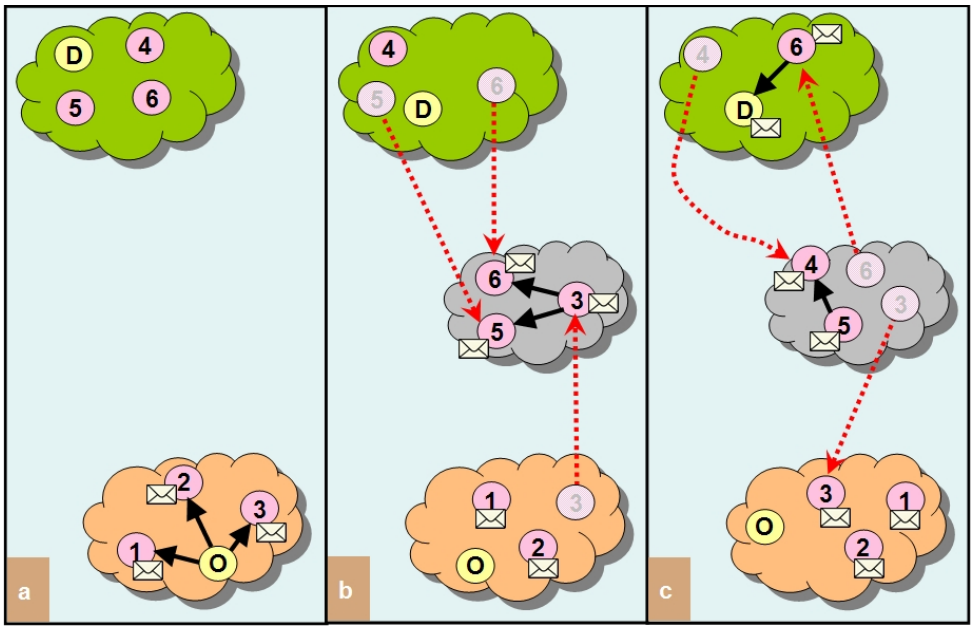

Figura 2.1: Operação *store-carry-and-forward*

Na Figura 2.1a é possível identificar a presença de duas regiões distintas e, aparentemente, incomunicáveis. Em uma das regiões um determinado nó de origem **O** encontra-se encaminhando uma mensagem, cujo destino é o nó **D**, para seus nós vizinhos identificados pelos numerais 1, 2 e 3. Algum tempo depois, os nós 3, 5 e 6 deslocam-se, formando uma terceira região, como é possível observar na Figura 2.1b. Nessa terceira região ocorre o encaminhamento da referida mensagem, armazenada pelo nó 3, para os nós 5 e 6. Já na Figura 2.1c, ocorre o deslocamento do nó 6 para a mesma região onde encontra-se o nó de destino **D** e o consequente encaminhamento da mensagem para o destinatário.

Em função das características peculiares da arquitetura DTN podemos concluir que

as oportunidades de transmissão normalmente não ocorrem com a frequência necessária na maioria dos cenários, consequentemente essas oportunidades de transmissão devem ser plenamente aproveitadas. A terminologia utilizada na arquitetura DTN define as oportunidades de transmissão como contatos e os diferentes tipos de contatos encontram-se descritos na Subseção 2.1.1. Dessa forma, as restrições comuns aos cenários típicos de DTNs favoreceram a criação de duas metodologias distintas para a propagação de mensagens, identificadas por: réplica, quando uma cópia da mensagem é transmitida para um vizinho direto[1] e uma cópia mantida pelo transmissor; e, transferência de custódia, quando a mensagem é efetivamente transmitida para um vizinho direto ficando o transmissor sem uma cópia da mensagem.

Além da transferência de custódia e do conceito de contato, a arquitetura DTN apresenta inúmeras funcionalidades, como a capacidade de interoperar com redes tradicionais, a transmissão confiável de mensagens, a camada de convergência, a capacidade de retransmissão, a habilidade de lidar com fragmentação, os mecanismos de segurança, os controles de congestionamento e de fluxo etc., que se encontram esmiuçadas em [27, 89, 20, 75, 62, 13].

As Subseções 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3 apresentam, respectivamente, informações acerca dos tipos de contato, da camada de agregação e da transferência de custódia.

2.1.1 Tipos de Contato

Diferentemente da arquitetura TCP/IP, onde presume-se que todos os nós da rede encontram-se disponíveis e podem ser acessados a qualquer instante, na arquitetura DTN esse formalismo não existe em função do particionamento das redes e da comunicação intermitente. Na arquitetura DTN a comunicação entre os nós somente é efetivada quando ocorre um contato. Cerf *et al.* [13] descrevem a ocorrência de um contato como uma oportunidade para que dois nós possam se comunicar e, tipicamente, os contatos podem ser classificados em função da previsibilidade e se alguma ação é necessária para que um contato possa ocorrer. Os principais tipos de contatos encontram-se categorizados como persistentes, sob demanda, programados, oportunistas e previsíveis. Fall [27] acrescenta que os contatos podem ser parametrizados pelo tempo de início e término (relativos ao nó DTN fonte), capacidade, latência e direção.

[1]Representa, sobre a ótica de um determinado nó identificado por n_a, um nó qualquer n_b que esteja dentro do raio de alcance de n_a

2.1.1.1 Contatos Persistentes

Os contatos persistentes não demandam qualquer ação para serem instanciados, ou seja, encontram-se sempre disponíveis. Conexões de última milha para a Internet como xDSL ou *cable modem* são exemplos de contatos persistentes.

2.1.1.2 Contatos Sob Demanda

Os contatos sob demanda necessitam de alguma ação para serem instanciados, mas após esse processo, permanecem como contatos persistentes até que sejam finalizados. Como exemplo é possível relacionar uma conexão via linha discada, sob o ponto de vista do usuário discador. No entanto, sob o ponto de vista do provedor do serviço de linha discada, o contato pode ser categorizado como oportunista.

2.1.1.3 Contatos Programados

Os contatos programados podem ser definidos como um acordo para estabelecer um contato em um horário e por um período de tempo previamente determinados entre nós DTN. O contato estabelecido entre uma estação terrestre e um satélite do tipo LEO (*Low Earth Orbit*) ou uma rede de sensores onde os nós despertam em horários previamente determinados são exemplos de contatos programados.

2.1.1.4 Contatos Oportunistas

Os contatos oportunistas ocorrem de forma não determinística, ou seja, em função de encontros entre nós de uma DTN que não foram previamente programados. Nesse caso, os nós devem aproveitar as vantagens provenientes de contatos oportunistas para estabelecer uma comunicação com outros nós visando o encaminhamento de mensagens. Como exemplo é possível relacionar o cenário de alunos carregando PDAs (*Personal Digital Assistant*) em um *campus* universitário que se comunicam através do protocolo *Bluetooth*. Os contatos oportunistas ocorrem quando pares de alunos estão dentro do raio de alcance dos rádios e deixam de existir quando se afastam do raio de alcance.

2.1.1.5 Contatos Previsíveis

Nos contatos previsíveis os nós DTN são capazes de efetuar previsões a respeito do horário e da duração dos próximos contatos com base em dados históricos de contatos realizados

anteriormente ou fundamentados em outro tipo de informação. Deve-se, todavia, ressaltar que os contatos previsíveis apresentam um certo grau de incerteza. O cenário onde ônibus equipados com dispositivos de comunicação sem fio, com grande capacidade de armazenamento e que circulam por um trajeto previamente estabelecido, possibilita a ocorrência de contatos previsíveis com outros dispositivos sem fio que se encontrem às margens do trajeto. Essa predição é baseada na previsibilidade do horário que um próximo contato ocorrerá entre algum dispositivo sem fio e um ônibus.

2.1.2 Camada de Agregação

O DTNRG (*Delay Tolerant Network Research Group*) propôs uma arquitetura denominada de arquitetura DTN [13] com objetivo de prover os recursos necessários para o encaminhamento de mensagens provenientes de aplicações desenvolvidas para a arquitetura DTN. A arquitetura DTN (apresentada na Seção 2.1) consiste, essencialmente, da sobreposição de uma nova camada, denominada camada de agregação (*bundle layer*), sobre a camada de transporte. A Figura 2.2 [62] ilustra o posicionamento da camada de agregação em relação às demais camadas, salientando que as camadas inferiores são determinadas de acordo com as características específicas de cada região da rede, e que a camada de agregação implementada deve ser a mesma em todas as regiões que compõem a DTN [89, 46, 30, 75].

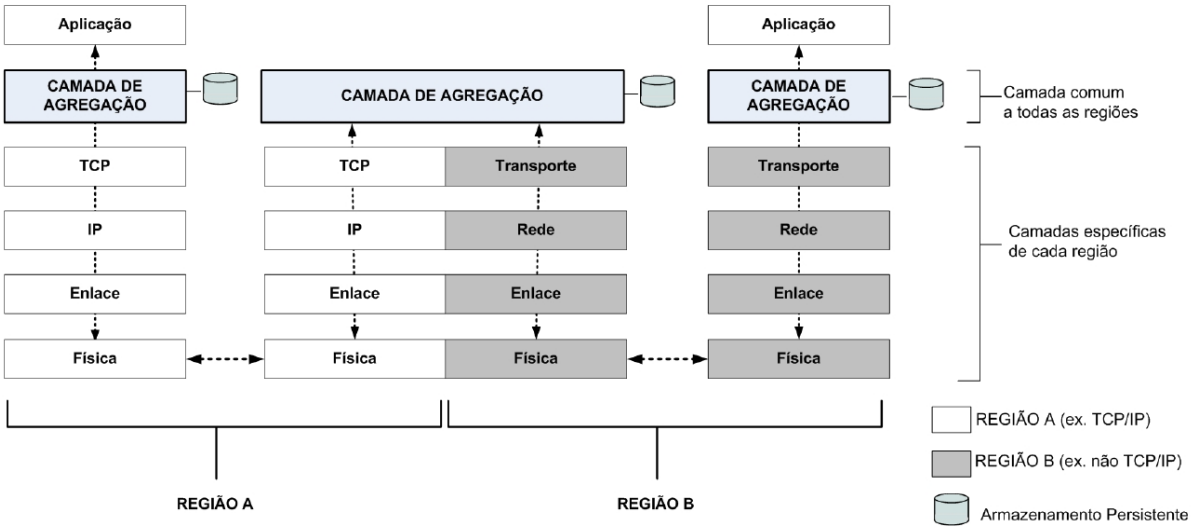

Figura 2.2: Camada de agregação

De acordo com Scott e Burleigh [75], as mensagens originadas na arquitetura DTN são intituladas agregados e podem apresentar tamanhos variáveis. Cada agregado contém uma sequência de um ou mais blocos de dados de protocolo. Deve-se observar que o

termo bloco é utilizado na terminologia DTN em substituição ao termo cabeçalho, pois as informações de controle nem sempre encontram-se no início dos dados (agregado). Na arquitetura DTN é factível a existência de múltiplas instâncias de um mesmo agregado em diferentes partes da rede ou até mesmo em uma mesma região. Logo, instâncias idênticas de um agregado podem estar armazenadas na memória local de nós DTN ou podem estar em trânsito, ou seja, sendo transmitidas.

Farrell *et al.* [30] definem um nó DTN como uma entidade que executa uma instância do protocolo de agregação ou BP (*Bundle Protocol*) e, consequentemente, é capaz de transmitir ou receber agregados, embora existam alguns tipos que somente podem transmitir, tais como sensores com poucos recursos. No entanto, na maioria das implementações os nós DTN são incapazes de transmitir e receber simultaneamente. Detalhes sobre a camada de agregação podem ser encontrados em [28, 89, 46, 30, 62, 75, 29].

2.1.3 Transferência de Custódia

Na arquitetura DTN a retransmissão em função de perdas ou de dados corrompidos pode ser realizada pela camada de agregação ou por camadas inferiores. Entretanto, como não há garantia que os protocolos das camadas inferiores sejam os mesmos entre uma origem e um destino, esses protocolos não são executados no modo fim-a-fim. Consequentemente, somente a camada de agregação é capaz de prover os mecanismos necessários para a implementação de confiabilidade fim-a-fim [89, 27].

Segundo Cerf *et al.* [13] e *Fall et al.* [28], a camada de agregação dispõe de um o serviço básico de entrega de mensagens, porém sem confirmação. Para incrementar a confiabilidade na entrega dos agregados, a camada de agregação oferece duas opções: confirmação fim-a-fim e transferência de custódia (TC) ou *custody transfer* (CT). Aplicações DTN podem utilizar as confirmações para implementar mecanismos próprios de transferência segura de mensagens. Já o uso da opção de transferência de custódia implica mover a responsabilidade pela entrega confiável de um agregado, ao longo da rede, através de diferentes nós DTN.

O uso da transferência de custódia para o encaminhamento ponto-a-ponto (*unicast*) implica mover agregados para o mais próximo possível (em termos de alguma métrica de roteamento) do destino final e efetuar retransmissões caso sejam necessárias. Os nós DTN que aceitam agregados com a opção de transferência de custódia são denominados de custódios. Deve-se observar que os nós DTN não são obrigados a aceitar a transferência de custódia de um agregado, e essa negativa pode ocorrer, por exemplo, em função da

carga de energia estar abaixo de um determinado limiar, em função de atingir o limite da capacidade de armazenamento ou em função de algum outro recurso estar se esgotando [28, 62, 13, 29].

Quando um nó DTN envia um agregado para um próximo nó com a opção de transferência de custódia selecionada, um temporizador de retransmissão é iniciado. Caso o nó DTN emissor não receba uma confirmação e o temporizador alcance um valor superior a um limite estabelecido, ocorre uma retransmissão. No entanto, se o próximo nó aceitar a custódia do agregado, caberá a esse próximo nó enviar um reconhecimento positivo (ACK) para o nó DTN emissor. Quando um nó DTN envia um agregado sem selecionar a opção de transferência de custódia à camada de agregação, o temporizador de retransmissão não é instanciado e o sucesso da transmissão passa a depender exclusivamente dos mecanismos de confiabilidade dos protocolos das camadas inferiores [89, 13].

Warthman [89] e *Fall et al.* [28] afirmam que um custódio tem a responsabilidade de manter um agregado até que um outro nó DTN aceite a responsabilidade da custódia desse agregado ou até que o tempo de vida do agregado expire. A opção de transferência de custódia não garante a confiabilidade fim-a-fim, contudo essa garantia pode ser obtida se o nó fonte solicitar tanto a transferência de custódia quanto a confirmação fim-a-fim. Nesse caso, o nó fonte deve manter uma cópia do agregado para garantir uma retransmissão se o temporizador expirar ou até receber uma confirmação.

Em [29], Fall e Farrell ressaltam que nós DTN que disponham de recursos diferenciados, tais como capacidade de armazenamento, padrão de mobilidade etc., podem ser configurados para aceitar a transferência de custódia, enquanto que os demais nós podem recusar esse tipo de solicitação. Esse recurso possibilitaria a concentração intencional de agregados em alguns nós específicos da rede que teriam funções diferenciadas. Os autores ainda relatam que existem circunstâncias onde o procedimento de confirmação pode falhar devido a interrupções durante o processo de transmissão ou em conexões unidirecionais, embora situações como essas sejam raras.

2.1.4 Modos de Disseminação

A arquitetura DTN faz uso de dois modos de disseminação, identificados por modo de disseminação epidêmica e modo de disseminação probabilística. No modo de disseminação epidêmica os nós encaminham todas as mensagens para todos os seus vizinhos diretos. Essa forma de disseminação permite que as mensagens sejam replicadas rapidamente para todos os nós da rede, aumentando a possibilidade de que as mensagens sejam entregues

aos seus respectivos destinatários. O protocolo de roteamento *Epidemic* [85] caracteriza-se como um exemplo clássico desse modo de disseminação. No entanto, como o sucesso do modo de disseminação epidêmica depende da capacidade de armazenamento dos nós e da duração do contato, algumas propostas fazem uso de uma variação do modo de disseminação epidêmica, denominada disseminação epidêmica controlada. No modo de disseminação epidêmica controlada, para que haja disseminação epidêmica é necessário que algum critério seja satisfeito. Como exemplo, é possível relacionar os protocolos *Spray and Wait* [81] e *Spray and Focus* [82, 83].

Já o modo de disseminação probabilística faz uso de mecanismos para determinar se uma determinada mensagem deve ser encaminhada para um vizinho direto ou não. Normalmente, protocolos de roteamento que implementam o modo de disseminação probabilística baseiam-se em dados estatísticos que costumam ser calculados a partir de métricas como: duração e frequência dos contatos, tamanho da mensagem, quantidade de mensagens entregues para o destinatário, etc. O objetivo principal do modo de disseminação probabilística é proporcionar um uso eficiente dos recursos da rede, evitando a propagação indiscriminada de mensagens que, em certos contextos, pode ocasionar um congestionamento e a perda de mensagens devido ao comprometimento da capacidade de armazenamento dos nós. Logo, em contextos que apresentem restrições como as descritas, o modo de disseminação probabilística tende a apresentar um melhor desempenho. No entanto, como o modo de disseminação probabilística depende de dados estatísticos, a ausência desses dados ou a presença de informações obsoletas pode acarretar a perda de oportunidades de transmissão. Os protocolos PROPHET PROPHET [49, 48], MaxProp [7], RAPID [1] constituem exemplos do modo de disseminação probabilística.

2.2 Aplicações

Uma das principais aplicações da arquitetura DTN está relacionada com a questão da inclusão digital. Governos e organizações não governamentais observaram o potencial da arquitetura DTN com o intento de prover a infraestrutura necessária ao acesso à Internet para comunidades de baixa renda, comunidades localizadas em áreas rurais, e comunidades localizadas em áreas onde não haja viabilidade para implantação de uma infraestrutura tradicional de comunicação. Nesses cenários, onde é razoável destacar a presença de duas grandes regiões, sendo uma com acesso à Internet e outra sem acesso à Internet, as aplicações mais comuns são o correio eletrônico (*e-mail*) e o acesso às páginas Web (*WWW - World Wide Web*). O transporte das requisições e das respectivas respostas entre as

diferentes regiões é provido, normalmente, por mulas de dados ou *data mules* (*Mobile Ubiquitous LAN Extensions*) [78]. As mulas de dados podem ser caracterizadas, normalmente, por pessoas, animais ou veículos equipados com dispositivos de comunicação sem fio, com grande capacidade de armazenamento, e com a responsabilidade de transportar dados entre as regiões. Os projetos DakNet [68, 69, 17] e Kiosknet [77, 32, 42] constituem exemplos desse modelo de aplicação das DTNs.

As DTNs também vêm sendo amplamente utilizadas com o objetivo de prover o monitoramento de animais e de condições climáticas. O projeto Zebranet [37, 92, 91] foi desenvolvido com objetivo de monitorar o comportamento de zebras na reserva *Sweetwaters Game Reserve*, localizada no Quênia. Os animais monitorados receberam colares equipados com nós sensores sem fio e com sistema de posicionamento global (GPS - *Global Positioning System*) que, periodicamente, coletam coordenadas a respeito da localização dos animais e efetuam o armazenamento em memória *flash*. As informações armazenadas nos colares são enviadas para uma estação base que se movimenta esporadicamente ao longo da reserva. Com o objetivo de preservar a maior quantidade de dados coletados, os colares são capazes de transmitir as informações entre si, salto a salto, aumentando a probabilidade dos dados alcançarem a estação base. Já o grupo SeNDT (*Sensor Networking with Delay Tolerance*) [55, 76] projetou uma plataforma versátil e robusta de sensores com a capacidade de permanecer em operação por longos períodos de tempo em ambientes hostis. O projeto piloto utiliza redes de sensores tolerantes a atrasos no monitoramento da qualidade da água em lagos de áreas rurais e no monitoramento da poluição sonora em rodovias localizadas na Irlanda.

Além dos projetos citados, é razoável relacionar aplicações da arquitetura DTN provenientes de inúmeros outros projetos concluídos e em andamento, tais como em TurtleNet [80], EDIFY (*Enhanced Disruption/Fault Tolerant Bundle Delivery*) [16], Internet Interplanetária (IPN) [9], SNC (*Sámi Network Connectivity*) [24], DieselNet [7], CONDOR (*C2 On-the-move Network Digital Over-the-horizon Relay*) [66], CARNIVORE (*Carnivore Adaptive Research Network in Varied Outdoor Remote Environments*) [71] etc.

2.3 Considerações Finais

As informações apresentadas neste capítulo retratam cenários com características contrastantes com as características adequadas à operação da arquitetura TCP/IP. Esse fato conduziu a comunidade científica à pesquisa e ao desenvolvimento de uma arquitetura

específica para lidar com cenários tão individualizados, denominada arquitetura DTN (*Delay and Disruption Tolerant Network*). A arquitetura DTN baseia-se, principalmente, na sobreposição de uma nova camada, denominada camada de agregação (*Bundle Layer*), sobre a camada de transporte. Cabe à camada de agregação a função de encaminhar as mensagens, que são intituladas agregados (*bundles*), prover os mecanismos essenciais para subsistência de confiabilidade fim a fim e/ou salto a salto, e ainda a fragmentação e a remontagem de agregados.

Em cenários típicos da arquitetura DTN, a existência de uma oportunidade de transmissão, denominada de contato, deve ser plenamente aproveitada, pois constitui, em sua maioria, um fato não determinístico. Finalmente, as aplicações apresentadas descrevem a serventia e a aplicabilidade real da arquitetura DTN, com intuito de atender aos requisitos de redes de comunicação para populações carentes sem infraestrutura de comunicação ou com infraestrutura inadequada, visando prover, por exemplo, o monitoramento de animais e de condições climáticas.

Capítulo 3

Motivação

Os cenários característicos de DTNs apresentam, em sua maioria, peculiaridades contrastantes que ocasionam uma variação considerável no desempenho dos principais protocolos de roteamento. Além disso, os diversos contextos que se formam ao longo da existência de cada cenário desafiam a capacidade dos protocolos de roteamento de manter um padrão de desempenho em relação a métricas fundamentais para toda e qualquer aplicação, tais como taxa de entrega, latência etc. Essa afirmativa encontra evidência no registro do desempenho de diversos protocolos presentes na literatura. Apenas como exemplo, é plausível contrastar o desempenho dos protocolos *Epidemic* [85] e PROPHET [49] em três trabalhos com cenários distintos.

O protocolo de roteamento *Epidemic* [85] foi proposto e avaliado em um cenário artificial com 50 nós dispostos de forma fortuita. Cada nó selecionava aleatoriamente uma coordenada no cenário de simulação e deslocava-se com uma velocidade uniforme entre (0,20] metros por segundo. Ao chegar ao ponto de destino, uma nova coordenada era escolhida, repetindo todo o processo. Os resultados obtidos demonstraram um desempenho bastante satisfatório, pois em quatro dos cinco conjuntos de simulações efetivadas a taxa de mensagens entregues ao destinatário foi de cem por cento e, no quinto, de 89,9 por cento.

No segundo trabalho, Lindgren *et al.* [49] propuseram o protocolo de roteamento PROPHET e estabeleceram dois cenários distintos para comparar o desempenho com o protocolo *Epidemic*. Os autores reproduziram o cenário empregado em [85] e, em um segundo cenário, modelaram a movimentação em vilas remotas ou aplicações de monitoramento de animais. No primeiro cenário, o protocolo PROPHET apresentou resultados melhores que o protocolo *Epidemic* em algumas simulações, já no segundo cenário, sob determinadas circunstâncias, a taxa de mensagens entregues do protocolo PROPHET foi

equivalente ao dobro da taxa obtida pelo protocolo *Epidemic*.

No terceiro trabalho, em um cenário de rede veicular de 40 ônibus, Balasubramanian *et al.* [1] propuseram e avaliaram o protocolo de roteamento RAPID, confrontando-o com os protocolos PROPHET, MaxProp [7] e *Spray and Wait* [81]. Nesse cenário, o PROPHET apresentou o pior desempenho entre os protocolos avaliados, a ponto de os resultados terem sido suprimidos pelos autores.

Embora a oscilação no desempenho dos protocolos de roteamento para DTNs em cenários com particularidades contrastantes seja esperada, faz-se necessário mensurar a dimensão dessa oscilação. Essa asserção tem por objetivo a comprovação da real indispensabilidade da adoção de um mecanismo que possibilite a adaptação dinâmica para protocolos de roteamento parametrizáveis em função de mudanças de características dos contextos, comprovando o quão significativas podem ser essas oscilações. Desta forma, serão avaliados três entre os principais protocolos de roteamento parametrizáveis para DTNs, em três cenários com propriedades distintas, e ainda será destacado o quão melhor poderia ser o desempenho, se uma configuração diferente da configuração padrão fosse utilizada.

Os protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* foram selecionados para análise por estarem entre os mais citados na literatura, e em função do aspecto favorável à variação de suas configurações. Além disso, sem que haja o intuito de propor um novo protocolo, uma camada de adaptação simplificada foi adicionada ao protocolo PROPHET visando exclusivamente comparar o desempenho entre a versão original do protocolo PROPHET e a versão modificada, que será identificada nesta tese de doutorado por PROPHET-ADPT.

Este capítulo apresenta-se como segue: a Seção 3.1 sumariza as principais particularidades dos protocolos avaliados; a Seção 3.2 descreve os cenários utilizados nas simulações, retratando as características inerentes aos contextos criados e relaciona o intervalo de valores associado a cada parâmetro dos protocolos selecionados; na Seção 3.3 os protocolos são avaliados, possibilitando que as configurações com melhor desempenho sejam destacadas, assim como a oscilação do desempenho dos protocolos resultante da variação dos parâmetros; já a Seção 3.4 demonstra que a adição de uma camada simplificada de adaptação a contextos ao protocolo PROPHET foi capaz de incrementar o desempenho; a Seção 3.5 elenca os principais trabalhos relacionados; e, por fim, a Seção 3.6 expressa as considerações finais.

3.1 Protocolos Avaliados

Os protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* foram selecionados por estarem entre os protocolos parametrizáveis mais citados na literatura, além de apresentarem modos de operação com características distintas. As subseções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3 descrevem brevemente os protocolos supracitados.

3.1.1 MaxProp

O protocolo MaxProp [7] faz uso do conhecimento adquirido de encontros anteriores entre nós da rede para otimizar o encaminhamento de mensagens. Cada nó mantém um vetor denominado *delivery likelihood* que armazena o custo para alcançar cada destinatário conhecido, baseado na frequência com que os nós se encontram. Consequentemente, quando dois nós se encontram, ocorre a troca do vetor *delivery likelihood*, possibilitando o cálculo do menor caminho para cada destinatário. Os cenários que apresentam contatos previsíveis, como cenários de rede veículares, são adequados ao modo de operação do protocolo MaxProp. O algoritmo de cálculo do custo de cada destino baseia-se nas seguintes regras:

- supondo que o conjunto de nós da rede é representado por S, cada nó $n_a \in S$ mantém registro da probabilidade de encontrar um nó $n_b \in S$ em $f_{n_b}^{n_a}$;
- o processo de inicialização de cada nó n_a para todo destino n_b é realizado de acordo com o valor de $\frac{1}{(|S|-1)}$;
- cada nó tem um vetor com um elemento para cada um dos demais nós da rede que é utilizado na qualidade de métrica de roteamento, sendo normalizado de forma que a soma dos elementos seja igual a um;
- quando um nó n_a encontra um nó n_b, o elemento do vetor correspondente ao nó n_b é incrementado de uma unidade, e todos os elementos do vetor são divididos por 2, mantendo o vetor sempre normalizado;

Dessa forma, o nó encontrado pela última vez apresenta sempre o maior valor, o encontrado pela penúltima vez a metade do valor anterior, e assim sucessivamente, ordenando os nós sempre em função dos encontros. De posse dos valores para os outros nós, um nó n_a pode calcular o custo $c(n_a, n_{a+1}, ..., n_b)$ de cada caminho possível para um nó de destino n_b, até um determinado limite de saltos. Logo, o custo de um caminho usando os nós

$(n_a, n_{a+1}, ..., n_b)$ será a soma das probabilidades de cada conexão ao longo do percurso não ocorrer, representada por um menos a probabilidade de cada conexão ocorrer, conforme ilustra a Equação 3.1.

$$c(n_a, n_{a+1}, ..., n_b) = \sum_{x=a}^{b-1} \left[1 - (f_{x+1}^{x})\right] \tag{3.1}$$

É factível, dessa forma, supor um contexto de uma DTN, contendo os nós n_a, n_b, n_c, n_d e n_e. É possível, ainda, acrescentar que o vetor *delivery likelihood* do nó n_a contenha as seguintes informações: $n_b = 0,5$, $n_c = 0,25$, $n_d = 0,125$ e $n_d = 0,125$. Caso n_a volte a estabelecer uma conexão com n_c, o valor de n_c, no vetor *delivery likelihood* de n_a, será incrementado de uma unidade ($n_c = 0,25 + 1 = 1,25$). Em seguida, os valores serão divididos por dois ($n_b = \frac{0,5}{2} = 0,25$, $n_c = \frac{1,25}{2} = 0,625$, $n_d = \frac{0,125}{2} = 0,0625$ e $n_d = \frac{0,125}{2} = 0,0625$), de forma que o somatório de todos os valores retorne para um.

Com o intuito de exemplificar como o protocolo MaxProp calcula o custo para cada destino, é razoável supor um contexto com quatro nós, identificados por n_a, n_b, n_c e n_d, e ilustrado pela Figura 3.1. Existem, no referido contexto, quatro alternativas para que n_a alcance n_d, identificadas por **ABD**, **ACD**, **ABCD** e **ACBD**. A Equação 3.2 apresenta o cálculo do custo para todas as rotas, demonstrando que a melhor alternativa é a rota **ACD**.

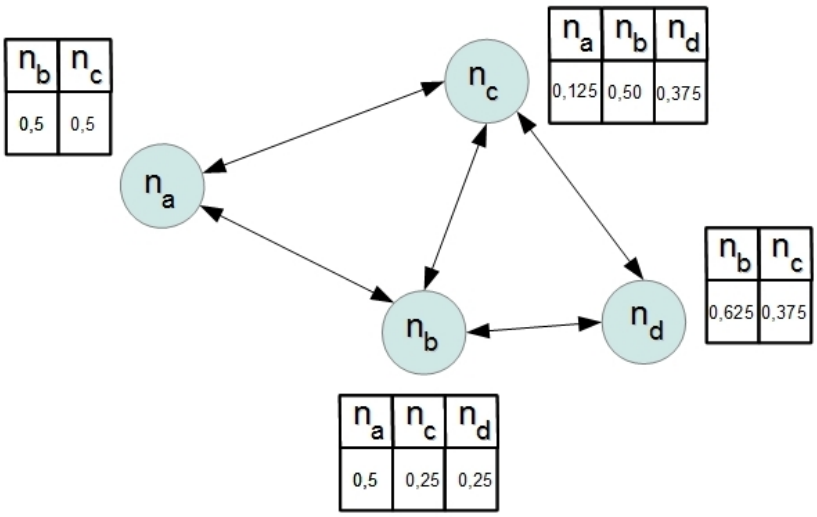

Figura 3.1: Cálculo do custo de rotas - Protocolo MaxProp

$$\begin{aligned}
\mathbf{ABD} &= (1-0,5)+(1-0,25) &&= \mathbf{1{,}250} \\
\mathbf{ACD} &= (1-0,5)+(1-0,375) &&= 1,125 \\
\mathbf{ABCD} &= (1-0,5)+(1-0,25)+(1-0,375) &&= 1,875 \\
\mathbf{ACBD} &= (1-0,5)+(1-0,50)+(1-0,25) &&= 1,750
\end{aligned} \tag{3.2}$$

3.1.2 PROPHET

O protocolo PROPHET (*Probabilistic Routing using History of Encounters and Transitivity*) [49] fundamenta-se no histórico de encontros para estimar a probabilidade de entrega e, consequentemente, adequa-se a cenários cujos contatos sejam previsíveis. Um índice denominado *Delivery Predictability*, $P_{(n_a,n_b)} \in [0,1]$, é calculado em todo nó n_a para cada destino conhecido n_b, conforme determina a Equação 3.3. Quando ocorre um contato entre dois nós n_a e n_b, o nó n_a efetua o encaminhamento da mensagem m se n_b apresentar uma maior probabilidade de entrega para o destino n_d, ou seja, se $P_{(n_a,n_d)} < P_{(n_b,n_d)}$.

$$P_{(n_a,n_b)} = P_{(n_a,n_b)old} + (1 - P_{(n_a,n_b)old}) \times P_{encounter}, \tag{3.3}$$

onde $P_{encounter}$ é uma constante de inicialização.

O valor de $P_{(n_a,n_b)}$ aumenta a cada novo encontro entre os nós n_a e n_b. No entanto, se os nós n_a e n_b deixam de encontrar-se frequentemente, $P_{(n_a,n_b)}$ tem o valor reduzido à proporção que o tempo decorre. Essa redução é controlada por uma constante de envelhecimento, identificada por γ, elevada à potência de k, que corresponde à quantidade de unidades de tempo decorridas desde a última vez que os nós n_a e n_b encontraram-se, conforme ilustra a Equação 3.4. Já a propriedade de transitividade, apresentada pela Equação 3.5, é aplicada caso um nó n_a encontre frequentemente um nó n_b, e o nó n_b encontre frequentemente um nó n_c. Desta forma, o nó n_c destaca-se como uma boa escolha para encaminhar mensagens para o nó n_a e vice-versa.

$$P_{(n_a,n_b)} = P_{(n_a,n_b)old} \times \gamma^k, \tag{3.4}$$

onde γ é uma constante de envelhecimento, e k a quantidade de unidades de tempo decorridas desde a última atualização da métrica *Delivery Predictability*.

$$P_{(n_a,n_c)} = P_{(n_a,n_c)old} + (1 - P_{(n_a,n_c)old}) \times P_{(n_a,n_b)} \times P_{(n_b,n_c)} \times \beta, \tag{3.5}$$

onde β é a constante que determina o impacto da transitividade na métrica *Delivery*

Predictability.

3.1.3 Spray and Wait

O protocolo *Spray and Wait* [81] baseia-se em uma abordagem oportunista para estimar a quantidade de nós na rede e determinar a quantidade ótima de réplicas das mensagens, combinando a velocidade na disseminação de mensagens do protocolo *Epidemic* com a simplicidade do encaminhamento de mensagens diretamente para o destinatário. Por conseguinte, o mecanismo de encaminhamento de mensagens requer duas fases distintas, denominadas *spray* e *wait*, descritas a seguir:

1. na fase *spray*, para cada mensagem gerada pelo nó de origem, uma quantidade máxima de L cópias dessa mensagem é propagada pela rede, de forma que as mensagens são transportadas pelo nó de origem e por outros L nós da rede;
2. na fase *wait*, se o destinatário não tiver sido alcançado na fase *spray*, cada um dos L nós que contém uma cópia da mensagem somente poderá efetuar a entrega diretamente para o destinatário.

O valor associado ao parâmetro L é determinante para o desempenho do protocolo *Spray and Wait*, e pode ser calculado em função da quantidade de nós da rede e do tempo estimado para uma transmissão direta para o destinatário. No entanto, devido à impossibilidade de determinação da quantidade de nós em certas redes, os autores propuseram uma equação distinta com o intuito de obter o valor do parâmetro L. As equações para o cálculo do parâmetro L encontram-se em [81].

Na fase *spray*, o protocolo *Spray and Wait* dispõe de dois modos de operação distintos para disseminar as L cópias de cada mensagem, identificados por *Source Spray and Wait* e *Binary Spray and Wait*. No modo de operação *Source Spray and Wait*, o nó de origem inicializa cada mensagem com L cópias e é responsável por distribuir todas as L cópias da mensagem. Nesse modo de operação, o nó de origem encaminha uma cópia da mensagem para L nós distintos.

No modo de operação *Binary Spray and Wait*, nó de origem também inicializa cada mensagem com L cópias, no entanto dissemina as mensagens de forma distinta. Caso o nó n_a, que tem $x > 1$ cópias da mensagem M, se encontre com o nó n_b, que não tem uma única cópia da referida mensagem, caberá ao nó n_a transferir $\lfloor x/2 \rfloor$ cópias para n_b, permanecendo com $\lceil x/2 \rceil$ cópias. Esse processo será repetido até que x seja igual a 1,

quando a mensagem M somente poderá ser transmitida para o destinatário. A Figura 3.2 ilustra os modos de operação do protocolo *Binary Spray and Wait*, considerando o envio de uma mensagem do nó identificado pela letra **O** para o nó identificado pela letra **D**, com $L = 6$.

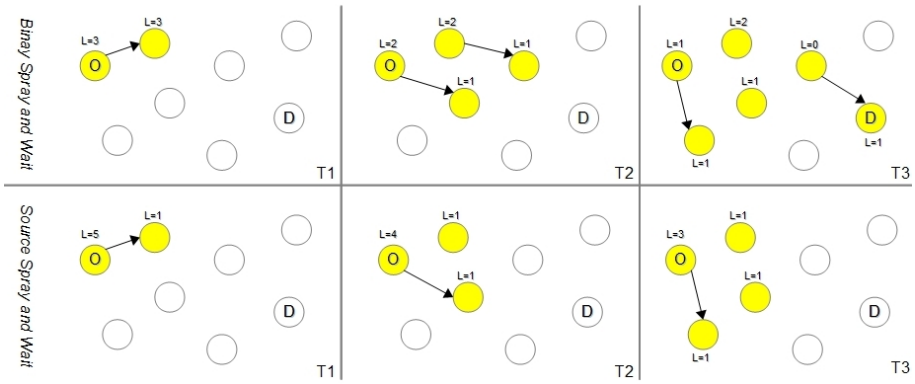

Figura 3.2: Modos de Operação - Protocolo *Spray and Wait*

Em função do modo de disseminação de mensagens, o protocolo *Spray and Wait* adequa-se a cenários em que os nós apresentem um grau elevado de mobilidade, pois, em contextos que apresentem nós com mobilidade limitada, a possibilidade de um destinatário permanecer isolado por muito tempo aumenta e, consequentemente, a probabilidade da mensagem alcançar o destinatário é reduzida.

3.2 Cenários

Visto que uma das motivações desta tese de doutorado é comprovar que as particularidades dos cenários podem interferir substancialmente no desempenho dos protocolos de roteamento para DTNs, foram selecionados três cenários com particularidades contrastantes, sendo que dois cenários foram reproduzidos a partir de registros de movimento reais e o terceiro cenário criado artificialmente.

O primeiro cenário, que será referenciado como DieselNet [3], descreve conexões entre ônibus (IEEE 802.11b), e entre ônibus e estacões fixas (rádios de longo alcance) na cidade de Amherst, nos EUA. Entretanto, para limitar as conexões no cenário, foram extraídos apenas os registros de conexões entre ônibus por um período de aproximadamente uma semana e descartadas as conexões entre ônibus e estações fixas. O segundo cenário, identificado por ZebraNet [88], distingue-se por retratar os movimentos reais de zebras em uma reserva no Quênia. As zebras foram equipadas com colares contendo um rádio para transmissão das informações coletadas e um dispositivo GPS, que possibilitou a obtenção

de coordenadas de posicionamento. Já o terceiro cenário foi criado artificialmente e representa, baseado no modelo WDM (*Working Day Movement Model*) [26], o deslocamento de nós de acordo com um mapa da área central da cidade de Helsinki, na Finlândia. O padrão de mobilidade dos nós tenciona delinear o comportamento de pedestres, carros e ônibus, com uma distribuição quantitativa na proporção de, respectivamente, 50%, 30% e 20%. As Tabelas 3.1 e 3.2 exibem, respectivamente, informações complementares acerca das características dos cenários e dos contextos formulados para a realização de simulações.

Tabela 3.1: Características dos cenários

Cenário	Quantidade de Nós	Duração	Dimensão (Km^2)
DieselNet	16 e 31	7 dias e 20 horas	241,40
WDM	75 e 150	6 horas	15.300
ZebraNet	10, 20, 30 e 40	45 minutos	97,124

O objetivo complementar do Capítulo 3 é mensurar o quanto a adequação da configuração de alguns protocolos de roteamento pode acarretar em resultados expressivamente melhores que os apresentados pelas respectivas configurações padrão. Dessa forma, os protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* foram relacionados em função da perspectiva que os referidos protocolos oferecem para variação de suas configurações. Para cada um dos cenários descritos na Tabela 3.1 foram gerados cinco arquivos distintos de tráfego com transmissões de mensagens de 10 KBytes e taxa de transmissão fixada em 11 Mbps. O simulador ONE [41] foi utilizado para avaliar o desempenho dos protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* nos cenários DieselNet, WDM e ZebraNet, com objetivo de observar o comportamento de diversas métricas, tais como a quantidade de mensagens entregues, encaminhadas e descartadas, a latência média etc.

Tabela 3.2: Características dos contextos

Cenário	Quantidade de Contextos	Raio de Alcance (m)	Quantidade de Mensagens	Capacidade de Armazenamento
DieselNet	16	100	50, 250, 500 e 1.000	500 KB, 2.5 MB, 5 MB e 10 MB
WDM	32	50 e 150		
ZebraNet	48	50, 150 e 250		

A Tabela 3.3 exibe valores padrão dos parâmetros selecionados, pertinentes aos protocolos avaliados, cujos detalhamentos encontram-se nas Subseções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3. Já a Tabela 3.4 apresenta o intervalo de valores dos parâmetros selecionados dos protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* que foram utilizados nas simulações.

Deve-se ressaltar que a implementação do protocolo MaxProp no simulador ONE foi baseada em [40], possibilitando que o incremento utilizado para atualização do vetor

Tabela 3.3: Valores da configuração padrão dos parâmetros

Protocolo	Parâmetro	Configuração Padrão
MaxProp	α	1
	MaxSize	50
PROPHET	β	0,25
	γ	0,999
Spray and Wait	*binary*	*true*
	L	calculado de acordo com a quantidade de nós

delivery likelihood não ficasse restrito a uma unidade. Essa implementação permitiu a avaliação do impacto causado pela variação desse incremento, identificado pelo parâmetro α, porém respeitando-se a normalização da proposta original. Já o parâmetro $MaxSize$ limita a quantidade de informações armazenadas no vetor *delivery likelihood* e, visto que não há na literatura um valor padrão para a referido parâmetro, foi assumido o valor sugerido na implementação do simulador ONE. Cabe destacar que as notações α e $MaxSize$ são específicas do simulador ONE.

Em relação ao protocolo PROPHET, o parâmetro $P_encounter$ foi excluído do processo de variação em função de apresentar uma influência limitada. Já o protocolo *Spray and Wait* é o único que prevê a alteração da configuração padrão, porém de forma estática. O valor de L associado à configuração padrão depende da quantidade de nós da rede e foi calculado utilizando o *Lema 4.3* apresentado em [81].

Tabela 3.4: Intervalo de valores dos parâmetros

Protocolo	Parâmetro	Intervalo de Valores	Quantidade de Configurações
MaxProp	α	0,01, 0,1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 50, 100, 250, 500 e 1.000	160
	MaxSize	10, 25, 50, 75, 100, 250, 500 e 1.000	
PROPHET	β	de 0,05 até 0,95, com incrementos de 0,05	399
	γ	de 0,05 até 0,95, com incrementos de 0,05, 0,98 e 0,999	
Spray and Wait	*binary*	*true* e *false*	56
	L	de 1 até 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 500 e 1.000	

A Tabela 3.5 retrata a quantidade de vezes que cada protocolo foi avaliado em cada um dos três cenários, considerando o intervalo de valores de cada parâmetro dos protocolos

e a quantidade de contextos criados por cada cenário, e sumariza com a quantidade total de simulações por protocolo.

Tabela 3.5: Sumário da quantidade simulações por protocolo e cenário

Protocolo	Variação de Parâmetros	Quantidade por Contexto			Total de Simulações
		DieselNet	ZebraNet	WDM	
MaxProp	160	2.560	5.120	7.680	15.360
PROPHET	399	6.384	12.768	19.152	38.304
Spray and Wait	56	896	1.792	2.688	5.376
Total	615	9.840	19.680	29.520	59.040

3.3 Desempenho dos Protocolos Avaliados

Cada um dos três protocolos selecionados (MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait*) foi avaliado através do simulador ONE nos três cenários relacionados (DieselNet, ZebraNet e WDM), conforme ilustra a Tabela 3.5. Os resultados extraídos dessas simulações foram discretizados e tabulados em função de duas dimensões: densidade da rede e percentual de ocupação da área de armazenamento. A densidade da rede foi mapeada em função da relação entre a área de alcance de todos os nós da rede e a área de simulação. Dessa forma, caso o somatório da área de alcance de todos os nós de um determinado cenário seja menor que a área de simulação, a densidade será igual a zero. Caso o somatório da área de alcance dos nós seja maior ou igual a área de simulação, porém menor que o dobro da área de simulação, a densidade será igual a um, e assim sucessivamente.

Já a carga de mensagens da área de armazenamento foi correlacionada ao valor obtido pela divisão do tráfego total da rede (quantidade total de mensagens transmitidas multiplicada pelo tamanho das mensagens) pela capacidade de armazenamento de cada nó. Um valor menor ou igual a 100% indica que os nós apresentam capacidade para armazenar todas as mensagens geradas, sendo representado por $Cxxxx\%$, de forma que $xxxx \leq 100$ (de C0005% até C0100%). No caso de C0200%, os nós deveriam ter o dobro da capacidade de armazenamento para suportar todas as mensagens geradas pela rede. As demais representações presentes no texto (C0500% e C2000%) seguem a mesma regra.

O protocolo PROPHET foi selecionado para ilustrar as discrepâncias entre o desempenho da configuração que obteve o melhor desempenho e o desempenho da configuração padrão em relação à métrica taxa de mensagens entregues. A análise dessas discrepâncias possibilitou o destaque do quanto a configuração padrão do protocolo PROPHET deveria melhorar, em termos percentuais, para igualar-se à configuração com melhor desempe-

Tabela 3.6: Percentual de mensagens entregues do PROPHET - Configuração com melhor desempenho

Carga de Mensagens por Densidade		ZebraNet Densidade 0	WDM Densidade 1	DieselNet Densidade 4	ZebraNet Densidade 8	DieselNet Densidade 9
C0005%, C0010% e C0020% (50 Mensagens)	γ	0,60	0,999	0,999	0,999	0,999
	β	0,45	0,95	0,15	0,95	0,95
	λ	10,70%	99,00%	88,00%	100,00%	80,80%
C0050% (250 e 500 Mensagens)	γ	0,95	0,60	0,999	0,999	0,999
	β	0,10	0,95	0,15	0,95	0,70
	λ	7,22%	96,75%	87,00%	100,00%	74,30%
C0100% (50, (250, 500 e 1.000 Mensagens)	γ	0,40	0,90	0,999	0,999	0,999
	β	0,55	0,90	0,15	0,95	0,90
	λ	7,76%	97,25%	87,40%	100,00%	76,00%
C0200% (500 e 1.000 Mensagens)	γ	0,98	0,80	0,999	0,98	0,999
	β	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	λ	6,43%	90,70%	84,20%	97,90%	70,80%
C0500% (250 Mensagens)	γ	0,999	0,80	0,999	0,999	0,999
	β	0,10	0,05	0,05	0,05	0,10
	λ	7,65%	71,50%	75,80%	88,20%	60,20%
C2000% (1.000 Mensagens)	γ	0,98	0,85	0,999	0,999	0,999
	β	0,20	0,05	0,05	0,05	0,10
	λ	6,10%	53,50%	60,40%	70,40%	49,60%

nho. Deve-se ressaltar que algumas dimensões das Tabelas 3.6 e 3.7 foram suprimidas em função de não agregarem informações relevantes.

A Tabela 3.6 estampa a configuração do protocolo PROPHET que apresentou o melhor desempenho, com os valores de γ e β devidamente identificados, além do percentual de mensagens entregues pela respectiva configuração, representando por λ. A análise dos resultados do desempenho da taxa de mensagens entregues possibilitou a redação de algumas conclusões interessantes, tais como:

- os valores de γ e β variaram consideravelmente de acordo com o contexto estabelecido para a simulação, o que nos induz a afirmar que uma versão do protocolo PROPHET com capacidade de adaptação às características do contexto, aumentaria significativamente o desempenho, em relação à versão original, em grande parte das simulações realizadas;

- o valor de β sofre uma alteração drástica a partir do instante em que a capacidade de armazenamento dos nós torna-se insuficiente para reter as mensagens geradas pela rede;

- o valor de γ admite modificações enquanto a densidade da rede está limitada a zero e um, pois a partir da $densidade \geq 2$ o valor de γ permanece praticamente constante.

Tabela 3.7: Percentual de mensagens entregues do PROPHET - Configuração padrão e Configuração com pior desempenho

Carga de Mensagens por Densidade		ZebraNet Densidade 0	WDM Densidade 1	DieselNet Densidade 4	ZebraNet Densidade 8	DieselNet Densidade 9
C0005%, C0010%, e C0020% (50 Mensagens)	Padrão	4,90%	2,06%	1,38%	0,00%	0,00%
	Pior	(5,94)%	(3,12)%	(22,22)%	(0,40)%	(22,42)%
C0050% (250 e 500 Mensagens)	Padrão	2,12%	0,52%	1,40%	0,81%	0,13%
	Pior	(4,94%)	(1,31%)	(17,25%	(1,01%)	(26,15%)
C0100% (50, (250, 500 e 1.000 Mensagens)	Padrão	2,11%	0,78%	1,27%	0,70%	0,13%
	Pior	(4,30%)	(5,63%)	(18,83%)	(0,86%)	(24,29%)
C0200% (500 e 1.000 Mensagens)	Padrão	1,26%	2,78%	3,82%	9,51%	2,16%
	Pior	(5,41%)	(5,71%)	(15,82%)	(28,82%)	(18,59%)
C0500% (250 Mensagens)	Padrão	2,00%	24,78%	3,55%	22,50%	2,73%
	Pior	(5,52%)	(28,14%)	(26,33%)	(72,94%)	(24,90%)
C2000% (1.000 Mensagens)	Padrão	0,83%	29,54%	10,22%	41,37%	5,98%
	Pior	(7,02%)	(44,59%)	(36,04%)	(100,00%)	(31,22%)

Já Tabela 3.7 quantifica a deficiência da configuração padrão (identificada pelo termo Padrão, na 2ª coluna), e da configuração com pior desempenho (identificada pelo termo Pior, na 2ª coluna), em relação à taxa de mensagens entregues em diversos contextos. Dessa forma, o primeiro valor de cada célula identifica, em termos percentuais, o quanto a configuração padrão deveria melhorar de modo a igualar o desempenho obtido pela configuração com melhor desempenho; o segundo valor, que se encontra entre parêntesis, apresenta o incremento necessário, também em termos percentuais, para que a configuração com pior desempenho se equipare à configuração com melhor desempenho. O resultado do desempenho obtido pela configuração com pior desempenho possibilita também a avaliação do impacto negativo causado pela variação dos parâmetros γ e β.

Cabe, ainda, ressaltar que, enquanto a área de armazenamento dos nós dispõe de capacidade para conter as mensagens transmitidas (C0005 até C0100), a discrepância entre o desempenho das configurações com melhor desempenho e a configuração padrão não é relevante. Contudo, à medida que o percentual de ocupação ultrapassa os 100% (de C0200 a C2000), a discrepância cresce consideravelmente, justificando a adoção de um mecanismo que proporcione o ajuste dos parâmetros γ e β. Já a análise dos resultados obtidos pela configuração com pior desempenho ratifica que as oscilações podem ser expressivas, o que demanda um mecanismo preciso para a identificação das particularidades dos contextos.

Além disso, a Tabela 3.7 possibilita a observação da interferência das características próprias dos cenários no desempenho do protocolo PROPHET. A análise dos resultados das células provenientes da interseção das colunas Densidade 8 e Densidade 9 com as linhas C0500 e C2000 demonstra quanto as propriedades intrínsecas aos cenários inter-

ferem no desempenho, implicando oscilações significativas. No par de células formado por (C0500, Densidade 8) e (C0500, Densidade 9), o desempenho da configuração padrão na segunda célula equivale a somente 12,13% do desempenho apresentado na primeira célula, considerando a mesma quantidade de mensagens e um grau de densidade a mais. A mesma análise pode ser replicada para o par (C2000,Densidade 8) e (C2000,Densidade 9), destacando que o desempenho da configuração padrão na segunda célula equivale a apenas 14,45% do desempenho exibido na primeira célula.

A Tabela 3.8 expõe a dimensão da oscilação da métrica latência média das mensagens entregues sobre as diversas configurações dos protocolos avaliados, exibindo, por cenário, os piores resultados da configuração padrão e da configuração que obteve o pior desempenho, quantificada em relação à configuração que obteve o melhor desempenho da métrica latência média. Os valores representam o quanto as respectivas configurações deveriam reduzir a latência média, em termos percentuais, para igualarem-se à configuração de cada protocolo que obteve o melhor desempenho. A observação desses resultados demonstra o quanto a concepção do protocolo também influencia no desempenho.

Tabela 3.8: Percentual de deficiência dos protocolos - Latência média

Protocolo	Configuração	Latência Média		
		DieselNet	WDM	ZebraNet
MaxProp	Padrão	(5,93%)	(67,17%)	(27,36%)
	Pior Desempenho	(10,68%)	(68,40%)	(39,61%)
PROPHET	Padrão	(33,55%)	(94,78%)	(83,74%)
	Pior Desempenho	(41,42%)	(181,64%)	(257,57%)
Spray and Wait	Padrão	(8,09%)	(851,01%)	(468,64%)
	Pior Desempenho	(116,11%)	(3.161,28%)	(3.411,42%)

Na Tabela 3.9 é possível examinar o percentual de vezes em que a configuração padrão de cada protocolo obteve o melhor desempenho em relação à métrica taxa de entrega de mensagens. O estudo desses dados permite que os seguintes comentários sejam anotados:

- a mudança do cenário de simulação implica uma alteração considerável no desempenho de todos os protocolos, o que ratifica a diversidade de características dos cenários e dos diversos contextos que se formam em um mesmo cenário;
- a oscilação no desempenho de todos os protocolos demonstra a incapacidade para lidar uniformemente com os diversos contextos;
- na imensa maioria das observações, a configuração padrão dos protocolos alcança um melhor desempenho enquanto as mensagens geradas pela rede são insuficientes

para ocupar toda a capacidade de armazenamento dos nós;

Tabela 3.9: Desempenho da configuração padrão

Protocolo	Percentual de Ocupação	DieselNet	WDM	ZebraNet	Média Parcial	Média Global
MaxProp	$\leq 100\%$	100,00%	88,89%	66,67%	85,19%	65,14%
	$> 100\%$	40,00%	86,67%	8,57%	45,08%	
Prophet	$\leq 100\%$	25,00%	11,11%	7,14%	14,42%	7,21%
	$> 100\%$	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
SprayAndWait	$\leq 100\%$	50,00%	46,67%	0,00%	32,23%	26,69%
	$> 100\%$	0,00%	52,00%	11,43%	21,14%	

É de suma importância ressaltar que a ótica deste capítulo não é a análise comparativa do comportamento dos protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait*, mas elucidar a motivação para esta tese de doutorado. Todavia, essa análise encontra-se disponível em [65].

3.4 PROPHET Adaptativo

Incrementar o desempenho comprovadamente inferior do protocolo PROPHET, demonstrado e comentado em diversos trabalhos [1, 40, 47, 58, 59, 56, 63], configurou-se um desafio para confirmar a real necessidade de uma camada que propicie um mecanismo de adaptação ciente às características dos contextos. Logo, com base na análise dos dados de desempenho do protocolo PROPHET, que foram intencionalmente resumidos nas Tabelas 3.6 e 3.7, foi possível concluir que os parâmetros γ e β evidenciam uma tendência quando a capacidade de armazenamento dos nós é incapaz de suprir a necessidade da rede (C0200, C0500 e C2000), não obstante os cenários DieselNet, WDM e ZebraNet apresentarem propriedades diferenciadas.

Nesse contexto, γ tende a aproximar-se do seu limite superior (0,999), enquanto β é conduzido ao seu limite inferior (0,05). Esse trabalho de análise foi realizado com os resultados de todas as simulações do protocolo PROPHET com o objetivo de elaborar uma tabela de correlação entre as dimensões densidade e percentual de ocupação e a configuração que obteve o melhor desempenho, representada pelos parâmetros γ e β. A Tabela 3.10 reflete o resultado dessa análise, de forma que os dados apresentados fomentaram uma camada de adaptação simplificada introduzida no protocolo PROPHET com o intuito de alterar os valores de γ e β presentes na configuração padrão. Apenas com a finalidade de facilitar a alusão a essa transformação, a versão modificada do protocolo

PROPHET será referenciada neste capitulo por PROPHET-ADPT, sem que se caracterize a proposta de um novo protocolo.

Deve-se ressaltar que a camada de adaptação simplificada presente no protocolo PROPHET-ADPT altera os parâmetros γ e β individualmente em cada nó de acordo com características instantâneas do contexto de qualquer cenário, porém sem modificar o comportamento padrão do referido protocolo. Logo, o desempenho da versão adaptativa não está limitado ao desempenho da melhor configuração conforme pode ser observado na Figura 3.3 (capacidade de armazenamento dos nós limitada a 2,5% e 5% do total de mensagens na rede) e, como cada nó analisa a densidade e o percentual de ocupação de forma independente, dois nós, ainda que vizinhos diretos, podem apresentar valores distintos de γ e β.

Para o cálculo da densidade local realizado por todos os nós foi estabelecido que, se o somatório da área de alcance de todos os nós que se encontram a até dois saltos do nó em questão for menor que a área de simulação, a densidade será igual a 0. Para que a densidade seja igual a 1, o somatório da área de alcance de todos os nós com até dois saltos deve ser maior ou igual à área de simulação, porém menor que o dobro, e assim sucessivamente. Com o intuito de evitar a circulação de mensagens de controle e alterações significativas no protocolo PROPHET, os nós são iniciados com a configuração padrão e, quando o processo de atualização da métrica *delivery predictability* ocorre, a camada de adaptação contabiliza os nós que se encontram a até dois saltos e determina a densidade local. Por simplificação, os nós têm ciência da dimensão da área de simulação e do raio de alcance do rádio. Já o percentual de ocupação é estimado a partir do somatório de todas as mensagens descartadas nos últimos 300 segundos com as mensagens presentes na área de armazenamento e dividido pela capacidade de armazenamento.

Tabela 3.10: Relação entre (γ e β) X (densidade local e percentual de ocupação)

Percentual de Ocupação	Densidade 0		Densidade 1		Densidade 2	
	γ	β	γ	β	γ	β
[0,100)%	0,40	0,90	0,60	0,95	0,999	0,95
[100,200)%	0,999	0,75	0,999	0,90	0,999	0,90
[200,300)%	0,999	0,15	0,999	0,10	0,999	0,05
[300,400)%	0,999	0,10	0,999	0,05	0,999	0,05

Para efeito de avaliação, o comportamento dos protocolos PROPHET e PROPHET-ADPT foi comparado em um novo cenário intitulado *Dartmouth*, que foi produzido a partir de um fragmento de 24 horas de um arquivo de movimento de usuários reais extraído de [44] e limitado a 500 nós. Foram, ainda, definidos cinco arquivos de tráfego distintos com

2.000 mensagens geradas aleatoriamente nas primeiras oito horas de simulação. Além das restrições impostas pelo cenário, a capacidade de armazenamento dos nós foi limitada a 50, 100, 200, 500, 1.000 e 2.000 mensagens, o que representa, respectivamente, 2.5%, 5%, 10%, 25%, 50% e 100% do total de mensagens na rede, totalizando 30 (trinta) simulações com contextos distintos por protocolo. Embora o cenário tenha sido definido com 500 nós, a quantidade máxima de nós ativos atingiu somente 61,4% da população total, ocasionando uma média de apenas 14,5% de nós ativos. Esse percentual reduzido de nós ativos ocorre em função de os nós ativarem e desativarem seus rádios diversas vezes durante a simulação ou por estarem movimentando-se em regiões sem cobertura.

O protocolo PROPHET-ADPT foi implementado no simulador utilizado em [63, 64]. A Figura 3.3 ilustra o desempenho da configuração do protocolo PROPHET que obteve o melhor desempenho, da configuração padrão do protocolo PROPHET e do protocolo PROPHET-ADPT para o cenário *Dartmouth* em relação à quantidade de mensagens entregues. Deve-se ressaltar que o cenário em questão apresenta características bem distintas dos cenários DieselNet, WDM e ZebraNet. A principal característica está relacionada ao fato de que os registros de movimento de usuários da rede sem fio do *campus* de *Dartmouth* são associados a um ponto de acesso, de forma que as estações não estabelecem comunicações *ad hoc*. A incapacidade de estabelecer conexões *ad hoc* impede que o protocolo PROPHET-ADPT calcule corretamente a densidade da rede, restringindo a alteração dinâmica dos valores de γ e β, ratificando que o referido cenário não favorece o processo de adaptação dinâmica do protocolo PROPHET-ADPT. A escolha desse cenário foi intencional, possibilitando avaliar o comportamento do protocolo PROPHET-ADPT em um cenário cujas propriedades não o favorecessem.

A configuração padrão do protocolo PROPHET começou a destacar-se à medida que o cenário tornava-se menos restrito, ou seja, uma maior capacidade de armazenamento favoreceu a redução da quantidade de descartes de mensagens e um desempenho similar ao da melhor configuração. Já o protocolo PROPHET-ADPT demonstrou que a aplicação de um mecanismo adaptativo é capaz de superar até mesmo a configuração com o melhor desempenho do protocolo PROPHET em alguns cenários. Nos cenários mais restritos, onde a capacidade da área de armazenamento foi limitada em 2,5%, 5%, 10% e 25% do total de mensagens na rede, o protocolo PROPHET-ADPT conseguiu adaptar-se satisfatoriamente e alcançou um desempenho superior ao desempenho da configuração padrão de, respectivamente, 19,96%, 16,37%, 4,56% e 0,25%. O PROPHET-ADPT foi ainda capaz de superar a configuração com melhor desempenho em 1,09% e 1,47% nos cenários onde a capacidade de armazenamento foi limitada em, respectivamente, 2,5% e

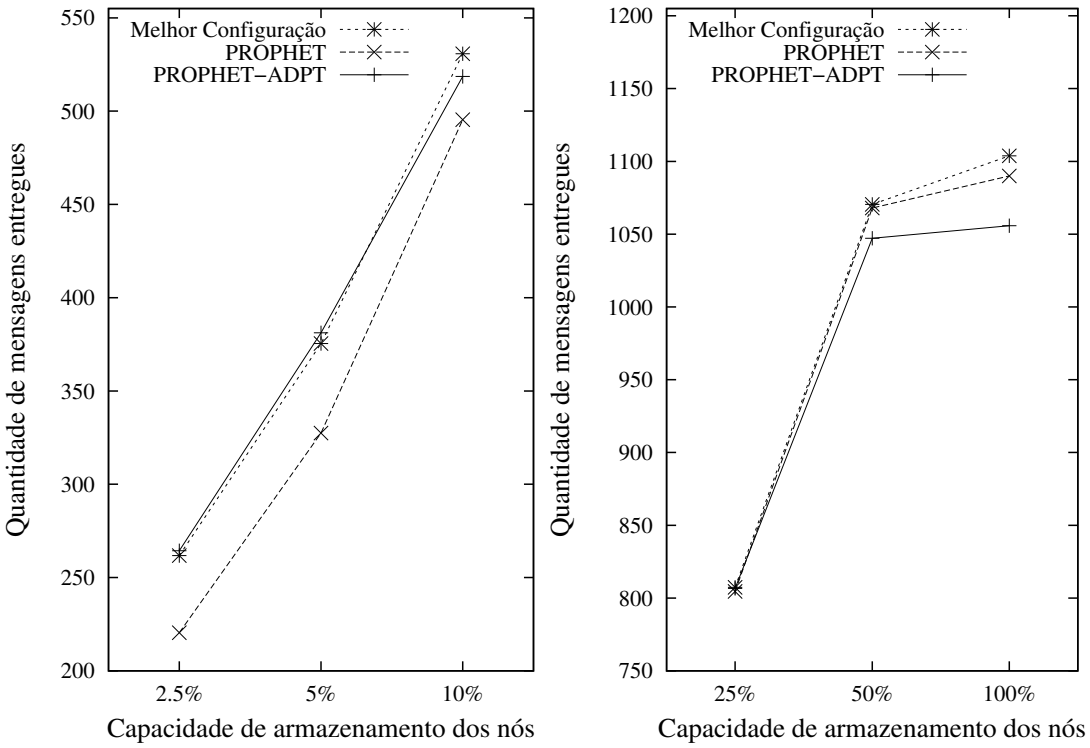

Figura 3.3: Quantidade de mensagens entregues - Cenário Dartmouth

5%. O protocolo PROPHET-ADPT não conseguiu equiparar o desempenho da configuração padrão nos cenários com menos restrições em função de inexistirem conexões *ad hoc* entre os nós, o que limitou o cálculo da densidade local. Ou seja, embora a Tabela 3.10 relacione valores diferenciados de γ e β para contextos cuja densidade seja igual a 2 ou 3, o PROPHET-ADPT foi incapaz de alterar a configuração para alguns desses contextos, restringindo o desempenho. Ainda é razoável ressaltar que, considerando o desempenho em todos cenários, o protocolo PROPHET-ADPT foi 5,86%, em média, superior à configuração padrão do protocolo PROPHET e ficou 1,27% aquém da configuração com melhor desempenho.

3.5 Trabalhos Relacionados

Em relação à análise do desempenho de protocolos de roteamento para DTNs, além dos trabalhos citados, existem várias propostas de protocolos de roteamento que, como forma de validação, comparam o desempenho do protocolo proposto com alguns dos principais protocolos, porém sendo respeitadas as respectivas configurações padrão [49, 81, 1, 47, 58, 59, 56, 63, 61]. Em [40] é possível encontrar o único trabalho em que Karvo e Ott avaliam, porém limitados a um único cenário, os protocolos PROPHET, MaxProp e uma versão

adaptada de cada protocolo, variando a escala de tempo e, resumidamente, parâmetros dos referidos protocolos. No entanto, o objetivo dos autores é analisar o impacto da escala de tempo e não mensurar o quanto os protocolos parametrizáveis podem oscilar em relação à configuração padrão.

O incremento na quantidade de propostas de protocolos de roteamento para DTNs que empregam diferentes mecanismos adaptativos vem ao encontro dessa tese de doutorado, indicando, possivelmente, uma nova tendência de soluções para esse cenário desafiador.

Em [72, 73] os autores apresentam e aprimoram o protocolo de roteamento ORWAR (*Opportunistic Routing with Window-Aware Replication*). O protocolo ORWAR propõe um mecanismo que possibilita a replicação de mensagens de forma controlada, similar ao proposto pelo protocolo *Spray and Wait* [81], mas com um processo de escalonamento baseado na métrica de roteamento, no tamanho em octetos da mensagem e na definição da duração da janela de contato. Com isso, os autores demonstram a intenção de evitar o desperdício proveniente da perda de conexão durante a transmissão de mensagens, assim como reduzir o consumo de energia e a utilização desnecessária do canal de comunicação. A janela de contato é calculada dinamicamente com base na velocidade de deslocamento dos nós envolvidos no contato, nas coordenadas de cada nó e no raio de alcance, permitindo, então, selecionar a mensagem mais adequada à janela de contato em função da taxa de transmissão. O resultado das simulações demonstra que o protocolo ORWAR apresenta um desempenho superior com o conjunto de mensagens original, porém à medida que o tamanho das mensagens é reduzido, o protocolo MaxProp iguala o desempenho. A proposta do protocolo ORWAR se justifica por reduzir o desperdício com transmissões de mensagens que serão interrompidas devido à perda de contato, porém não pode ser amplamente implementada, já que requer dos nós a capacidade de calcular a composição do movimento (vetor com velocidade, sentido e direção do deslocamento), além do posicionamento.

Em [45] os autores demonstram que é viável adaptar dinamicamente o processo de roteamento em função da densidade da rede, da velocidade de deslocamento do nó e do tamanho da mensagem selecionando dois conjuntos diferentes de protocolos identificados por MANET (*Mobile Ad-hoc Network*) e DTN. O conjunto MANET é composto do protocolo de roteamento AODV (*Ad-hoc On demand Distance Vector*) com o protocolo de transporte fim-a-fim TCP (*Transmission Control Protocol*), já o conjunto DTN é composto por um protocolo de roteamento DTN (*Epidemic* ou *Spray and Wait*) associado ao protocolo de agregação (BP ou *Bundle Protocol*), que provê o transporte salto-a-salto. Os

autores observam que, quando as redes se caracterizam como esparsas, quando os nós se movem rapidamente ou quando as mensagens são consideradas grandes, o uso do conjunto DTN favorece um melhor desempenho e, baseado em resultados de simulações realizadas, determinam um ponto de alternância. Em suma, quando o tempo estimado para envio da mensagem é menor que o tempo estimado de duração do percurso, o conjunto MANET é utilizado para transmitir a mensagem, caso contrário o conjunto DTN é selecionado. A proposta de utilizar um protocolo para MANET quando se identifica que o nó que detém a mensagem e o nó de destino da mensagem se encontram na mesma partição simplifica o processo de roteamento, porém novamente a proposta não pode ser amplamente implementada, pois requer que os nós apresentem a capacidade de calcular sua velocidade de deslocamento.

Huang *et al.* [35] propuseram modificações ao protocolo PROPHET com objetivo de torná-lo adaptativo a quatro parâmetros distintos, identificados por capacidade de armazenamento (V_B), quantidade de energia remanescente (V_P), banda de transmissão (V_A) e a popularidade (V_O). Embora os valores relativos a cada parâmetro sejam obtidos dinamicamente, a formulação da métrica de roteamento, que ainda considera o valor calculado pelo protocolo PROPHET (V_R), utiliza pesos com valores imutáveis para qualquer tipo de contexto de DTN, conforme ilustra a Equação 3.6. Além disso, os autores presumem que a capacidade para medir a energia remanescente está presente de forma incondicional em todos os nós de DTNs, assim como a consciência da quantidade de energia total, e do consumo de energia para receber e transmitir um pacote.

$$V_D = (0,25 \times V_B) + (0,25 \times V_P) + (0,1 \times V_A) + (0,1 \times V_O) + (0,3 \times V_R) \tag{3.6}$$

Proposto por Musolesi e Mascolo, o protocolo CAR (*Context-aware Adaptive Routing*) [57, 58] adota dois modos distintos para envio de mensagens, denominados de modo síncrono e de modo assíncrono. Logo, se o nó de destino estiver na mesma região que o nó que detém a mensagem, o envio se dará através do modo síncrono, sendo utilizado um protocolo de roteamento pró-ativo para MANETs como o protocolo DSDV (*Destination-Sequenced Distance Vector*). Caso o nó de destino se encontre em uma região diferente, a mensagem será enviada através do modo assíncrono, sendo encaminhada para o vizinho direto que apresente o maior índice de roteamento, referenciado por *delivery probability*. A função utilidade que determina o valor do índice de roteamento, formulada através da Equação 3.7, utiliza duas variáveis para representar a importância do atributo no cálculo

da métrica de roteamento, identificadas por w e a. A variável w é dependente do cenário de forma que todos os nós da rede assumem o mesmo valor, já a variável a é calculada dinamicamente através da Equação 3.8.

$$Maximize \left\{ f(U(x_i)) = \sum_{i=1}^{n} a_i(x_i) w_i U_i(x_i) \right\}, \tag{3.7}$$

onde $U_i(x_i)$ representa a função utilidade para o valor do atributo x_i, w_i denota o peso associado estaticamente ao cenário e, por fim, $a_i(x_i)$ é um parâmetro composto por a_{range_i}, $a_{predictability_i}$ e $a_{availability_i}$ que possibilita uma adaptação dinâmica.

$$a_i(x_i) = a_{range_i}(x_i) \cdot a_{predictability_i}(x_i) \cdot a_{availability_i}(x_i) \tag{3.8}$$

onde a_{range_i} representa o impacto relativo ao intervalo dos valores que podem ser assumidos pelo atributo dentro do domínio $[0, 1]$; $a_{predictability_i}$ denota a capacidade do modelo de previsibilidade prover uma medição precisa ou não, assumindo os valores 0 ou 1; e, finalmente, $a_{availability_i}$ denota a disponibilidade do atributo, assumindo os valores 0 ou 1.

Embora possa ser tratado como um arcabouço, o protocolo CAR foi avaliado em função de dois atributos específicos, identificados por grau de conectividade e posicionamento futuro, e faz uso do filtro de Kalman [39] com objetivo de obter uma previsão realista da evolução da análise do contexto e para otimizar a banda de comunicação. O protocolo CAR restringe o processo de adaptação a atributos de redes que estejam presentes de forma incondicional em todos os nós da rede, no entanto, apresenta as seguintes deficiências:

- modo de disseminação - o protocolo CAR ignora a possibilidade de explorar a disponibilidade de recursos presentes no contexto de uma rede, ainda que esses recursos se apresentem de forma circunstancial, ao disseminar as mensagens somente de forma probabilística;

- quantidade de cópias - como o descarte de mensagens é considerado um processo indesejável porém esperado em cenários restritos de DTNs, o envio de mais de uma cópia de uma mensagem aumenta significativamente a probabilidade de entrega, entretanto esse comportamento não é compartilhado pelo protocolo CAR, que mantém uma única cópia da mensagem na rede;

- determinação de valores iniciais - para todo atributo de rede analisado, o protocolo CAR requer a determinação, *a priori*, de valores estáticos e adequados às características de cada cenário para a variável w;

- formulação única - o uso de uma formulação única favorece a inclusão ou exclusão de atributos de rede do processo de detecção do contexto para a métrica de roteamento, porém impossibilita que a análise de cada um dos atributos possa ser interpretada individualmente, objetivando alterações no comportamento de processos como envelhecimento de rotas, determinação do modo de disseminação etc.

Cabe ressaltar que, em uma versão modificada do protocolo CAR [23], Divya e Sivakumara implementaram um mecanismo que possibilita o envio de várias cópias de cada mensagem.

O protocolo NECTAR [64, 63], proposto por Oliveira e Albuquerque, utiliza o conceito de vizinhança para efetuar o encaminhamento de mensagens em cenários estocásticos, com o objetivo de aumentar a probabilidade de entrega de mensagens e reduzir o tráfego na rede. As funções executadas pelo protocolo NECTAR podem ser sumarizadas em três módulos, identificados por cálculo do *Neighborhood Index*, algoritmo para escalonamento de mensagens e política para descarte de mensagens. A Tabela 3.11 define os principais parâmetros e variáveis do protocolo NECTAR, inclusive os que são utilizados no cálculo do *Neighborhood Index*.

Tabela 3.11: Parâmetros e variáveis do protocolo NECTAR)

item	Descrição
$hops_{(i,j)}$	Expressa a quantidade de saltos necessários para que o nó i alcance o nó j.
TS	*Timestamp* atual.
$ts_update_{(i,j)}$	*Timestamp* da última atualização ocorrida entre i e j.
$\sigma_{(i,j)}$	Variável de envelhecimento associada ao $Nidx_{(i,j)}$.
ω	Peso aplicado às rotas conhecidas.
γ	Determina o nível de ocupação máxima da área de armazenamento de mensagens durante a fase $MaxEpidemicLevel$.
$MinEpidemicLevel$	Durante esta fase, o protocolo NECTAR atua como o protocolo *Epidemic*.
$MaxEpidemicLevel$	Durante esta fase, o protocolo NECTAR depende do valor do parâmetro γ para atuar ou não como o protocolo *Epidemic*.
$NextHop_{(i,j)}$	Define o nó para o qual devem ser encaminhadas mensagens cujo destino seja j.
$Nidx_{(i,j)}$	*Neighborhood Index* do nó i para o nó j.

O índice de roteamento, identificado por *Neighborhood Index* ($Nidx$), é baseado no histórico de contatos recentes, de forma que os nós cujos contatos sejam duradouros e frequentes apresentem um valor superior ao valor dos nós cujos contatos sejam de curta duração e/ou eventuais. Quando o primeiro contato entre os nós i e j ocorre, o $Nidx_{(i,j)}$ é

inicializado com 1 e, enquanto i e j permanecerem em contato, $Nidx_{(i,j)}$ é incrementado de forma linear.

Em seguida, i e j atualizam o $Nidx$ para os demais nós que se encontram fora do alcance. Logo, supondo que $Nidx_{(j,d)} > Nidx_{(i,d)}$ ou que i não conhece uma rota para um nó d qualquer, $Nidx_{(i,d)}$ terá j como $NextHop_{(i,d)}$ e será atualizado de acordo com as seguintes regras: $Nidx_{(j,d)}$ será divido por duas métricas distintas, definidas como métrica de distância e métrica de envelhecimento. A métrica de distância é calculada somando-se uma unidade ao contador $hops_{(j,d)}$, que representa a quantidade de saltos entre os nós j e d. Já a quantidade de unidades de tempo (*time slots*) que j e d encontram-se sem estabelecer contato ($TS - ts_update_{(j,d)}$), elevada à variável de envelhecimento ($\sigma_{(j,d)}$), define a métrica de envelhecimento.

No entanto, se i conhece uma rota para d, $Nidx_{(i,d)}$ será atualizado de forma ponderada (ω), conforme apresenta a Equação 3.9. Com essa abordagem, o cálculo do $Nidx$ reduz o impacto de novas informações, impedindo que os nós alterem, de forma drástica, valor do índice com dados que podem ter uma validade limitada. O $Nidx_{(i,d)}$ é alterado, porém, o novo valor associado reflete parcialmente o impacto da informação proveniente de j.

A fórmula do índice de roteamento proposto pelo protocolo NECTAR favorece o encaminhamento de mensagens para vizinhos que se encontram próximos ao nó de destino e que estejam ou tenham estado recentemente em contato com o nó de destino.

$$N'_{(i,d)} = \frac{Dcontact_{(j,d)}}{(HOPS_{(j,d)}+1)\times(TS-ts_update_{(j,d)}+1)^{\sigma}_{(j,d)}}; \tag{3.9}$$

$$N_{(i,d)} = \begin{cases} N'_{(i,d)}, & \text{caso } i \text{ não tenha rota para } d \\ \frac{(N_{(i,d)}\times\omega)+N'_{(i,d)}}{\omega+1}, & \text{caso } i \text{ tenha rota para } d. \end{cases}$$

O protocolo NECTAR ainda implementa componentes que atuam de forma adaptativa. O índice de envelhecimento aplicado é inversamente proporcional ao valor do $Nidx$, ou seja, quanto maior o valor do $Nidx$, menor será a variável de envelhecimento. Esse mecanismo possibilita que índices de vizinhança associados a valores maiores, que representam rotas mais estáveis, sejam envelhecidos de forma mais amena.

O protocolo NECTAR também possui uma fase de operação de natureza epidêmica. A definição de dois limiares, identificados por $MinEpidemicLevel$ e $MaxEpidemicLevel$, determinam quantas vezes uma mensagem pode ser encaminhada de forma epidêmica. Dentro do primeiro limiar, as mensagens enviadas de forma epidêmica são armazenadas

por todos os vizinhos diretos, já no segundo limiar, as mensagens transmitidas de forma epidêmica somente serão armazenadas se a taxa de ocupação da área de armazenamento estiver abaixo de um determinado valor, definido pelo parâmetro (γ).

A política de descartes implementada considera a quantidade de réplicas da mensagem efetuada pelo nó que efetuará o descarte e, ainda, o tempo que a mensagem permanece armazenada.

Cabe evidenciar que, a descrição detalhada do protocolo NECTAR fundamenta-se pelo fato do referido protocolo ser utilizado nas simulações presentes no Capítulo 6.

Nota-se, entretanto, que nenhuma das propostas visa a criação de uma camada adaptativa que analise o contexto e altere dinamicamente parâmetros de configuração sem alterar as propriedades originais dos protocolos de roteamento.

3.6 Considerações Finais

A comparação de alguns dos principais protocolos de roteamento parametrizáveis para DTNs em cenários com particularidades distintas, como DieselNet, WDM e ZebraNet, permitiu o dimensionamento do quanto as respectivas configurações padrão dos protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* encontram-se aquém da configuração com melhor desempenho, e evidenciou a necessidade de promover mecanismos de adaptação para protocolos de roteamento parametrizáveis, de forma que as mudanças de características que ocorram durante a formação de contextos distintos em um único cenário sejam analisadas e adequadamente tratadas.

Uma camada de adaptação simplificada, baseada no cálculo da densidade local e do percentual de ocupação da área de armazenamento, foi agregada ao protocolo PROPHET que passou a ser referenciado por PROPHET-ADPT. Simulações realizadas com registros de movimentos extraídos de [44] demonstraram que a versão modificada do protocolo PROPHET, referenciada por PROPHET-ADPT, suplantou a configuração padrão do protocolo PROPHET em 4 dos 6 cenários avaliados, apresentando, em média, um desempenho 5,86% superior e, especificamente em contextos mais limitados, 19,96% superior. O protocolo PROPHET-ADPT ainda superou a configuração com melhor desempenho em 2 dos 6 cenários avaliados, ficando, em média, 1,27% aquém.

A análise do contexto realizada pela camada de adaptação simplificada, baseada em apenas duas dimensões, foi suficiente para superar tanto a configuração padrão como a

configuração com melhor desempenho, isso em circunstâncias de limitação severa de recursos e em um cenário desfavorável (sem a possibilidade de conexões *ad-hoc*). Logo, é factível supor que um algoritmo mais sensível para detecção de características de contextos associado a um protocolo de roteamento com a habilidade de adaptar-se dinamicamente será capaz de proporcionar um desempenho ainda superior, o que motiva fundamentalmente esta tese de doutorado.

Capítulo 4

O Problema de Detecção de Contexto

O contexto de uma rede de comunicação provê diversos atributos, como densidade da rede, quantidade de energia restante por nó, disponibilidade da capacidade de armazenamento etc., que podem ser modificados por eventos, controlados ou não, ao longo de um período de observação. A hipótese desta tese de doutorado é que protocolos de roteamento que apresentam a capacidade de extrair informações a partir da análise desses atributos tendem a evidenciar um desempenho superior quando comparados com protocolos que não possuem essa habilidade.

O Problema de Detecção de Contexto (PDC) envolve o estabelecimento de regras bem definidas que possibilitem aos nós da rede examinar o contexto a partir de mais de uma dimensão[1] e, a partir de um conhecimento prévio, determinar a ação mais indicada a ser tomada com objetivo de buscar o melhor desempenho de alguma métrica, entre as quais é razoável relacionar taxa de entrega, latência, quantidade de transmissões etc. A solução proposta por esta tese de doutorado tenciona analisar o contexto de uma rede sob a ótica de três dimensões distintas, identificadas por densidade, capacidade de armazenamento e periodicidade de contato, provendo o protocolo de roteamento com a competência necessária à adaptação dinâmica de seus parâmetros.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: a Seção 4.1 descreve as restrições aplicadas ao processo de escolha das dimensões e elenca, sucintamente, justificativas para cada uma das dimensões selecionadas; as Seções 4.2, 4.3 e 4.4 avaliam o impacto das dimensões densidade, capacidade de armazenamento e periodicidade de contato sobre algumas métricas para redes de comunicação, reforçam a adoção de cada dimensão, propõem mecanismos para a extração de informações relevantes à detecção de contexto e

[1] O termo dimensão será usado como forma de representar um atributo presente no contexto de uma rede de computadores que será analisado com intuito de possibilitar a detecção e adaptação ao contexto.

descrevem o algoritmo proposto para solução do PDC; já a Seção 4.5 relaciona trabalhos afins baseados em outras métricas e, por fim, a Seção 4.6 apresenta a conclusão deste capítulo.

4.1 Dimensões para Detecção de Contexto

Entre os atributos presentes em uma DTN é possível relacionar a densidade de uma rede, a velocidade de deslocamento dos nós, a posição geográfica do nó, o tempo de vida útil em função da quantidade de energia disponível, a capacidade de armazenamento, a periodicidade, a duração e o tipo de contato, a taxa de transmissão, entre tantas outras.

Em relação à lista de atributos supramencionados, a maioria pode ser vista na qualidade de uma dimensão passível de estudo com o objetivo de prover a detecção de contexto para a função de roteamento, entretanto, nem todos os atributos podem ser empregados de forma irrestrita ou possuem a capacidade de impactar de forma relevante o desempenho de alguma métrica. A obtenção da velocidade de deslocamento ou da posição geográfica requer que o nó disponha, por exemplo, de um GPS (*Global Positioning System*) ou de um mecanismo similar. Contudo, como não existe obrigatoriedade para que os nós participantes de uma DTN estejam equipados com mecanismos complementares, o emprego desses atributos restringiria a capacidade de adaptação dinâmica. Portanto, de forma a prevenir circunstâncias que impeçam a adoção de forma ampla e irrestrita da capacidade de adaptação dinâmica por todos os nós da rede, esta tese doutorado estabeleceu que somente os atributos que possam ser avaliados indiscriminadamente serão considerados.

Oliveira *et al.* [65] comparam o desempenho dos protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* variando parâmetros de configuração em três cenários com propriedades contrastantes e destacam o quanto a densidade da rede e a capacidade de armazenamento são capazes de impactar o desempenho de diversas métricas como quantidade de mensagens entregues, encaminhadas e descartadas, a latência média etc. Além disso, ao propor e avaliar um mecanismo de adaptação para o protocolo PROPHET, os autores ratificam a dimensão do impacto da densidade da rede e da capacidade de armazenamento em relação a métricas como, por exemplo, taxa de mensagens entregues. Em função dos resultados exibidos em [65] e no Capítulo 3, os atributos densidade e capacidade de armazenamento foram selecionados para compor o processo de detecção de contexto visando uma adaptação dinâmica pelo protocolo de roteamento. Já para lidar com a dinâmica do contato, o atributo periodicidade de contato foi selecionado em detrimento da duração do contato.

Essa decisão baseia-se no fato de que a duração do contato, embora possa ser utilizada de modo a compor o índice de roteamento, está mais relacionada ao processo de escalonamento de mensagens do que ao processo de roteamento. Com base na duração do contato, é possível identificar quais mensagens podem ser transmitidas antes que ocorra a perda de contato.

A quantidade de energia restante em cada nó apresenta-se, indubitavelmente, como um atributo relevante para o processo de roteamento em redes de dispositivos móveis. Um nó com consciência que sua energia está prestes a exaurir-se poderia aproveitar o próximo contato para encaminhar todas as mensagens ou um conjunto de mensagens selecionadas a partir de um determinado critério. Esse procedimento salvaguardaria as mensagens, evitando a perda definitiva. Em um outro contexto, um nó com uma alta probabilidade de entrega para um destinatário poderia ser ignorado pelos demais nós da rede caso apresentasse uma quantidade de energia limitada. A consciência da quantidade de energia dos nós vizinhos diretos poderia influenciar na forma de disseminação de mensagens, possibilitando a alternância entre uma disseminação epidêmica e uma disseminação probabilística.

Além da quantidade de energia, existem outros atributos que podem ser utilizados como dimensões para o PDC objetivando a adaptação dinâmica. Torna-se, todavia, imprescindível pesar a limitação de recursos comum aos nós que compõem as DTNs ao quantificar os atributos analisados. Ademais, cabe salientar que o objetivo dessa tese de doutorado não é explorar todos os atributos passíveis de serem utilizados como dimensões, mas comprovar a eficiência da adoção de componentes dinamicamente adaptativos através da proposta, implementação e avaliação de um protocolo de roteamento adaptativo que seja capaz de detectar características dos contextos e reduzir as oscilações no desempenho decorrentes da formação dos referidos contextos.

Consequentemente, de forma a tornar o processo de adaptação dinâmica computacionalmente viável em função das restrições comumente encontradas em nós de DTNs e das características intrínsecas às DTNs, as dimensões para prover informações para o PDC ficaram restritas aos atributos de rede densidade, capacidade de armazenamento e periodicidade de contato.

4.2 Densidade

A densidade é uma propriedade que apresenta a capacidade de interferir substancialmente no desempenho de diversas métricas de uma rede, tal quais as propriedades quantidade de mensagens entregues, latência etc., e sua avaliação conduz à classificação das redes como densas ou esparsas. Redes densas caracterizam-se por uma alta concentração de nós e uma grande capacidade de conexão, possibilitando, muitas vezes, uma conexão fim a fim e a existência de múltiplos caminhos entre uma origem e um destino. Já redes esparsas apresentam, como particularidade, uma quantidade reduzida de nós em função da área total da rede e a presença frequente de regiões desconexas, sendo improvável a existência de caminhos que possibilitem uma conexão fim a fim entre nós que se encontrem em extremidades opostas da rede. Deve-se ressaltar que, além da quantidade de nós, o raio de alcance também influencia significativamente o cálculo da densidade.

As Subseções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 tratam, respectivamente, de avaliar o impacto da densidade sobre métricas como quantidade de mensagens entregues e latência, da heurística proposta para determinar o grau de densidade e, por fim, de descrever o algoritmo utilizado para calcular o grau de densidade.

4.2.1 Impacto da Densidade

A literatura dispõe de inúmeros experimentos que comprovam o quanto a densidade de uma rede é capaz de afetar o desempenho de diversas métricas. Em [85], Vahdat e Becker propõem e avaliam o protocolo *Epidemic* em um cenário retangular de 1.500 metros por 300 metros. Durante as simulações, o raio de alcance dos nós varia de 10 metros a 250 metros, o que representa, em termos percentuais, uma cobertura de 0,02% a 10,91% da área total de simulação. Comparando-se o desempenho do cenário com raio de alcance reduzido (10 metros) com o desempenho do cenário com o maior raio de alcance (250 metros) e mantendo-se idênticas todas as demais características, a diferença entre o cenário mais denso e o cenário mais esparso chegou a 10,1% em relação à quantidade de mensagens entregues e a 22.414.750% em relação à latência média.

Já em [63], os protocolos NECTAR, NECTAR refinado, *Epidemic* e PROPHET são avaliados em um cenário extraído de [43]. Considerando-se inalteradas todas as características do cenário mais restrito, exceto a densidade, no caso do protocolo NECTAR refinado, a quantidade de mensagens entregues no cenário mais denso (cerca de 2.000 nós) foi 108,4% superior à quantidade de mensagens entregues no cenário mais esparso

(500 nós). No caso do protocolo *Epidemic*, considerando-se a proporção entre o cenário mais restrito e o mais denso, o percentual de incremento foi de 72,7% e de 65,5% no caso do protocolo PROPHET.

Nunes e Dotti [60] propõem e avaliam o protocolo APRP (*Adaptive Potential Routing Protocol*) em um cenário retangular de 4.500 metros por 3.400 metros, comparando-o com os protocolos *Epidemic*, PROPHET e *Spray and Wait*. Os autores variam tanto a quantidade de nós, realizando simulações com 30, 50, 100 e 300 nós, quanto o raio de alcance do nós, alternando valores como 10, 30 e 80 metros. Em simulações realizadas com 30 nós e raio de alcance igual a 30 metros, o protocolo APRP apresentou uma latência média para entrega de mensagens de, aproximadamente, 9.000 segundos. Já em simulações com 300 nós e raio de alcance de 30 metros, o tempo esteve próximo a 5.000 segundos, o que demonstra uma redução na latência média de cerca de 44%. No mesmo cenário, porém alterando-se o raio de alcance de 30 metros para 80 metros, a redução na latência média foi de aproximadamente 66%.

Uma vez que a densidade de uma rede interfere consideravelmente no desempenho de diversas métricas, é preciso mensurar e discretizar esse valor. No caso das DTNs, espera-se que os principais atributos (densidade, capacidade de armazenamento dos nós, velocidade de deslocamento etc.) sofram alterações ao longo de toda a existência da rede, produzindo inúmeros contextos. Deve-se destacar, ainda, que em alguns cenários essas alterações ocorrem em intervalos reduzidos de tempo, ratificando o dinamismo das DTNs. Desta forma, uma análise simplificada que possa especificar, de forma binária, se uma rede encontra-se densa ou esparsa é insuficiente para determinar a ação mais indicada visando alcançar o melhor desempenho de alguma métrica. Como consequência, faz-se necessário discretizar o atributo densidade.

4.2.2 Determinação do Grau de Densidade

A determinação do grau de densidade de uma rede demanda a troca de mensagens de controle por todos os nós da rede ou, pelo menos, por uma parcela significativa. Analisando sob a ótica das DTNs, o resultado seria, na maioria da vezes, incoerente, pois uma das características principais das DTNs é a ocorrência frequente de particionamentos, que causa a formação de regiões desconexas. Além disso, para manutenção do grau de densidade seria necessário o envio constante de informações de controle, o que acarretaria em um uso inadequado de recursos que tendem a ser escassos. Portanto, a adoção de uma abordagem local é a mais recomendada para DTNs.

De modo alternativo, é plausível tecer a seguinte ponderação: associar o valor 1,0 ao grau de densidade, considerando que a soma da área de alcance de todos os nós não sobrepostos da rede, distribuídos de forma adjacente e visando reduzir áreas sem cobertura, equivale à área total de atuação da rede, e, como método de aproximação, descartar as áreas não contempladas pelo raio de alcance dos nós. A Figura 4.1 exemplifica áreas de simulação de formatos diferenciados, cujas partes hachuradas identificam áreas sem cobertura.

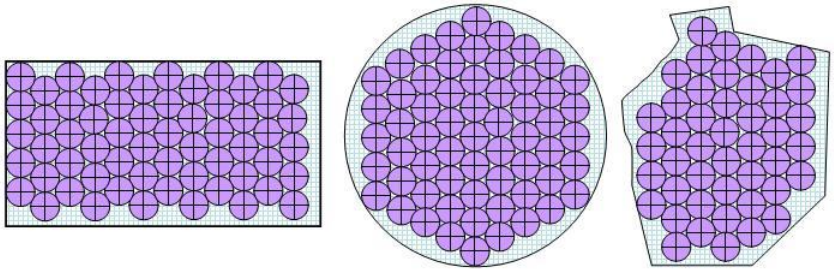

Figura 4.1: Disposição de nós não sobrepostos e adjacentes cobrindo a totalidade da rede

A partir dessa ponderação é factível inferir uma heurística que estabeleça que o grau de densidade de uma rede pode ser estimado por um nó a partir da determinação da quantidade de vizinhos diretos e de vizinhos indiretos[2] com dois saltos. Ou seja, com base na Figura 4.2, é aceitável observar que, em uma rede com grau de densidade igual a um, o número de vizinhos diretos de um nó é igual a seis e o número de vizinhos indiretos com dois saltos é igual a doze. Objetivando destacar a funcionalidade dos nós no cálculo da densidade através da Figura 4.2, cada grupo foi colorido de forma diferenciada: o nó que efetua o cálculo foi preenchido pela cor verde, os vizinhos diretos pela cor amarela, os vizinhos indiretos com dois saltos pela cor rosa e os vizinhos indiretos com mais de dois saltos pela cor lilás.

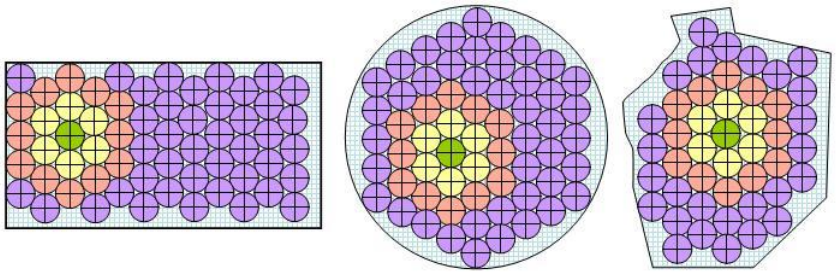

Figura 4.2: Identificação de vizinhos diretos e indiretos não sobrepostos e adjacentes em uma rede

[2]Representa, sobre a ótica de um determinado nó identificado por n_a, um nó qualquer n_b que não esteja dentro do raio de alcance de n_a

Logo, caso um nó apresente um total de dezoito vizinhos, considerando os vizinhos diretos e os vizinhos indiretos com dois saltos, esse nó pode deduzir que a rede ao seu redor possui grau de densidade igual a um. Caso esse total seja igual a nove, a dedução baseada na mesma heurística conduziria a um grau de densidade igual a meio. Da mesma forma, se a quantidade de vizinhos diretos e indiretos com dois saltos totalizasse quarenta e cinco, o grau de densidade seria dois e meio.

Por tratar-se de uma abordagem local, cabe salientar que o grau de densidade obtido a partir desse processo de medição pode, sob determinadas circunstâncias, não representar a realidade da rede, conforme ilustra a Figura 4.3. Entretanto, essa abordagem representa a realidade de cada um dos nós e independe da existência de conectividade plena da rede, sendo possível obter um grau de densidade, ainda que existam regiões desconexas, o que, em se tratando de DTNs, considera-se uma grande vantagem.

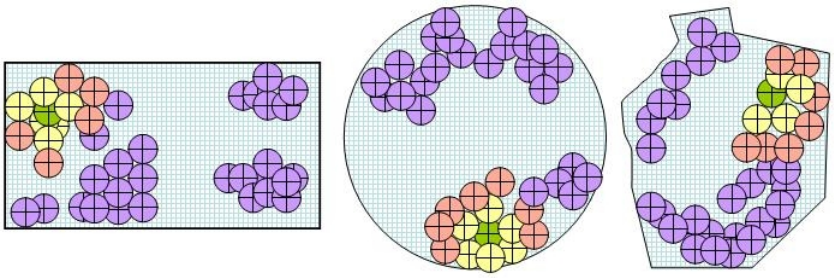

Figura 4.3: Observação da densidade considerando a existência de regiões desconexas

4.2.3 Cálculo da Densidade

O cálculo do grau de densidade deve ser efetuado toda vez que um nó estabelece contato com um vizinho direto. Para efetuar o cálculo da densidade não há, em princípio, necessidade de acrescentar, à transmissão, informações adicionais, pois as estruturas das tabelas de roteamento, comumente utilizadas por protocolos de roteamento, mantêm todas as informações necessárias, identificadas por: quantidade de saltos para o nó de destino e o registro de tempo da última atualização. No caso de vizinhos diretos a quantidade de saltos para o nó de destino é associada ao valor um e, no caso de vizinhos indiretos úteis ao cálculo da densidade, a quantidade de saltos é associada ao valor dois. O registro de tempo da última atualização serve para identificar e descartar rotas obsoletas.

Logo, a cada evento de contato, o grau de densidade da rede é recalculado com base nas informações atualizadas pelo vizinho direto que estabeleceu o contato. Para o perfeito entendimento da Equação 4.1, reitera-se que uma DTN pode ser representada por um

grafo simples, constituída de um conjunto V finito de elementos denominados vértices e de um conjunto E de elementos denominados arestas, de forma que cada aresta e é um par não ordenado de elementos distintos de V, ou seja, $E = \{(n_i, n_j) \mid n_i, n_j \in V,\ i \neq j\}$. Desta forma, se $e = (n_i, n_j)$ é uma aresta, então afirma-se que e incide sobre n_i e n_j, que n_i e n_j são extremidades da aresta e, e que os vértices n_i e n_j são adjacentes [18]. É razoável, então, definir um conjunto $R_{(i)}$ que contenha todos os vizinhos que se encontrem dentro do raio de alcance (vizinhos diretos) de n_i, e um conjunto $S_{(i)}$ que seja a união de todos os vizinhos diretos dos elementos do conjunto $R_{(i)}$. Por fim, o valor associado à densidade de n_a será computado pela quantidade de elementos proveniente da união dos conjuntos $R_{(a)}$ e $S_{(a)}$, conforme ilustra a Equação 4.1.

$$\begin{aligned} &G = (V, E) \\ &R_{(i)} = \{n_j \mid (n_i, n_j) \ \in \ E\} \\ &S_{(i)} = \{\bigcup R_{(k)},\ \forall\, k \ \in \ R_{(i)}\} \\ &Densidade_{(a)} = \mid R_{(a)} \ \cup \ S_{(a)} \mid \end{aligned} \tag{4.1}$$

Supondo que n_a estabeleceu um contato com n_b e que a duração desse contato seja suficiente para que haja a troca da tabela de roteamento, o grau de densidade da rede será atualizado tanto para n_a quanto para n_b. Para isso, quando n_b enviar a sua tabela de roteamento para n_a, n_b e todos os demais nós presentes na tabela de roteamento de n_b que apresentarem quantidade de saltos igual a um serão incluídos no cálculo do grau de densidade da rede de n_a. Deve-se ressaltar que existe a necessidade de excluir do cômputo do grau de densidade da rede toda e qualquer rota que tenha sido envelhecida, evitando, dessa forma, que rotas obsoletas sejam erroneamente consideradas no cálculo. O Algoritmo 1 demonstra como esse cálculo é realizado.

A inclusão desse procedimento nos algoritmos dos protocolos de roteamento visa possibilitar que o grau de densidade da rede possa ser calculado de forma simples, dinâmica e sem impactar o desempenho da rede, uma vez que a heurística proposta reutiliza as mesmas informações necessárias ao processo de roteamento.

4.3 Capacidade de Armazenamento

A capacidade de armazenamento de um nó da rede pode ser definida como uma área de memória destinada a armazenar as mensagens da rede. A capacidade de armazenamento é uma característica que, tal qual a densidade, impacta de forma expressiva o desem-

Algoritmo 1: Cálculo da Densidade

```
Dados:
lista tab_roteamento {inteiro MAC_dest, ..., qtde_saltos, atualizado, ...};
decimal densidade ← 0;
inteiro densidade_base ← 18;
decimal limite_atualiza;
Início
    Para cada destino presente na routing_table que não tenha sido envelhecido Faça
        Se ((tab_roteamento.qtde_saltos = 1) ou (tab_roteamento.qtde_saltos = 2))
        Então
            densidade ← densidade + 1 ;
        Fim
    Fim
    densidade ← densidade / densidade_base;
Fim
```

penho de diversas métricas. A partir da avaliação de disponibilidade da capacidade de armazenamento é possível identificar, entre um conjunto de nós da rede, aquele que, além de apresentar uma maior probabilidade de entrega, dispõe de espaço suficiente em sua área de armazenamento para receber novas mensagens que devem ser encaminhadas sem necessidade de descarte, ou que, pelo menos, produza a menor quantidade de descartes possível. A análise da capacidade de armazenamento de vizinhos diretos também pode ser utilizada como critério de decisão para determinação do modo de disseminação de mensagens. Dessa forma, a disponibilidade da capacidade de armazenamento, que é crucial para evitar a ocorrência de múltiplas retransmissões, pode ser transmitida entre os nós como uma informação adicional, ou pode, simplesmente, ser traduzida em um índice para a métrica de roteamento. Embora não seja objeto de estudo desta tese, é recomendável advertir que os algoritmos responsáveis pela classificação e pelo descarte de mensagens também são capazes de influenciar o desempenho.

O restante desta seção encontra-se organizada desta forma: a Subseção 4.3.1 demonstra o impacto causado no desempenho de diversas métricas quando a capacidade de armazenamento é intencionalmente limitada; a Subseção 4.3.2 explica de que forma a identificação do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento pode cooperar com a tarefa de encaminhamento de mensagens; e a Subseção 4.3.3 descreve como o percentual de ocupação da capacidade de armazenamento será calculado pelos nós visando o PDC.

4.3.1 Impacto da Capacidade de Armazenamento

O impacto proveniente da diversificação da capacidade de armazenamento é demonstrado em várias publicações, como em [49], [1] e [65]. Lindgren *et al.* [49] propõem e avaliam o protocolo PROPHET em uma área retangular de 1.500 metros por 3.000 metros com 50 nós utilizando modelos de mobilidade aleatória e realista. No modelo de mobilidade aleatória, com raio de alcance de 50 metros, quantidade de saltos limitada a três saltos e transmissão de 1.920 mensagens, a quantidade de mensagens entregues no cenário cujos nós dispunham de capacidade para armazenar cerca de 20% do total de mensagens transmitidas foi, aproximadamente, 230% superior ao cenário cuja capacidade de armazenamento estava limitada a cerca de 5%.

Uma outra metodologia de avaliação da influência da capacidade de armazenamento passa por manter inalterada a capacidade de armazenamento dos nós e variar a quantidade de mensagens transmitidas. Em [1], o protocolo RAPID é proposto e comparado com os protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* em um cenário de rede veicular com 40 ônibus. Embora o objetivo do artigo não seja avaliar o impacto da capacidade de armazenamento sobre métricas como latência média, pico de latência, percentual de mensagens entregues etc., uma análise dos resultados publicados permite a observação de um comportamento uniforme de todos os protocolos. À medida que a quantidade de mensagens transmitidas por hora aumenta, reduz-se automaticamente a capacidade dos nós de armazenar todas as mensagens, e identifica-se o aumento da latência média, do pico da latência e da utilização do canal de transmissão, da mesma forma que se observa uma redução do percentual de mensagens entregues.

Em [65] os protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* são avaliados em três cenários com características distintas, com destaque para o protocolo PROPHET, cujo desempenho é exibido em detalhes. Apenas como exemplo, no cenário Zebranet [88] com densidade da rede inferior à área de simulação ($densidade < 1,0$) e comprometimento de até 20% da capacidade de armazenamento, a configuração padrão do protocolo PROPHET obteve um percentual de mensagens entregues 62,3% superior ao percentual observado nas simulações cujo comprometimento da capacidade de armazenamento era equivalente à 200%.

4.3.2 Percentual de Ocupação da Capacidade de Armazenamento

O conhecimento da disponibilidade da capacidade de armazenamento de nós vizinhos diretos possibilita uma melhor percepção do potencial desses nós para execução da tarefa de encaminhamento de mensagens. Para exemplificar de que modo esse conhecimento pode ser fundamental, é factível delinear um cenário onde n_a disponha de uma mensagem que deve ser encaminhada para n_d e que existam dois nós vizinhos diretos a n_a, identificados por n_b e n_c, que apresentem índices de roteamento para n_d com valores similares. Complementando o cenário, é possível supor que o vizinho direto n_b apresente um percentual de ocupação da capacidade de armazenamento de 80% e o vizinho direto n_c de 75%. Nesse caso, a escolha mais óbvia recairia sobre o vizinho direto que dispusesse do menor percentual de ocupação da capacidade de armazenamento, ou seja, n_c.

No entanto, esse retrato pode induzir a decisões equivocadas. Seguindo a mesma linha de raciocínio, é plausível admitir que em um período de observação o vizinho direto n_b tenha mantido uma média do percentual de ocupação de 75%, já o vizinho direto n_c manteve uma média limítrofe a 100%. Essa visão do histórico do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento permite a elaboração da seguinte conjectura: o fato do vizinho direto n_c manter-se com a totalidade da sua capacidade de armazenamento ocupada por um longo período caracteriza-se como indicativo de que deve ter recebido e descartado muitas mensagens, portanto, encaminhar mensagens para esse nó implica em um risco significativo de descarte.

Com isso, entende-se que observar o histórico do percentual de ocupação de um nó pode ser determinante para que as mensagens transmitidas sejam encaminhadas aos seus respectivos destinatários com sucesso e com a possibilidade de descarte reduzida. Entretanto, a precisão na determinação do período de observação para o cálculo do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento de um nó é imprescindível para o êxito da solução, pois tanto um período de observação muito longo quanto um período de observação reduzido podem ser incapazes de refletir um ciclo de comportamento futuro.

Cabe ressaltar que a análise quantitativa da capacidade de armazenamento disponível é incapaz de retratar com equivalência as informações providas pelo percentual de ocupação da capacidade de armazenamento. De forma de comprovar essa afirmativa, é aceitável presumir um cenário onde n_a deseje encaminhar uma mensagem para n_d e que seus vizinhos diretos n_b e n_c apresentem índices de roteamento para n_d semelhantes. O exame do histórico de disponibilidade de n_b e n_c por um período de observação poderia indicar uma disponibilidade média de, respectivamente, 5 Mbytes e 1 Mbytes, o que implicaria em um

encaminhamento da mensagem através de n_b. Contudo, é razoável supor que durante $\frac{2}{3}$ do tempo de observação n_b esteve com 100% de ocupação e durante $\frac{1}{3}$ com disponibilidade de 15 Mbytes. Já n_c manteve durante o período de observação uma disponibilidade mínima de 800 Kbytes. Nesse cenário, n_b descartou mensagens por $\frac{2}{3}$ do período de observação, o que certamente não o qualifica como o melhor encaminhador e demonstra a fragilidade da adoção da análise quantitativa da capacidade de armazenamento disponível na condição de dimensão para o PDC.

4.3.3 Cálculo do Percentual de Ocupação da Capacidade de Armazenamento

Os protocolos de roteamento devem efetuar o cálculo do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento caso ocorra uma das três situações a seguir:

- transferência de uma mensagem para o seu respectivo destino;
- exclusão de uma mensagem;
- recebimento de uma nova mensagem.

Com o objetivo de aproximar o cálculo do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento à realidade do contexto, as mensagens excluídas em função da indisponibilidade para armazenamento de novas mensagens no período de observação são consideradas no cálculo. Consequentemente, o percentual de ocupação da capacidade de armazenamento pode ultrapassar o limite de 100%. No entanto, é fundamental ressaltar que mensagens excluídas em função de transferência para seus respectivos destinos e mensagens excluídas em função do recebimento de confirmação de entrega não devem ser contabilizadas no cálculo do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento.

Já que o período de observação, que será representado por $Tjanela_a$ para n_a, é fundamental para o cálculo do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento, foi determinado que esse valor será obtido de forma dinâmica, possibilitando um retrato fidedigno e próprio da realidade de cada nó da rede. Conforme demonstra a Equação 4.2, $Tjanela_a$ representa a média do intervalo de tempo decorrido entre o fim do último contato e o início do contato atual de cada vizinho direto de n_a. Para que a variável $Tjanela_a$ possa ser calculada, torna-se necessário que, a cada contato entre n_a e um vizinho direto qualquer representado por n_i, um repositório com o histórico de contatos seja atualizado,

armazenando o tempo inicial e final do contato ocorrido, até o limite de duas ocorrências (último contato e contato corrente).

$$Tjanela_a = \frac{\sum_{i=1}^{v} Tjanela_{(a,i)}}{v}, \tag{4.2}$$

onde v denota a quantidade de vizinhos diretos de n_a, e $Tjanela_{(a,i)}$ representa o intervalo de tempo decorrido entre o final do último contato e o início do contato atual dos vizinhos diretos n_a e n_i.

Pode-se, então, conceber que n_a tenha cinco vizinhos diretos, identificados por n_{a1}, n_{a2}, n_{a3}, n_{a4} e n_{a5}, e que o intervalo de tempo transcorrido entre o fim do último contato e o início do contato atual de cada vizinho direto de n_a seja igual a, respectivamente, 1, 3, 2, 5 e 4 unidades de tempo, como ilustra a Figura 4.4. Nesse cenário, o valor de $Tjanela_a$ será calculado por $\frac{(1+3+2+5+4)}{5}$, o que equivale a $Tjanela_a = 3$.

Figura 4.4: Intervalo entre o último contato e o contato atual

Com o propósito de evitar distorções, foram estabelecidas as seguintes regras:

- caso o vizinho direto n_i tenha estabelecido um contato pela primeira vez com n_a, um valor inicial, identificado por $Tjanela_ini_a$, será associado a $Tjanela_{(a,i)}$;
- caso o valor do intervalo entre contatos seja superior a $Tjanela_max_a$, $Tjanela_{(a,i)}$ receberá o valor de $Tjanela_max_a$.

Portanto, caso o vizinho direto n_{a5} tenha estabelecido um contato pela primeira vez, $Tjanela_a$ será obtido por $\frac{(1+3+2+5+Tintervalo_ini_a)}{5}$, e, da mesma forma, caso o valor de $Tjanela_{a5}$ seja maior que $Tjanela_max_a$, $Tjanela_a$ será o resultado da operação de $\frac{(1+3+2+5+Tjanela_max_a)}{5}$.

Como os cenários de DTNs apresentam características contrastantes, a determinação de valores inexatos para $Tjanela_ini_a$ e para $Tjanela_max_a$ poderia impactar de forma negativa o desempenho da função de roteamento. Desse modo, com o desígnio de reduzir possíveis incoerências, foram arbitrados em cada nó valores iniciais para as variáveis $Tjanela_ini$ e $Tjanela_max$, identificados, nessa ordem, por $Tjanela_ini_base$ e $Tjanela_max_base$. Ademais, como o cerne desta tese de doutorado é a adaptação dinâmica, após a inicialização com os valores das constantes $Tjanela_ini_base$ e $Tjanela_max_base$, as variáveis $Tjanela_ini_a$ e $Tjanela_max_a$ passarão a ser atualizadas dinamicamente, refletindo as características do contexto observadas individualmente por n_a.

Para n_a, a variável $Tjanela_ini_a$ será atualizada em função da mediana do intervalo dos contatos observados entre n_a e seus respectivos vizinhos diretos. Já $Tjanela_max_a$ será calculada em função do maior intervalo de tempo observado entre n_a e seus vizinhos diretos.

Os valores das constantes $Tjanela_ini_base$ e $Tjanela_max_base$ foram calculados a partir de simulações realizadas com os seguintes cenários, extraídos de [63, 65]: ZebraNet com 10, 20, 30 e 40 nós; DieselNet com 16 e 31 nós; WDM com 75 e 150 nós; e Dartmouth com nós conectores (VANET - *Vehicular Ad-Hoc Network*) com 510, 1.020 e aproximadamente 2.000 nós. Todos os cenários apresentam registros de movimento extraídos de experimentos reais, com exceção do cenário WDM, cujos registros de movimento foram produzidos artificialmente. A Tabela 4.1 apresenta detalhes dos cenários utilizados. Cabe ainda destacar que o leque de arquivos de movimento contempla os tipos de contato oportunista e previsível, que se encontram presentes na maioria expressiva das DTNs.

Tabela 4.1: Características dos cenários para definição de valores para $Tjanela_ini_base$ e $Tjanela_max_base$

Cenário	Tipo de Contato	Qtde de Contextos	Raio de Alcance (m)	Quantidade de nós	Duração	Dimensão (Km^2)
Dartmouth	previsível e oportunista	3	150	510, 1020 e 2.000	24 horas	241,40
DieselNet	previsível	2	100	16 e 31	188 horas	15.300
WDM	oportunista	4	50 e 150	75 e 150	6 horas	1.000
ZebraNet	oportunista	12	50, 150 e 250	10, 20, 30 e 40	45 minutos	809,37

Para a determinação das constantes $Tjanela_ini_base$ e $Tjanela_max_base$ foram realizadas 21 simulações envolvendo os cenários supracitados e identificados por ZebraNet, DieselNet, WDM e Dartmouth. O conjunto de simulações descreve as seguintes propriedades: 5 cenários exibem contatos do tipo previsível e 19 cenários apresentam contatos do tipo oportunista; a quantidade de nós varia de 10 a aproximadamente 2.000 nós; o menor tempo de simulação é de 45 minutos e o maior alcança 7 dias e 20 horas (188 horas); e o raio de alcance varia de 50 metros a 250 metros. O valor de $Tjanela_ini_base$ foi obtido a partir do cálculo da mediana do intervalo de tempo entre contatos de cada par de nós. Já o valor de $Tjanela_max_base$ foi calculado pela mediana dos maiores intervalos de tempo entre contatos de cada par de nós. Para o cômputo dos valores de $Tjanela_ini_base$ e de $Tjanela_max_base$, foram descartadas as medições provenientes de pares que tenham se encontrado apenas duas vezes com a finalidade de limitar o peso de distorções na estimativa dos referidos valores, resultando em $Tjanela_ini_base = 635,5$ e $Tjanela_max_base = 2.221,0$, representados em segundos (s). A opção pela mediana ao invés da média justifica-se pelo fato de a mediana ser menos sensível à presença de valores descritos como *outliers*, ou seja, valores muito grandes ou muito pequenos se comparados aos demais valores observados.

A escolha do intervalo de tempo entre contatos dos vizinhos diretos, na qualidade de métrica para determinar o período de observação, incide na concepção de que os nós devem expor para seus vizinhos diretos um retrato de como a rede afetou a capacidade de armazenamento durante o período em que os próprios vizinhos diretos estiveram fora de contato. O intuito dessa ação é possibilitar que as oscilações do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento possam influenciar o comportamento de um protocolo de roteamento adaptativo, refletindo, de forma mais precisa, a realidade. O Algoritmo 2 ilustra como essa operação é executada.

4.4 Periodicidade do Contato

A análise do histórico de ocorrência de contatos entre pares de nós que estejam na condição de vizinhos diretos em uma DTN possibilita a extração de diversas informações sobre o comportamento dos nós, como o tipo de contato, periodicidade de contato, duração do contato, entre outras. A entidade contato é tão rica de informações que, sob determinadas circunstâncias, seu estudo é capaz de contemplar outras características importantes tal qual a velocidade de deslocamento e o tipo de contato. Apenas como exemplo, a determinação da previsibilidade de ocorrência de um contato pode favorecer de forma significativa

Algoritmo 2: Cálculo do Percentual de Ocupação da Capacidade de Armazenamento

```
Dados:
lista vizinho_direto {inteiro id_vizinho, ult_contato};
lista msg_excluida {inteiro tempo, tamanho};
lista p_nodo {inteiro MAC_nodo, ....., ocup_armazena_nodo, ....};
inteiro qtde_vizinhos ← 0, Tintervalo_viz, ocup_armazena;
inteiro TimeStamp;                    %Time Stamp − Registro de tempo%;
decimal Tjanela ← 0, perc_ocup;
Início
    Para cada vizinho_direto Faça
        Tjanela_viz ← PesquisaUltimoContato(TimeStamp, vizinho.id_vizinho) ;
        Se (Tjanela_viz = 0) Então
            Tjanela_viz ← Tjanela_ini ;
        Senão
            Se (Tjanela_viz > Tjanela_max) Então
                Tjanela_viz ← Tjanela_max ;
            Fim
        Fim
        Tjanela ← Tjanela + Tjanela_viz ;
        qtde_vizinhos ← qtde_vizinhos + 1 ;
    Fim
    Tjanela ← Tjanela / qtde_vizinhos ;
    ocup_armazena ← p_nodo.ocup_armazena_nodo ;
    Para cada msg_excluida Faça
        Se ((TimeStamp − Tjanela) ≤ msg_excluida.tempo) Então
            ocup_armazena ← ocup_armazena + msg_excluida.tamanho ;
        Senão
            Se ((TimeStamp − Tjanela_max) > msg_excluida.tempo) Então
                ExcluiMsg (msg_excluida);
            Fim
        Fim
    Fim
    perc_ocup ← ocup_armazena / TAM_ARMAZENA ;
Fim
```

a tarefa de roteamento e reduzir a carga de mensagens na rede.

As próximas subseções encontram-se organizadas na seguinte ordem: a Subseção 4.4.1 objetiva a identificação de trabalhos presentes na literatura que avaliem o quanto o conhecimento da periodicidade de contato entre pares de nós pode impactar a função de roteamento; a Subseção 4.4.2 esclarece como a periodicidade de contato pode contribuir para a tarefa de roteamento; já Subseção 4.4.3 formula uma metodologia para o processo de cálculo da periodicidade de contato para o PDC.

4.4.1 Impacto da Periodicidade de Contato

Uma parcela expressiva dos trabalhos que objetivam comparar o desempenho de protocolos de roteamento fundamenta a análise avaliando métricas como a quantidade de mensagens transmitidas na rede [81, 10, 7, 1, 70, 83, 59, 67, 51], a capacidade de armazenamento dos nós [85, 7, 1, 70, 31, 83, 67, 63, 11], a quantidade de nós presente na rede [81, 10, 83, 59, 50, 51], o raio de alcance do nós [85, 81, 7, 82, 11], entre outras. Entretanto, raras são as propostas que investigam o comportamento de protocolos de roteamento sob a ótica de métricas como área de simulação [70], probabilidade de encontro [50, 51], tempo de vida das mensagens [50, 51], a taxa de transmissão [81], quantidade de saltos [63], periodicidade de ocorrência de contatos entre pares de nós, duração dos contatos etc.

A constatação que características intrínsecas ao contato não têm sido utilizadas para mensurar o desempenho impede a realização de uma comparação análoga à confeccionada para as dimensões densidade e capacidade de armazenamento. Entretanto, cabe salientar que, em [40], Karvo e Ott definem escala de tempo como o tempo necessário para a adaptação a um novo padrão de mobilidade e analisam de que forma a variação da escala de tempo impacta o desempenho de protocolos de roteamento para DTNs, principalmente em protocolos que estimam a probabilidade de entrega de mensagens. Por conseguinte, ao variar a escala de tempo, os autores acabam alterando a duração dos contatos e a periodicidade de ocorrência de contatos, porém sem explorar o impacto dessas métricas. Já em [51] os autores modelam a rede através de informações provenientes do histórico de contatos ou de algum conhecimento prévio sobre a rede, mas, novamente, apenas com o intuito de propor o protocolo RCM (*Routing in Cyclic MobiSpace*). Logo, não foi possível localizar na literatura trabalhos que tenham explorado a característica periodicidade de contato e extraído informações dessa característica para a função de roteamento.

4.4.2 Determinação da Periodicidade do Contato

A imensa maioria dos protocolos de roteamento efetua o envelhecimento de rotas à medida que decorre o tempo do último contato. Por certo, essa é a ação mais indicada a ser realizada por um protocolo de roteamento generalista. Entretanto, em DTNs existem situações reais onde dispor da capacidade necessária para analisar o histórico do comportamento dos nós da rede pode representar uma diferença notável para o desempenho de algumas métricas.

Em cenários que apresentem tipo de contato previsível ou programado, nós com protocolos de roteamento incapazes de identificar e tratar a periodicidade de contato perdem, certamente, muitas oportunidades para um melhor encaminhamento de mensagens. No cenário ilustrado pela Figura 4.5(a) existem dois nós, representados respectivamente por um ônibus e um carro, que percorrem, com uma determinada velocidade, uma rota circular em x unidades de tempo, estabelecendo contatos do tipo previsível. Sob a ótica do carro, o envelhecimento da rota para o ônibus ocorrerá gradativamente até que sejam decorridas $x - 1$ unidades de tempo em relação ao último contato e, ao concluir um ciclo de x unidades de tempo, a rota para o ônibus será novamente atualizada. No instante retratado pela Figura 4.5(a), é factível determinar que o valor da métrica de roteamento do carro para o ônibus seja representada por $r_{(carro,onibus)} = 10$, estipular que ao transcorrer uma unidade de tempo essa métrica seja decrementada de uma unidade, e arbitrar que o valor de x seja 10.

Na Figura 4.5(b) é possível observar o surgimento de uma caminhonete, com tipo de contato oportunista e com uma mensagem cujo destino é o ônibus, estabelecendo contato com o carro. Nesse instante, foram decorridas $x - 1 = 9$ unidades de tempo desde o último contato entre o carro e o ônibus, o que acarretou o decremento do valor da métrica de roteamento até $r_{(carro,onibus)} = 1$. Além disso, para compor o cenário, foi estabelecido que a métrica de roteamento da caminhonete para o ônibus será representada por $r_{(caminhonete,onibus)} = 2$. É razoável, ainda, supor que a política de escalonamento empregada por todos os nós desse cenário estabelece que, para uma mensagem ser encaminhada, a métrica de roteamento do vizinho deve, obrigatoriamente, ser maior que a métrica de roteamento do nó que detém a mensagem. Conforme demonstra a Figura 4.5(c), em função das particularidades dos contextos apresentados, a caminhonete seguirá seu percurso sem que a mensagem para o ônibus seja encaminhada para seu destino (caminhonete $\Rightarrow$ carro $\Rightarrow$ ônibus), uma vez que $r_{(caminhonete,onibus)} > r_{(carro,onibus)}$.

Já a Figura 4.6(a) reflete o mesmo cenário introduzido pela Figura 4.5(a), exceto que os

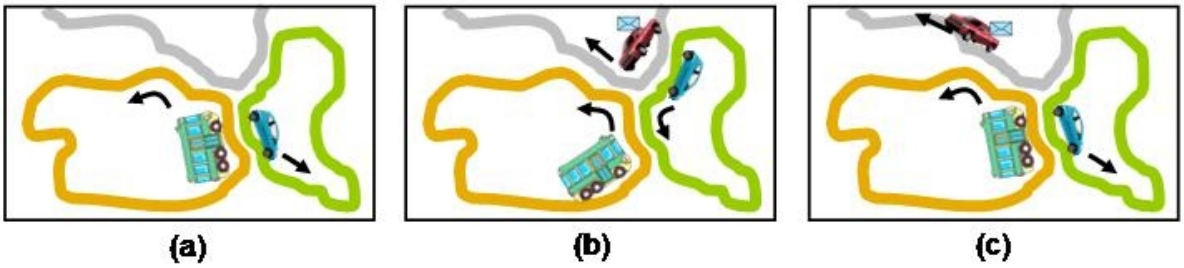

Figura 4.5: Roteamento sem aplicação do histórico da periodicidade de contato

protocolos de roteamento dispõem da capacidade de armazenar e analisar a periodicidade com que pares de nós estabelecem contato, o que conduzirá, certamente, a um desempenho bastante superior em relação àqueles que não dispõem dessa capacidade. Ou seja, é plausível estabelecer que tanto o carro quanto o ônibus analisem mutuamente o histórico de periodicidade de contatos, efetuando o envelhecimento da métrica de roteamento de forma recíproca até um determinado instante, por exemplo até $\frac{x}{2}$ unidades de tempo de uma estimativa de contato, e, partir desse instante, voltem a incrementá-la. Considerando essa realidade para o cenário reproduzido pela Figura 4.6(b), no momento do contato entre a caminhonete e o carro, ou seja, após decorridas $x - 1 = 9$ unidades de tempo, seria obtido $r_{(caminhonete,onibus)} = 2$ e $r_{(carro,onibus)} = 9$, o que implicaria no encaminhamento da mensagem destinada ao ônibus, e transportada pela caminhonete, para o carro. No instante seguinte, exposto pela Figura 4.6(c), a mensagem seria entregue ao destinatário. No entanto, caso a previsão não se concretizasse, a métrica de roteamento voltaria a ser decrementada.

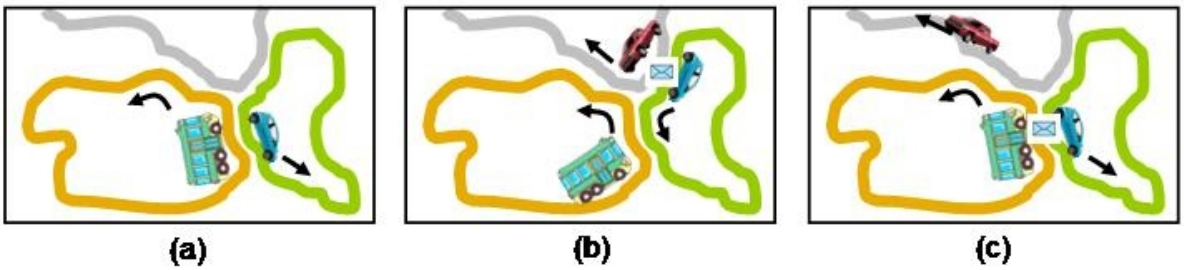

Figura 4.6: Roteamento com aplicação do histórico da periodicidade de contato

4.4.3 Cálculo da Periodicidade de Contato

A primeira etapa para se calcular a periodicidade de contato entre um par de nós passa pela determinação da quantidade de intervalos entre contatos que deve ser analisada. Uma quantidade de amostras muito grande pode ser incapaz de refletir um comportamento

recente, o que certamente é uma desvantagem, pois caso a maioria das amostras recentes apresente valores muito próximos, haverá uma probabilidade significativa que a próxima medição resulte em um valor similar aos apurados. Já uma quantidade muito pequena de amostras pode refletir uma mudança recente de comportamento, entretanto pode ocultar um comportamento momentâneo, o que tornaria a previsão frágil.

Para a determinação da quantidade apropriada de intervalos entre contatos, que será referenciada por $Qtde_contato$, foram realizadas simulações com os mesmos cenários descritos na Subseção 4.3.3. Consequentemente, para cada nó da rede foi calculada a quantidade de contatos estabelecidos com cada vizinho direto dentro de uma janela de tempo limitada por $Tjanela_max_base$ e, ao final de cada janela de tempo, a quantidade de contatos entre cada par de vizinhos diretos foi armazenada e estabelecida uma nova janela de tempo, cuja marcação inicial foi deslocada em $Tjanela_ini_base$ unidades de tempo. Ao final de cada simulação foi calculada a mediana da quantidade de contatos entre pares distintos de vizinhos diretos dentro da janela de tempo firmada por $Tjanela_max_base$, e, ao final de todas as simulações, a mediana dos valores calculados a partir de cada simulação deu origem a $Qtde_contato = 3$.

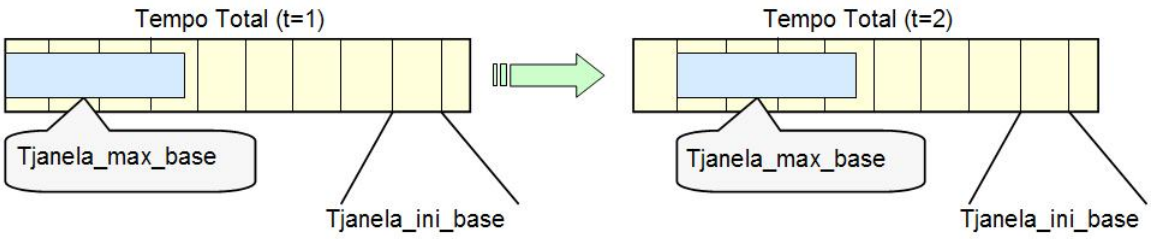

Figura 4.7: Deslocamento da janela de tempo $Tjanela_max_base$

Deve-se ressaltar que as medições provenientes de pares de vizinhos diretos que se tenham encontrado uma única vez foram descartadas com a finalidade de limitar o peso de distorções na estimativa do cálculo do valor de $Qtde_contato$. A Figura 4.7 ilustra de que modo o tempo total foi fatiado em $Tjanela_ini_base$ intervalos de tempo e como a janela de tempo definida por $Tjanela_max_base$ foi deslocada.

A partir de informações provenientes da periodicidade de contato entre um par de nós é factível predizer, com um certo grau de certeza, quando deverá ser iniciado o próximo contato. Logo, com o intuito cobrir as vantagens e reduzir as desvantagens pertinentes à observação de quantidades grandes e pequenas de amostras de intervalos entre contatos, foi determinado, para o PDC, que somente seriam consideradas amostras que contivessem, ao menos, $Qtde_contato$ contatos dentro de uma janela de tempo limitada

por $Tjanela_max$. Dessa forma, $Estima_contato_{(a,b)}$ estimará o instante em que deverá ocorrer o próximo contato entre os nós n_a e n_b, desde de que a quantidade de contatos computada na janela de tempo definida por $Tjanela_max$ e representada por $Qcontato_{(a,b)}$ seja maior ou igual a $Qtde_contato$.

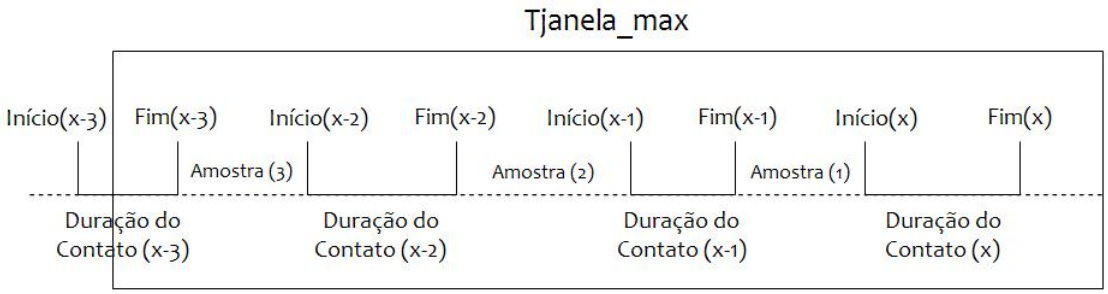

Figura 4.8: Determinação de amostras para o cálculo da periodicidade de contato

As amostras para o cálculo da periodicidade de contato serão determinadas pela subtração da marcação do tempo de início de um contato entre os nós n_a e n_b da marcação do tempo de término do contato anterior, desde que ambas marcações de tempo encontrem-se dentro da janela de tempo estabelecida por $Tjanela_max$. A Figura 4.8 ilustra a marcação de início e término de contatos entre um par qualquer de nós da rede e estabelece três amostras válidas, considerando o intervalo de tempo especificado por $Tjanela_max$.

A aplicação da periodicidade de contato sobre a métrica de roteamento dependerá do cumprimento das seguintes regras:

- n_a e n_b devem ter estabelecido ao menos $Qtde_contato$ contatos durante uma janela de tempo de $Tjanela_max$;
- a medida de dispersão das amostras dos intervalos entre contatos, representada por $\sigma_int_contato_{(a,b)}$, será calculada através do desvio padrão, e a média das amostras será representada por $\bar{x}_int_contato_{(a,b)}$;
- $\sigma_int_contato_{(a,b)}$ deve ser menor que a metade de $\bar{x}_int_contato_{(a,b)}$.

Caso as restrições tenham sido superadas, comprovando que as amostras apresentem informações relevantes para a alteração no processo de envelhecimento de uma determinada rota, será determinado o instante, após a perda de contato, em que o índice de roteamento deixará de ser decrementado e passará a ser incrementado. O Algoritmo 3 mostra como o cálculo da estimativa de periodicidade de contato é realizado.

Algoritmo 3: Cálculo da Estimativa da Periodicidade de Contato

```
Dados:
lista periodo_contato {inteiro id_vizinh, ini_contato, fim_contato};
lista amostra {inteiro intervalo_contato};
inteiro qtde_amostras ← 0, janela_limite, inicio_contato;
inteiro TimeStamp;                    %Time Stamp − Registro de tempo%;
decimal incrementa_idx ← 0, σ_int_contato, estima_contato;
Início
    inicio_contato ← 0 ;
    janela_limite ← TimeStamp − Tjanela_max ;
    Para cada periodo_contato Faça
        Se (inicio_contato = 0) Então
            Se ((periodo_contato.ini_contato < janela_limite) Então
                ExcluiContato(periodo_contato) ;
            Senão
                inicio_contato ← periodo_contato.ini_contato ;
            Fim
        Senão
            Se (periodo_contato.fim_contato < janela_limite) Então
                ExcluiContato(periodo_contato) ;
            Senão
                IncluiAmostra(inicio_contato − periodo_contato.fim_contato) ;
                qtde_amostras ← qtde_amostras + 1 ;
                inicio_contato ← periodo_contato.ini_contato ;
            Fim
        Fim
    Fim
    Se (qtde_amostras ≥ QTDE_CONTATO) Então
        x̄_int_contato_(a,b) ← x̄(amostras) ;
        σ_int_contato ← σ(amostras) ;
        Se (σ_int_contato < (x̄_int_contato_(a,b) / 2)) Então
            incrementa_idx ← TimeStamp + (x̄_int_contato_(a,b) / 2) + σ_int_contato ;
            estima_contato ← TimeStamp + x̄_int_contato_(a,b)
        Fim
    Senão
    Fim
Fim
```

4.5 Análise de Outros Atributos de Rede

Embora não tenha sido possível localizar um trabalho dedicado à análise de atributos de rede passíveis de serem empregados no processo de detecção de características de contexto para DTNs, a literatura dispõe de algumas propostas de protocolos de roteamento que fazem uso de abordagens similares.

Em [57, 58], Musolesi e Mascolo descrevem um protocolo de roteamento que apresenta a capacidade de efetuar a avaliação de informações do contexto de DTNs e, dessa forma, auxiliar o processo de roteamento. Os autores efetuam a implementação do protocolo CAR com base em dois atributos, identificados por grau de conectividade e posicionamento futuro. O atributo grau de conectividade é calculado a partir da quantidade de nós que estabeleceram conexão ou se desconectaram dentro de um período de observação, sendo normalizado pela quantidade total de nós encontrados dentro do mesmo período de observação. Já o atributo posicionamento futuro estima a probabilidade de um nó estar localizado na mesma partição de um outro nó (destinatário).

Em [54, 22, 23] são apresentadas variações do protocolo CAR. Musolesi e Mascolo [54] adaptam a versão original do protocolo CAR para rede de sensores sem fio e acrescentam o atributo nível de energia da bateria. Já Dini e Lo Duca [22] acrescentam o conceito de reputação à métrica *Delivery Probability*, enquanto que Divya e Sivakumara [23] apresentam melhorias em relação à versão original.

Por fim, Boldrini *et al.* [5, 6] propõem o protocolo HiBOp (*History Based Routing Protocol for Opportunistic Networks*) e definem contexto como um conjunto de informações que descreve um ambiente e a história das relações sociais entre usuários (nós). Cada nó usa informações pessoais (nome, sobrenome, e-mail etc.), da residência (rua, cidade etc.), do trabalho (endereço, instituição etc.) e outras informações para a construção do contexto. O compartilhamento desse conjunto de informações com os demais nós da rede possibilita o aprendizado do contexto em que os nós se encontram imersos, favorecendo o roteamento. Deve-se ressaltar que, diferentemente das demais propostas, o processo de detecção do contexto provido pelo protocolo HiBOp possibilita o encaminhamento de mensagens ainda que o destinatário não seja conhecido, Nessas situações, o HiBOp efetua o encaminhamento baseado em uma classificação qualitativa da precisão da classe de atributos. Embora o foco dos autores seja uma abordagem visando redes sociais, o processo de detecção do contexto pode ser empregado de forma generalista.

4.6 Considerações Finais

Como a análise dinâmica de características dos contextos que se formam em cenários de DTNs possibilita um aprendizado fundamental para incrementar o desempenho dos protocolos de roteamento, verificou-se a necessidade de efetuar um estudo de quais atributos de rede poderiam ser utilizados de forma indiscriminada e quais contribuiriam, de fato, para o PDC. Por conseguinte, coube ao Capítulo 4 avaliar o impacto sobre o processo de detecção de contexto baseado nos principais atributos de rede, que passaram a ser referenciados por dimensões, e apresentar os motivos que culminaram com a seleção de três dimensões, identificadas por densidade, capacidade de armazenamento e periodicidade de contato. Deve-se ressaltar que essa análise considera que, em cenários típicos de DTN, os recursos computacionais dos nós que compõem a rede são escassos, assim como são raras as oportunidades de transmissão, portanto alternativas locais foram privilegiadas em detrimento a alternativas que requisitassem informações provenientes de nós vizinhos indiretos.

Para a dimensão Densidade foi definido um valor base associado a uma rede teórica, de forma que a distribuição dos nós contemplasse totalmente a área de cobertura. A partir desse modelo, foi possível formular o cálculo do grau de densidade da rede que depende, exclusivamente, de informações procedentes de nós vizinhos diretos.

Para que as informações oriundas da dimensão capacidade de armazenamento pudessem ser utilizadas com convicção, verificou-se a necessidade de analisar dados históricos. Como o contexto que envolve todo nó da rede apresenta características próprias, o período de observação dos dados históricos deve ser calculado por cada nó, a cada nova conexão. Visto que a análise quantitativa da capacidade de armazenamento foi incapaz de retratar com fidelidade o contexto da rede, optou-se por calcular o grau da capacidade de armazenamento com base no percentual de ocupação, acrescido das mensagens descartadas durante o período de observação.

Já a dimensão periodicidade de contato estabelece critérios com intuito de definir se o comportamento histórico de um vizinho indireto deve ser considerado de forma a prever o momento no qual, possivelmente, uma nova conexão com esse nó será estabelecida.

As heurísticas e os algoritmos elaborados especificamente para cada dimensão descrita neste capítulo objetivam estabelecer uma metodologia para a discretização de valores, tencionando atender aos requisitos necessários para o PDC e de forma a prover o protocolo de roteamento com as informações fundamentais para o processo de adaptação (PRA).

Capítulo 5

CARTOON: Proposta de um Protocolo de Roteamento Adaptativo

O grande interesse da comunidade acadêmica em DTNs é facilmente comprovado pela quantidade de propostas de protocolos de roteamento publicadas recentemente, propostas essas que se encontram parcialmente relacionadas na Seção 1.1. Também é possível notar que uma parcela considerável dos protocolos de roteamento é avaliada em cenários específicos, cujas características adequam-se ao comportamento dos protocolos propostos. Todavia, quando esses protocolos de roteamento são avaliados em cenários com características distintas dos cenários para os quais foram propostos, o desempenho apurado oscila de forma expressiva. O Capítulo 3 explora com consistência essa questão, mensurando a dimensão da oscilação observada e evidenciando a necessidade de protocolos de roteamento com competência para adaptar-se dinamicamente.

O Problema de Roteamento Adaptativo (PRA) abrange: (1) a análise das informações produzidas pelas heurísticas descritas para o Problema de Detecção de Contexto (PDC); e (2) a consoante adaptação dinâmica de valores parametrizáveis do protocolo de roteamento. Para que o ajuste ocorra com precisão, é necessário analisar o contexto sob a ótica de mais de um atributo de rede e, ao menos à primeira vista, quanto maior a quantidade de atributos analisados, mais preciso será o resultado. Contudo, cabe ressaltar que, a cada atributo analisado o grau de complexidade para efetuar a sintonia dos parâmetros do protocolo de roteamento cresce expressivamente. Além disso, é plausível relatar a probabilidade de que diferentes atributos de rede avaliados isoladamente entrem em conflito, ou seja, enquanto um atributo de rede direciona um determinado parâmetro para o seu limite inferior, um outro atributo de rede direciona o mesmo parâmetro para o seu limite superior.

Com o objetivo de atender às especificações do PRA, o Capítulo 5 apresenta um protocolo de roteamento adaptativo, intitulado CARTOON (*Context-Aware Routing Protocol for Opportunistic Networks*), que possui a habilidade de adequar-se às particularidades dos contextos que se formam ao longo da existência de DTNs. Os atributos de rede densidade, intervalo entre contatos, duração do contato e percentual de ocupação da capacidade de armazenamento, que são referenciados no texto desta tese de doutorado como dimensões, norteiam o processo de adaptação dinâmica ao contexto, impactando de forma positiva a função utilidade que define a métrica de roteamento e o comportamento geral do protocolo de roteamento proposto. A determinação do modo de disseminação, a duração do modo de disseminação epidêmica, as limitações impostas para a retransmissão de mensagens no modo de disseminação epidêmica, o envelhecimento da tabela de roteamento, o processo de estimativa de contato, a definição do instante de restabelecimento de contato etc. representam alguns exemplos da extensão da atuação do processo de adaptação dinâmica.

Uma das características do protocolo CARTOON, proveniente da competência para adaptação ao contexto, é a habilidade de usufruir das vantagens pertinentes ao uso concorrente do modo de disseminação epidêmica e do modo de disseminação probabilística. Essa habilidade proporciona que, com o uso da disseminação epidêmica em uma rede sem restrições, a latência seja reduzida e também que se aumente significativamente a possibilidade de que ao menos uma cópia da mensagem seja entregue ao destinatário. Contudo, caso se identifique que o contexto apresenta restrições, a disseminação epidêmica não será utilizada, permanecendo o protocolo CARTOON exclusivamente no modo de disseminação probabilística. Outra característica do protocolo CARTOON, proveniente da competência para adaptação ao contexto, é a capacidade de extrair informações oriundas do atributo contato e, a partir do instante em que for possível detectar a perda de um contato, estimar quando este contato poderá ser restabelecido.

Com o intuito de facilitar o entendimento do modo de operação do protocolo CARTOON, as funções de controle foram segmentadas em quatro processos macros distintos, identificados por:

- controle de processo - responsável por instanciar o processo de envio de mensagens e o processo de recebimento de mensagens;
- processo de envio de mensagens - composto pelo modos de disseminação probabilística e epidêmica;
- processo de recebimento de mensagens - responsável por armazenar as mensagens

recebidas e, se necessário, descartar mensagens segundo a política de descarte;

- processo de controle de mensagens - compreende os processos de escalonamento e de descarte de mensagens.

As seções do Capítulo 5 encontram-se estruturadas na seguinte ordem: a Seção 5.1 relaciona as variáveis e constantes utilizadas pelos componentes do protocolo CARTOON; a Seção 5.2 descreve, em detalhes, os processos de envio e de escalonamento de mensagens; a Seção 5.3 apresenta o processo de recebimento de mensagens; a Seção 5.4 descreve o formato das principais estruturas de dados utilizadas pelo protocolo CARTOON; e, por fim, a Seção 5.5 tece as considerações finais deste capítulo.

5.1 Constantes e Variáveis do Protocolo CARTOON

Como os componentes do protocolo CARTOON fazem uso de constantes, de variáveis globais e de variáveis específicas por contato, torna-se imprescindível para a compreensão dos componentes destacar e descrever a abrangência e o significado das constantes e das variáveis.

As constantes possuem valores definidos com base em equações formuladas no Capítulo 4, são utilizadas por todos os nós da rede executando o protocolo CARTOON e encontram-se descritas na Tabela 5.1. Cabe destacar que os valores das constantes $Tjanela_ini_base$ e $Tjanela_max_base$ encontram-se expressos em segundos e que valor da constante τ foi derivado do protocolo de roteamento RIP (*Routing Information Protocol*) [53].

Algumas variáveis têm seus valores computados de forma local devido às observações realizadas ao longo da vida útil do nó. A Tabela 5.2 relaciona essas variáveis.

Além das variáveis já descritas, existem outras variáveis que contêm informações pertinentes exclusivamente a um par de nós e que se encontram descritas na Tabela 5.3.

5.2 Processo de Envio de Mensagens

O modo de disseminação de mensagens utilizado na arquitetura DTN difere do modo de disseminação empregado pela arquitetura TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) devido, fundamentalmente, à intermitência das conexões. Essa questão motivou o estabelecimento de modos de disseminação com características apropriadas às

Tabela 5.1: Tabela de constantes do protocolo CARTOON

Campo	Valor	Descrição
$Densidade_base$	18	Valor base associado a uma rede teórica, de forma que a distribuição dos nós contempla totalmente a área de cobertura
$Qtde_contato$	3	Quantidade mínima de intervalos entre contatos para estimar quando ocorrerá um próximo contato
$RecPassivo$	5	Percentual de ocupação da capacidade de armazenamento destinado a mensagens do tipo reconhecimento passivo
τ	16	Valor inicial do campo $Tempo_de_Vida$
$Tjanela_ini_base$	635,5	Mediana apurada do intervalo de tempo entre contatos de cada par de nós e valor inicial da variável local $Tjanela_ini$
$Tjanela_max_base$	2.221,0	Mediana apurada dos maiores intervalos de tempo entre contatos de cada par de nós e valor inicial da variável local $Tjanela_max$

Tabela 5.2: Tabela de variáveis locais ao protocolo CARTOON

Campo	Descrição
$Densidade_idx$	Densidade estimada considerando observações locais e dos vizinhos diretos
$Densidade_local$	Densidade estimada com base na quantidade de vizinhos diretos e indiretos com até dois saltos
$Densidade_viz$	$Densidade_idx$ informada por um vizinho direto
$Perc_Armazena$	Percentual real de ocupação da capacidade de armazenamento
$Perc_Estima_Ocup$	Percentual real de ocupação da capacidade de armazenamento acrescido de mensagens descartadas durante o período estabelecido por $Tjanela$
$TAM_ARMAZENA$	Capacidade de armazenamento em octetos
$Tjanela$	Média do intervalo de tempo entre o contato atual e o último contato de cada um de seus vizinhos diretos
$Tjanela_ini$	Média do valor atual de $Tjanela_ini$ com a mediana dos intervalos de tempo entre contatos de cada par de nós
$Tjanela_max$	Média do valor atual de $Tjanela_max$ com a mediana dos maiores intervalos de tempo entre contatos de cada par de nós

DTNs, entre os quais é possível citar o modo probabilístico e o modo não-probabilístico ou epidêmico.

Os protocolos de roteamento baseados no modo de disseminação probabilística fazem uso de dados estatísticos, provenientes de métricas como a quantidade de transmissões, o tempo de vida de uma mensagem, a ocorrência de contatos entre um par de nós etc., com

Tabela 5.3: Tabela de variáveis específicas de um par de nós e das mensagens

Campo	Descrição
$Dcontato_{(a,b)}$	Duração do contato, não necessariamente contígua, entre os nós n_a e n_b dentro da janela de tempo estabelecida por $Tjanela_max$
$Dcontato_idx_{(a,b)}$	Índice da métrica de roteamento de n_a para n_b
$Qcontato_{(a,b)}$	Quantidade de contatos entre n_a e n_b calculada dentro de uma janela de tempo estabelecida por $Tjanela_max$
$Qtde_de_Saltos_{(a,b)}$	Quantidade de nós necessária para que uma mensagem enviada por n_a possa alcançar n_b
$\sigma_int_contato_{(a,b)}$	Desvio padrão dos intervalos entre contatos de n_a e n_b dentro de uma janela de tempo estabelecida por $Tjanela_max$
$Tempo_de_Vida$	Quantidade de encaminhamentos possíveis para a cópia de uma determinada mensagem
$\bar{x}_int_contato_{(a,b)}$	Média dos intervalos entre contatos de n_a e n_b dentro de uma janela de tempo estabelecida por $Tjanela_max$

o objetivo de determinar se uma mensagem deve ou não ser encaminhada para um vizinho direto. Por escolher, ainda que em teoria, o melhor encaminhador para cada mensagem, o modo probabilístico tende a utilizar melhor os recursos da rede em função de restringir transmissões desnecessárias, limitar a quantidade de cópias de uma mensagem e reduzir a possibilidade de descarte. No entanto, decisões equivocadas podem implicar, resumidamente, uma alta latência, ou até mesmo na incapacidade de entregar determinadas mensagens aos seus respectivos destinos. Os protocolos PROPHET, MaxProp, NECTAR constituem alguns exemplos de utilização do modo de disseminação probabilística.

Já os protocolos de roteamento fundamentados no modo de disseminação epidêmica encaminham as mensagens para a maior quantidade possível de nós da rede. Esse pensamento encontra sustentação no fato de que quanto maior a quantidade de cópias de uma mensagem na rede, maior será a possibilidade de alguma cópia alcançar o destinatário. De fato, em uma rede sem limitações, a disseminação epidêmica reduz a latência e aumenta significativamente a possibilidade de que ao menos uma das cópias da mensagem seja entregue ao destinatário. Todavia, caso haja restrições na rede, a disseminação epidêmica pode, em síntese, ocasionar uma quantidade expressiva de descartes, assim como a perda contínua de oportunidades de transmissão para determinadas mensagens em função da quantidade de mensagens armazenadas nos nós. Exemplos de emprego do modo de disseminação epidêmica podem ser encontrados nos protocolos *Epidemic*, *Spray and Wait* e NECTAR.

Com base nas particularidades expostas, é razoável assumir que, em contextos sem

restrições[1] ou com restrições mínimas, o modo de disseminação epidêmica é capaz de, em teoria, utilizar os recursos da rede com mais eficiência que o modo de disseminação probabilística, o que tende a ser traduzido em uma menor latência e uma maior taxa de entrega de mensagens. Contudo, se o contexto for caracterizado na qualidade de restrito, o modo de disseminação probabilística apresenta propensão a um melhor desempenho, pois, ao limitar a quantidade de mensagens, reduz a possibilidade de descartes em função da plena ocupação da capacidade de armazenamento, limita a ocorrência de congestionamentos, e restringe a perspectiva de colapso da rede.

Dessa forma, um protocolo de roteamento capaz de detectar características da rede e classificar um contexto como sem restrições, ou com restrições, terá a habilidade de ajustar seu modo de disseminação adequadamente. O protocolo CARTOON agrega essa funcionalidade, implementando dois modos distintos de operação, denominados de modo de disseminação epidêmica e modo de disseminação probabilística. Consequentemente, enquanto durar a fase epidêmica, as mensagens serão encaminhadas para todos os vizinhos diretos através do modo de disseminação epidêmica, aproveitando os recursos disponíveis da rede; já na fase probabilística, as mensagens serão encaminhadas especificamente para um vizinho direto, que será selecionado a partir de uma função utilidade, através do modo de disseminação probabilística. As Subseções 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 descrevem, respectivamente, a metodologia de operação dos modos de disseminação probabilística e epidêmica do protocolo CARTOON, e a metodologia empregada para determinar o modo de disseminação.

5.2.1 Modo de Disseminação Probabilística

Durante a execução do modo de disseminação probabilística ocorre o cálculo da métrica de roteamento ($Dcontato_idx$), a manutenção da tabela de roteamento, a atualização dinâmica de variáveis de controle que lidam com a adaptação ao contexto e, evidentemente, o envio de mensagens baseado na função utilidade, cuja ordem é determinada pelo processo de escalonamento de mensagens. Os seguintes procedimentos, representados através do Diagrama de Fluxo de Dados (DFD) presente na Figura 5.1, são executados ciclicamente, enquanto perdurar o modo de disseminação probabilística:

1. ocorrência de um contato - o processo de escalonamento seleciona mensagens cujo destino corresponde ao nó que se encontra em contato e determina a ordem de envio;

[1]Contextos sem restrições caracterizam-se por apresentar nós com capacidade de armazenamento suficiente para comportar as mensagens da rede sem necessidade de descarte, alta mobilidade e densos.

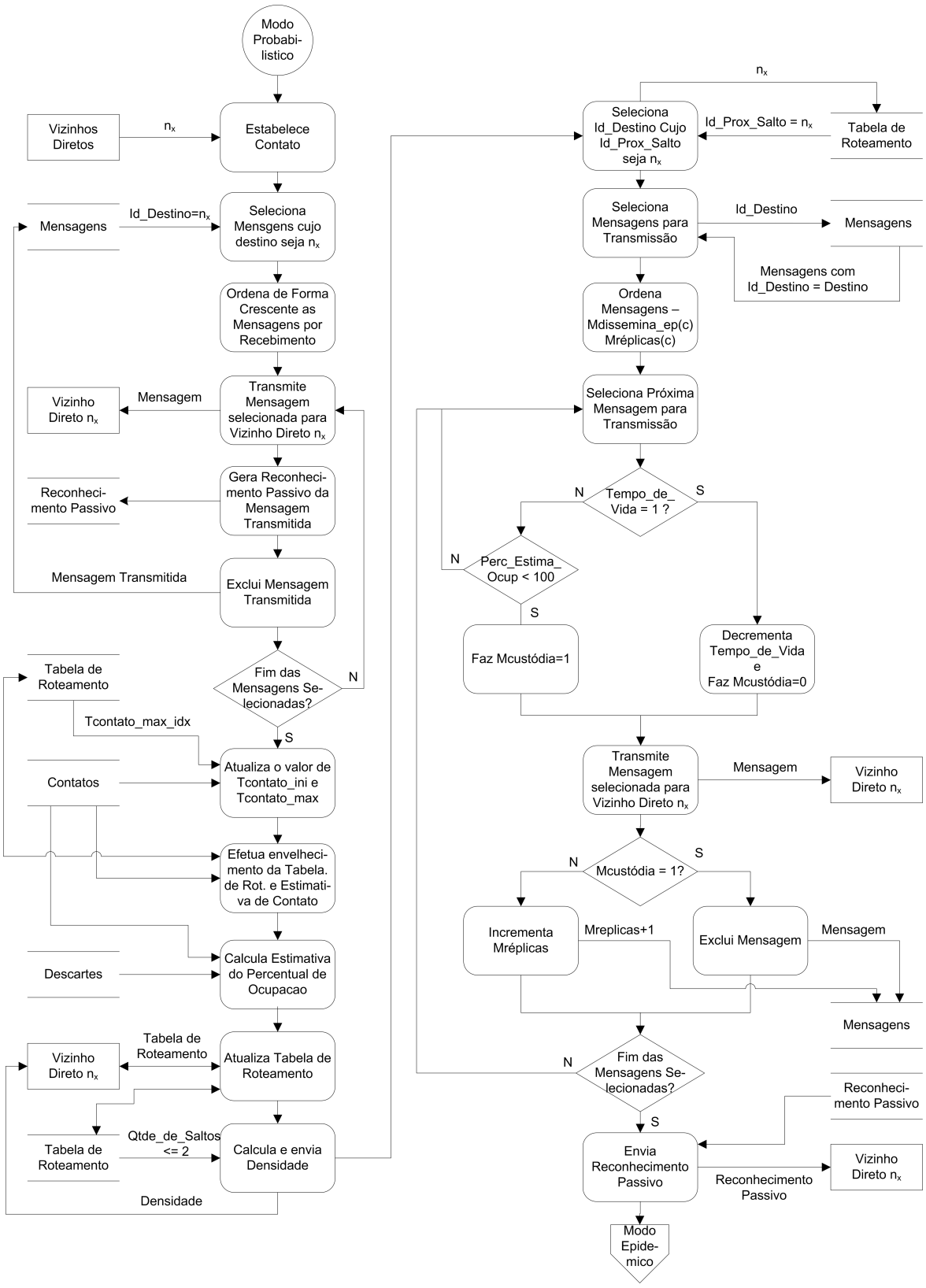

Figura 5.1: DFD do modo de disseminação probabilística

2. envio de mensagens para o destino - envia as mensagens selecionadas na ordem determinada pelo processo de escalonamento, gera uma mensagem de reconhecimento

passivo e exclui as mensagens transmitidas;

3. atualização da janela de contato - atualiza os valores de $Tjanela_ini$ e $Tjanela_max$ com base, respectivamente, nas informações existentes no histórico de contatos e na tabela de roteamento;

4. envelhecimento da tabela de roteamento e cálculo da estimativa de contato - a tabela de roteamento é analisada, possibilitando que as rotas para os nós cujo contato foi perdido sejam envelhecidas (para que uma rota seja considerada perdida é necessário que a última atualização tenha ocorrido há mais de $Tjanela_ini$ unidades de tempo) e que se identifiquem rotas cujas características permitam estimar quando provavelmente ocorrerá um próximo contato, respeitando-se as limitações estabelecidas pela Seção 4.4;

5. cálculo e envio da estimativa de ocupação - cada nó calcula e envia a estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento a partir do histórico de descartes e do histórico de contatos;

6. atualização da tabela de roteamento - cada nó envia a sua tabela de roteamento e, se houver necessidade, atualiza a métrica de roteamento com informações provenientes da tabela de roteamento recebida;

7. cálculo e envio da densidade - a métrica densidade é recalculada a partir da atualização da tabela de roteamento e enviada para o nó que se encontra em contato;

8. envio de mensagens para o próximo salto - o processo de escalonamento é novamente acionado com intuito de selecionar mensagens cujo próximo salto corresponda ao nó que se encontra em contato, possibilitando o envio das mensagens selecionadas na ordem estipulada pela Subseção 5.2.1.1;

9. envio de reconhecimento passivo - informações resumidas do cabeçalho de mensagens entregues, identificadas por reconhecimento passivo, são encaminhadas na ordem em que se encontram armazenadas;

10. disseminação epidêmica - após a execução dos procedimentos supracitados, o modo de disseminação epidêmica é acionado para o envio de mensagens.

Cabe ressaltar que, cada vez que uma mensagem é transmitida, independente do modo de transmissão, a quantidade de réplicas associada a mensagem, identificada pelo campo *Mréplicas*, é automaticamente incrementada de uma unidade, a menos que a mensagem

seja excluída do repositório para armazenamento de mensagens por ter sido entregue ao destinatário.

As Subseções 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.1.3, 5.2.1.4, 5.2.1.5, 5.2.1.6, 5.2.1.7, 5.2.1.8 e 5.2.1.9 tratam, nessa ordem, do processo de escalonamento de mensagens para transmissão, do envio de reconhecimento de mensagens entregues, do cálculo da janela deslizante, do processo de cálculo do índice de roteamento, do envelhecimento do índice de roteamento, da estimativa de contato, da estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento, da estimativa da densidade, e do tempo de vida e da transferência de custódia.

5.2.1.1 Processo de Escalonamento de Mensagens para Disseminação Probabilística

Visto que as DTNs representam, em sua maioria, cenários restritos, que se caracterizam por raras oportunidades de contato, capacidade de transmissão da rede limitada, nós com recursos escassos etc., torna-se imprescindível a definição de uma política de escalonamento de mensagens que possibilite aos nós selecionar e priorizar as mensagens que devem ser transmitidas, aproveitando ao máximo o tempo de contato disponível e evitando, dessa forma, a perda da oportunidade de transmissão.

Embora os campos *Mdissemina_ep*, *Mréplicas* e *Mtempo* encontrem-se descritos no repositório para armazenamento de mensagens (ver Subseção 5.4.1), para a perfeita compreensão do processo de escalonamento, torna-se determinante detalhar os referidos campos.

- *Mdissemina_ep* - identifica se a mensagem foi recebida através de uma disseminação probabilística (valor 0) ou através de uma disseminação epidêmica (valor 1);
- *Mréplicas* - representa a quantidade de réplicas acumuladas da mensagem computada localmente;
- *Mtempo* - armazena o instante em que a mensagem foi recebida ou gerada.

Posto isto, cabe, então, ao processo de escalonamento de mensagens determinar a prioridade de encaminhamento de cada mensagem presente na área de armazenamento, ressaltando que esse processo ocorre em função do nó que estabeleceu contato. As seguintes regras definem o comportamento do processo de escalonamento utilizado pelo modo de disseminação probabilística:

- mensagens cujo destino seja o nó que se encontra conectado são enviadas com precedência e na ordem em que foram recebidas, ou seja, caso n_a e n_b estejam em contato, n_a tentará encaminhar todas as mensagens cujo destino seja n_b, e vice-versa;

- mensagens que devam ser encaminhadas, através da técnica de *relay*, para o nó que se encontra em contato devem ser classificadas segundo os seguintes critérios: ordenadas de forma crescente em relação ao modo em que a mensagem foi disseminada (*Mdissemina_ep*), privilegiando mensagens disseminadas de forma probabilística; ordenadas de forma crescente em relação à quantidade de réplicas das mensagens efetuadas localmente (*Mréplicas*); e, como critério de desempate, classificadas de forma que as mensagens mais antigas sejam encaminhadas primeiro (*Mtempo*);

- mensagens de reconhecimento passivo (descritas na Subseção 5.2.1.2 são encaminhadas na ordem inversa em que foram recebidas.

5.2.1.2 Reconhecimento de Mensagens Entregues

No instante em que um nó qualquer da rede consegue encaminhar uma determinada mensagem para o nó de destino, essa mensagem é automaticamente eliminada da área de armazenamento, liberando espaço para que novas mensagens possam ser recebidas sem a necessidade de descarte. No entanto, uma cópia sumarizada do cabeçalho contendo a identificação do nó de origem (*Id_Origem*), identificação do nó de destino (*Id_destino*) e número de sequência da mensagem (*Num_Sequência*) é mantida no repositório para fins de reconhecimento passivo, passando a ser identificada por mensagem do tipo reconhecimento passivo. Esse procedimento é realizado com o intuito de evitar o recebimento de cópias de mensagens previamente entregues ao destinatário.

Além disso, o cabeçalho sumarizado é utilizado como um *PassiveAck* [38] e encaminhado durante o estabelecimento de contato para os vizinhos diretos caso a duração do contato permita. Dessa forma, é plausível descrever um cenário onde n_a encaminhou uma mensagem m_x para o destinatário n_d e, em seguida, movimentou-se na direção de n_b, que mantinha em sua área de armazenamento a mesma mensagem m_x. Quando n_a e n_b entrarem em contato, n_a poderá informar que a mensagem m_x, destinada a n_d, já foi entregue. A troca do reconhecimento passivo possibilitará que n_b elimine a mensagem m_x da sua área de armazenamento, liberando espaço para o recebimento de novas mensagens sem a necessidade de descarte, e que posteriormente repasse essa informação para outros nós da rede.

Uma área equivalente a *RecPassivo* porcento da capacidade de armazenamento dos nós é reservada para as mensagens do tipo reconhecimento passivo. No entanto, esse limite pode tornar-se flexível caso haja disponibilidade na área de armazenamento, facultando que mensagens recebidas possam ocupar parte do repositório para armazenamento de reconhecimento passivo, assim como que mensagens do tipo reconhecimento passivo possam ultrapassar o limite estabelecido por *RecPassivo* porcento. Se, porventura, a capacidade de armazenamento for insuficiente para armazenar novas mensagens do tipo reconhecimento passivo, a política de descarte de mensagens será aplicada, eliminando tanto mensagens de dados como mensagens do tipo reconhecimento passivo que estejam ocupando uma área indevida. As mensagens de reconhecimento passivo são mantidas até que novas mensagens de reconhecimento sejam recebidas e impliquem o descarte de mensagens de reconhecimento mais antigas.

5.2.1.3 Cálculo da Janela Deslizante

Em função da natureza adaptativa do protocolo CARTOON é imperativo formular equações que possibilitem que as variáveis $Tjanela_ini$ e $Tjanela_max$ reflitam o contexto. Dessa forma, toda vez que um nó identifica tanto o estabelecimento quanto a perda de contato com um vizinho, o instante de ocorrência do evento e a identificação do vizinho são registrados no repositório para armazenamento de contatos. Além disso, desde que haja um contato anterior, a duração do intervalo entre o início do contato corrente e o fim do contato anterior é calculada, possibilitando que o mais longo intervalo entre contatos de cada vizinho direto seja armazenando no campo $Tjanela_max_idx$ da tabela de roteamento.

As Equações 5.1 e 5.2 demonstram como o processo de adaptação ao contexto atua sobre as variáveis $Tjanela_max$ e $Tjanela_ini$. Para o cálculo das referidas equações, considera-se que a variável $M_d_Tjanela_max$ exibe a mediana dos valores do campo $Tjanela_max$ de todas as entradas na tabela de roteamento, e que a variável $M_d_Tjanela_ini$ denota a mediana do intervalo entre contatos de cada par de nós obtida a partir de informações do repositório para armazenamento de contatos. Cabe destacar que as variáveis $Tjanela_max$ e $Tjanela_ini$ são inicializadas, respectivamente, com o valor das constantes $Tjanela_max_base$ e $Tjanela_ini_base$, e que, durante o processo de cálculo da variável $Tjanela_ini$, os registros presentes no repositório para armazenamento de contatos, cujo contato inicial seja anterior a $(TS - Tjanela_max)$, são excluídos. Cabe relembrar que TS representa o tempo atual.

$$Tjanela_max = \left(\frac{Tjanela_max + M_d_Tjanela_max}{2}\right) \tag{5.1}$$

$$Tjanela_ini = \left(\frac{Tjanela_ini + M_d_Tjanela_ini}{2}\right) \tag{5.2}$$

É possível descrever um cenário onde n_a tenha três vizinhos diretos, identificados por n_b, n_c e n_d. Supondo que o valor de $Tjanela_max$ para n_a seja igual a 200 e que a tabela de roteamento de n_a registre o valor 230 para maior intervalo de tempo entre contatos com n_b, 150 com n_c e 75 com n_d, o valor atualizado de $Tjanela_max$ para n_a será calculado conforme ilustra a Equação 5.3:

$$Tjanela_max = \left(\frac{200 + 150}{2}\right) = 175 \tag{5.3}$$

Considerando o mesmo cenário, é razoável supor que o valor de $Tjanela_ini$ para n_a seja igual a 120 e que o cálculo da mediana do intervalo entre contatos de n_a com n_b seja igual a 65 (presumindo que existam os valores 50, 60, 70 e 220), com n_c seja igual a 80 e com n_d seja igual a 130, o valor atualizado $Tjanela_ini$ para n_a será calculado conforme ilustra a Equação 5.4:

$$Tjanela_ini = \left(\frac{120 + 80}{2}\right) = 100 \tag{5.4}$$

5.2.1.4 Cálculo do Índice de Roteamento

O encaminhamento de mensagens durante o modo de disseminação probabilística requer a definição de uma função utilidade que possa representar uma métrica para o processo de roteamento. No caso do protocolo CARTOON, a métrica de roteamento é baseada em uma característica do atributo contato. A observação de que em cenários reais o movimento dos nós não ocorre de forma totalmente aleatória encontra sustentação em assertivas de diversos autores [49, 94, 90, 19, 64, 63], portanto é plausível concluir que, em uma parcela significativa de cenários reais, os nós têm um destino certo, que esse destino pode ser visitado inúmeras vezes, e que existe a probabilidade de os nós reencontrarem, com uma determinada frequência, alguns dos nós de que tenham sido vizinhos diretos anteriormente e restabelecerem contato.

Desse modo, o protocolo CARTOON adotou o atributo duração do contato entre

pares de nós na condição de métrica de roteamento. Logo, considerando o que o nó n_b entrou em contato com o nó n_a, n_a computará a duração do contato de n_b dentro de uma janela de tempo definida por $Tjanela_max$, valor que será representado por $Dcontato_{(a,b)}$. Consequentemente, quanto maior a duração do contato entre n_a e n_b, maior será o valor da métrica de roteamento identificada por $Dcontato_idx_{(a,b)}$. A Equação 5.5 descreve a fórmula utilizada para calcular o índice de roteamento entre os vizinhos diretos n_a e n_b.

$$Dcontato_idx_{(a,b)} = \max\left(Dcontato_idx_{(a,b)}; \frac{Dcontato_{(a,b)}}{Tjanela_max_a}\right), \tag{5.5}$$

onde $Dcontato_{(a,b)}$ denota a duração do(s) contato(s), não necessariamente contínua, entre os vizinhos diretos n_a e n_b, porém limitado a uma janela de tempo deslizante determinada por $Tjanela_max_a$.

Já a atualização da métrica de roteamento para vizinhos indiretos segue uma fórmula diferenciada, possibilitando que a distância para o nó de destino, representada pela quantidade de nós intermediários ou simplesmente $Qtde_de_Saltos$, influencie o valor atribuído. Dessa forma, durante o período de contato entre n_a e n_b haverá a troca da tabela de roteamento e, caso n_b conheça um percurso para um nó qualquer identificado por n_c que não seja vizinho direto de n_a e que resulte em $Dcontato_idx_{(a,c)} < Dcontato_idx_{(b,c)}$, $Dcontato_idx_{(a,c)}$ será atualizado conforme a Equação 5.6.

$$Dcontato_idx_{(a,c)} = \frac{Dcontato_idx_{(b,c)} \times Qtde_de_Saltos_{(b,c)}}{Qtde_de_Saltos_{(b,c)} + 1}, \tag{5.6}$$

onde $Qtde_de_Saltos_{(b,c)}$ representa, a partir de n_b, a quantidade de nós para que a mensagem possa alcançar n_c.

Supondo que $VD_{(a)}$ represente o conjunto de vizinhos diretos de um determinado nó n_a, é factível estipular um contexto de uma DTN onde $n_b \in VD_{(a)}$, $n_c \in VD_{(b)}$ e $n_a \notin VD_{(c)}$ e, com a aplicação da propriedade da transitividade, é possível ainda inferir que n_c apresenta-se como uma boa alternativa para encaminhar mensagens cujo destino seja n_a, do mesmo modo que n_a para n_c. A Figura 5.2 estende o contexto descrito, com $VD_{(a)} = \{b, x, y\}$, $VD_{(b)} = \{a, c, z\}$, $VD_{(c)} = \{b, d, w, z\}$ e $VD_{(d)} = \{c, w\}$, e ilustra, através das tabelas de roteamento de n_a, n_b, n_c e n_d, o suporte provido pelo protocolo CARTOON à propriedade da transitividade e os valores associados a cada destino para uso da disseminação probabilística.

Com o intuito de detalhar a operação de cálculo da métrica de roteamento implementada pelo protocolo CARTOON, é razoável efetuar uma análise sob a ótica de um dos

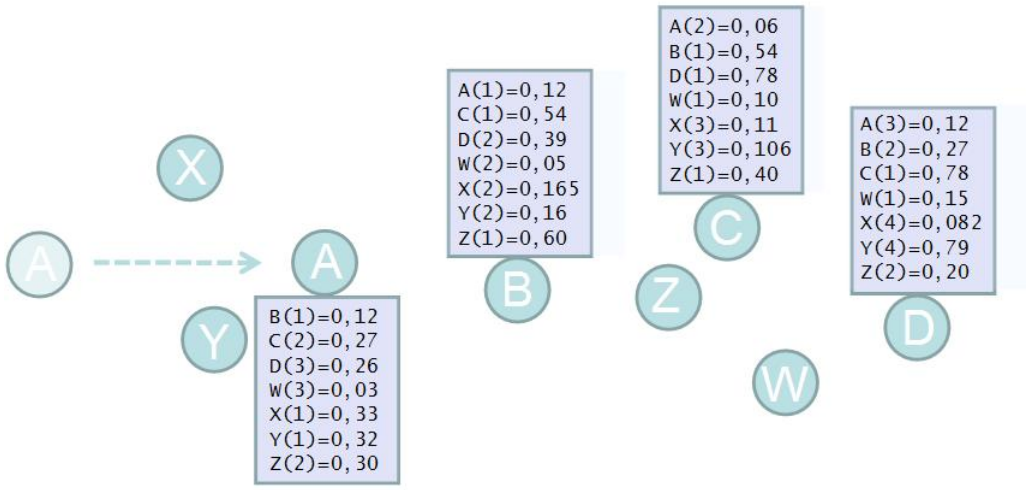

Figura 5.2: Aplicação da propriedade da transitividade e construção da tabela de roteamento do protocolo CARTOON

nós presentes no contexto ilustrado pela Figura 5.2. Cabe evidenciar que o primeiro valor de cada registro das tabelas de roteamento identifica o nó de destino, que o valor entre parêntesis indica a quantidade de saltos necessária para se alcançar o destino e que, por fim, aparece o valor apurado pela métrica de roteamento. No caso de n_a, o valor da métrica de roteamento para n_b, n_x e n_y é obtido em função do tempo em que os referidos nós permanecem em contato com n_a, sendo calculado através da Equação 5.5. Já a métrica de roteamento para os demais nós é informada por n_b e calculada através da Equação 5.6. Em relação a n_c, a métrica de roteamento é computada pela expressão presente na Equação 5.7.

$$Dcontato_idx_{(a,c)} = \left(\frac{Dcontato_idx_{(b,c)} \times Qtde_de_Saltos_{(b,c)}}{Qtde_de_Saltos_{(b,c)} + 1} \right) = \left(\frac{0,54 \times 1}{1+1} \right) = 0,27. \tag{5.7}$$

Durante o processo de atualização da Tabela de Roteamento, ocorre a troca de informações sobre rotas conhecidas e sobre informações computadas localmente pelos nós. Todas essas informações são armazenadas na tabela de roteamento. Por exemplo, para o processo de determinação do modo de disseminação, os nós enviam a estimativa do percentual de ocupação da capacidade armazenamento ($Perc_Estima_Ocup$); para o cálculo da estimativa da densidade, os nós compartilham a densidade apurada ($Densidade_idx$); etc.

5.2.1.5 Envelhecimento do Índice de Roteamento

Como uma das principais características das DTNs é a mobilidade constante dos nós, os contatos são estabelecidos e finalizados diversas vezes e com diferentes vizinhos diretos, implicando a necessidade de procedimentos para manter a tabela de roteamento atualizada. Uma das consequências proveniente da mobilidade dos nós é a obsolescência de rotas que, quando não é devidamente identificada e tratada, provoca o envio indevido de mensagens e ainda pode ocasionar, dependendo de particularidades da rede, a perda de mensagens. Por conseguinte, todas as rotas existentes na tabela de roteamento serão envelhecidas conforme a Equação 5.8:

$$Dcontato_idx_{(a,b)} = \frac{Dcontato_idx_{(a,b)}}{\max\left(1; \frac{TS-Ult_Atualiza_{(a,b)}}{Tjanela_ini}\right)}, \tag{5.8}$$

onde TS denota o tempo atual e $Ult_Atualiza$ indica o instante em que ocorreu a última atualização da rota.

A função $\max\left(1; \frac{TS-Ult_Atualiza_{(a,b)}}{Tjanela_ini}\right)$ evita o envelhecimento de rotas em função da perda de contato ocasional. Uma perda de contato ocasional pode ocorrer devido à gestão de energia, aos nós estarem se deslocando no limite do raio de alcance etc. No entanto, caso $Dcontato_idx_{(a,b)}$ seja decrementado até alcançar o valor zero, a rota será descartada.

5.2.1.6 Estimativa de Contato

A partir do momento em que n_a identifica que a rota para o vizinho direto n_b deve ser envelhecida, ou seja, a partir do momento em que o contato com n_b é considerado perdido ($\frac{TS-Ult_Atualiza_{(a,b)}}{Tjanela_ini} > 1$), entra em ação o processo de estimativa de contato fundamentado por informações provenientes do PDC. O primeiro passo para o processo de estimativa de contato requer a análise do repositório para armazenamento de contatos, visando computar $Qcontato_{(a,b)}$, que representa a quantidade de contatos entre n_a e n_b dentro da janela de tempo estabelecida por $Tjanela_max$.

O passo seguinte é verificar se a expressão $Qcontato_{(a,b)} \geq Qtde_contato$ é verdadeira, considerando que $Qtde_contato$ representa a quantidade mínima de contatos para a validação do processo de estimativa de contato, cujo detalhamento pode ser observado na Subseção 4.4.3. Caso a expressão seja verdadeira, a quantidade de amostras é considerada válida, possibilitando o cálculo da média ($\bar{x}_int_contato_{(a,b)}$) e do desvio padrão ($\sigma_int_contato_{(a,b)}$) dos intervalos entre contatos, com o objetivo de efetuar uma análise

qualitativa das amostras. O terceiro e último passo para o cálculo da estimativa de contato requer que $\sigma_int_contato_{(a,b)} < \frac{\bar{x}_int_contato_{(a,b)}}{2}$, possibilitando o cálculo dos valores para $Incrementa_idx_{(a,b)}$ e $Estima_Contato_{(a,b)}$ conforme ilustram, respectivamente, as Equações 5.9 e 5.10.

$$Incrementa_idx_{(a,b)} = TS + \left(\frac{\bar{x}_int_contato_{(a,b)}}{2}\right) + \sigma_int_contato_{(a,b)}, \tag{5.9}$$

$$Estima_contato_{(a,b)} = TS + \bar{x}_int_contato_{(a,b)}, \tag{5.10}$$

onde TS indica o tempo atual.

Caso todos os requisitos para o processo de estimativa de contato tenham sido contemplados, o índice de roteamento de n_a para n_b, $Dcontato_idx_{(a,b)}$, será atualizado de acordo com as seguintes condições:

- de TS até $Incrementa_idx_{(a,b)}$ - o índice de roteamento $Dcontato_idx_{(a,b)}$ será envelhecido conforme ilustra a Equação 5.8;
- de $Incrementa_idx_{(a,b)}$ até $Estima_contato_{(a,b)}$ - o índice de roteamento, identificado por $Dcontato_idx_{(a,b)}$, será incrementado segundo a Equação 5.11.

$$Dcontato_idx_{(a,b)} = Dcontato_idx_{(a,b)} \times \left(1 + \frac{TS - Incrementa_idx_{(a,b)}}{Tjanela_ini}\right) \tag{5.11}$$

Quando o contato entre os nós n_a e n_b for restabelecido, o índice $Dcontato_idx_{(a,b)}$ passará a ser atualizado através da Equação 5.5. Entretanto, caso o contato não seja restabelecido até o instante previsto por $Estima_contato_{(a,b)}$, a métrica de roteamento voltará ser envelhecida, conforme a Equação 5.8. É importante salientar que, se a expressão $Qcontato_{(a,b)} \geq Qtde_contato$ for falsa ou se a expressão $\sigma_int_contato_{(a,b)} < \frac{\bar{x}_int_contato_{(a,b)}}{2}$ for falsa, as amostras serão consideradas inapropriadas para a execução do processo de estimativa de contatos e, consequentemente, o índice $Dcontato_idx_{(a,b)}$ será envelhecido normalmente, de acordo com a Equação 5.8.

É possível, então, estabelecer um contexto hipotético com $Dcontato_idx_{(a,b)} = 0,3181$, $TS = 1620$, $Tjanela_ini = 120$, $Tjanela_max = 550$, $Qtde_contato = 3$ e com o registro de quatro contatos entre n_a e n_b que se encontram disponíveis no repositório para

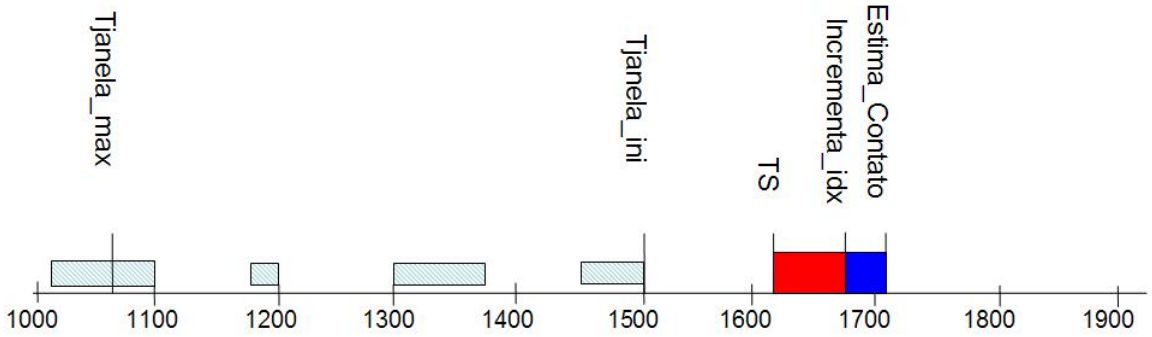

Figura 5.3: Aplicação do processo de estimativa de contato

armazenamento de contatos identificados pelos valores (n_b,1500,1450), (n_b,1375,1300), (n_b,1200,1180) e (n_b,1100,1010) no formato (identificação do vizinho, término do contato, início do contato). Cabe salientar que apenas três contatos encontram-se dentro da janela de tempo limitada por $Tjanela_max$. Como $Qcontato_{(a,b)} = Qtde_contato = 3$, as amostras dos intervalos entre contatos são consideradas válidas, permitindo que as expressões presentes na Equação 5.12 computem a estimativa de contato para n_a e n_b. O referido contexto pode ser observado na Figura 5.3, sendo que a área colorida de azul ilustra o período de tempo em que a métrica de roteamento será decrementada conforme a Equação 5.8, e a área colorida de vermelho ilustra o período de tempo em que a métrica de roteamento será incrementada de acordo com a Equação 5.11.

$$
\begin{array}{lcllcl}
Dcontato_idx_{(a,b)} & = & \frac{(1500-1450)+(1375-1300)+(1200-1180)}{550} & + & & \\
 & & \frac{(1100-(1620-550))}{550} & = & 0,3181 & \\
Qcontato_{(a,b)} & \geq & Qtde_contato & \Longrightarrow & verdadeira & \\
\bar{x}_int_contato_{(a,b)} & = & \frac{(1450-1375)+(1300-1200)+(1180-1100)}{3} & = & 85 & \\
\sigma_int_contato_{(a,b)} & = & 10,8012 & & & \\
\sigma_int_contato_{(a,b)} & < & \frac{\bar{x}_int_contato_{(a,b)}}{2} & \Longrightarrow & verdadeira & \\
Incrementa_idx & = & 1620 + \left(\frac{85}{2}\right) + 10,8012 & = & 1673,3012 & \\
Estima_Contato & = & 1620 + 85 & = & 1705 &
\end{array}
\tag{5.12}
$$

Considerando a tupla mais recente do repositório para armazenamento de contatos, é razoável inferir que $Ult_Atualiza_{(a,b)} = 1500$. Logo, supondo, apenas como exemplo, que o processo de estimativa de contato seja executado a cada dez unidades de tempo (ver incremento no valor de TS na Tabela 5.4), é possível verificar a evolução de $Dcontato_idx_{(a,b)}$ na Tabela 5.4. Cabe destacar que os valores em negrito representam os

índices de roteamento calculados após o restabelecimento do contato entre n_a e n_b, que os valores em itálico indicam o incremento aplicado ao índice $Dcontato_idx_{(a,b)}$ após ter decorrido o período determinado por $Incrementa_idx$, e os valores sem destaque apontam para o decremento programado após a perda de contato.

Tabela 5.4: Evolução de $Dcontato_idx$ durante o processo de estimativa de contato

Próximo Contato entre n_a e n_b	TS									
	1620	1630	1640	1650	1660	1670	1680	1690	1700	1710
1800	0,3181	0,2937	0,2517	0,2013	0,1510	0,1066	*0,1125*	*0,1282*	*0,1567*	0,0895
1705	0,3181	0,2937	0,2517	0,2013	0,1510	0,1066	*0,1125*	*0,1282*	*0,1567*	**0,2727**
1675	0,3181	0,2937	0,2517	0,2013	0,1510	0,1066	**0,2727**	**0,2909**	**0,3090**	**0,3272**
1640	0,3181	0,2937	**0,2818**	**0,2818**	**0,3000**	**0,3181**	**0,3363**	**0,3545**	**0,3727**	**0,3909**

5.2.1.7 Estimativa do Percentual de Ocupação da Capacidade de Armazenamento

O processo de cálculo da estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento segue as definições estabelecidas na Subseção 4.3.3, acessando, para isso, os repositórios para armazenamento de descartes e contatos. Sob a ótica de um determinado nó, identificado por n_a, será estipulado um período de observação resultante da média do intervalo de tempo entre o contato atual e o último contato de cada um de seus vizinhos diretos, que será representado por $Tjanela_a$. Deve-se realçar que as restrições aplicáveis aos valores associados a cada intervalo de tempo entre o contato atual e o último contato encontram-se delineadas na Subseção 4.3.3, assim como a Equação 4.2, responsável pelo cálculo de $Tjanela_a$. É necessário, ainda, salientar que, todo nó n_a executando o protocolo CARTOON mantém uma variável identificada por $Perc_Armazena_a$, que representa o percentual real de ocupação da área de armazenamento e é atualizada a cada operação de inclusão ou exclusão efetuada no repositório para armazenamento de mensagens.

Em função do valor apurado por $Tjanela_a$ serão computados, em octetos, todos os descartes ocorridos do instante de cálculo (TS) até o instante determinado por $TS - Tjanela_a$. O valor computado é armazenado na variável $Descartes_a$, possibilitando o cálculo da variável $Perc_Estima_Ocup_a$ conforme apresenta a Equação 5.13. Descartes anteriores a $TS - Tjanela_a$ são eliminados do repositório para armazenamento de descartes.

$$Perc_Estima_Ocup_a = \left(\frac{Descartes_a \times 100}{TAM_ARMAZENA} \right) + Perc_Armazena_a, \qquad (5.13)$$

onde $TAM_ARMAZENA$ representa a capacidade de armazenamento de n_a em

octetos.

Cabe realçar a diferença entre as variáveis $Perc_Armazena$ e $Perc_Estima_Ocup$: enquanto a primeira variável denota o percentual da capacidade de armazenamento que se encontra ocupado por mensagens, a segunda simboliza o percentual da capacidade de armazenamento que se encontra ocupado por mensagens acrescido do percentual equivalente às mensagens descartadas durante o período estabelecido por $Tjanela$. O valor apurado por $Perc_Estima_Ocup$ é repassado para os vizinhos diretos durante o processo de atualização da tabela de roteamento.

5.2.1.8 Estimativa da Densidade

O processo de cálculo da métrica $Densidade_idx$ ocorre após a atualização da tabela de roteamento. O cálculo da densidade para um nó qualquer, identificado por n_a, envolve a densidade local, calculada a partir da quantidade de vizinhos diretos e vizinhos indiretos com até dois saltos, e a densidade observada por cada um dos vizinhos diretos. Cabe ressaltar que rotas envelhecidas não entram no cálculo. Dessa forma, já que $Qtde_vizinho_densidade_a$ representa a quantidade de registros na tabela de roteamento que atende à restrição $Qtde_de_Saltos \leq 2$ e que $Densidade_viz_a$ representa a média da densidade apurada pelos vizinhos diretos, é possível observar, através das Equações 5.14, 5.15 e 5.16, o processo de cálculo da métrica $Densidade_idx_a$.

$$Densidade_local_a = \frac{Qtde_vizinho_densidade_a}{Densidade_base} \tag{5.14}$$

onde $Densidade_base$ representa o valor base associado a uma rede teórica (18), de forma que a distribuição dos nós contempla totalmente a área de cobertura.

$$Densidade_viz_a = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{v} Densidade_local_i}{v} \right\}, \tag{5.15}$$

onde v representa os vizinhos diretos de n_a.

$$Densidade_idx_a = \left(\frac{densidade_local_a + Densidade_viz_a}{2} \right) \tag{5.16}$$

5.2.1.9 Tempo de Vida e Transferência de Custódia

Com o objetivo de otimizar o uso dos recursos, as mensagens são criadas com o campo $Tempo_de_Vida$ inicializado com o valor do parâmetro τ, possibilitando que, a cada vez que ocorrer a transmissão de uma determinada mensagem, o valor do campo $Tempo_de_Vida$ da referida mensagem seja decrementado de uma unidade até alcançar o valor um. Por conseguinte, uma mensagem com o campo $Tempo_de_Vida$ com valor um não pode ser replicada, ou seja, somente pode ser encaminhada para o nó de destino, ou sofrer uma transferência de custódia (ver Seção 2.1). Cabe destacar que mensagens transmitidas sob custódia têm o valor do campo *Mcustódia* do repositório para armazenamento de mensagens alterado para um.

Considerando um cenário onde n_a, que está em contato com n_b, selecionou para transmissão uma determinada mensagem cujo destino é n_c e cujo $Tempo_de_Vida = 1$, torna-se necessário o atendimento aos preceitos descritos a seguir para que possa haver uma transferência de custódia de n_a para n_b:

- a métrica de roteamento de n_a para n_c deve ser menor que a métrica de n_b para n_c, ou seja, $Dcontato_idx_{(a,c)} < Dcontato_idx_{(b,c)}$;
- a estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento de n_b ($Perc_Estima_Ocup_b$) deve estar abaixo de 100%;
- a transferência de custódia não pode ser utilizada concomitantemente com o modo de disseminação epidêmica.

5.2.2 Modo de Disseminação Epidêmica

Como o uso indiscriminado da disseminação epidêmica de mensagens pode impactar negativamente no desempenho de uma rede, torna-se imprescindível uma análise das particularidades do contexto visando determinar restrições para o emprego desse modo de disseminação. Por conseguinte, a implementação do modo de disseminação epidêmica pelo protocolo CARTOON avalia se o contexto encontra-se adequado para a disseminação epidêmica e, em caso afirmativo, calcula dinamicamente a duração máxima de permanência no modo de disseminação epidêmica e estabelece restrições ao processo de seleção de mensagens para o envio epidêmico. Todos os procedimentos realizados estão representados pelo Diagrama de Fluxo de Dados (DFD) ilustrado na Figura 5.4 e elencados a seguir:

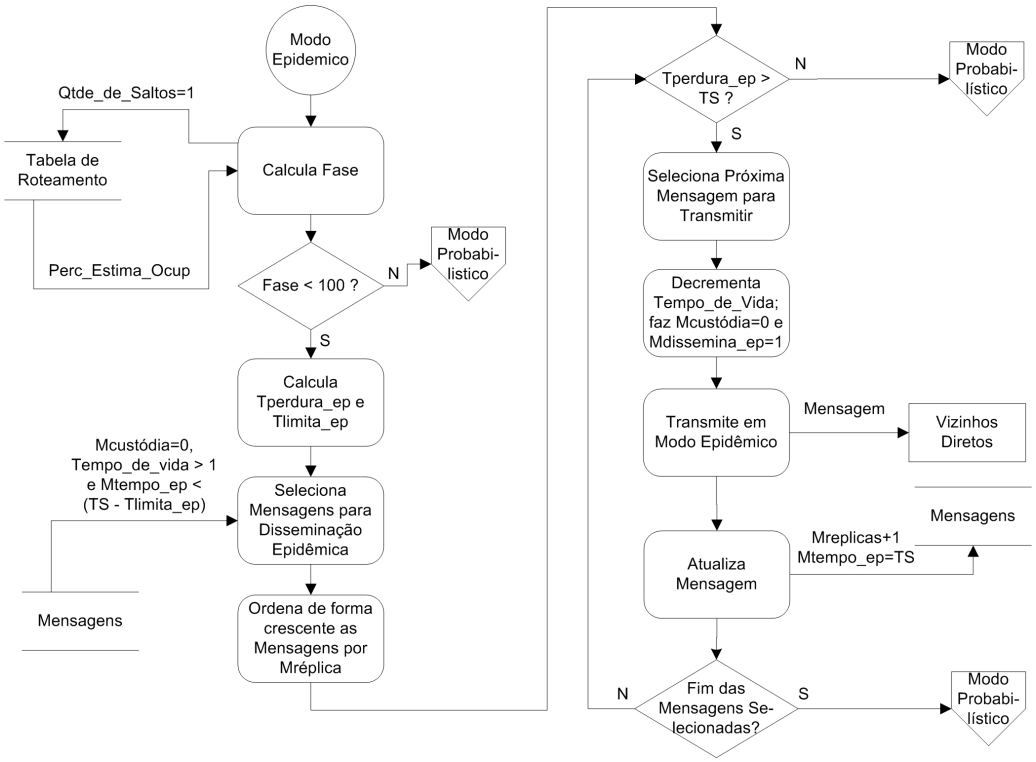

Figura 5.4: DFD do modo de disseminação epidêmica

1. análise global das restrições - verifica se a mediana da estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento dos vizinhos diretos, representada pela variável $fase$, é menor que 100, justificando o envio de forma epidêmica;

2. análise local das restrições - calcula o tempo de permanência máxima no modo de disseminação epidêmica ($Tperdura_ep$) e o limite de tempo para que uma mensagem possa ser retransmitida de forma epidêmica ($Tlimita_ep$);

3. seleção de mensagens - seleciona as mensagens que podem ser disseminadas, ou seja, as mensagens que não tenham sido recepcionadas sob custódia (*Mcustódia=0*), que jamais tenham sido disseminadas de forma epidêmica ou que tenham sido disseminadas há mais de *Tlimita_ ep* unidades de tempo, e que apresentem *Tempo_ de_ Vida* $>$ *1*;

4. envio de mensagens - efetua o envio das mensagens selecionadas através do modo de disseminação epidêmica pelo tempo de permanência máxima calculado;

5. disseminação probabilística - retorna o controle ao modo de disseminação probabilística, após a execução dos procedimentos supracitados.

Cabe lembrar que, cada vez que uma mensagem é transmitida, independente do modo de transmissão, a quantidade de réplicas associadas à mensagem, identificada pelo campo *Mréplicas*, é automaticamente incrementada de uma unidade, a menos que a mensagem seja excluída do repositório para armazenamento de mensagens por ter sido entregue ao destinatário. Já no caso de uma disseminação epidêmica, além do campo *Mréplicas*, o campo *Mtempo_ep* é atualizado com o valor de TS, possibilitando controlar a difusão das mensagens de forma individualizada.

Durante o processo de análise global das restrições, a variável $fase$, utilizada com objetivo de restringir a ação do modo de disseminação epidêmica, é computada pelo componente responsável pela determinação do modo de disseminação em função da mediana dos valores do campo $Perc_Estima_Ocup$ de seus vizinhos diretos, a partir de informações presentes na tabela de roteamento. Cabe evidenciar que o campo $Perc_Estima_Ocup$ representa a estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento e que a fórmula de cálculo do referido campo encontra-se na Subseção 5.2.1.7.

Em cenários tipicamente densos, as oportunidades de contato com diferentes vizinhos diretos, assim como a duração dos contatos, tendem a ser significativamente superiores à de cenários esparsos. Dessa forma, uma mensagem transmitida através do modo de disseminação probabilística pode aproveitar essas inúmeras oportunidades de contato para rapidamente alcançar o destinatário e, ainda que o algoritmo probabilístico perca algumas oportunidades para transmitir a mensagem devido à função utilidade, o fator densidade possivelmente favorecerá, em algum momento, o encaminhamento da mensagem. Já em cenários esparsos, a perda de uma única oportunidade pode representar a diferença entre o sucesso e o fracasso na entrega da mensagem, logo, é razoável assumir que neste contexto a disseminação epidêmica pode favorecer o encaminhamento de mensagens. O contexto torna-se ainda mais favorável à disseminação epidêmica se inexistirem restrições em relação à capacidade de armazenamento dos nós.

Para o processo de análise local das restrições, conforme justificado no Capítulo 4, os atributos densidade (representado pela variável $Densidade_idx$) e percentual de ocupação da capacidade de armazenamento (representado pela variável $Perc_Estima_Ocup$) foram selecionados como dimensões viáveis para o PDC. Os referidos atributos serão utilizados com o intuito de influenciar a duração da disseminação epidêmica, representada pela variável $Tperdura_ep$, e o intervalo de tempo mínimo para que uma mensagem possa ser retransmitida de forma epidêmica, representado por $Tlimita_ep$. As equações a seguir ilustram como o processo de adaptação ao contexto atua sobre as variáveis que

influenciam o modo de disseminação epidêmica, de tal modo que a Equação 5.17 delimita a duração da disseminação epidêmica e a Equação 5.18 estabelece um intervalo de tempo para que uma mensagem disseminada através do modo epidêmico possa ser novamente disseminada de forma epidêmica.

$$Tperdura_ep = TS + (\frac{Tjanela_max}{Densidade_idx}) \times (\frac{100}{fase}) \tag{5.17}$$

$$Tlimita_ep = TS - \min(TS, (\frac{Tjanela_max}{Densidade_idx} \times (1 - \frac{fase}{100}))) \tag{5.18}$$

É razoável salientar que quanto menores forem os valores associados às variáveis $Densidade_idx$ e $fase$, maior será a duração do modo de disseminação epidêmica e menor será a restrição para o reenvio de mensagens. Em outras palavras, contextos esparsos e com espaço disponível na capacidade de armazenamento favorecem o uso frequente do modo de disseminação epidêmica, ao contrário de contextos densos e com plena ocupação da capacidade de armazenamento, corroborando as afirmativas anteriores.

Visto que durante o modo de disseminação epidêmica os nós enviam suas mensagens para todos os vizinhos diretos, sempre haverá a possibilidade de ocorrer um congestionamento na rede, tal qual uma quantidade expressiva de descartes. Em uma DTN essas consequências podem ser temerárias, principalmente em função da escassez de recursos e de contatos. Portanto, com o objetivo de restringir as desvantagens provenientes do modo de disseminação epidêmica, coube ao protocolo CARTOON adotar medidas preventivas. O processo de seleção de mensagens classifica como elegíveis as mensagens que não foram recebidas sob custódia (*Mcustódia*= 0), as que foram disseminadas através do modo epidêmico há mais de *Tlimita_ ep* (ver Equação 5.18) unidades de tempo e as que apresentam *Tempo_ de_ Vida* > *1*. O processo de escalonamento para o modo de disseminação epidêmica ordena as mensagens elegíveis de forma crescente em função de *Mréplicas*, que representa a quantidade de réplicas efetuadas individualmente pelos nós.

Além disso, com o intuito de evitar o descarte das mensagens presentes na área de armazenamento, as mensagens encaminhadas durante a fase epidêmica somente serão armazenadas pelos vizinhos diretos se houver disponibilidade em suas respectivas áreas de armazenamento, ou seja, se a estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento ($Perc_Estima_Ocup$) estiver abaixo de 100% e se a mensagem puder ser armazenada sem a necessidade de descarte ($Perc_Armazena < 100$). Logo, é factível supor um contexto onde n_a tenha cinco vizinhos diretos, identificados por n_{a1}, n_{a2}, n_{a3},

n_{a4} e n_{a5}, e cuja estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento ($Perc_Estima_Ocup$) calculada por cada nó seja de, respectivamente, 95%, 105%, 85%, 15% e 215%. No contexto descrito, as mensagens disseminadas de forma epidêmica para os vizinhos diretos de n_a seriam armazenadas pelos vizinhos diretos n_{a1}, n_{a3} e n_{a4} desde que $((\frac{Tam_Mensagem}{TAM_ARMAZENA} + Perc_Armazena) < 100)$. Já os vizinhos diretos n_{a2} e n_{a5} descartariam as mensagens incondicionalmente.

5.2.3 Modo de Determinação de Disseminação

Os nós executando o protocolo CARTOON iniciam o envio de mensagens através do modo de disseminação probabilística. Quando a fase probabilística termina, o controle retorna ao modo de determinação de disseminação e, sob determinadas circunstâncias, o controle pode ser repassado para o modo de disseminação epidêmica. Caso as circunstâncias sejam favoráveis ao modo de disseminação epidêmica, os nós iniciam a disseminação de mensagens através do modo epidêmico e, ao final da fase epidêmica, o controle retorna para o modo de determinação de disseminação. Esse processo é repetido ciclicamente.

Para a determinação do uso do modo de disseminação epidêmica, cada nó computa, através do campo $Perc_Estima_Ocup$ da tabela de roteamento, a mediana da estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento de seus vizinhos diretos e armazena o valor na variável $fase$. Cabe evidenciar que o cálculo detalhado do campo $Perc_Estima_Ocup$ encontra-se na Subseção 5.2.1.7. Caso $fase < 100$, indicando que a maioria de seus vizinhos diretos tem disponibilidade para armazenar mensagens, o encaminhamento das mensagens dar-se-á de modo epidêmico, respeitando-se as restrições impostas na seleção de mensagens para disseminação. Caso contrário, ou seja, se $fase \geq 100$ o controle do envio de mensagens retorna para o modo de disseminação probabilística. A opção pela mediana em detrimento da média aritmética objetiva evitar distorções, tais qual a que poderia ser provocada por um nó ter sido ligado há poucos instantes e, consequentemente, apresentar a estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento próximo a 0%.

Deve-se, no entanto, ressaltar que, em função de limitações individualizadas, a estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento dos vizinhos diretos de um determinado nó pode variar significativamente. Logo, é factível supor um contexto onde n_a tenha cinco vizinhos diretos, identificados por n_{a1}, n_{a2}, n_{a3}, n_{a4} e n_{a5}, e que a estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento calculada por cada nó seja de, respectivamente, 138%, 105%, 5%, 115% e 131%. No contexto descrito,

n_a não poderia efetuar o encaminhamento das mensagens utilizando o modo de disseminação epidêmica, uma vez que o cálculo da variável $fase$ resultaria em 115. Caso a variável $fase$ fosse calculada com base na média aritmética, o valor seria $98,8$ o que implicaria a disseminação de mensagens de forma epidêmica, embora o contexto não seja favorável.

5.3 Processo de Recebimento de Mensagens

Com o intuito de validar cada mensagem, o modo de recebimento de mensagens executa uma série de procedimentos e, se necessário, disponibiliza recursos para que o processo de armazenamento possa ser efetivado. É importante ressaltar que, o valor do campo $Tempo_de_Vida$ de cada mensagem recebida será decrementado, a menos que o recebimento tenha ocorrido sob custódia. Ademais, cabe destacar que algumas funções específicas são executadas em conformidade com o modo de disseminação da mensagem. Os procedimentos específicos do modo de recebimento de mensagens encontram-se presentes na Figura 5.5 e relacionados a seguir:

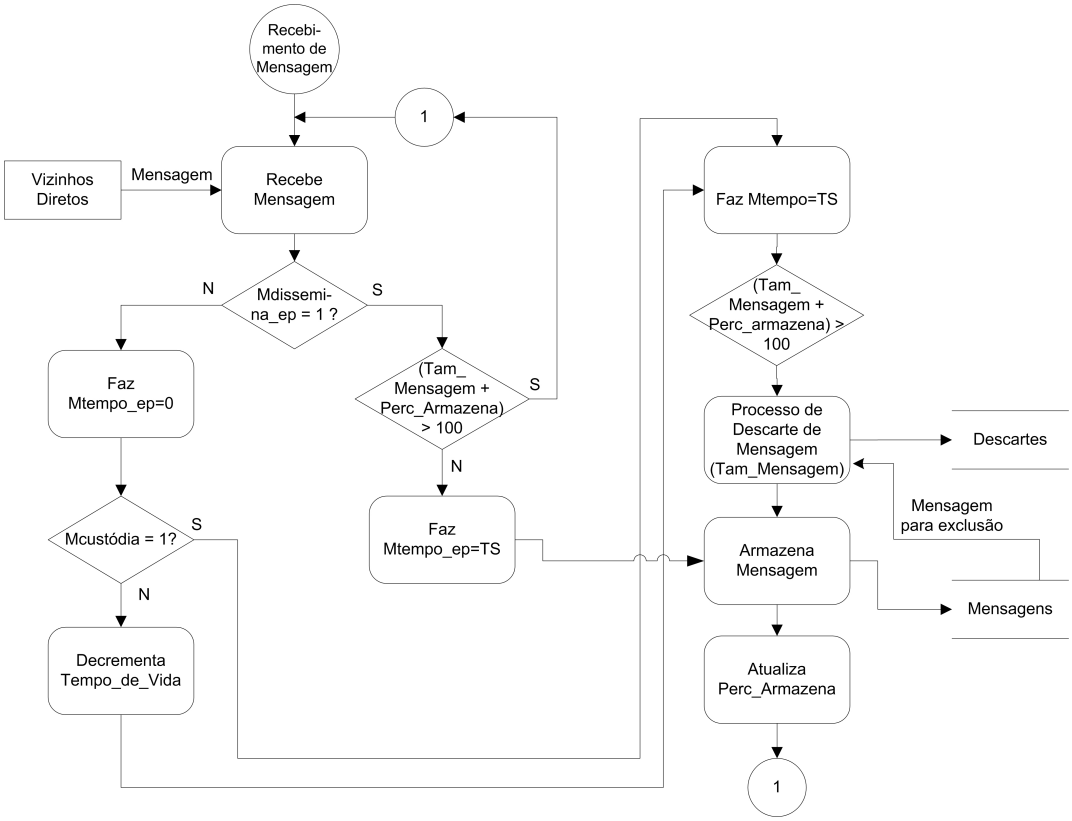

Figura 5.5: DFD do modo de recebimento de mensagens

1. análise das particularidades da mensagem - verifica as particularidades da mensa-

gem, visando classificá-la adequadamente;

2. recebimento por disseminação epidêmica - recebe a mensagem caso haja, obrigatoriamente, espaço na área de armazenamento para que a mensagem possa ser salva sem a necessidade de invocar o processo de descarte de mensagens, caso contrário ignora a mensagem;

3. recebimento por disseminação probabilística - averígua se existe espaço necessário para o armazenamento ou se será inevitável executar o processo de descarte de mensagens;

4. processo de descarte - descarta as mensagens classificadas de acordo com as políticas estabelecidas pelo processo de descarte de mensagens, exclui a quantidade de mensagens necessária para o armazenamento e registra o descarte no repositório para armazenamento de descartes;

5. armazenamento da mensagem - armazena a mensagem recebida, definindo valores apropriados para campos como $Tempo_de_Vida$, $Mtempo$ (registro de tempo de mensagens recebidas através do modo de disseminação probabilística), $Mtempo_ep$ (registro de tempo de mensagens recebidas através do modo de disseminação epidêmica) etc. e atualiza a variável $Perc_Armazena$ de forma a refletir a nova realidade do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento.

A análise do campo $Mdissemina_ep$ da mensagem recebida possibilita identificar a forma de disseminação empregada e, consequentemente, tomar ações apropriadas. No caso de uma disseminação epidêmica, para que uma mensagem possa ser armazenada é necessário que a variável $Perc_Estima_Ocup$ seja menor que 100, indicando a inexistência recente de descartes, e que o armazenamento na mensagem não implique a necessidade de descartar alguma mensagem, atendendo a $((\frac{Tam_Mensagem}{TAM_ARMAZENA} + Perc_Armazena) < 100)$. Caso as restrições não sejam plenamente atendidas, a mensagem não será armazenada. Ademais, no caso de mensagens armazenadas, provenientes de disseminação epidêmica, o campo $Mtempo_ep$ recebe o valor de TS, evitando, dessa forma, que a mensagem possa ser disseminada novamente de forma epidêmica em curto espaço de tempo. Esse controle visa reduzir a carga de transmissões na rede.

No caso do recebimento de uma mensagem de forma probabilística, faz-se necessário verificar se existe disponibilidade para o armazenamento. Caso não exista disponibilidade, o processo de descarte de mensagens descrito na Subseção 5.3.1 será acionado, com o

objetivo de liberar espaço suficiente para o armazenamento da nova mensagem. Após o armazenamento da mensagem, a variável *Perc_Armazena* é atualizada e o processo de recebimento de mensagens permanece aguardando novas mensagens.

5.3.1 Processo de Descarte de Mensagens

Uma característica comum em cenários estocásticos reais e presente em DTNs refere-se à capacidade de armazenamento limitada dos nós, tornando imprescindível a definição de uma política de descarte de mensagens. Como a especificação de qual mensagem deve ser descartada requer a associação das mensagens recebidas ou geradas às características que permitem classificá-las, fez-se necessária a definição dos campos subsequentes, encontrados no repositório para armazenamento de mensagens do protocolo CARTOON:

- *Mdissemina_ ep* - identifica se a mensagem foi recebida através de uma disseminação probabilística (valor 0) ou através de uma disseminação epidêmica (valor 1);
- *Mréplicas* - representa a quantidade de réplicas da mensagem geradas pelo nó;
- *Mtempo* - armazena o instante em que a mensagem foi recebida pelo nó intermediário ou gerada pelo nó de origem.

O descarte de mensagens no protocolo CARTOON ocorre somente se o espaço disponível na área de armazenamento for insuficiente para armazenar uma nova mensagem, seja essa mensagem gerada pelo próprio nó ou recebida de um vizinho direto. Quando essa situação ocorre, entra em ação o mecanismo de seleção de mensagens para descarte que calcula o espaço justo e necessário para o recebimento de novas mensagens e classifica as mensagens existentes de acordo com a seguinte ordem:

- ordem decrescente do parâmetro *Mdissemina_ ep*, de forma que as mensagens recebidas através da disseminação epidêmica são descartadas prioritariamente;
- ordem decrescente do parâmetro *Mréplicas*, de forma que mensagens com maior quantidade de réplicas transmitidas pelo nó sejam descartadas com precedência;
- ordem crescente do parâmetro *Mtempo*, de forma que mensagens mais antigas sejam descartadas e as mais novas sejam mantidas.

5.4 Estruturas de Dados

As principais estruturas de dados utilizadas pelo protocolo CARTOON apresentam-se esmiuçadas nas seguintes subseções: a Subseção 5.4.1 define a estrutura do repositório para o armazenamento de mensagens; a Subseção 5.4.2 relaciona os campos necessários ao processo de roteamento; a Subseção 5.4.3 descreve os campos utilizados para o reconhecimento passivo, e, enfim, a Subseção 5.4.4 apresenta as estruturas dos repositórios essenciais para a adaptação dinâmica ao contexto.

5.4.1 Repositório para Armazenamento de Mensagens

Todas as mensagens recebidas pelo protocolo CARTOON são armazenadas no repositório de mensagens apresentado pela Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Repositório para armazenamento de mensagens

Campo	Descrição
Id_ Destino	Identificação do nó de destino da mensagem
Id_ Origem	Identificação do nó que originou a mensagem
Num_ Sequência	Número de sequência da mensagem gerado pelo nó de origem
Tempo_ de_ Vida	Quantidade máxima de saltos
Mdissemina_ ep	Modo de disseminação da mensagem
Mcustódia	Mensagem recebida sob custódia ou cópia da mensagem
Mréplicas	Quantidade de réplicas da mensagem computada localmente
Mtempo	Registro de tempo do recebimento da mensagem
Mtempo_ ep	Registro de tempo da última transmissão da mensagem em modo epidêmico
Tam_ Mensagem	Tamanho da mensagem
Mensagem	Conteúdo da mensagem

Deve-se destacar que o campo *Mréplicas* é inicializado com o valor zero e incrementado de uma unidade a cada transmissão da mensagem, independente do modo de disseminação, enquanto que o campo *Mtempo* registra o instante em que a mensagem foi recebida. Já o campo *Mtempo_ ep* é inicializado com valor zero e, no caso de uma disseminação epidêmica da mensagem, registra o momento em que a disseminação ocorreu.

5.4.2 Tabela de Roteamento

A tabela de roteamento elaborada para o protocolo CARTOON armazena informações com o objetivo de prover recursos para funções básicas, como a identificação do nó para o qual devem ser encaminhadas as mensagens, assim como informações úteis para os

componentes responsáveis pela adaptação dinâmica ao contexto. Os campos presentes na tabela de roteamento encontram-se relacionados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Tabela de roteamento

Campo	Descrição
Id_Destino	Identificador do nó de destino
Id_Prox_Salto	Identificador do nó para o qual se deve encaminhar mensagens cujo destino seja *Id_Destino* ou zero se *Id_Destino* for um vizinho direto
Qtde_de_Saltos	Quantidade de nós no percurso até *Id_Destino*, considerando *Id_Destino*
Dcontato_idx	Valor da métrica de roteamento
Incremento_idx	Registro de tempo que determina o momento em que *Dcontato_idx* voltará a ser incrementado ou zero se não houver incremento programado
Estima_Contato	Registro de tempo que estima o momento em que ocorrerá um próximo contato com *Id_Destino* ou zero se não houver incremento programado
Perc_Estima_Ocup	Estimativa do Percentual de ocupação da capacidade de armazenamento se vizinho direto (*Id_Prox_Salto*=0) ou zero se vizinho indireto
Densidade_idx	Densidade apurada se vizinho direto ou zero se vizinho indireto
Tjanela_max_idx	Duração do contato mais longo
Ult_Atualiza	Registro de tempo que marca o momento em que ocorreu a última atualização dessa rota

Em relação à adaptação dinâmica ao contexto, todas as dimensões exploradas pelo PDC encontram-se relacionadas na tabela de roteamento. A dimensão densidade, representada pelo campo *Densidade_idx*, influencia, por exemplo, a periodicidade com que uma mensagem pode ser encaminhada através do modo de disseminação epidêmica e a duração do modo de disseminação epidêmica. Já a dimensão percentual de ocupação da capacidade de armazenamento, simbolizada pelo campo *Perc_Estima_Ocup*, determina o limite para recebimento de mensagens disseminadas de forma epidêmica e, por fim, a dimensão periodicidade de contato, retratada pelos campos *Incremento_idx* e *Estima_Contato*, é utilizada para estimar o momento em que um vizinho indireto possivelmente ressurgirá como vizinho direto.

5.4.3 Repositório para Armazenamento de Reconhecimento Passivo

Toda vez que uma mensagem é entregue ao seu destinatário, algumas informações básicas que identificam univocamente a mensagem na rede são armazenadas no repositório de reconhecimento passivo. Essa operação possibilita a propagação da informação de que uma determinada mensagem foi entregue ao seu destinatário, permite que os nós que receberem essa informação eliminem a mensagem correspondente e, consequentemente, que essa informação seja difundida para os demais vizinhos diretos.

Cabe ressaltar que o processo de envio de mensagens do tipo reconhecimento passivo ocorre somente durante o estabelecimento de um contato no modo de disseminação probabilística. O repositório de reconhecimento passivo é formado pelos campos presentes na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Repositório para armazenamento de reconhecimento passivo

Campo	Descrição
Id_Destino	Identificação do nó de destino da mensagem
Id_Origem	Identificação do nó que originou a mensagem
Num_Sequência	Número de sequência da mensagem gerado pelo nó de origem

5.4.4 Repositórios para Adaptação Dinâmica ao Contexto

Para que a dimensão percentual de ocupação da capacidade de armazenamento, descrita na Seção 4.3, e a dimensão periodicidade do contato, detalhada na Seção 4.4, possam ser exploradas com o objetivo de prover uma adaptação dinâmica ao contexto, faz-se necessária a definição de duas estruturas de dados adicionais, identificadas por repositório para armazenamento de descartes e repositório para armazenamento de contatos.

O repositório para armazenamento de descartes é incrementado toda vez que se identifica a necessidade de efetuar o descarte de alguma mensagem, conforme as políticas descritas na Seção 5.3.1. Como forma de otimização, as ocorrências de descarte são mantidas apenas por um tempo limite, estabelecido por $Tjanela_max$, ou seja, enquanto são imprescindíveis para o cálculo da estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento. A Tabela 5.8 ilustra a estrutura de dados que mantém o repositório para armazenamento de descartes.

Já o repositório para armazenamento de contatos mantém o registro de início e término de cada contato ocorrido dentro do intervalo de tempo delimitado por $Tjanela_max$. O

Tabela 5.8: Repositório para armazenamento de descartes

Campo	Descrição
Tam_Mensagem	Tamanho da mensagem
Registro_Descarte	Registro de tempo do instante do descarte

armazenamento dessas informações possibilita a realização do cálculo do intervalo de tempo entre contatos para cada destino presente na tabela de roteamento. Cabe destacar que essas informações são fundamentais para o cálculo da estimativa do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento e da periodicidade de contato, e que a estrutura que descreve o repositório para armazenamento de contatos encontra-se na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Repositório para armazenamento de contatos

Campo	Descrição
Id_vizinho	Identificação do vizinho
Contato_Final	Registro de tempo que marca o momento em que ocorreu a perda de contato
Contato_Inicial	Registro de tempo que marca o momento em que ocorreu o início do contato

5.5 Considerações Finais

Com o objetivo de atender às especificações do PRA, o Capítulo 5 apresenta um protocolo de roteamento adaptativo, intitulado CARTOON (*Context-Aware Routing Protocol for Opportunistic Networks*), que possui a habilidade para adequar-se às particularidades dos contextos que se formam ao longo da existência de DTNs. Os atributos de rede densidade, intervalo entre contatos, duração do contato e percentual de ocupação da capacidade de armazenamento, que são referenciados no texto desta tese de doutorado como dimensões, norteiam o processo de adaptação dinâmica ao contexto, impactando de forma positiva o índice de roteamento e o comportamento geral do protocolo de roteamento proposto. A determinação do modo de disseminação, a duração do modo de disseminação epidêmica, as limitações impostas para a retransmissão de mensagens no modo de disseminação epidêmica, o envelhecimento da tabela de roteamento, o processo de estimativa de contato, a definição do instante de restabelecimento de contato etc. representam alguns exemplos da extensão de atuação do processo de adaptação dinâmica.

Uma das características do protocolo CARTOON, proveniente da competência para adaptação ao contexto, é a habilidade de usufruir das vantagens pertinentes ao uso con-

corrente do modo de disseminação epidêmica e do modo de disseminação probabilística. Essa habilidade faz com que, com o uso da disseminação epidêmica em uma rede sem restrições, a latência seja reduzida e que se aumente significativamente a possibilidade de que ao menos uma cópia da mensagem seja entregue ao destinatário. Contudo, caso se identifique que o contexto apresenta restrições, a disseminação epidêmica não é utilizada, permanecendo o protocolo CARTOON exclusivamente no modo de disseminação probabilística.

Com base no percentual de ocupação da capacidade de armazenamento dos vizinhos diretos, é possível determinar se o modo de disseminação epidêmica será utilizado ou não. Caso o contexto favoreça a disseminação epidêmica, a duração no modo de disseminação epidêmica e as restrições para retransmissões de mensagens de forma epidêmica são especificadas em função de valores provenientes da observação do percentual de ocupação da capacidade de armazenamento dos vizinhos diretos, da densidade apurada e da duração do maior intervalo entre contatos. Cabe destacar que todos esses valores são obtidos dinamicamente.

A duração dos contatos não necessariamente contíguos, ocorridos dentro de uma janela de tempo entre um par de nós, determina a métrica de roteamento utilizada no modo de disseminação probabilística, avaliando, dessa forma, a disponibilidade de cada nó que se caracterize como vizinho direto. A propriedade da transitividade é empregada possibilitando que o conhecimento adquirido por vizinhos diretos possa ser repassado. Porém, os valores são influenciados pela quantidade de saltos no percurso até o destino. Já o processo de estimativa de contato, assim como o envelhecimento da tabela de roteamento, faz uso de informações extraídas dinamicamente do contexto, e de informações que interferem substancialmente no cálculo do instante em que a métrica de roteamento voltará a ser incrementada, no cômputo do incremento da métrica de roteamento, e na estimativa do instante em que o contato deverá ser restabelecido.

É plausível, então, concluir que o protocolo de roteamento CARTOON apresenta um modo de operação inovador, possibilitando que as variações dos atributos de rede densidade, intervalo entre contatos, duração do contato e percentual de ocupação, que atuam de forma determinante para a formação de contextos de DTNs, sejam detectadas, e possibilitando que influenciem positivamente o comportamento de todas as suas ações, favorecendo um desempenho satisfatório para a métrica taxa de mensagens entregues.

Contudo, é imprescindível salientar a indispensabilidade de recursos computacionais para que o protocolo CARTOON possa apresentar um desempenho diferenciado. Essa

assertiva implica que, em uma DTN formada por nós rudimentares, o desempenho do protocolo CARTOON pode não ser adequado em função da execução de diversos procedimentos durante o estabelecimento de um contato. Em outras palavras, um nó com recursos computacionais (capacidade de processamento e de armazenamento) limitados pode consumir um tempo significativo do contato processando informações, o que acarretaria, provavelmente, perdas de oportunidades de transmissão. Nesses casos, protocolos de roteamento elementares, como os protocolos *Epidemic* ou *Spray and Wait*, seriam mais indicados.

Capítulo 6

Avaliação da Proposta

Um dos principais objetivos desta tese de doutorado é comprovar que a adoção de um mecanismo eficiente para detecção de contexto (PDC), associado a um protocolo de roteamento com capacidade de adaptação dinâmica (PRA), deve dispor da competência necessária para apresentar um desempenho que seja afetado de forma limitada pelas características particulares de contextos formados ao longo de cenários típicos de DTN. Visando atender às referidas expectativas, esta tese de doutorado apresenta a proposta e uma avaliação minuciosa do protocolo de roteamento CARTOON.

Para que o processo de avaliação possa ser considerado justo, deve haver, em primeira instância, cenários diversificados que sejam caracterizados por apresentar contatos dos tipos previsível e oportunista, e que sejam ambos preferencialmente extraídos de experimentos reais. Em segunda instância, independente da formação natural de contextos, é essencial para as avaliações que sejam realizadas alterações na capacidade de armazenamento dos nós e na densidade da rede, possibilitando uma análise ampla e irrestrita do desempenho de diversas métricas. Em terceira e última instância, o desempenho do protocolo CARTOON e dos demais protocolos utilizados no processo de avaliação deve ser expresso em função da normalização do desempenho apurado pelo oráculo do pleno conhecimento [36]. Através desse modelo de avaliação, será possível mensurar a diferença do desempenho de todos os protocolos analisados em relação a valores ótimos obtidos para cada cenário, evitando, consequentemente, análises inapropriadas provenientes de comparações com protocolos ineficientes. Cabe, ainda, ressaltar que o objetivo principal do Capítulo 6 é analisar o quanto o desempenho do protocolo CARTOON encontra-se próximo do oráculo do pleno conhecimento e mensurar as oscilações provenientes das alterações de características dos cenários.

Este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma: a Seção 6.1 apresenta, em detalhes, características dos cenários e dos seus respectivos arquivos de movimento utilizados na composição do processo de avaliação; a Seção 6.2 descreve o ambiente em que foram produzidos os resultados; a Seção 6.3 contém a análise dos resultados; e, por fim, a Seção 6.4 apresenta as considerações finais.

6.1 Características dos Cenários

A maioria das publicações que avaliam protocolos de roteamento para DTNs categoriza os cenários em função do tipo de contato, fazendo referência principalmente aos cenários cujos contatos sejam do tipo previsível ou oportunista. No entanto, independente do tipo de contato, existem diversas características próprias que tornam os cenários únicos, tais como: quantidade de nós, padrão de movimentação, tipo de contato etc.

Com base nessa perspectiva, é razoável que as características dos cenários utilizados no processo de avaliação do protocolo de roteamento CARTOON sejam esmiuçadas, auxiliando o processo de análise. Por conseguinte, a Tabela 6.1 apresenta, de forma sumarizada, informações a respeito dos cenários Dartmouth College, UMass DieselNet, Infocom 2006 iMotes, Helsinki WDM e Princeton ZebraNet. Deve-se salientar que os cenários selecionados serão referenciados nesta tese de doutorado de forma abreviada, como consta na coluna Cenário da Tabela 6.1, e que a coluna Capacidade de Armazenamento indica, em termos percentuais, a capacidade de armazenamento dos nós em relação à quantidade de mensagens.

Tabela 6.1: Características sumarizadas dos cenários

Cenário	Características dos cenários			Características dos contextos		
	Quantidade de Nós	Duração	Dimensão Aproximada (Km^2)	Raio de Alcance (m)	Quantidade de Mensagens	Capacidade de Armazenamento
Dartmouth	50 e 100	8 horas	809,30	100	1.000	10%, 25%, 50% e 100%
DieselNet	16 e 33	14 dias	241,40	100		
iMotes	50 e 98	4 dias	6,68	30 e 100		
WDM	75 e 150	6 horas	15.300,00	150 e 250		
ZebraNet	30 e 40	45 minutos	97,124	150 e 250		

A Tabela 6.2 apresenta outras características dos cenários, como densidade, percentual de conectividade, e média de conexões por nó por hora. A densidade geográfica foi calculada dividindo-se a área de cobertura total (quantidade de nós multiplicada pela área do raio de alcance) pela área do cenário. Já o percentual de conectividade indica o percentual de conexões diretas estabelecidas entre os nós, logo quanto maior esse valor,

maior a possibilidade de entrega de mensagens. A média de conexões por hora por nó permite a observação da média de quantidade de conexões estabelecidas por cada nó durante o período de uma hora. Por fim, a duração média das conexões por nó por hora exprime a média do tempo, expressa em segundos, que cada nó esteve conectado dentro do período de uma hora com seus vizinhos diretos.

Tabela 6.2: Características específicas dos cenários

Cenário	Características específicas dos contextos					
	Quantidade de Nós	Raio de Alcance (m)	Densidade Geográfica	Percentual de Conectividade	Média de Conexões por nó por hora	Duração Média das Conexões por nó por hora
Dartmouth	50	100	0,19%	13,06%	0,84	10.087,38
	100	100	0,38%	12,99%	0,42	18.611,56
DieselNet	16	100	0,20%	80,83%	0,12	1,58
	33	100	0,42%	61,74%	0,16	2,19
iMotes	50	30 e 100	10,63%	77,79%	3,87	1.925,87
	98	30 e 100	12,78%	86,95%	9,12	2.728,38
WDM	75	150	0,03%	94,01%	42,93	3.630,71
	75	250	0,09%	97,44%	63,73	8.792,66
	150	150	0,07%	94,21%	172,62	7.495,62
	150	250	0,19%	97,46%	252,94	17.849,83
ZebraNet	30	150	2,19%	23,90%	18,30	6.605,47
	30	250	6,05%	37,70%	28,40	15.987,24
	40	150	2,92%	21,79%	19,76	8.444,93
	40	250	8,07%	34,87%	29,30	20.528,50

O cenário Dartmouth, em função das limitações impostas, expressa, intencionalmente, o menor percentual de conectividade, apresentando-se como o cenário mais restrito entre os selecionados. O cenário DieselNet exibe uma baixa densidade em função do cenário ter sido desenhado em uma área parcial de uma cidade porém, como o estabelecimento de comunicação foi limitado aos ônibus com percursos coincidentes, o percentual de conectividade observado foi significativamente superior ao computado para o cenário Dartmouth. O cenário iMotes apresenta a maior densidade entre os cenários avaliados e um alto percentual de conectividade em função dos dispositivos móveis deslocarem-se dentro de uma área limitada, e por haver pontos de interesse comum.

Embora o cenário WDM apresente a maior dimensão, o que resulta na menor densidade entre os cenários avaliados, o percentual de conectividade encontra-se próximo à 100% devido aos nós percorrerem somente algumas áreas específicas do cenário, como ruas, avenidas e praças. O padrão de movimentação dos nós também é responsável por incrementar, substancialmente, a média de conexões por nó por hora, pois os veículos motorizados, que representam 50% da população dos nós, possuem uma velocidade de deslocamento superior à velocidade dos pedestres, o que implica o estabelecimento e encerramento de diversas conexões. O percentual reduzido de conectividade do cenário Ze-

braNet é decorrente da formação de regiões desconexas, o que torna este cenário um dos mais restritos. A identificação de características contrastantes nos cenários é fundamental para o processo de avaliação, pois possibilita a análise do desempenho de diversas métricas sob circunstâncias distintas e, ainda, permite que as possíveis variações decorrentes das particularidades dos cenários sejam mensuradas.

O Apêndice A contém uma avaliação detalhada das características dos cenários utilizados na avaliação do protocolo de roteamento CARTOON.

6.2 Ambiente de Simulação

Em relação à intenção de avaliar a proposta do protocolo de roteamento CARTOON em cenários com características contrastantes, verificou-se a necessidade de utilização de um simulador de redes de computadores projetado especificamente para DTNs. Devido a os principais simuladores não atenderem plenamente aos requisitos de avaliação, optou-se por estender o simulador[1] utilizado em [65, 63, 64]. Como o referido simulador não é orientado a eventos, foi estabelecido um TIC (*Time Interval Count*) de 50 milissegundos que determina o avanço do simulador. Ademais, cabe destacar que o simulador ONE foi escolhido para validar o desempenho do simulador utilizado nesta tese de doutorado em função dos referidos simuladores não implementarem a camada de enlace, limitando suas ações às funções pertinentes à camada de rede.

Para atender aos requisitos desta proposta de tese, foram selecionados e implementados os seguintes protocolos: o protocolo *Epidemic*, que representa a classe de protocolos com disseminação epidêmica, foi implementado conforme [85]; o protocolo PROPHET, que simboliza a classe de protocolos com disseminação probabilística, foi implementado de acordo com [48]; os protocolos NECTAR (apresentado na Seção sec:30TrabRelacionados) e CARTOON, que representam a classe de protocolos adaptativos, foram implementados conforme [63, 64] e conforme o Capítulo 5, respectivamente; além do oráculo do pleno conhecimento [36]. Outra vantagem fundamental pertinente à utilização do referido simulador diz respeito à possibilidade de implementar, a qualquer momento, novas funcionalidades e relatórios que se façam necessários à perfeita compreensão dos resultados.

Cabe ressaltar que entre os principais objetivos desta tese de doutorado encontram-se: verificar o quanto o desempenho do protocolo de roteamento CARTOON aproxima-se do

[1] O simulador utilizado nesta tese e nos referidos artigos foi desenvolvido pelo autor desta tese e, embora ainda seja de uso restrito, existe a intenção de, em um trabalho futuro independente desta tese, torná-lo público.

desempenho do oráculo do pleno conhecimento, mensurar as oscilações provenientes das mudanças de cenários e, ainda, comprovar as vantagens pertinentes à adoção de mecanismos que possibilitem a adaptação dinâmica a contextos. Logo, a análise do desempenho do protocolo CARTOON em comparação ao desempenho dos demais protocolos para DTNs, estejam eles entre os protocolos selecionados ou não, será aplicada em circunstâncias específicas com o único objetivo de evidenciar algum comportamento do protocolo CARTOON. A metodologia de avaliação adotada, normalizando-se o desempenho de todos os protocolos implementados perante os resultados apurados pelo oráculo do pleno conhecimento, impede que haja conclusões incoerentes, como as que podem ser obtidas através da comparação com um protocolo cujo desempenho tenha sido comprometido por características intrínsecas a um determinado cenário.

Em função da relevância e da influência do desempenho do oráculo do pleno conhecimento nos resultados apresentados, torna-se imprescindível a compreensão do modo de operação do referido oráculo. A implementação do oráculo do pleno conhecimento foi baseada em [36] e possibilita a todos os nós uma visão virtual da topologia atual e futura da rede, permitindo que as mensagens encaminhadas para os respectivos destinatários sejam entregues norteadas pelo menor atraso possível. Logo, o oráculo do pleno conhecimento conhece a demanda atual e futura da rede, assim como quando as mensagens serão geradas pelos nós de origem, além de outras informações. Com o objetivo de tornar o valor ótimo, o oráculo do pleno conhecimento também faz uso do conhecimento da disponibilidade da capacidade de armazenamento dos nós da rede para decidir se uma determinada mensagem deve ser encaminhada ou não, evitando, dessa forma, a ocorrência de descartes e retransmissões.

Para a implementação do oráculo do pleno conhecimento foram necessárias duas fases. Na primeira fase, as mensagens são disseminadas de forma epidêmica, porém sem que as limitações provenientes da duração do contato e da capacidade de armazenamento sejam consideradas. Quando uma cópia de uma mensagem alcança o seu respectivo destino, o caminho percorrido é armazenado, assim como o registro de tempo que marca cada encaminhamento. Como a implementação do oráculo do pleno conhecimento foi norteada pelo menor atraso, somente as informações pertinentes às cópias das mensagens com menor atraso recebidas pelos destinatários são consideradas. Na segunda fase, a simulação considera somente as cópias das mensagens com menor atraso, com o objetivo de validar a existência de restrições em função da capacidade de armazenamento ou da duração do contato. Caso sejam identificadas restrições, o processo retorna à primeira fase, porém sem as cópias das mensagens que não puderam ser transmitidas.

Para cada cenário apresentado na Tabela 6.2 foram gerados cinco arquivos de tráfego distintos com 1.000 mensagens cada um. Já o tamanho da mensagem foi fixado em 10 Kbytes, e os endereços de origem e destino foram escolhidos de forma aleatória. A partir dos arquivos de movimento dos cenários descritos, foram realizadas, para todos os protocolos selecionados (CARTOON, *Epidemic*, NECTAR, PROPHET e oráculo do pleno conhecimento), simulações com os cinco arquivos de tráfego. Esse método de avaliação possibilita que o cálculo de todos os valores exibidos na Seção 6.3, independente da métrica analisada, seja o resultado da média dos cinco arquivos de tráfego, além de permitir o cômputo do intervalo de confiança, cujo nível de confiança foi estipulado em 95%.

A Tabela 6.3 expõe, por cenário, a média do intervalo de tempo, em segundos, requerida para que as mensagens dos arquivos de tráfego seja geradas. É possível, dessa forma, identificar que a variação expressiva na duração das simulações nos cenários selecionados reflete, diretamente, no intervalo de tempo utilizado para geração das mensagens.

Tabela 6.3: Intervalo de tempo médio entre mensagens

Cenário	Dartmouth		DieselNet		iMotes		WDM		ZebraNet	
	50 Nós	100 Nós	16 Nós	33 Nós	50 Nós	98 Nós	75 Nós	150 Nós	30 Nós	40 Nós
Intervalo médio entre mensagens (s)	8,26	8,25	596,11	596,11	8,26	8,25	2,15	2,16	1,20	1,20

Com o objetivo de tornar os cenários ainda mais restritos, a capacidade de armazenamento dos nós foi limitada. Para cada conjunto cenário (Dartmouth, DieselNet, iMotes, WDM e ZebraNet), protocolo (CARTOON, *Epidemic*, NECTAR, PROPHET) e arquivo de tráfego (01, 02, 03, 04 e 05) foram executadas quatro simulações, com a capacidade de armazenamento dos nós limitada a 10%, 25%, 50% e 100% do arquivo de tráfego. Consequentemente, o ambiente de simulação definido possibilitou que cada protocolo fosse avaliado em 280 cenários distintos, conforme discriminado na Tabela 6.4. Por fim, a velocidade de comunicação foi mantida em 1 Mbps.

Tabela 6.4: Quantificação dos cenários

Cenário	Quantidade de Nós	Raio de Alcance (m)	Capacidade de Armazenamento	Arquivos de Tráfego	Quantidade de Cenários
Dartmouth	50 e 100	100	10%,		40
DieselNet	16 e 33	100	25%,	5	40
iMotes	50 e 98	30 e 100	50%	arquivos	80
WDM	75 e 150	150 e 250	e		80
ZebraNet	30 e 40	150 e 250	100%		80
Total de Cenários					280

A Tabela 6.5 exibe os valores dos parâmetros dos protocolos selecionados para o

processo de avaliação.

Tabela 6.5: Configuração dos protocolos selecionados para avaliação

Protocolo	Parâmetro	Valor
Epidemic	Anti-entropy timeout	500 ms
PROPHET	P_encounter_max	0,7
	P_encounter_first	0,5
	α	0,5
	β	0,9
	δ	0,1
	γ	0,999
NECTAR-ref	EP_DYN_MIN	1
	EP_DYN_MAX	4
	γ	0.90
	ω	5
	σ	0.05
CARTOON	Densidade_base	18
	Qtde_contato	3
	RecPassivo	5%
	τ	16
	Tjanela_ini_base	655,5 s
	Tjanela_max_base	2.221,0 s

6.3 Avaliação dos Resultados

A metodologia estabelecida para avaliar o comportamento do protocolo CARTOON atua sob três dimensões distintas. A primeira dimensão visa mensurar o desempenho do protocolo CARTOON perante o oráculo do pleno conhecimento em função de métricas como mensagens entregues, *overhead* de mensagens, descartes e atraso médio. Com o intuito de simplificar o texto, a métrica *overhead* de mensagens será referenciada apenas por *overhead* e a fórmula de cálculo encontra-se ilustrada pela Equação 6.1. A metodologia instituída para a segunda dimensão objetiva analisar as oscilações no desempenho do protocolo CARTOON frente às mudanças de características dos cenários. Já a terceira dimensão tenciona demonstrar o ganho no desempenho que se obtém face à adoção de procedimentos que sejam capazes de efetuar a adaptação dinâmica às características dos contextos.

$$overhead = \frac{(mensagens\ transmitidas \quad - \quad mensagens\ entregues)}{mensagens\ entregues} \tag{6.1}$$

A Seção 6.3 encontra-se organizada da seguinte forma: a Subseção 6.3.1 analisa o desempenho do protocolo CARTOON em função do oráculo do pleno conhecimento; a Subseção 6.3.2 avalia as variações do desempenho do protocolo CARTOON; e, por fim, a

Subseção 6.3.3 elucida as vantagens e as desvantagens pertinentes ao uso dos mecanismos de adaptação do protocolo CARTOON.

6.3.1 1ª Dimensão: Avaliação do Desempenho

A normalização dos resultados em função do desempenho do oráculo do pleno conhecimento possibilita uma análise precisa do comportamento dos protocolos, porém oculta características importantes, inerentes ao desempenho, nos cenários avaliados. Como a maioria dos resultados apresentados nesta subseção serão normalizados, torna-se fundamental expor as restrições impostas por atributos como densidade, grau de conectividade, raio de alcance, conexões por segundo etc. nos cenários selecionados para avaliação.

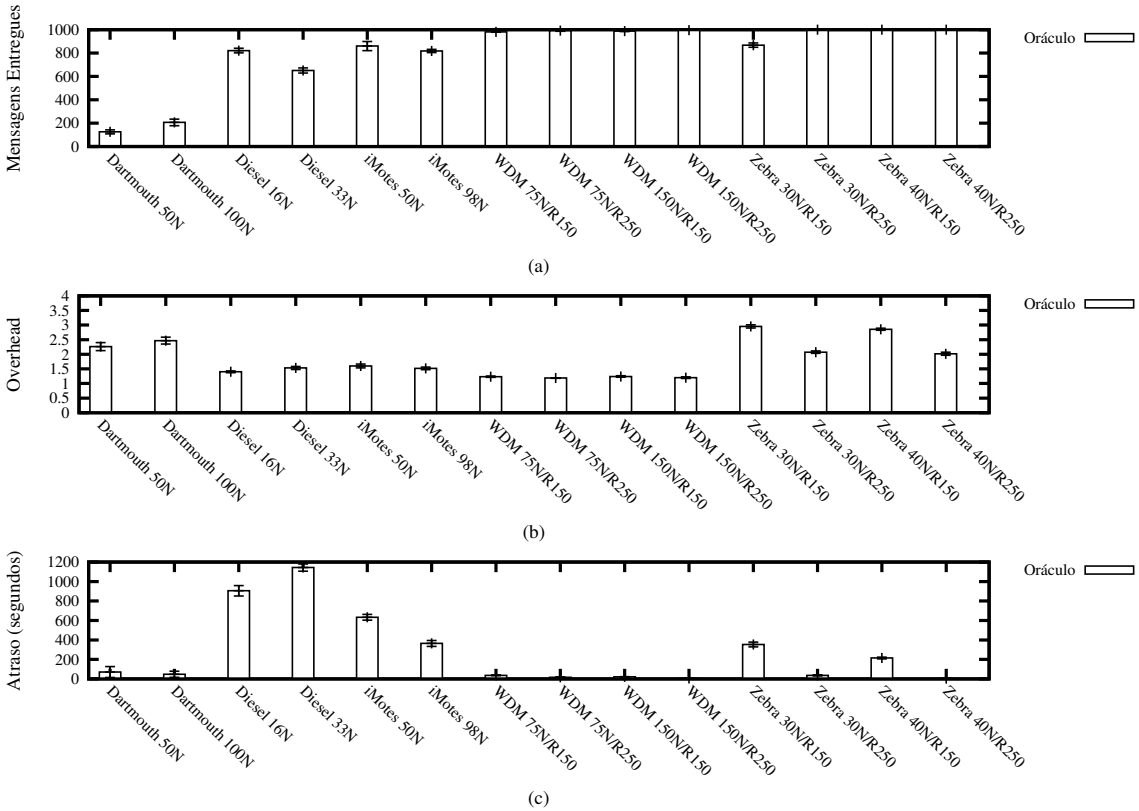

Figura 6.1: Mensagens entregues, *overhead* e atraso do oráculo do pleno conhecimento

O desempenho do oráculo do pleno conhecimento em relação à quantidade de mensagens entregues, apresentado na Figura 6.1(a), ratifica a diversidade de características e restrições dos cenários selecionados, comprovando a existência dos requisitos essenciais para que o processo de avaliação do protocolo CARTOON seja considerado adequado. Essa constatação baseia-se no comparação do desempenho do oráculo do pleno conhecimento, pois, dependendo do cenário, a taxa de mensagens entregues variou de 12,5% à 100,0%.

A Figura 6.1(b) ilustra o desempenho do oráculo do pleno conhecimento em relação à métrica *overhead*, comprovando que o conhecimento da topologia da rede favorece o envio de mensagens com custo reduzido. Essa observação é fundamentada pela média dos valores apurados para a métrica *overhead* ser de apenas 1,82 saltos. Ou seja, a maioria das mensagens entregues pelo oráculo do pleno conhecimento alcança o destinatário com menos de duas transmissões. Já a Figura 6.1(c) exibe o atraso médio, em segundos, do oráculo do pleno conhecimento, comprovando que, mesmo para o oráculo do pleno conhecimento, a densidade da rede influencia de forma significativa no cálculo do atraso médio. Apenas como exemplo, o atraso médio do oráculo do pleno conhecimento no cenário Dartmouth com 50 nós foi de 70,6 segundos e, no mesmo cenário porém com 100 nós, o atraso médio foi de 47,5 segundos.

Em DTNs, a formação de regiões desconexas e a ocorrência de descartes constituem dois dos principais fatores que podem resultar na incapacidade de entrega de mensagens ao destinatário. No caso das simulações realizadas nesta tese de doutorado com o oráculo do pleno conhecimento, é possível afirmar que a formação de regiões desconexas foi responsável pela impossibilidade de alcançar o destinatário para todas as mensagens não entregues em função da inexistência de descartes. Consequentemente, o gráfico de descartes foi suprimido da Figura 6.1. Posto isso, o desempenho do protocolo CARTOON será avaliado segundo as métricas mensagens entregues, atraso médio, descartes e *overhead*.

A representação da capacidade de armazenamento nas figuras e no texto foi simplificada com o propósito de facilitar o entendimento. Logo, os cenários com capacidade de armazenamento limitada a 10%, 25%, 50% e 100% do total de mensagens encontram-se simbolizados por B10%, B25%, B50% e B100%, respectivamente. As Figuras 6.2 e 6.3 ilustram o desempenho do protocolo CARTOON e dos demais protocolos selecionados em função da métrica mensagens entregues por cenário, para todas as capacidades de armazenamento. Cabe ressaltar que todos os resultados foram normalizados em função do desempenho obtido pelo oráculo do pleno conhecimento, com exceção das métricas descartes e atraso.

O protocolo CARTOON demonstrou um desempenho próximo do ótimo em relação à métrica mensagens entregues. Considerando-se todos os cenários avaliados, o protocolo CARTOON transmitiu para o destinatário, em média, 95,04% das mensagens possíveis de serem entregues, alcançando uma taxa de 99,54% no cenário iMotes com 98 nós. O único cenário em que o desempenho do protocolo CARTOON destoou foi o cenário ZebraNet com 30 nós e raio de alcance de 150 metros, cujo desempenho médio, ponderando-se todas

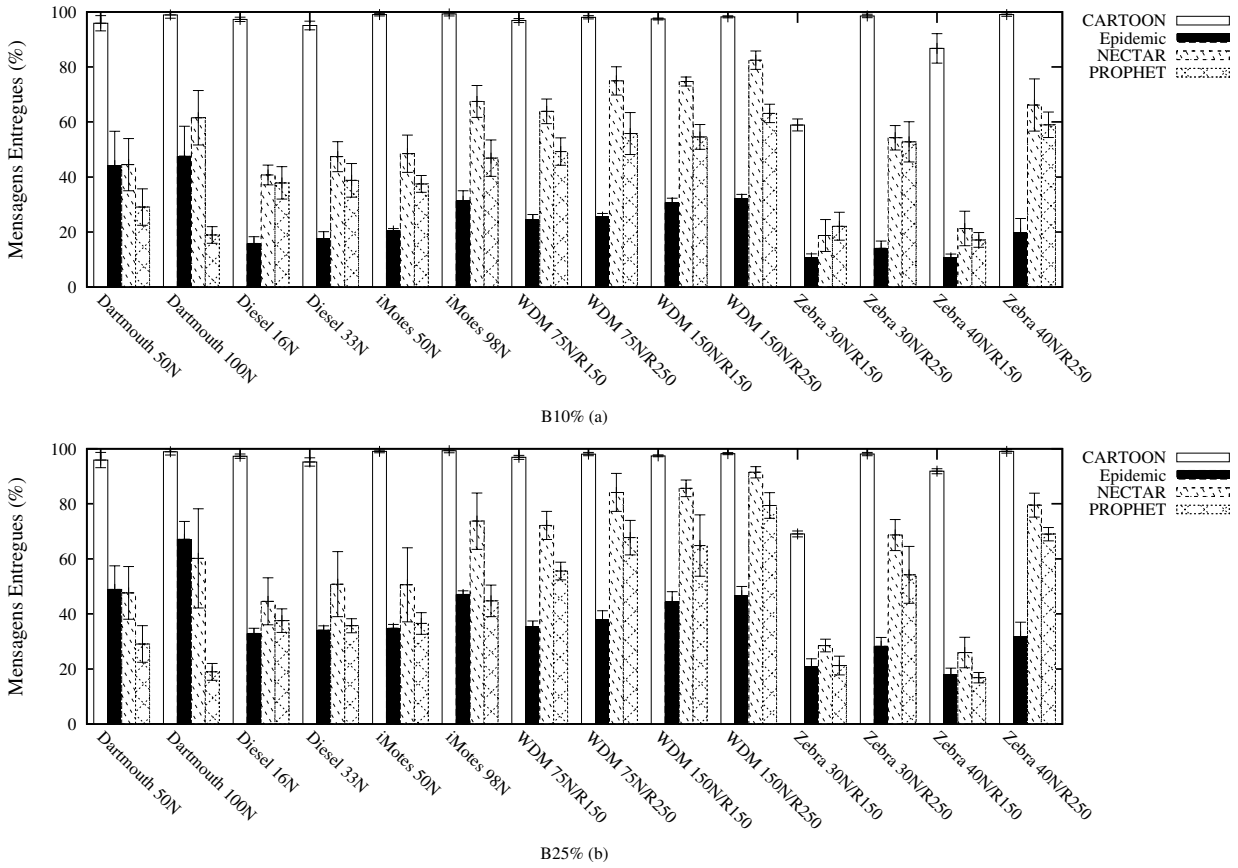

Figura 6.2: Mensagens entregues - Capacidade de armazenamento B10% e B25%

as capacidades de armazenamento de mensagens (10%, 25%, 50% e 100%), foi de 66,61%.

Com o intuito de identificar as características responsáveis pelo desempenho diferenciado, serão apresentados, a seguir, comentários específicos sobre o comportamento do protocolo CARTOON no cenário ZebraNet com 30 nós e raio de alcance de 150 metros, assim como particularidades do cenário. Como o desempenho sofreu alterações mínimas em função da variação da capacidade de armazenamento, é razoável concluir que o mecanismo de escalonamento de mensagens não interferiu no desempenho e, consequentemente, é plausível fixar os comentários acerca de um cenário específico, que, neste caso, será o cenário B10%. A duração do cenário ZebraNet de apenas 45 minutos implicou um tráfego cujas características podem ser consideradas como as características de um tráfego em rajada, comparando-se com a média do intervalo de tempo para geração de mensagens dos demais cenários (ver Tabela 6.3). Além disso, a quantidade reduzida de nós, associada ao padrão de movimentação em grupos, implicou a formação de regiões desconexas. É possível ter uma noção da limitação de conectividade observando-se e comparando-se a quantidade média de entradas na tabela de roteamento dos nós no cenário em estudo e alterando-se o raio de alcance de 150 para 250 metros. No cenário em questão, o proto-

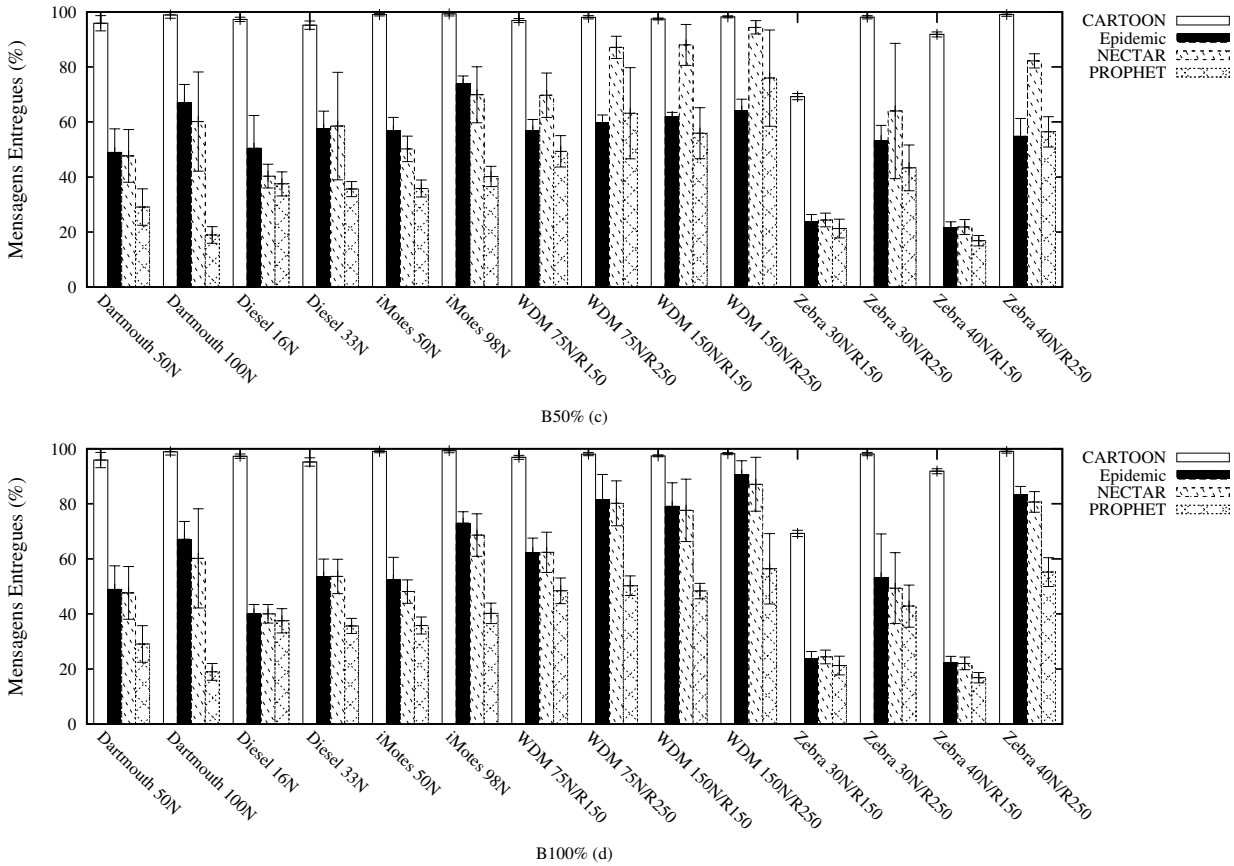

Figura 6.3: Mensagens entregues - Capacidade de armazenamento B50% e B100%

colo CARTOON entregou, em média, 511,2 mensagens aos destinatários e as tabelas de roteamento dos nós apresentaram, em média, 17,5 entradas. Já no cenário com raio de alcance modificado para 250 metros, porém com as mesmas características, o protocolo CARTOON entregou 985,4 mensagens e as tabelas de roteamento dos nós continham, em média, 27,66 entradas. É coerente, então, concluir que a capacidade de antever o posicionamento dos nós foi determinante para o oráculo do pleno conhecimento entregar, em média, 867,60 mensagens no cenário ZebraNet com 30 nós e raio de alcance limitado a 150 metros.

Outra constatação das restrições do cenário ZebraNet em estudo pode ser comprovada pelas tentativas de envio de mensagens sob custódia do protocolo CARTOON. No modo de operação do protocolo CARTOON, as cópias das mensagens podem ser encaminhadas para os vizinhos que se encontrem em contato, com objetivo de alcançar o destinatário até o limite de τ tentativas. Após o limite de τ encaminhamentos, a cópia da mensagem somente poderá ser encaminhada sob custódia, conforme descrito na Subseção 5.2.1.9. A análise da Figura 6.4 permite, claramente, identificar as tentativas nos cenários ZebraNet com raio de alcance de 150 metros (30 e 40 nós), e no cenário iMotes com 98 nós. As

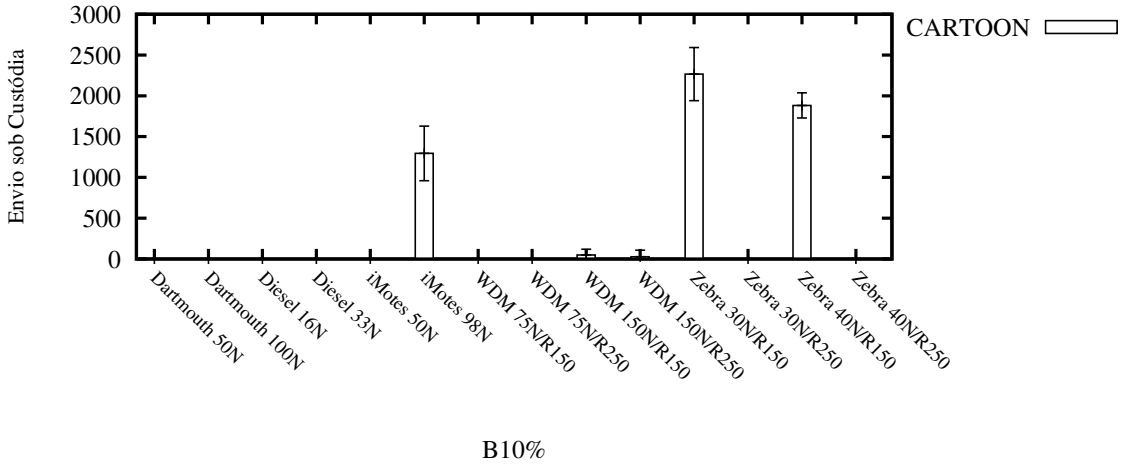

Figura 6.4: Transmissões sob custódia do protocolo CARTOON nos cenários Dartmouth, DieselNet, iMotes, WDM e ZebraNet

restrições inerentes ao cenário ZebraNet com raio de alcance igual a 150 metros justificam o envio de mensagens sob custódia superior aos demais cenários. No entanto, a quantidade de mensagens enviadas sob custódia no cenário iMotes com 98 nós deve-se à quantidade expressiva de conexões estabelecidas (80.895 - ver Apêndice A), implicando também um *overhead* destacado, conforme pode ser observado na Figura 6.7.

Cabe ainda destacar que o envio de mensagens sob custódia foi implementado com o intuito de evitar a disseminação contínua de mensagens, o que poderia congestionar a rede e impactar o encaminhamento de outras mensagens, principalmente em cenários com grandes restrições. A redução experimental em 50% do valor do parâmetro τ no cenário ZebraNet analisado implicou um aumento de cerca de 2% da quantidade de mensagens entregues e um aumento de mais de 400% na quantidade de transmissões sob custódia. Ademais, a redução, também experimental, do parâmetro que influencia o componente estimativa de contato do protocolo CARTOON ($Qtde_contato = 2$) provocou um aumento de, aproximadamente, 2% na quantidade de mensagens entregues. Na realidade, como o cenário ZebraNet caracteriza-se por apresentar contatos do tipo oportunista, a interferência do componente responsável pela estimativa de contato é limitada.

Embora a avaliação dos demais protocolos não faça parte dos objetivos desta tese de doutorado, cabe destacar o desempenho do protocolo NECTAR em relação à quantidade de mensagens entregues. O fato do protocolo NECTAR implementar as formas de disseminação probabilística e epidêmica, ainda que através de um mecanismo de adaptação estático, favoreceu a entrega de mensagens, alcançando o segundo melhor desempenho com 59,02%. A Figura 6.5 exibe a média do percentual de mensagens entregues por

protocolo, considerando-se todos os cenários avaliados.

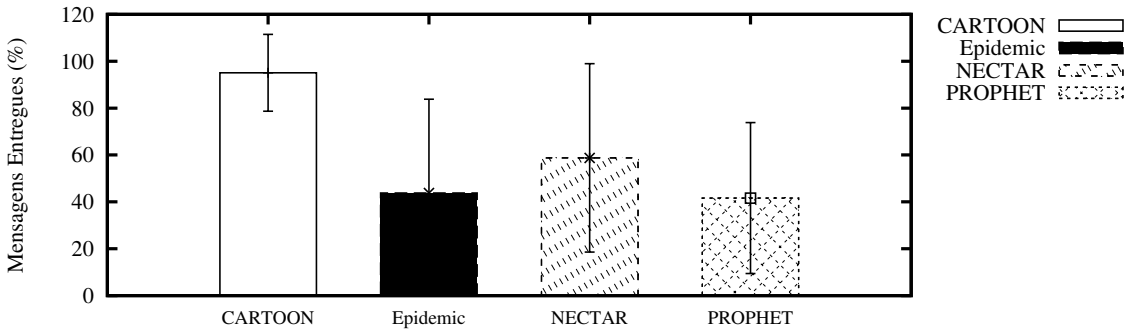

Figura 6.5: Média global do percentual de mensagens entregues por protocolo

A métrica *overhead* foi calculada conforme a Equação 6.1 e normalizada em função dos valores calculados para o oráculo do pleno conhecimento. A Figura 6.6 ilustra os valores computados para todos os protocolos, no entanto, como a quantidade de mensagens transmitidas pelo protocolo CARTOON foi significativamente inferior à quantidade de mensagens transmitidas pelos demais protocolos, foi necessário representar o comportamento do protocolo CARTOON em uma escala diferenciada através da Figura 6.7.

Os protocolos *Epidemic*, NECTAR e PROPHET apresentam, individualmente, um desempenho esperado. Em função da forma de disseminação totalmente epidêmica, o protocolo *Epidemic* apresenta a maior taxa de *overhead*. Já o protocolo NECTAR apresenta a segunda maior taxa de *overhead*, devido a alternância estática das formas de disseminação epidêmica e probabilística. O protocolo PROPHET, por encaminhar suas mensagens somente de forma probabilística, apresenta a menor taxa entre os três protocolos. A análise global também está coerente, pois à medida que a capacidade de armazenamento de mensagens aumenta, a taxa de *overhead* diminui. Essas observações, embora não façam parte do escopo desta tese de doutorado, serão referenciadas na análise do protocolo CARTOON.

É importante ressaltar que os resultados da taxa de *overhead* provenientes dos cenários com capacidade de armazenamento de mensagens identificados por B25% e B50% foram suprimidos das Figuras 6.6 e 6.7 em função de não acrescentarem informações relevantes. Cabe ressaltar que a Figura 6.7 destaca o resultado da taxa de *overhead* do protocolo CARTOON, devido aos valores apurados serem significativamente inferiores.

A formulação adotada pelo protocolo CARTOON resultou na menor taxa de *overhead*

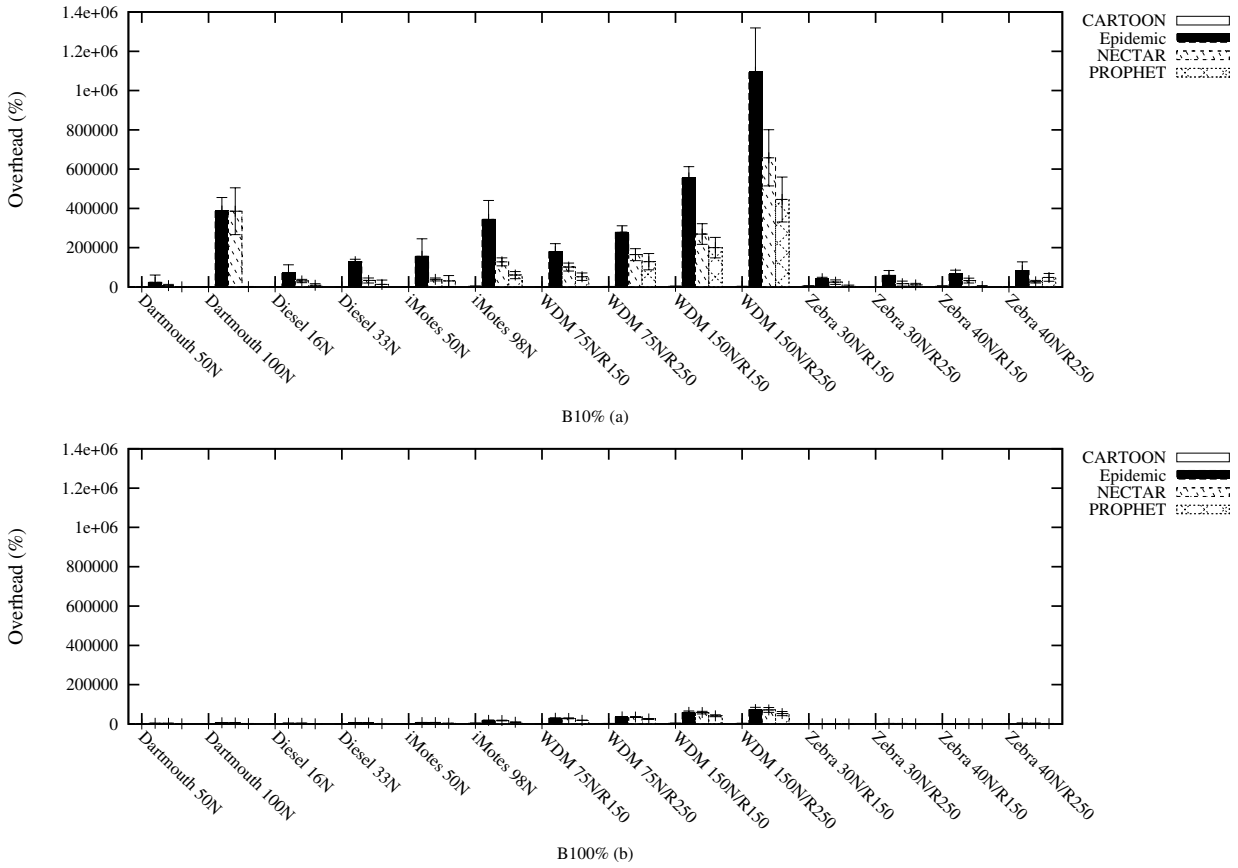

Figura 6.6: *Overhead* - Capacidade de armazenamento B10% e B100%

devido à equação da função utilidade do modo de disseminação probabilística impor restrições para o encaminhamento de mensagens. Como o índice de roteamento é computado em função da duração do contato dentro de uma janela de tempo adaptável ao contexto, torna-se necessário permanecer em contato para que haja o incremento do índice de roteamento. Além disso, as informações de roteamento propagadas são afetadas pela distância (quantidade de saltos) e envelhecidas quando necessário.

A comparação do desempenho do protocolo CARTOON em função da métrica *overhead*, nos cenários identificados por B10% e B100% e ilustrados através da Figura 6.7, resulta na conclusão de que o protocolo CARTOON foi sutilmente afetado pelo aumento na capacidade de armazenamento dos nós, porém sem prejuízo para o desempenho da métrica quantidade de mensagens entregues. Essa observação é válida para a maioria dos cenários, com exceção do cenário ZebraNet com raio de alcance de 150 metros, em função de particularidades do cenário já identificadas e comentadas. Logo, essa oscilação na métrica *overhead*, que contrasta com a análise efetuada do comportamento dos demais protocolos, ratifica a proposta do índice de roteamento de controlar a propagação de mensagens no modo probabilístico. No entanto, esse modelo requer a complementação provida pela

adoção, de forma adaptativa e controlada, do modo de disseminação epidêmica.

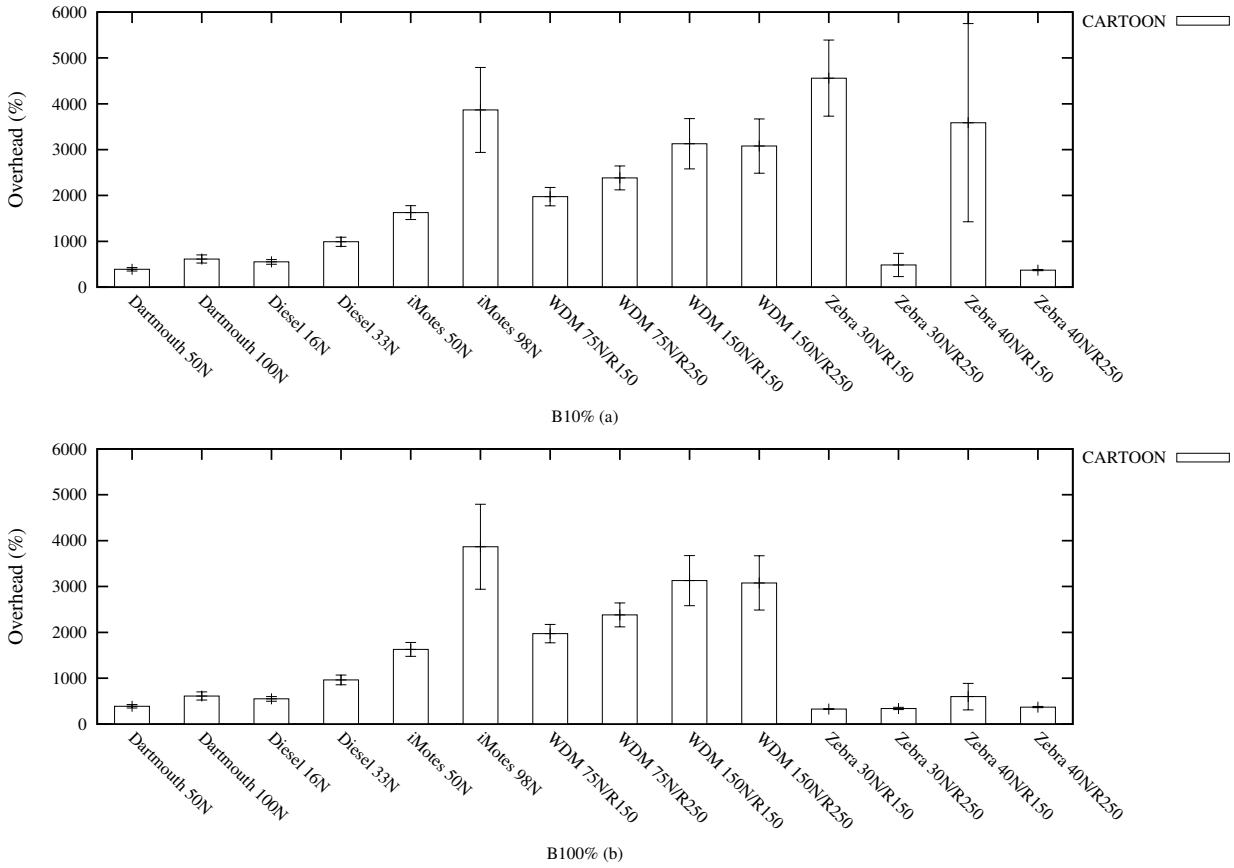

Figura 6.7: *Overhead* do protocolo CARTOON - Capacidade de armazenamento B10% e B100%

A métrica descartes de mensagens é influenciada pelo nível de comprometimento da capacidade de armazenamento de mensagens em função do tráfego observado na rede, pela fórmula de disseminação de mensagens, e pelo algoritmo responsável pelo processo de descarte. Protocolos de roteamento eficientes tendem a obter uma alta taxa de mensagens entregues, controlando a disseminação de mensagens e evitando a ocorrência de descartes.

Como nas simulações com o oráculo do pleno conhecimento não ocorreram descartes, os dados ilustrados pela Figura 6.8 não foram normalizados. Observa-se, no entanto, que o protocolo CARTOON gerenciou adequadamente os recursos da rede, efetuando descartes em apenas 11,78% dos cenários avaliados. O controle de disseminação de mensagens implementado no protocolo CARTOON foi, ainda, responsável pela menor quantidade de mensagens descartadas. Como a análise dos resultados provenientes da métrica descartes nos cenários com B25%, B50% e B100% não produziu informações que justifiquem comentários, optou-se por suprimir os referidos resultados da Figura 6.8. A Figura 6.8(a) apresenta a quantidade de descartes efetuada por todos os protocolos nos cenários B10% (mais restritos) e a Figura 6.8(b) ilustra os eventos de descarte do protocolo CARTOON.

Cabe salientar que a Figura 6.8(b) está representada em uma escala diferenciada, em função da quantidade reduzida de descartes do protocolo CARTOON.

O protocolo NECTAR apresentou uma quantidade de descartes superior à quantidade de descartes do protocolo *Epidemic* em alguns cenários como Dartmouth com 100 nós, WDM com 150 nós e raio de alcance de 150, WDM com 150 nós e raio de alcance de 250 metros, entre outros. Em primeira instância, a natureza de operação do protocolo *Epidemic* faz com que a afirmativa anterior soe incoerente, entretanto as justificativas elencadas a seguir comprovam o contrário. A quantidade de descartes superior do protocolo NECTAR deve-se a alguns fatores, como:

- enquanto que o protocolo *Epidemic* fundamenta os processos de escalonamento e descarte em estruturas do tipo FIFO (*First In, First Out*), os processos de escalonamento e descarte do protocolo NECTAR analisam a quantidade de réplicas efetuadas da mensagem e o tempo decorrido desde que a mensagem foi recebida aproveitando melhor o tempo de contato;
- o protocolo NECTAR conta com um mecanismo denominado PassiveAck, que propaga informações a respeito de mensagens transmitidas para seus respectivos destinatários, liberando espaço para o recebimento de novas mensagens;
- os processos de escalonamento e descarte do protocolo NECTAR possibilitaram a entrega de uma quantidade de mensagens superior à quantidade alcançada pelo protocolo *Epidemic*, liberando espaço para que outras mensagens pudessem ser transmitidas (ver Figura 6.2);
- especificamente em relação ao cenário WDM com 150 nós, raio de alcance de 250 metros e B10%, o protocolo NECTAR transmitiu, em média, 55,4% mensagens a mais que o protocolo *Epidemic*, entretanto entregou, em média, 157,9% mensagens a mais;
- o protocolo NECTAR ainda dispõe de uma fase de disseminação epidêmica e de um mecanismo de envelhecimento adaptativo, que favorecem a disseminação de mensagens.

A métrica atraso foi calculada a partir da média dos atrasos provenientes de mensagens entregues e exibida através da Figura 6.9. Cabe ressaltar que a métrica atraso não foi normalizada em função do desempenho obtido pelo oráculo do pleno conhecimento, pois a análise isolada desta métrica pode incorrer em conclusões equivocadas. É possível supor

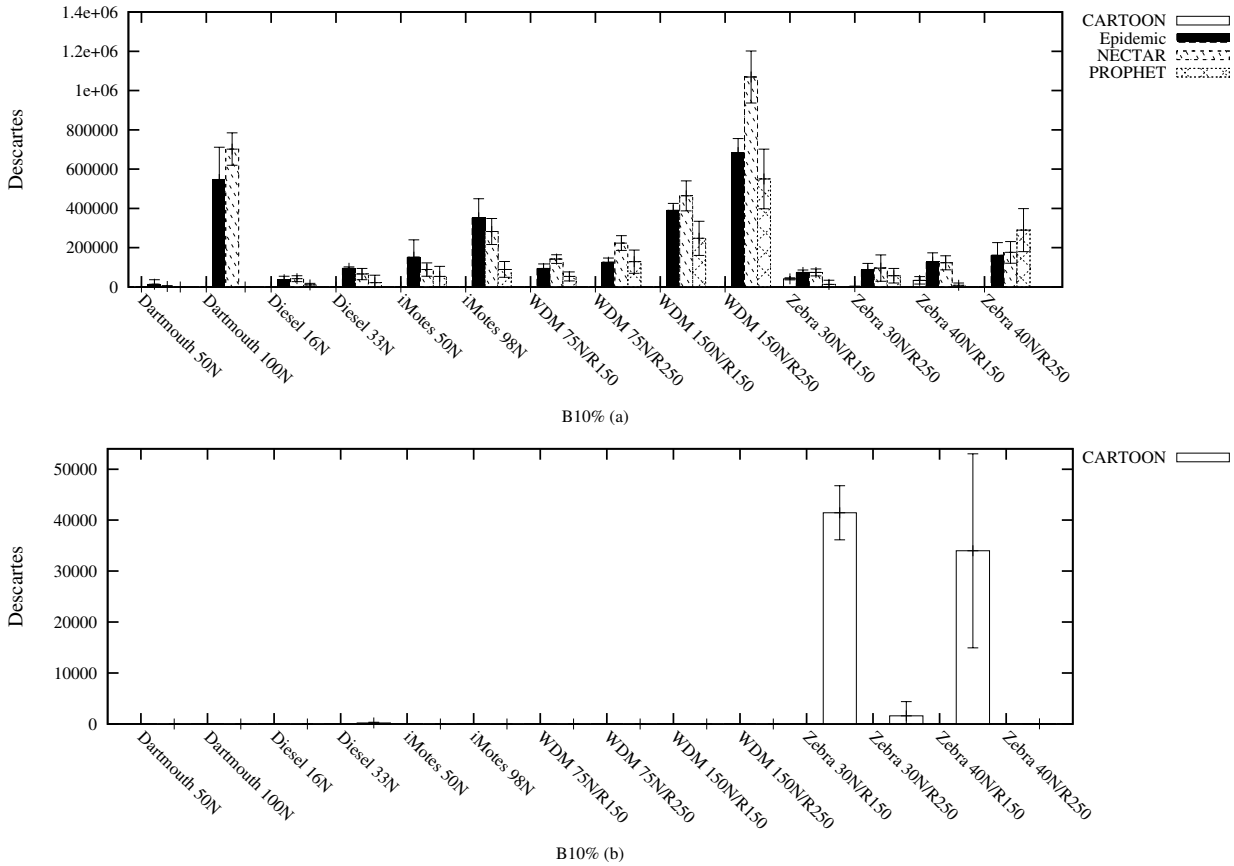

Figura 6.8: Descartes - Capacidade de armazenamento B10%

um cenário em que um protocolo X tenha apresentado um atraso médio de 100 segundos e um protocolo Y tenha demonstrado um atraso médio de 30 segundos. Uma análise superficial poderia concluir que o protocolo Y exibe um atraso menor que o protocolo X, no entanto é possível presumir também que o protocolo X foi capaz de entregar 90 mensagens enquanto que o protocolo Y apenas 15 mensagens. Para que a comparação seja justa, seria necessário calcular o atraso do protocolo X considerando-se somente as 15 mensagens entregues pelo protocolo Y. Portanto, a análise da métrica atraso requer a análise conjunta da métrica mensagens entregues.

Posto isso, cabe ressaltar que os resultados dos cenários com capacidade de armazenamento B25% e B50% foram suprimidos da Figura 6.9 em função de não apresentarem informações relevantes, e que o atraso médio superior do oráculo do pleno conhecimento, exibido em alguns cenários, deve-se, evidentemente, à quantidade superior de mensagens entregues em todos os cenários, corroborando a afirmativa supracitada.

O protocolo CARTOON, além obter a maior quantidade de mensagens entregues, com menor *overhead* e menor proporção de descartes, ainda apresentou o menor atraso na imensa maioria do cenários avaliados. Contudo, em um único cenário, identificado por

DieselNet com 16 nós e capacidade armazenamento limitada a 10% do total de mensagens (B10%), o protocolo CARTOON não foi capaz de exibir o melhor desempenho. O referido cenário revela um alto grau de conectividade, no entanto, destaca-se por apresentar a menor média de conexões por nó por hora e a menor duração média de conexões por nó por hora, conforme demonstrado na Tabela 6.2. Essas particularidades contribuíram para o atraso observado, embora o cenário caracterize-se por apresentar contatos do tipo previsível.

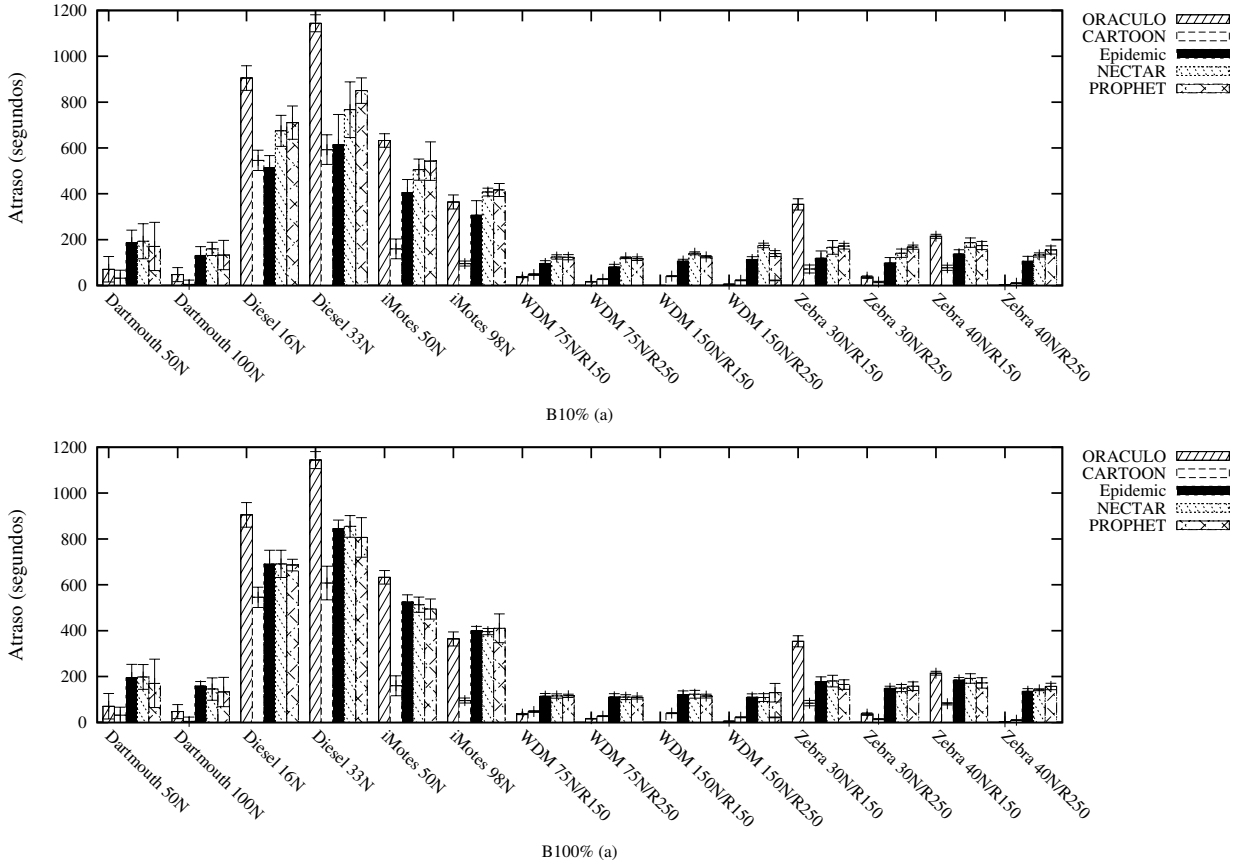

Figura 6.9: Atraso - Capacidade de armazenamento B10% e B100%

Como o modo de operação do protocolo CARTOON controla a disseminação de mensagens, o atraso médio para o cenário DieselNet com 16 nós e capacidade armazenamento referenciada por B10% foi 6,16% superior ao atraso observado para o protocolo *Epidemic*. Cabe salientar que o protocolo *Epidemic* dissemina todas as mensagens através do modo de disseminação epidêmica para todos os nós que estabelecem contato, de forma que uma parcela significativa de mensagens que alcança o destinatário chega com atraso reduzido. No entanto, no referido cenário, o protocolo CARTOON entregou, em média, 97,32% das mensagens enquanto que o protocolo *Epidemic* entregou, em média, 15,84% das mensagens.

Um estudo detalhado permitiu identificar que o valor do atraso médio do protocolo CARTOON no referido cenário deve-se, justamente, ao peso do conjunto de mensagens não entregues pelo protocolo *Epidemic* no cômputo da métrica atraso médio. Desta forma, as mensagens entregues pelo protocolo *Epidemic* foram identificadas e isoladas permitindo calcular o atraso, em termos percentuais, do protocolo CARTOON para as mesmas mensagens, no mesmo cenário, e para cada um dos cinco arquivos de tráfego. A Tabela 6.6, através da coluna Percentual do Atraso, ilustra, em termos percentuais, o tempo gasto pelo protocolo CARTOON para entregar o mesmo conjunto de mensagens entregue pelo protocolo *Epidemic* no cenário DieselNet com 16 nós e com capacidade de armazenamento dos nós limitada a 10% da carga de mensagens da rede. Ademais, foi possível calcular o percentual de mensagens entregues pelo protocolo CARTOON em relação ao conjunto de mensagens entregues pelo protocolo *Epidemic*, que encontra-se disponível na coluna Percentual de Mensagens Coincidentes, da Tabela 6.6. Logo, é factível concluir que, para o protocolo CARTOON entregar, em média, 99,09% das mensagens entregues pelo protocolo *Epidemic* no cenário DieselNet com 16 nós e com capacidade de armazenamento dos nós limitada a 10% da carga de mensagens da rede, o protocolo CARTOON apresentou um atraso médio equivalente a 25,99% do atraso apresentado pelo protocolo *Epidemic*. A Tabela 6.6 sumariza esses valores, comprovando, na verdade, o desempenho superior do protocolo CARTOON em relação ao protocolo *Epidemic* para a métrica atraso.

Tabela 6.6: Comparação do atraso entre os Protocolos CARTOON e *Epidemic* - Cenário DieselNet com 16 nós e B10%

	Desempenho do Protocolo CARTOON	
Arquivo de Tráfego	Percentual do Atraso	Percentual de Mensagens Coincidentes
01	20,08%	99,24%
02	23,85%	99,26%
03	36,04%	98,35%
04	27,68%	99,32%
05	22,34%	99,32%
Média	25,99%	99,09%

6.3.2 2ª Dimensão: Oscilações do protocolo CARTOON

Um dos principais objetivos desta tese de doutorado é demonstrar a eficiência que advém do uso de mecanismos dinamicamente adaptativos ao contexto, no entanto, além de prover um desempenho superior, espera-se que, devido à capacidade de adaptação, as oscilações observadas em função de particularidades dos contextos sejam reduzidas. Logo, torna-se imprescindível realizar um estudo das oscilações no desempenho da métrica mensagens entregues com o intuito de verificar o grau de eficiência dos componentes responsáveis pelo

processo de adaptação dinâmica, implementados pelo protocolo CARTOON. O estudo realizado considerou as particularidades presentes nos 280 cenários distintos utilizados nesta tese de doutorado, além dos contextos que se formam ao longo das simulações em cada um dos cenários. A medida de variância adotada para mensurar essas oscilações foi o desvio padrão.

O desvio padrão é uma medida de dispersão dos valores de uma distribuição normal em relação à sua média, caracterizando-se como a raiz quadrada da variância. Logo, quanto maior o desvio padrão, maior a variância ou, nos termos desta tese de doutorado, maiores as oscilações. A Tabela 6.7 apresenta a média, o desvio padrão e o percentual correspondente do desvio padrão em relação à média da métrica mensagens entregues para o protocolo CARTOON, que se apresenta normalizada em função do desempenho do oráculo do pleno conhecimento.

Para a perfeita compreensão dos valores expressos na Tabela 6.7 e nas demais tabelas apresentadas nesta subseção e na Subseção 6.3.3, torna-se imprescindível evidenciar que os valores globais (coluna Global - valores que representam todos os 280 cenários) foram computados estimando-se, de forma ponderada, a quantidade de contextos por cenário. Logo, no cálculo dos valores globais foi atribuído o peso 2 para os valores dos cenários Dartmouth, DieselNet e iMotes (cenários com duas quantidades distintas de nós e raio de alcance único) e o peso 4 para os valores dos cenários WDM e ZebraNet (cenários com duas quantidades distintas de nós e raio de alcance). Os pesos foram estipulados em função da quantidade de configurações distintas (variações na quantidade de nós e no raio de alcance) que cada cenário apresenta. Já as colunas B10%, B25%, B50% e B100% representam os valores computados para a capacidade de armazenamento limitada a, respectivamente, 10%, 25%, 50% e 100% do total de mensagens da rede.

Tabela 6.7: Oscilações do protocolo CARTOON em relação à métrica mensagens entregues

	Global	B10%	B25%	B50%	B100%	Dartmouth	DieselNet	iMotes	WDM	ZebraNet
Média	95,04	94,23	95,30	95,31	95,31	97,41	96,25	99,16	97,61	88,60
Desvio Padrão	16,33	20,34	14,89	14,81	14,81	3,60	2,39	0,63	1,55	26,38
% Desvio Padrão	17,18	21,58	15,62	15,54	15,54	3,69	2,48	0,63	1,59	29,78

A análise das oscilações sob a ótica dos cenários possibilitou a constatação do excelente desempenho demonstrado pelos componentes responsáveis pelo processo de adaptação dinâmica do protocolo CARTOON. Esse desempenho demonstrou a manutenção da eficiência, independente da capacidade de armazenamento de mensagens, da densidade da rede, da quantidade de nós e de características intrínsecas aos cenários. Considerando-se os cenários Dartmouth, DieselNet, iMotes e WDM, o desvio padrão manteve-se abaixo de

4% da média. O efeito negativo foi causado por um único cenário, identificado por ZebraNet com 30 nós e raio de alcance limitado a 150 metros. Nesse cenário, ponderando-se todas as capacidades de armazenamento, a média do percentual de mensagens entregues foi de 66,60%, influenciando o cálculo do desvio padrão do cenário como um todo.

A Tabela 6.8 detalha o cenário ZebraNet, apresentando valores relativos à quantidade de nós e ao raio de alcance, e comprova que o efeito negativo permaneceu restrito a um cenário específico. Os cenários com 30 e 40 nós foram identificados por N30 e N40, respectivamente, assim como os cenários com raio de alcance de 150 e 250 metros foram identificados por R150 e R250. Apenas para efeito de equiparação, os valores do protocolo que obteve o segundo melhor desempenho no cenário ZebraNet foram incluídos na Tabela 6.8. Enquanto que as características restritivas dos cenários ZebraNet impactaram o protocolo CARTOON em um único cenário, o protocolo NECTAR teve o desempenho afetado para os cenários com raio de alcance limitado a 150 metros.

Tabela 6.8: Oscilações dos protocolos CARTOON e NECTAR em relação à métrica mensagens entregues no cenário ZebraNet

	CARTOON					NECTAR				
	ZebraNet (Global)	N30 R150	N40 R150	N30 R250	N40 R250	ZebraNet (Global)	N30 R150	N40 R150	N30 R250	N40 R250
Média	88,60	66,60	90,57	98,21	99,04	45,74	23,99	22,76	59,07	77,14
Desvio Padrão	26,38	9,03	5,11	0,68	0,56	47,67	7,71	5,62	20,23	13,91
% Desvio Padrão	29,78	13,56	5,65	0,69	0,57	104,21	32,13	24,67	34,24	18,03

É razoável destacar que, excluindo-se o cenário ZebraNet com 30 nós e raio de alcance de 150 metros, a média global do protocolo CARTOON para a métrica mensagens entregues em todos os demais 275 cenários passou de 95,04% para 97,41%, o desvio padrão de 16,33 para 4,57, e o percentual do desvio padrão em função da média de 17,18% para 4,69%. Cabe ainda lembrar que a Seção 6.3, no decurso do estudo da métrica mensagens entregues, tece comentários a respeito das particularidades do cenário ZebraNet com 30 nós e raio de alcance de 150 metros que se aplicam à análise das oscilações no desempenho do protocolo CARTOON.

6.3.3 3ª Dimensão: Análise da Adaptação ao Contexto

O desempenho superior apresentado pelo protocolo CARTOON ficou evidente em todas as métricas analisadas, no entanto, como o principal objetivo desta tese de doutorado é comprovar a eficiência oriunda da adoção de mecanismos para adaptação dinâmica a

contextos, torna-se essencial avaliar a influência dos componentes adaptativos responsáveis pela estimativa de contato e pela utilização do modo de disseminação epidêmica. Objetivando atender a essas necessidades, foram implementadas duas versões do protocolo CARTOON. Para a primeira versão, identificada por PURE, foram retirados os dois componentes responsáveis pelo processo de adaptação dinâmica ao contexto (estimativa de contato e disseminação epidêmica). Para a segunda versão, identificada por PURE+ESTIMATE, foi acrescentado o componente responsável pela estimativa de contato.

Visando mensurar o desempenho detalhado dos componentes adaptativos do protocolo CARTOON, foram realizadas simulações com as versões PURE e PURE+ESTIMATE em todos os 280 cenários, possibilitando a apresentação dos resultados através da Figura 6.10. Os resultados com B25% e B50% foram excluídos em função de não agregarem informações relevantes. O desempenho do componente adaptativo responsável pela estimativa de contato torna-se mais evidente à medida que o cenário apresenta características mais restritivas, como nos cenários Dartmouth e ZebraNet. Um desempenho semelhante também pode ser observado nos cenários com padrão de movimentação previsível e em cenários com padrão de movimentação baseado em interesses compartilhados, como nos cenários DieselNet e iMotes. Em cenários com restrições mínimas, como no caso do cenário WDM, o modelo de disseminação probabilística atua com eficiência, o que implica em uma redução da participação dos componentes adaptativos no desempenho. Cabe ressaltar que os valores percentuais expressos nesta subseção foram computados em função dos valores obtidos pelo protocolo CARTOON e normalizados pelo oráculo do pleno conhecimento.

A comprovação da eficiência dos componentes adaptativos, principalmente da estimativa de contato, pode ser observada através da análise da média global do percentual de mensagens entregues pelo protocolo CARTOON e por suas versões PURE e PURE+ESTIMATE. Em termos globais, ou seja, considerando todos os 280 cenários, a versão PURE obteve uma média de mensagens entregues equivalente a 64,49% das mensagens entregues pelo protocolo CARTOON. Já a versão PURE+ESTIMATE alcançou uma média de 88,05% mensagens entregues. Logo, como a única diferença entre as versões PURE e PURE+ESTIMATE é o componente responsável pela estimativa de contato, é possível concluir que o referido componente responde por 23,56% das mensagens entregues. Fundamentado pelo mesmo raciocínio, é plausível concluir que o modo de disseminação epidêmica responde por 11,95% das mensagens entregues, uma vez que esse componente constitui a única diferença entre a versão PURE+ESTIMATE e o protocolo CARTOON. Em função dessas constatações, foi possível elaborar a Tabela 6.9, respon-

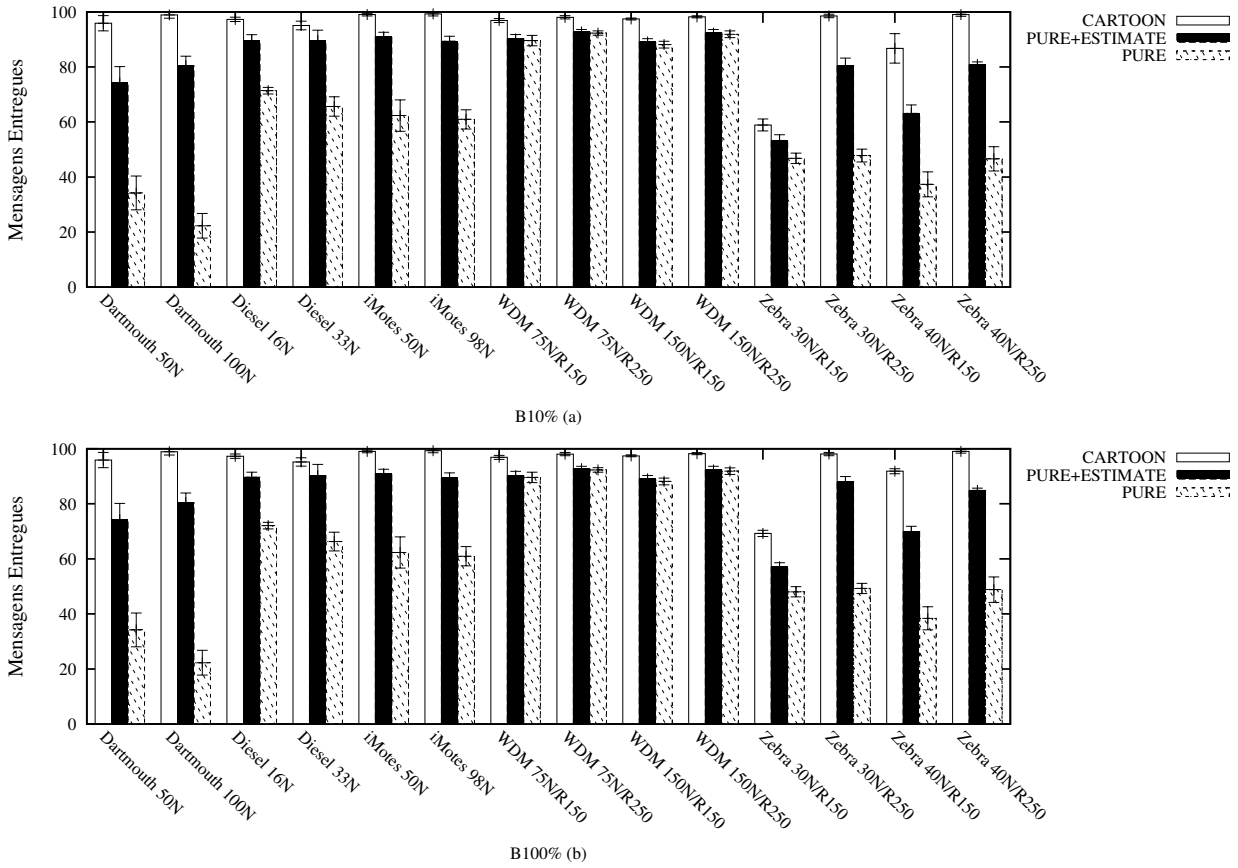

Figura 6.10: Mensagens entregues - Capacidade de armazenamento B10% e B100%

sável por exibir, em termos percentuais, a participação dos componentes estimativa de contato e modo de disseminação epidêmica em relação à métrica mensagens entregues.

Tabela 6.9: Participação no desempenho dos componentes do protocolo CARTOON em relação à métrica mensagens entregues com sucesso

	Global	Dartmouth	DieselNet	iMotes	WDM	ZebraNet
Estimativa de Contato	23,56%	50,44%	21,63%	28,81%	0,63%	31,39%
Modo Epidêmico	11,95%	20,58%	6,65%	9,03%	6,72%	16,98%

Como as características do cenário WDM não são favoráveis ao destaque do componente estimativa de contato, o valor apurado ficou significativamente abaixo dos demais cenários. O cenário WDM apresenta, entre os cenários utilizados nas simulações, o maior grau de conectividade, com valores superiores a 94%, conforme pode ser observado na Tabela 6.2 e nas Figuras A.4(g) e A.4(h). Ademais, as informações presentes na Tabela 6.2 demonstram que o cenário WDM também possui a maior média de conexões por nó por hora, com valores expressivamente superiores aos valores dos demais cenários. Essas condições são propícias à operação do modo básico do protocolo CARTOON (PURE) que, independente da ação do componente estimativa de contato, é capaz efetuar o enca-

minhamento de mensagens para os destinatários.

Também é possível comprovar a influência dos componentes adaptativos do protocolo CARTOON comparando, através da Figura 6.11, o desempenho da versão PURE com o desempenho dos demais protocolos em função da métrica mensagens entregues. À exceção do cenário ZebraNet, a versão PURE apresenta um desempenho superior nos cenários com maior percentual de conectividade, com destaque para o cenário WDM devido ao percentual médio de conectividade ser de 95,78%. Cabe, ainda, evidenciar que, mesmo sem os componentes adaptativos, a versão PURE do protocolo CARTOON apresentou o melhor desempenho em 42,85% dos cenários avaliados, demonstrando a importância da fórmula adotada, no modo de disseminação probabilística, para o cálculo do índice de roteamento.

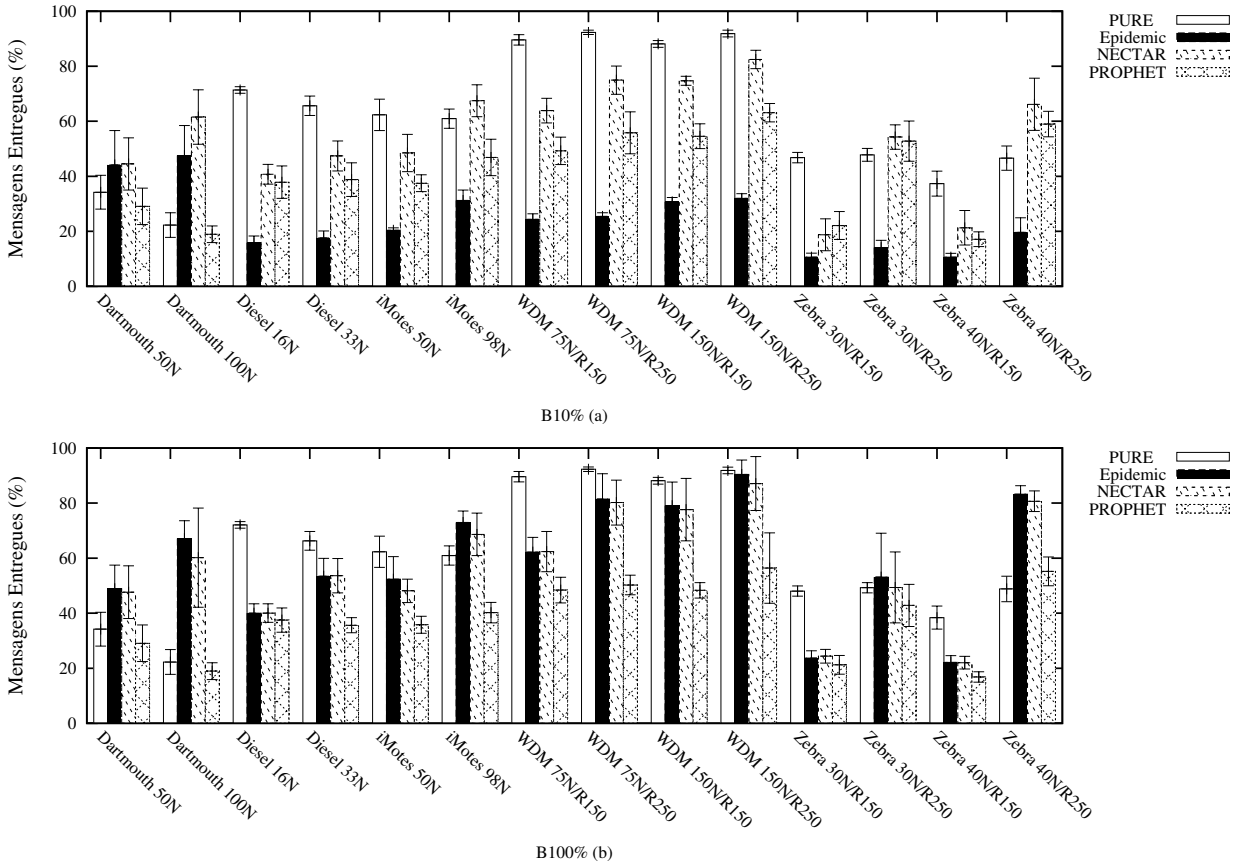

Figura 6.11: Mensagens entregues com protocolo PURE - Capacidade de armazenamento B10% e B100%

Embora a eficiência do componente estimativa de contato tenha sido comprovada, para efeito de avaliação da proposta é fundamental ainda a avaliação da acuidade do componente. Essa avaliação, considerando a média dos valores apurados, encontra-se detalhada na Tabela 6.10.

Tabela 6.10: Avaliação do componente adaptativo estimativa de contato

	Global	Dartmouth	DieselNet	iMotes	WDM	ZebraNet
Contatos estimados	17.342,2	5.361,2	603,0	29.486,5	40.989,5	1.982,8
Contatos realizados entre os estimados	5.470,1	983,8	207,5	7.697,5	14.399,7	301,4
Percentual de acerto	25,65%	18,35%	34,41%	26,11%	35,13%	15,20%

O percentual de acerto de estimativas de contato reduzido observado nos cenários Dartmouth e ZebraNet deve-se ao padrão de mobilidade com contatos do tipo oportunista e, principalmente, à longa duração dos contatos. Essa conclusão é corroborada pela Tabela 6.2, que atribui aos referidos cenários os maiores valores para a métrica duração média de conexões por hora. O cenário DieselNet é o único cenário em que todos os nós descrevem um padrão de mobilidade com contatos do tipo previsível. No entanto, a quantidade reduzida de conexões por hora restringiu a ação do componente estimativa de contato.

No cenário WDM apenas 20% dos dispositivos móveis (ônibus) possuem um padrão de mobilidade que remete a contatos previsíveis. Logo, os demais 80% dos dispositivos móveis (carros e pedestres) apresentam um padrão de mobilidade característico de contatos oportunistas. Ademais, o alto grau de conectividade do cenário reduz a ação do componente adaptativo denominado estimativa de contato. O cenário iMotes apresenta o maior grau de densidade entre os cenários utilizados nas simulações e o segundo maior percentual de conectividade. Ainda assim, em valores aproximados, a cada três estimativas realizadas pelo componente estimativa de contato, uma estimativa foi concretizada.

O componente modo de disseminação epidêmica não foi capaz de apresentar resultados tão expressivos quanto o componente estimativa de contato, mas ainda assim foi responsável direto, em termos globais, por 11,65% das mensagens entregues. Em relação à perspicácia, é notório que a quantidade de mensagens transmitidas através da disseminação epidêmica é significativamente superior à quantidade de mensagens entregues com sucesso ao destinatário. A Tabela 6.11 ilustra a média do percentual de mensagens entregues em relação à quantidade de mensagens transmtitidas através do modo de disseminação epidêmica.

Os componentes adaptação ao contexto do protocolo CARTOON dependem de diversas variáveis que são atualizadas dinamicamente durante a vida útil dos nós e que objetivam refletir particularidades dos contextos observados. Entre essas variáveis encontram-se

Tabela 6.11: Média do percentual de mensagens entregues em relação à quantidade de mensagens transmitidas pelo modo de disseminação epidêmica

	Global	B10%	B25%	B50%	B100%	Dartmouth	DieselNet	iMotes	WDM	ZebraNet
% de Mensagens Entregues	6,22%	6,11%	6,25%	6,25%	6,25%	3,59%	14,13%	3,45%	5,94%	5,23%

a densidade, a estimativa de ocupação, as janelas deslizantes $Tjanela_max$ e $Tjanela_ini$, entre outras. Com o intuito de comprovar o processo de adaptação, a Figura 6.12 ilustra a evolução da densidade observada por dois nós selecionados de forma aleatória, em alguns cenários. O valores observados refletem o comportamento da coluna percentual de conectividade da Tabela 6.2 e comprovam que cada nó possui uma visão diferenciada da rede em função da capacidade de adaptação ao contexto do protocolo CARTOON.

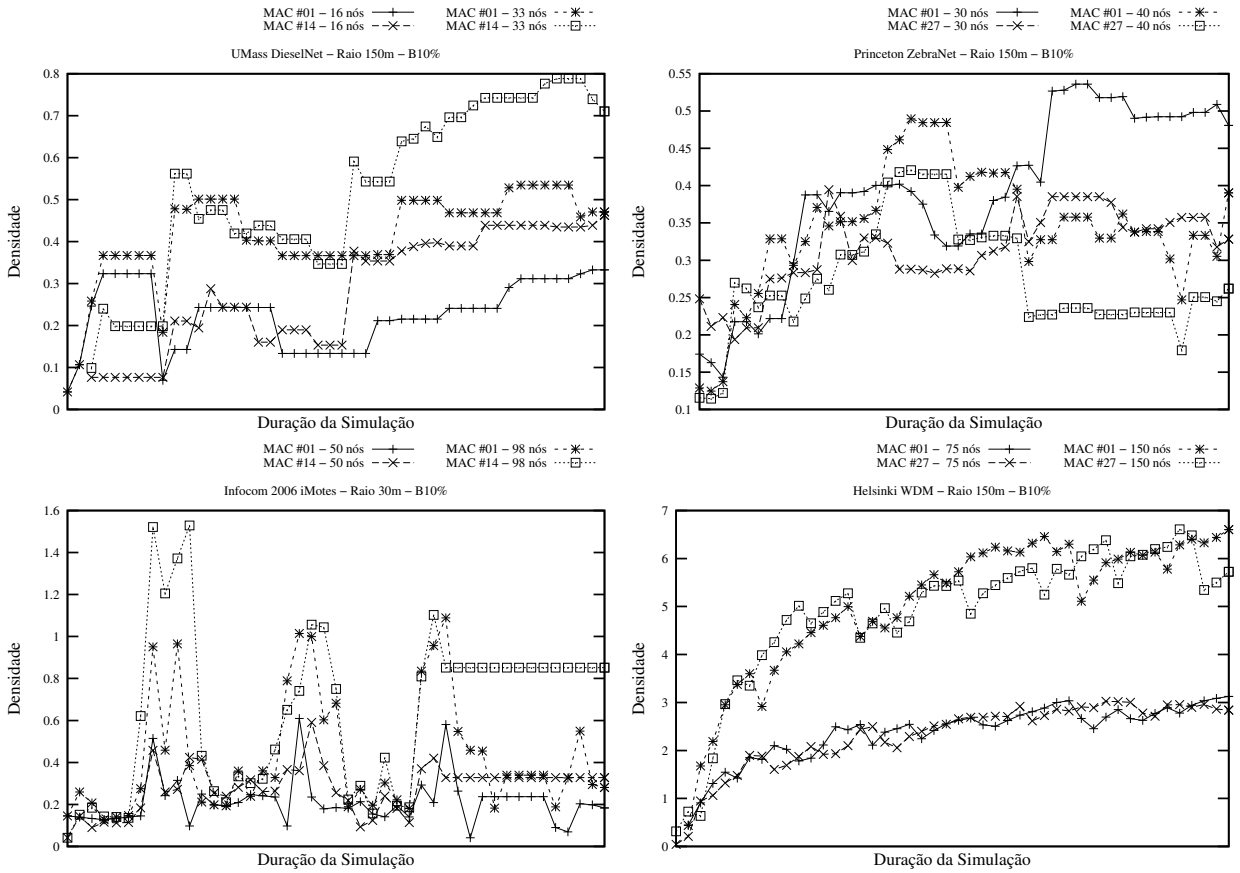

Figura 6.12: Evolução da variável Densidade

O desempenho diferenciado do protocolo CARTOON está intimamente associado ao desempenho dos componentes adaptativos estimativa de contato e modo de disseminação epidêmica. No entanto, esse desempenho requer uma complexidade computacional que não pode ser mensurada por simuladores de redes de comunicação. Como não foram realizados experimentos práticos objetivando avaliar o impacto da complexidade computacional nos resultados, optou-se por computar esse impacto através do consumo de

recursos do processador requerido à execução das simulações do protocolo CARTOON e dos demais protocolos selecionados.

O comando *time*, presente em todas as distribuições do sistema operacional Linux, foi utilizado visando mensurar o consumo de recursos do processador. Entre as diversas opções do comando *time*, as opções %U e %S foram escolhidas por exibir, respectivamente, a quantidade total de segundos consumidos pelo processador no modo usuário e a quantidade total de segundos consumidos pelo processador no modo *kernel*. Os valores apurados, que representam a média consolidada por protocolo e por cenário, encontram-se presentes na Tabela 6.12. Independente do cenário, coube ao protocolo CARTOON, em função dos componentes adaptativos, o maior consumo de recursos computacionais.

Tabela 6.12: Consumo em segundos de recursos do processador

	Dartmouth	DieselNet	iMotes	WDM	ZebraNet
CARTOON	302,43	650,37	2.202,47	1.067,49	332,38
Epidemic	55,57	3,09	14.40	57,95	5,54
NECTAR	198,82	5,23	24,08	81,65	14,38
PROPHET	85,10	4,15	30,80	44,54	7,15

6.4 Considerações Finais

Com o intuito de definir um processo de avaliação justo para o protocolo CARTOON, foram reunidos arquivos de movimento provenientes de cenários diversificados, com particularidades que remetem à ocorrência de contatos do tipo oportunista e previsível. O critério de seleção objetivou selecionar, preferencialmente, cenários provenientes de experimentos reais que apresentassem características contrastantes, possibilitando uma avaliação ampla do protocolo CARTOON como um todo e, de forma detalhada, dos componentes responsáveis pelo processo de adaptação dinâmica. Os cenários Dartmouth College [43], UMass DieselNet [3, 4], Infocom 2006 iMotes [74], Helsinki WDM [26] e Princeton ZebraNet [37, 92, 52, 91] foram selecionados em virtude de atenderem as expectativas para o processo de avaliação.

Como os cenários típicos de DTNs apresentam características próprias que podem influenciar o desempenho de qualquer métrica, observou-se a necessidade de examinar detalhadamente os referidos cenários e de evidenciar as particularidades. Consequentemente, informações básicas dos cenários como quantidade de nós, raio de alcance, densidade, dimensão da área e a duração foram expostas, da mesma forma que informações intrínsecas aos cenários, tais como percentual de conectividade, média de conexões por hora por

nó, duração média das conexões por hora por nó etc. O estudo das informações extraídas dos cenários possibilitou a compreensão necessária para justificar adequadamente o desempenho apurado do protocolo CARTOON.

Em função de indispensabilidades específicas para o ambiente de avaliação, identificou-se a necessidade de estender o simulador utilizado em [65, 63, 64] e de implementar os protocolos CARTOON, *Epidemic* [85], NECTAR [63, 64] e PROPHET [48]. Ademais, visando fundamentar o desempenho averiguado, todos os resultados foram normalizados em função do desempenho do oráculo do pleno conhecimento [36], evitando, dessa forma, conclusões incoerentes devido ao comprometimento de algum protocolo por características intrínsecas a um determinado cenário.

O protocolo CARTOON foi avaliado nos cenários supra-citados possibilitando a avaliação do desempenho segundo três dimensões distintas: a primeira dimensão mensurou o desempenho do protocolo CARTOON perante o oráculo do pleno conhecimento em função das métricas mensagens entregues, *overhead*, descartes e atraso; a segunda dimensão avaliou as oscilações no desempenho apresentado; e, por fim, a terceira dimensão evidenciou o ganho no desempenho proporcionado pelos componentes adaptativos.

Tendo em vista que a avaliação da métrica mensagens entregues foi normalizada a partir do oráculo do pleno conhecimento, o protocolo CARTOON apresentou um desempenho próximo do ótimo. Considerando-se todos os cenários avaliados, o protocolo CARTOON transmitiu para o destinatário, em média, 95,04% das mensagens possíveis de serem entregues, alcançando uma taxa de 99,54% no cenário iMotes com 98 nós. O único cenário em que o desempenho do protocolo CARTOON destoou foi o cenário ZebraNet com 30 nós e raio de alcance de 150 metros, em função de restrições intrínsecas ao cenário. Desconsiderando-se o referido cenário, a média global de mensagens entregues alcançaria 97,24% das mensagens. Nas demais métricas avaliadas, o protocolo CARTOON caracterizou-se por apresentar, em termos globais e em relação a cada um dos cenários, a menor taxa de *overhead*, a menor quantidade de descartes e o menor atraso. Em um único cenário, identificado por DieselNet com 16 nós e capacidade armazenamento limitada a 10% do total de mensagens (B10%), o protocolo CARTOON exibiu o segundo melhor desempenho, apresentando atraso médio 6,16% superior do protocolo *Epidemic*. Deve-se, no entanto, destacar que uma análise justa da métrica atraso médio requer um estudo da quantidade de mensagens entregues e, ao analisar essa métrica, foi possível identificar que no referido cenário coube ao protocolo CARTOON um percentual médio de mensagens entregues de 97,32% enquanto que o protocolo *Epidemic* entregou, em média, 15,84% das

mensagens.

Os componentes do protocolo CARTOON responsáveis pelo processo de adaptação dinâmica foram responsáveis pelo excelente desempenho demonstrado durante a análise das oscilações. Essa constatação fundamenta-se pela manutenção da eficiência observada que, independente da capacidade de armazenamento de mensagens, da densidade da rede, da quantidade de nós e de características intrínsecas aos cenários, apresentou uma variação mínima. Considerando-se os cenários Dartmouth, DieselNet, iMotes e WDM, o desvio padrão manteve-se abaixo de 4% da média. O efeito negativo foi causado novamente pelo cenário ZebraNet com 30 nós e raio de alcance limitado a 150 metros, influenciando o cálculo do desvio padrão global. No cômputo de todos os cenários, o desvio padrão alcançou 9,34% da média.

Para a análise de desempenho dos componentes responsáveis pelo processo de adaptação dinâmica foram implementadas duas versões do protocolo CARTOON, identificadas por PURE e PURE+ESTIMATE. Simulações realizadas com as referidas versões possibilitaram isolar o desempenho individual dos componentes adaptativos estimativa de contato e modo de disseminação epidêmica, identificando um percentual global de participação no desempenho da métrica mensagens entregues de, respectivamente, 23,30% e 11,65%. No entanto, a avaliação da complexidade computacional baseada no consumo de recursos do processador demonstrou um consumo substancialmente superior ao observado nos demais protocolos.

Em função de todas as avaliações realizadas, com capacidade de armazenamento de mensagens variando de 10% a 100% do total de mensagens, cenários com tipos de contato previsível e oportunista, densidades diferenciadas, variações significativas no percentual de conectividade etc., é possível concluir que o protocolo CARTOON atingiu o objetivo proposto ao apresentar um desempenho próximo do ótimo em relação à métrica mensagens entregues, oscilações mínimas de desempenho apesar das características contrastantes dos cenários e, principalmente, por comprovar a eficiência dos componentes adaptativos estimativa de contato e modo de disseminação epidêmica em cenários característicos de DTNs.

Capítulo 7

Conclusão

Esta tese de doutorado elaborou um estudo minucioso acerca da necessidade da adoção de componentes dinamicamente adaptativos para protocolos de roteamento específicos para Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (DTNs), que culminou com o projeto, a implementação e a avaliação do protocolo de roteamento CARTOON (*Context-Aware Routing Protocol for Opportunistic Networks*).

O desenvolvimento desta tese doutorado proporcionou diversas contribuições. A realização de um estudo a respeito do comportamento de três dentre os principais protocolos de roteamento parametrizáveis para DTNs constituiu a motivação para esta tese. Esse estudo objetivou quantificar a influência proveniente da variação de características dos contextos extraídos de cenários como DieselNet, WDM e ZebraNet e, principalmente, analisar o quanto a variação dinâmica de valores dos parâmetros dos protocolos MaxProp, PROPHET e *Spray and Wait* seria capaz de interferir positivamente no desempenho de métricas como taxa de mensagens entregues e latência. Para efeito de comprovação da análise realizada, foi acrescentado ao protocolo PROPHET uma camada simplificada de adaptação dinâmica e foram realizadas simulações em um quarto cenário, extraído de Dartmouth. O protocolo PROPHET modificado suplantou a configuração padrão do protocolo PROPHET em 4 dos 6 cenários avaliados, apresentando, em média, um desempenho 5,86% superior e, especificamente em contextos mais limitados, 19,96% superior, conforme pode ser observado na Figura 3.3.

A comprovação de que a inclusão de uma camada simplificada de adaptação dinâmica, com a habilidade de ajustar valores parametrizados às características do contexto, apresenta a capacidade de incrementar o desempenho de um protocolo de roteamento parametrizável para DTNs motivou a elaboração de heurísticas com o objetivo de detectar e quantificar características de contextos de DTNs baseadas em três dimensões de rede,

identificadas por Densidade, Capacidade de Armazenamento e Periodicidade de Contato.

Com base nas heurísticas elaboradas, foi proposto de um protocolo de roteamento parametrizável capaz de adaptar-se dinamicamente às particularidades dos diversos contextos que se formam ao longo das DTNs denominado CARTOON. O protocolo CARTOON apresenta diversas variáveis que se adaptam às características dos contextos e dois componentes principais, responsáveis por prover uma estimativa de contato e por determinar se o contexto encontra-se propício para o modo de disseminação epidêmica.

Para a avaliação do protocolo CARTOON foram implementados os protocolos de roteamento PROPHET, NECTAR e *Epidemic*. A implementação do oráculo do pleno conhecimento foi determinante para a coerência das conclusões, possibilitando a normalização dos resultados. O desempenho demonstrado pelo protocolo CARTOON em relação às métricas mensagens entregues, *overhead*, descartes e atraso comprovaram a eficiência dos componentes adaptativos responsáveis pela estimativa de contato e pelo modo de disseminação epidêmica, tanto que o protocolo CARTOON transmitiu para o destinatário, em média, 95,04% das mensagens possíveis de serem entregues, como pode ser observado na Figura 6.5.

7.1 Contribuições

As principais contribuições desta tese de doutorado encontram-se sumarizadas a seguir:

- a elaboração de um estudo a respeito do comportamento de três protocolos de roteamento parametrizáveis para DTNs (Capítulo 3);
- a quantificação da influência proveniente da variação de características dos contextos no desempenho de métricas como taxa de mensagens entregues e latência (Capítulo 3);
- a comprovação de que a inclusão de uma camada simplificada de adaptação apresenta a capacidade de incrementar o desempenho de um protocolo de roteamento parametrizável para DTNs (Capítulo 3, Seção 3.4);
- a elaboração de heurísticas com o objetivo de detectar e quantificar características de contextos de DTNs baseadas nos atributos de rede Densidade, Capacidade de Armazenamento e Periodicidade de Contato (Capítulo 4);

- a proposta e implementação do protocolo de roteamento CARTOON que apresenta a capacidade de adaptar-se dinamicamente às particularidades dos contextos que se formam ao longo das DTNs (Capítulo 5);
- uma avaliação minuciosa do protocolo de roteamento CARTOON e de seus componentes adaptativos (Capítulo 6);
- uma análise detalhada de cinco cenários típicos de DTNs (Apêndice A).

7.2 Considerações Finais

O estudo do desempenho de alguns dos principais protocolos de roteamento para DTNs em cenários com características contratantes constatou uma oscilação expressiva no desempenho de métricas como mensagens entregues e latência. Essa observação motivou o desenvolvimento desta tese de doutorado, ao demonstrar a necessidade de adaptação dinâmica às características de contextos de DTNs, e, ainda, ao conduzir à identificação de dois grandes problemas: o Problema da Detecção de Contexto (PDC) e o Problema do Roteamento Adaptativo (PRA). Para o PDC foram elaboradas heurísticas que permitiram a adaptação dinâmica ao contexto em função dos atributos de rede densidade, capacidade de armazenamento e periodicidade do contato. Já para atender as necessidades do PRA, o protocolo de roteamento dinamicamente adaptativo CARTOON foi projetado, implementado e avaliado em cinco cenários com características contrastantes, demonstrando, ainda, um desempenho próximo do ótimo em relação à métrica mensagens entregues, apresentando uma oscilação reduzida e comprovando a eficiência dos componentes adaptativos. Face ao exposto, é possível afirmar que os objetivos traçados para esta tese de doutorado foram plenamente alcançados.

7.3 Trabalhos Futuros

Os resultados provenientes do desempenho do protocolo CARTOON em relação à métrica mensagens entregues comprovam, de forma irrefutável, que os objetivos estabelecidos foram alcançados. Essa constatação deve-se ao percentual superior a 95% de mensagens entregues, à oscilação mínima observada apesar dos cenários com características contrastantes, e ao desempenho individual dos componentes adaptativos estimativa de contato e modo de disseminação epidêmica. No entanto, vislumbram-se pesquisas futuras para o protocolo CARTOON.

Uma alternativa para um trabalho futuro poderia prover o CARTOON com a capacidade de reduzir a latência de forma global ou pontual, implementando mecanismos de qualidade de serviço através da marcação de mensagens. Esse mecanismos possibilitariam, por exemplo, reduzir as restrições impostas ao modo de disseminação epidêmica e criar classes diferenciadas para o envio no modo de disseminação probabilística.

A análise do contexto objetivando o processo de adaptação dinâmica do protocolo CARTOON foi limitada aos atributos de rede densidade, percentual de ocupação da capacidade de armazenamento e periodicidade de contato. No entanto, outros atributos poderiam ser analisados em conjunto com os atributos implementados, ou em separado, com o desenvolvimento de versões específicas do protocolo CARTOON. Um exemplo claro e real deve-se ao fato de que muitos dispositivos de DTNs dependem, exclusivamente, da fonte de energia provida por baterias. Em alguns casos, o intervalo de carga das baterias pode ser longo ou podem até existir dispositivos móveis cuja recarga não seja viável. Nesses cenários, a aplicabilidade do protocolo CARTOON poderia ficar comprometida em função da complexidade computacional dos componentes adaptativos. Logo, outro trabalho futuro interessante seria adequar o protocolo CARTOON à gerência de energia, incluindo essa métrica no cálculo do índice $Dcontato_idx$, controlando a ação do modo de disseminação epidêmica e restringindo os demais componentes adaptativos em razão do consumo de recursos do processador.

Uma parcela significativa de protocolos de roteamento para DTNs apresenta, como característica, a utilização de parâmetros que possibilitam alterar a configuração e, consequentemente, o comportamento dos protocolos. Desta forma, o ajuste dinâmico dos parâmetros a partir da observação de características dos contextos certamente causaria um efeito positivo no desempenho de métricas específicas. Essa averiguação conduz a um possível trabalho futuro de criação de um arcabouço genérico, ou específico, para um determinado protocolo que apresente a habilidade de identificar dinamicamente as características dos contextos. Este arcabouço pode, ainda, dispor da capacidade de adaptar os parâmetros do protocolo a partir de uma base de conhecimento proveniente de estudos prévios.

Referências

[1] Balasubramanian, A., Levine, B., Venkataramani, A. DTN Routing as a Resource Allocation Problem. Em: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)* (Agosto 2007), vol. 37, p. 373–384.

[2] Balasubramanian, A., Levine, B. N., Venkataramani, A. Replication Routing in DTNs: a Resource Allocation Approach. Em: *Proceedings of the IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)* (Abril 2010), vol. 18, p. 596–609.

[3] Banerjee, N., Corner, M., Towsley, D., Levine, B. N. CRAWDAD trace umass/diesel/transfer/fall2007 (v. 2008-09-14). Disponível em: http://crawdad.cs.dartmouth.edu/umass/diesel/transfer/fall2007. Acessado em: (Setembro 2008).

[4] Banerjee, N., Corner, M. D., Towsley, D., Levine, B. N. Relays, Base Stations, and Meshes: Enhancing Mobile Networks with Infrastructure. Em: *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)* (Setembro 2008), p. 81–91.

[5] Boldrini, C., Conti, M., Jacopini, J., Passarella, A. Hibop: a History Based Routing Protocol for Opportunistic Networks. Em: *Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)* (Junho 2007), p. 1–12.

[6] Boldrini, C., Conti, M., Passarella, A. Impact of Social Mobility on Routing Protocols for Opportunistic Networks. Em: *Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)* (Junho 2007), p. 1–6.

[7] Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D., Levine, B. N. MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks. Em: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (Infocom)* (Abril 2006), p. 1–11.

[8] Burleigh, S. Dynamic Routing for Delay-Tolerant Networking in Space Flight Operations. Em: *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (AIAA) - SpaceOps Conference)* (Maio 2008).

[9] Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Fall, K., Cerf, V., Durst, B., Scott, K., Weiss, H. Delay-Tolerant Networking: an Approach to Interplanetary Internet. Em: *IEEE Communications Magazine* (Junho 2003), vol. 41, p. 128–136.

[10] Burns, B., Brock, O., Levine, B. MV Routing and Capacity Building in Disruption Tolerant Networks. Em: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (Infocom)* (Março 2005), vol. 1, p. 398–408.

[11] Campos, C. A. V., de Moraes, L. F. M., Silva, R. F. Caracterização da Mobilidade Veicular e o seu Impacto nas Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (Maio 2010), p. 585–598.

[12] Cerf, V., Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, B., Scott, K., Fall, K., Weiss, H. Interplanetary Internet (IPN): Architectural Definition. Em: Relatório Técnico, IPN Research Group (Maio 2001), p. 1–59.

[13] Cerf, V., Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, B., Scott, K., Fall, K., Weiss, H. Delay-Tolerant Networking Architecture. Em: Internet Engineering Task Force RFC Draft 4878 (Abril 2007), p. 1–35.

[14] Chen, L.-J., Yu, C.-H., Sun, T., Chen, Y.-C., Chu, H.-h. A Hybrid Routing Approach for Opportunistic Networks. Em: Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM) - Workshop on Challenged Networks (CHANTS) (Setembro 2006), p. 213–220.

[15] Chen, Y., Zhao, W., Ammar, M., Zegura, E. Hybrid Routing in Clustered DTNs with Message Ferrying. Em: *Proceedings of the International MobiSys - Workshop on Mobile Opportunistic Networking (MobiOpp)* (Junho 2007), p. 75–82.

[16] Chuah, M., Cheng, L., Davison, B. Enhanced Disruption and Fault Tolerant Network Architecture for Bundle Delivery (EDIFY). Em: *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)* (Novembro 2005), vol. 2, p. 807–812.

[17] Chyau, C., Raymond, J.-F. What Works: First Mile Solutions' Daknet Takes Rural Communities Online. Disponível em: http://www.firstmilesolutions.com/documents/FMS_Case_Study.pdf. Acessado em: (Agosto 2009).

[18] Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R. Algoritmos Elementares de Grafos. Em: *Algoritmos: Teoria e Prática*, 2o edição, Ed. Elsevier, 2001, p. 419–438.

[19] Crowcroft, J., Yoneki, E., Hui, P., Henderson, T. Promoting Tolerance for Delay Tolerant Network Research. Em: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, (Outubro 2008), vol. 38, p. 63–68.

[20] Demmer, M., Brewer, E., Fall, K., Jain, S., Ho, M., Patra, R. Implementing Delay Tolerant Networking. Em: Relatório Técnico, Intel Research Berkeley (Dezembro 2004), p. 1–14.

[21] Demmer, M., Fall, K. DTLSR: Delay Tolerant Routing for Developing Regions. Em: *Proceedings of the Networked Systems for Developing Regions (NSDR)* (Agosto 2007), p. 1–6.

[22] Dini, G., Lo Duca, A. A Reputation-Based Approach to Tolerate Misbehaving Carriers in Delay Tolerant Networks. Em: *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)* (Junho 2010), p. 772–777.

[23] Divya, T. V., Sivakumara, T. A Modified CAR Routing Method for Delay Tolerant Mobile Ad Hoc Networks. Em: *International Journal of Information Technology and Knowledge Management (JIKM)* (Junho 2010), vol. 2, p. 633–637.

[24] Doria, A., Uden, M., Pandey, D. Providing Connectivity to the Saami Nomadic Community. Em: *Proceedings of the International Conference on Open Collaborative Design for Sustainable Development* (Dezembro 2002), p. 1–8.

[25] Durst, R., Feighery, P., Scott, K. Why not use the Standard Internet Suite for the Interplanetary Internet? Em: Relatório Técnico, The MITRE Corporation (2002), p. 1–13.

[26] Ekman, F., Keränen, A., Karvo, J., Ott, J. Working Day Movement Model. Em: *Proceeding of the ACM SIGMOBILE workshop on Mobility Models* (Maio 2008), p. 33–40.

[27] Fall, K. A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets. Em: Relatório Técnico, Intel Research Berkeley (Fevereiro 2003), p. 1–14.

[28] Fall, K., Hong, W., Madden, S. Custody Transfer for Reliable Delivery in Delay Tolerant Networks. Em: Relatório Técnico, Intel Research Berkeley (Fevereiro 2003), p. 1–6.

[29] Fall, K., Farrel, S. DTN: An Architectural Retrospective. Em: Proceeding of the IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Maio 2008), vol. 26, p. 828–836.

[30] Farrell, S., Cahill, V., Geraghty, D., Humphreys, I., McDonald, P. When TCP breaks: Delay- and disruption- tolerant networking. Em: Proceedings of the IEEE Internet Computing (Julho 2006), vol. 10, p. 72–78.

[31] Guedes, R. M., da Silva, M. W. R., de Rezende, J. F. Escassez de Recursos em Redes Tolerantes a Atrasos e Interrupções. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (Maio 2008), p. 749–762.

[32] Guo, S., Falaki, H., Oliver, E., Rahman, S. U., Seth, A., Zaharia, M., Keshav, S. Very Low-Cost Internet Access Using KioskNet. Em: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (Janeiro 2007), vol. 37, p. 95–100.

[33] Harras, K., Almeroth, K. Inter-Regional Messenger Scheduling in Delay Tolerant Mobile Networks. Em: *Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)* (Junho 2006), p. 93–102.

[34] Harras, K., Almeroth, K., Belding-Royer, E. Delay Tolerant Mobile Networks (DTMNs): Controlled Flooding Schemes in Sparse Mobile Networks. Em: *IFIP Netwoking Conference* (Maio 2005), p. 1180–1192.

[35] Huang, T.-K., Lee, C.-K., Chen, L.-J. Prophet+: An Adaptive Prophet-Based Routing Protocol for Opportunistic Network. Em: *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)* (Abril 2010), p. 112–119.

[36] Jain, S., Fall, K., Patra, R. Routing in a Delay Tolerant Network. Em: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (Agosto 2004), vol. 34, p. 145–158.

[37] Juang, P., Oki, H., Wang, Y., Martonosi, M., Peh, L. S., Rubenstein, D. Energy-Efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with Zebranet. Em: *ACM Special Interest Group on Computer Architecture (SIGARCH)* (Outubro 2002), vol. 30, p. 96–107.

[38] Jubin, J., Tornow, J. The DARPA Packet Radio Network Protocols. Em: *Proceedings of the IEEE* (Janeiro 1987), vol. 75, p. 21–32.

[39] Kalman, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Em: *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering* (1960).

[40] Karvo, J., Ott, J. Time Scales and Delay-Tolerant Routing Protocols. Em: *ACM MobiCom Workshop on Challenged Networks (CHANTS)* (Setembro 2008), p. 33–40.

[41] Keränen, A., Ott, J., Kärkkäinen, T. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. Em: *Proceedings of the International Conference on Simulation Tools and Techniques (Simutools)* (Março 2009), p. 55:1–55:10.

[42] KioskNet. The KioskNet Resource Project. Disponível em: http://blizzard.cs.uwaterloo.ca/tetherless/index.php/KioskNet. Acessado em: (Setembro 2008).

[43] Kotz, D., Henderson, T., Abyzov, I. CRAWDAD trace dartmouth/campus/syslog/01_04 (v. 2004-12-18). Disponível em: http://crawdad.cs.dartmouth.edu/dartmouth/campus/syslog/01_04. Acessado em: (Setembro 2008)

[44] Kotz, D., Henderson, T., Abyzov, I., Yeo, J. CRAWDAD trace set dartmouth/campus/movement (v. 2005-03-08). Disponível em: http://crawdad.cs.dartmouth.edu/dartmouth/campus/movement. Acessado em: (Setembro 2008).

[45] Lakkakorpi, J., Pitkänen, M., Ott, J. Adaptive Routing in Mobile Opportunistic Networks. Em: *Proceedings of the ACM international Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM)* (Outubro 2010), p. 101–109.

[46] Leguay, J., Friedman, T., Conan, V. DTN Routing in a Mobility Pattern Space. Em: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM) - Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN)* (Agosto 2005), p. 276–283.

[47] Lin, C.-S., Chang, W.-S., Chen, L.-J., Chou, C.-F. Performance Study of Routing Schemes in Delay Tolerant Networks. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINAW) - Workshops* (Março 2008), p. 1702–1707.

[48] Lindgren, A., Doria, A., Davies, E., Grasic, S. Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks. Em: Internet Engineering Task Force RFC Draft (Abril 2011).

[49] Lindgren, A., Doria, A., Schelén, O. Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks. Em: *Proceeding of the ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R)* (Julho 2003), vol. 7, p. 19–26.

[50] Liu, C., Wu, J. An Optimal Probabilistic Forwarding Protocol in Delay Tolerant Networks. Em: *Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc)* (Maio 2009), p. 105–114.

[51] Liu, C., Wu, J. Practical Routing in a Cyclic Mobispace. Em: *IEEE/ACM Transactions on Networking* (Abril 2010), vol. 19, p. 369–382.

[52] Liu, T., Sadler, C. M., Zhang, P., Martonosi, M. Implementing Software on Resource-Constrained Mobile Sensors: Experiences with Impala and ZebraNet. Em: *Proceedings of the International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)* (Junho 2004), p. 256–269.

[53] Malkin, G. Routing Information Protocol (RIP). Em: Internet Engineering Task Force RFC Standard 2453 (Novembro 1988).

[54] Mascolo, C., Musolesi, M. SCAR: Context-Aware Adaptive Routing in Delay Tolerant Mobile Sensor Networks. Em: *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)* (Julho 2006), p. 533–538.

[55] McDonald, P., Geraghty, D., Humphreys, I., Farrell, S., Cahill, V. Sensor Network with Delay Tolerance (SeNDT). Em: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)* (Agosto 2007), p. 1333–1338.

[56] Mota, V., Silva, T., Nogueira, J. Introduzindo Tolerância a Interrupção em Redes Adhoc Móveis para Cenários de Emergência. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (Maio 2009), p. 671–684

[57] Musolesi, M., Hailes, S., Mascolo, C. Adaptive Routing for Intermittently Connected Mobile Ad hoc Networks. Em: *Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)* (Junho 2005), p. 183–189.

[58] Musolesi, M., Mascolo, C. CAR: Context-Aware Adaptive Routing for Delay-Tolerant Mobile Networks. Em: *IEEE Transactions on Mobile Computing* (Fevereiro 2009), vol. 8, p. 246–260.

[59] Nelson, S., Bakht, M., Kravets, R. Encounter-Based Routing in DTNs. Em: *Proceedings of the IEEE INFOCOM* (Abril 2009), p. 846–854.

[60] Nunes, C., Dotti, F. Uma Nova Estratégia de Roteamento para Redes Tolerantes a Atrasos. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (Maio 2009), p. 757–770.

[61] Nunes, C., Dotti, F., Oliveira, J. APRP-Group: Roteamento para Redes DTN com Repasse Baseado em Agrupamento de Nodos por Potencial de Entrega. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC10)* (Maio 2010), p. 451–464.

[62] Oliveira, C., Moreira, M., Rubinstein, M., Costa, L., Duarte, O. Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões. Em: *Minicurso do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (Maio 2007), p. 203–256.

[63] Oliveira, E., Albuquerque, C. Análise do protocolo NECTAR em Cenários com Mobilidade e Frequentes Interrupções. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (Maio 2009), p. 771–784.

[64] Oliveira, E., Albuquerque, C. NECTAR: A DTN Routing Protocol Based on Neighborhood Contact History. Em: *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing (SAC)* (Março 2009), p. 359–365.

[65] Oliveira, E., Silva, E., Albuquerque, C. Promovendo Adaptação a Contextos em DTNs. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (Maio 2011), p. 119-132.

[66] Parikh, S., Durst, R. Disruption Tolerant Networking for Marine Corps (CONDOR). Em: *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)* (Outubro 2005), vol. 1, p. 325–330.

[67] Passos, D., Bueno, H., Oliveira, E., Albuquerque, C. Packet Scheduling and Discard Policies for Diffusion Control in Delay and Disruption Tolerant Networks. Em: *Journal of Communication and Information Systems* (Abril 2008). vol. 23, p. 12–21.

[68] Pentland, A., Fletcher, R., Hasson, A. A Road to Universal Broadband Connectivity. Em: *International Conference Open Collaborative Design for Sustainable Innovation* (Dezembro 2002).

[69] Pentland, A., Fletcher, R., Hasson, A. Daknet: Rethinking Connectivity in Developing Nations. Em: *IEEE Computer* (Janeiro 2004), vol. 37, p. 78–83.

[70] Ramanathan, R., Hansen, R., Basu, P., Rosales-Hain, R., Krishnan, R. Prioritized Epidemic Routing for Opportunistic Networks. Em: *Proceedings of the International MobiSys - Workshop on Mobile Opportunistic Networking (MobiOpp)* (Junho 2007), p. 62–66.

[71] Rutishauser, M., Petkov, V., Boice, J., Obraczka, K., Mantey, P., Williams, T., Wilmers, C. Carnivore: A Disruption-Tolerant System for Studying Wildlife. Em: EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (Janeiro 2011), p. 10:1–10:14.

[72] Sandulescu, G., Nadjm-Tehrani, S. Opportunistic DTN Routing with Window-Aware Adaptive Replication. Em: *Proceedings of the Asian Conference on Internet Engineering (AINTEC)* (Fevereiro 2008), p. 103–112.

[73] Sandulescu, G., Nadjm-Tehrani, S. Adding Redundancy to Replication in Window-Aware Delay-Tolerant Routing. Em: *Journal of Communications (JCM)*, (Fevereiro 2010), vol. 5, p. 117–129.

[74] Scott, J., Gass, R., Crowcroft, J., Hui, P., Diot, C., Chaintreau, A. CRAWDAD trace cambridge/haggle/imote/infocom2006 (v. 2009-05-29). Disponível em: http://crawdad.cs.dartmouth.edu/cambridge/haggle/imote/infocom2006. Acessado em: (Maio 2009).

[75] Scott, K., Burleigh, S. Bundle Protocol Specification. Em: Internet Engineering Task Force RFC Experimental 5050 (Novembro 2007).

[76] SeNDT. Sensor Networking with Delay Tolerance (SeNDT). Disponível em: http://down.dsg.cs.tcd.ie/sendt/. Acessado em: (Maio 2009).

[77] Seth, A., Kroeker, D., Zaharia, M., Guo, S., Keshav, S. Low-cost Communication for Rural Internet Kiosks Using Mechanical Backhaul. Em: *Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)* (Setembro 2006), p. 334–345.

[78] Shah, R., Roy, S., Jain, S., Brunette, W. Data Mules: Modeling a Three-tier Architecture for Sparse Sensor Networks. Em: *Proceeding of the IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA)* (Maio 2003), p. 30–41.

[79] Small, T., Haas, Z. Resource and Performance Tradeoffs in Delay Tolerant Networks. Em: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM) - Workshop on Delay Tolerant Networks (WDTN)* (Agosto 2005), p. 260–267.

[80] Sorber, J., Kostadinov, A., Garber, M., Brennan, M., Corner, M. D., Berger, E. D. EON: A Language and Runtime System for Perpetual Systems. Em: *Proceedings of the International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)* (Novembro 2007), p. 161–174.

[81] Spyropoulos, T., Psounis, K., Raghavendra, C. Spray and Wait: an Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks. Em: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM) - Workshop on Delay Tolerant Networks (WDTN)* (Agosto 2005), p. 252–259.

[82] Spyropoulos, T., Psounis, K., Raghavendra, C. Spray and Focus: Efficient Mobility-assisted Routing for Heterogeneous and Correlated Mobility. Em: *Proceedings of the IEEE Pervasive Computing and Communication (PerCom) - Workshop on Intermittently Connected Mobile Ad hoc Networks (ICMAN)* (Março 2007), p. 252–259.

[83] Spyropoulos, T., Psounis, K., Raghavendra, C. S. Efficient Routing in Intermittently Connected Mobile Networks: the Multiple-copy Case. Em: *Proceedings of the IEEE/ACM Transactions on Networking (TON). 16* (Fevereiro 2008), vol. 16, p. 77–90.

[84] Tariq, M. M. B., Ammar, M., Zegura, E. Message Ferry Route Design for Sparse Ad hoc Networks with Mobile Nodes. Em: *Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc)* (Maio 2006), p. 37–48.

[85] Vahdat, A., Becker, D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad hoc Networks. Em: Relatório Técnico CS-200006, Duke University (Abril 2000), p. 1–14.

[86] Wang, Y., Jain, S., Martonosi, M., Fall, K. Erasure-coding Based Routing for Opportunistic Networks. Em: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM) - Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN)* (Agosto 2005), p. 229–236.

[87] Wang, Y., Zhang, P., Liu, T., Sadler, C., Martonosi, M. CRAWDAD trace princeton/zebranet/movement/baseoututm1 (v.2007-02-14). Disponível em: http://crawdad.cs.dartmouth.edu/princeton/zebranet/movement/baseoutUTM1. Acessado em: (Agosto 2008).

[88] Wang, Y., Zhang, P., Liu, T., Sadler, C., Martonosi, M. CRAWDAD trace set princeton/zebranet/movement (v. 2007-02-14). Disponível em: http://crawdad.cs.dartmouth.edu/princeton/zebranet/movement. Acessado em: (Agosto 2008).

[89] Warthman, F. Delay-Tolerant Networks (DTNs): A tutorial v1.1. Disponível em: http://www.dtnrg.org/docs/tutorials/warthman-1.1.pdf. Acessado em: (Maio 2007).

[90] Yuan, Q., Cardei, I., Wu, J. Predict and Relay: an Efficient Routing in Disruption-Tolerant Networks. Em: *Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc)* (Maio 2009), p. 95–104.

[91] ZebraNet. The Zebranet Wildlife Tracker. Disponível em: http://www.princeton.edu/ mrm/zebranet.html. Acessado em: (Fevereiro 2009).

[92] Zhang, P., Sadler, C., Lyon, S., Martonosi, M. Hardware Design Experiences in ZebraNet. Em: *Proceedings of the International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)* (Novembri 2004), p. 227–238.

[93] Zhang, Z. Routing in Intermittently Connected Mobile Ad hoc Networks and Delay Tolerant Networks: Overview and Challenges. Em: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (2006), vol. 8, p. 24–37.

[94] Zhao, W., Ammar, M., Zegura, E. A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad hoc Networks. Em: *Proceedings of the ACM international symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc)* (Maio 2004), p. 187–198.

[95] Zhao, W., Ammar, M., Zegura, E. Controlling the Mobility of Multiple Data Transport Ferries in a Delay-Tolerant Network. Em: *Proceedings of the IEEE INFOCOM* (Março 2005), vol. 2, p. 1407–1418.

APÊNDICE A - Características dos Cenários

As Seções A.1, A.2, A.3, A.4 e A.5 descrevem, respectivamente, os cenários Dartmouth College, UMass DieselNet, Infocom 2006 iMotes, Helsinki WDM e Princeton ZebraNet em detalhes.

A.1 Dartmouth College

O Dartmouth College encontra-se em uma área de $809,3Km^2$ onde foram instalados mais de 500 pontos de acesso distribuídos por cerca de 190 edifícios. Como todos os pontos de acesso compartilham o mesmo SSID (*Service Set Identifier*), os dispositivos móveis sem fio utilizados por alunos e professores são capazes de percorrer praticamente todo o *campus* sem interrupção do sinal de comunicação. Os processos de associação e desassociação aos pontos de acesso de todos os dispositivos móveis sem fio foram registrados e disponibilizados em [43].

A partir do arquivo original, que contém o registro de tempo, o endereço físico do dispositivo móvel e a identificação do ponto de acesso, foi gerado um novo arquivo de movimento, seguindo o padrão estabelecido na Seção 6.1. Visando normalizar as conexões, toda associação de um dispositivo móvel a um ponto de acesso gera um registro de conexão do dispositivo que está se associando com cada dispositivo que se encontra associado ao respectivo ponto de acesso, simulando, dessa forma, uma rede *ad hoc*. Além disso, com objetivo de criar um cenário restrito, a quantidade de dispositivos móveis foi reduzida, criando-se dois cenários distintos com 50 e 100 nós.

A Tabela A.1 apresenta algumas características próprias provenientes dos arquivos de movimento do Cenário Dartmouth com 50 e 100 nós. É necessário destacar que a duração das conexões encontra-se padronizada na unidade de tempo segundo e o experimento foi limitado a um período de 8 horas.

Tabela A.1: Arquivos de movimento - Cenário Dartmouth College

Qtde de nós	Qtde de Registros	Média de Conexões por nó	Qtde de Conexões	Duração Média das Conexões	Duração da Conexão mais longa	Duração da Conexão mais curta
50	336	3,360	168	12,009	2.878,20	22,0
100	1346	6,730	673	11,062	2.878,20	22,0

Nas Figuras A.1(a) e A.1(b) encontra-se representada a função de distribuição acumulada, que será referenciada por CDF (*Cumulative Distribution Function*), da quantidade de conexões em função da duração da conexão, para os arquivos do cenário Dartmouth com, respectivamente, 50 e 100 nós. Cabe ressaltar que os valores estão expressos em termos percentuais. A análise das figuras possibilita a observação de uma distribuição dos valores ao longo do tempo total estabelecido para a simulação.

As Figuras A.1(c) e A.1(d) ilustram a quantidade total de conexões estabelecidas por cada nó. O cenário Dartmouth, independente da quantidade de nós, apresenta um número reduzido de estabelecimento de conexões (ver coluna Qtde de Conexões da Tabela A.1), principalmente considerando-se que o tempo de duração da simulação foi de oito horas. Esse resultado deve-se, provavelmente, ao horário em que os registros de movimento foram coletados, que coincide com a realização de aulas. Nesse período, os alunos tendem a permanecer por várias horas confinados em um mesmo ambiente, reduzindo as oportunidades de estabelecer novas conexões com outros alunos. Além disso, com o intuito de mensurar a variância da quantidade de conexões, foi calculado o percentual do desvio padrão em relação à média de conexões. Essa metodologia possibilita concluir a existência de um comportamento heterogêneo, em função do percentual do desvio padrão alcançar 54,02% da média no cenário com 50 nós e 75,01% no cenário com 100 nós.

Já as Figuras A.1(e) e A.1(f) apresentam a duração acumulada, em segundos, de todas as conexões realizadas por cada nó, para os cenários com 50 e 100 nós respectivamente. A partir da análise das referidas figuras, é possível observar oscilações significativas no tempo de conexão, o que pode ser comprovado pelo percentual do desvio padrão em relação à média ter alcançado 98,85% no cenário com 50 nós e 88,95% no cenário com 100 nós. Em função do horário de coleta dos registros de movimento, o cenário Dartmouth caracteriza-se por apresentar uma quantidade reduzida de conexões, porém de longa duração, conforme pode ser comprovado através da Tabela 6.2.

Por fim, as Figuras A.1(g) e A.1(h) possibilitam que seja mensurada a diversidade de conexões, identificando a quantidade de nós distintos com os quais cada nó estabeleceu ao menos uma conexão. Observa-se um percentual de conectividade reduzido, tendo,

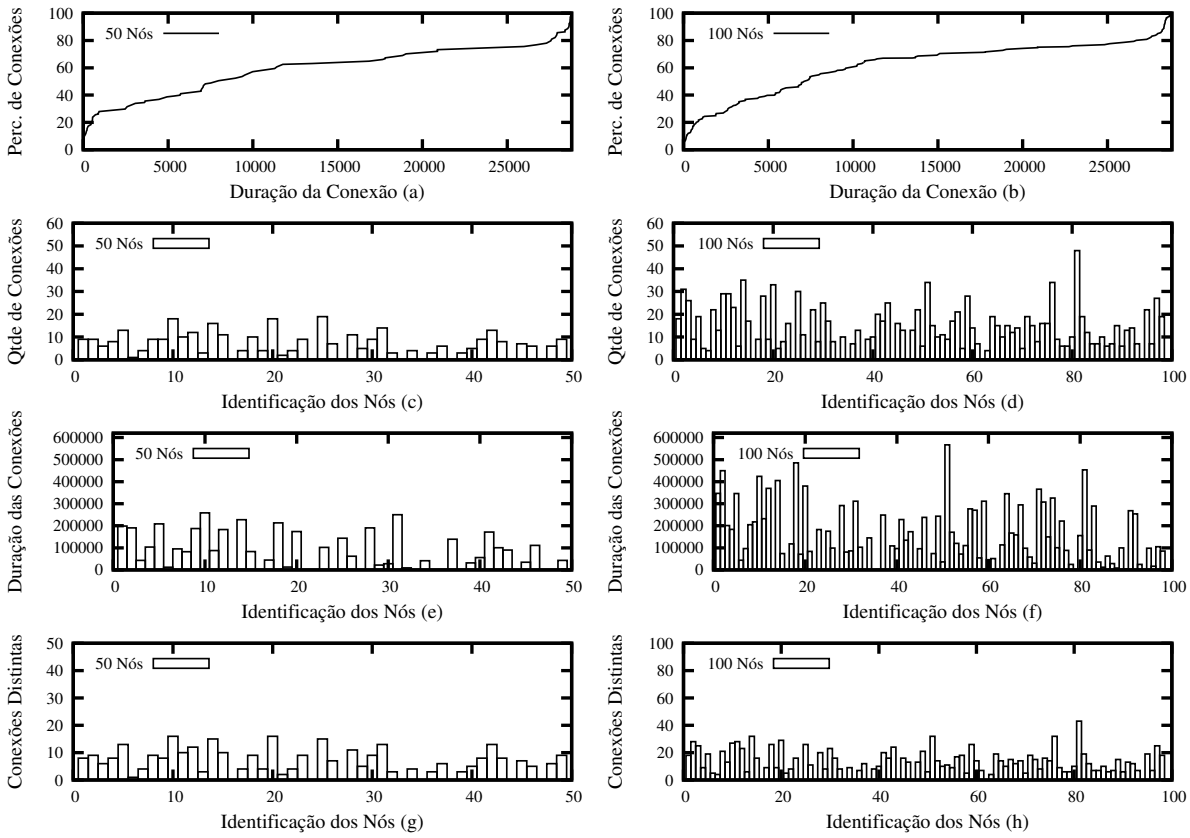

Figura A.1: Avaliação do cenário Dartmouth College

em média, cada nó estabelecido conexão com apenas 13,06% e 12,99% dos demais nós nos cenários com 50 e 100 nós, respectivamente. O exame do arquivo de estatísticas ainda permitiu observar a formação de uma quantidade significativa de regiões desconexas, culminando com a constatação de que 16,0% e 10,0% dos nós, nos cenários com 50 e 100 nós, sequer estabeleceram uma única conexão durante o período de simulação.

A.2 UMass DieselNet

Os registros de movimento do cenário identificado por UMass DieselNet [3, 4] foram extraídos de um experimento real realizado no período de 23 de outubro de 2007 à 09 de novembro de 2007, na cidade de Amherst, nos EUA. O experimento descreve, basicamente, conexões *ad hoc* entre ônibus através do padrão IEEE 802.11b e entre ônibus e estações fixas utilizando rádios de longa distância. Com o intuito de limitar as conexões no cenário, foram extraídos apenas os registros de conexões entre ônibus, sendo descartados os registros de conexões entre ônibus e estações fixas.

Cada registro de conexão informa a identificação dos ônibus envolvidos, o instante

em que a conexão foi estabelecida e a duração da conexão, além de outras informações que não foram aproveitadas. Os registros de movimento foram agrupados em um único arquivo e devidamente tratados, sendo necessário ajustar o instante em que a conexão foi estabelecida em função do registro ser diário. Além disso, para cada registro de movimento foram criados dois registros distintos, um determinando o início de conexão e outro determinando o término da conexão, aderindo ao formato especificado para o arquivo de movimento. A Tabela A.2 apresenta algumas particularidades provenientes dos arquivos de movimento. Cabe destacar que a unidade de tempo relativa à duração das conexões é o segundo e que o experimento foi realizado por um período de 14 dias.

Tabela A.2: Arquivos de movimento - Cenário UMass DieselNet

Qtde de Ônibus	Qtde de Registros	Média de Conexões por Ônibus	Qtde de Conexões	Duração Média das Conexões	Duração da Conexão mais longa	Duração da Conexão mais curta
16	1.340	41,875	670	6,325	134,686	0,500
33	3.638	55,121	1.819	6,660	134,686	0,500

As Figuras A.2(a) e A.2(b) apresentam a CDF da quantidade de conexões, em termos percentuais, em função da duração da conexão para os arquivos do cenário DieselNet com, respectivamente, 16 e 33 ônibus. A análise dos dados comprova que o cenário se caracteriza por apresentar conexões com duração reduzida, já que em cerca de 80% das conexões a duração foi inferior a 10 segundos.

Além disso, é possível identificar que os ônibus não apresentam um comportamento homogêneo em relação à métrica quantidade de conexões. Isso ocorre, possivelmente, devido ao fato de os ônibus percorrerem rotas distintas e, consequentemente, gerando uma discrepância entre o valor mais expressivo e o menos expressivo na quantidade total de conexões superior a 90%. Essa constatação é válida para os cenários com 16 e 33 ônibus, conforme ilustram as Figuras A.2(c) e A.2(d), e é corroborada pelo cálculo da média e do desvio padrão dos valores. No cenário com 16 ônibus, o desvio padrão equivale a 64,87% da média e, no cenário com 33 ônibus, o desvio padrão equivale a 92,10% da média, comprovando a oscilação observada.

As Figuras A.2(e) e A.2(f) apresentam a duração acumulada, em segundos, de todas as conexões realizadas por cada ônibus, para os cenários com 16 e 33 ônibus, respectivamente. Novamente, a rota percorrida por cada ônibus influencia o desempenho, refletindo um resultado semelhante ao expresso pela métrica quantidade de conexões. Em função de particularidades como velocidade de deslocamento e oportunidade de contato, o cenário DieselNet caracteriza-se por exibir a menor duração acumulada entre os cenários

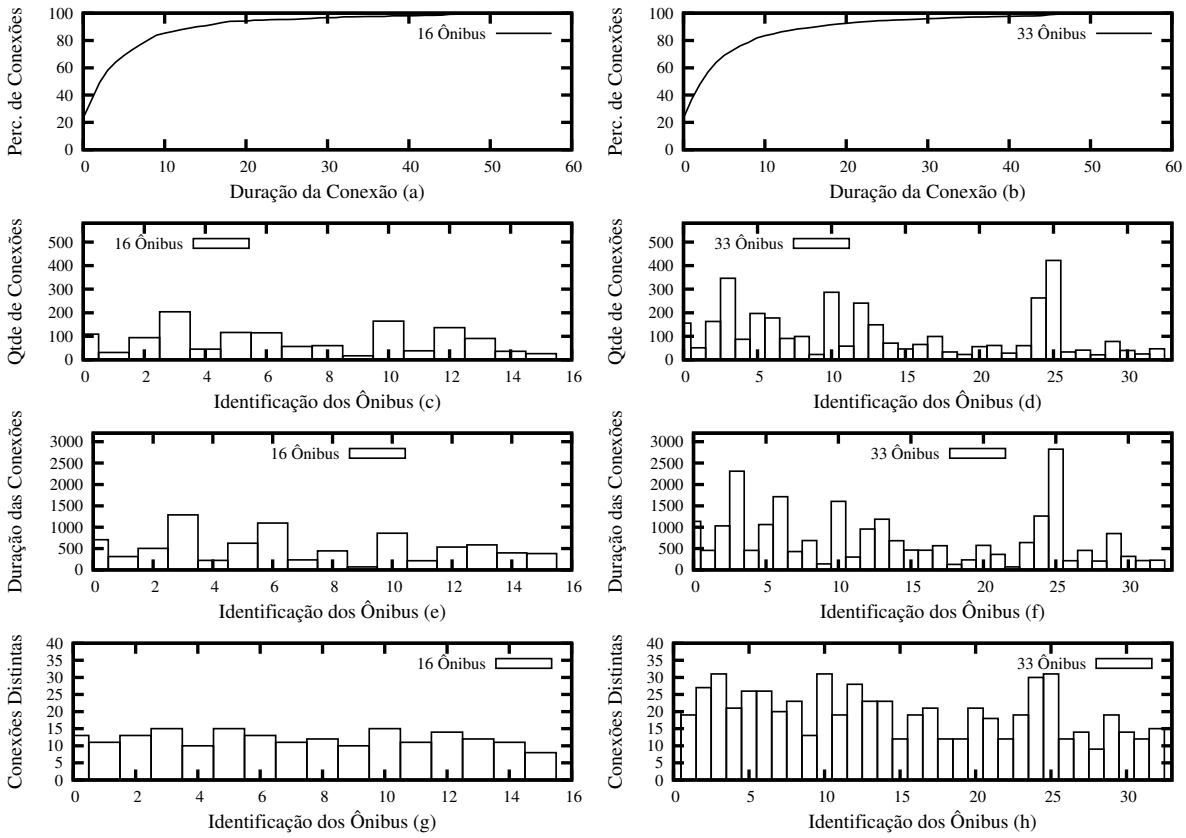

Figura A.2: Avaliação do cenário UMass DieselNet

selecionados.

As Figuras A.2(g) e A.2(h) possibilitam que seja mensurada a diversidade de conexões para os referidos cenários. Diferentemente das constatações anteriores, a análise dos resultados indica que uma parcela expressiva dos ônibus teve oportunidade de estabelecer conexão com a maioria dos demais ônibus presentes nos respectivos cenários. O estudo do desvio padrão estima que, para o cenário com 16 ônibus, cada um estabeleceu conexões com [10,14] ônibus distintos e, no cenário com 33 ônibus, cada ônibus estabeleceu conexões com [13,26] ônibus distintos. Essa diversidade pode ser comprovada através da construção de uma matriz de conexões, o que possibilitou a identificação do estabelecimento de 80,83% e 61,74% de conexões distintas nos cenários com, respectivamente, 16 e 33 ônibus.

A partir da análise de todas as informações coletadas é possível concluir que o cenário DielselNet se caracteriza por apresentar contatos com duração reduzida, e uma oscilação significativa na quantidade e na duração das conexões. Entretanto, é importante destacar o estabelecimento de conexões com uma parcela expressiva do conjunto de ônibus presente no cenário.

A.3 Infocom 2006 iMotes

Durante o congresso Infocom 2006, Scott *et al.* [74] realizaram um experimento, por um período de quatro dias, cujo objetivo era rastrear a ocorrência de contatos entre dispositivos móveis e entre dispositivos móveis e dispositivos fixos. O experimento fez uso de 98 dispositivos de comunicação, identificados por *iMotes*, que foram numerados e distribuídos da seguinte forma:

- *iMotes* numerados de 1 a 17 foram fixados em pontos específicos da área da conferência;
- *iMotes* numerados de 18 a 20 foram posicionados dentro de três elevadores;
- *iMotes* numerados de 21 a 98 foram distribuídos para participantes do *Infocom student workshop*.

É importante destacar que o raio de alcance dos *iMotes* numerados de 21 a 98 era de 30 metros, e que os *iMotes* numerados de 1 a 20 dispunham de bateria com maior capacidade de armazenamento de energia e raio de alcance de 100 metros. Independente do posicionamento, os *iMotes* foram configurados para armazenar o registro de tempo de início e término das conexões, possibilitando o processamento das informações e a criação de um arquivo único com todas as conexões realizadas, inclusive com conexões externas ao experimento. Dessa forma, a partir do arquivo original foram gerados dois arquivos com registros de conexões provenientes de 50 e de 98 dispositivos. Já as conexões externas foram excluídas de ambos arquivos.

A Tabela A.3 apresenta algumas características extraídas dos arquivos de movimento com 50 e 98 *iMotes*, considerando que a unidade de tempo pertinente à duração das conexões é o segundo e que o tempo total de duração do experimento foi de 4 dias.

Tabela A.3: Arquivos de movimento - Cenário Infocom 2006 iMotes

Qtde de *iMotes*	Qtde de Registros	Média de Conexões por *iMotes*	Qtde de Conexões	Duração Média das Conexões	Duração da Conexão mais longa	Duração da Conexão mais curta
50	37.164	371,640	18.582	248,740	20.854,000	0,992
98	161.790	825,459	80.895	158,654	29.530,000	0,992

Visto que os gráficos que ilustram os resultados seguem um padrão único, as mesmas considerações redigidas nas Seções A.1 e A.2 aplicam-se a esta seção, assim como às Seções

A.4 e A.5. É importante, no entanto, ressaltar que a escala representativa dos gráficos será adequada em função das particularidades de cada cenário.

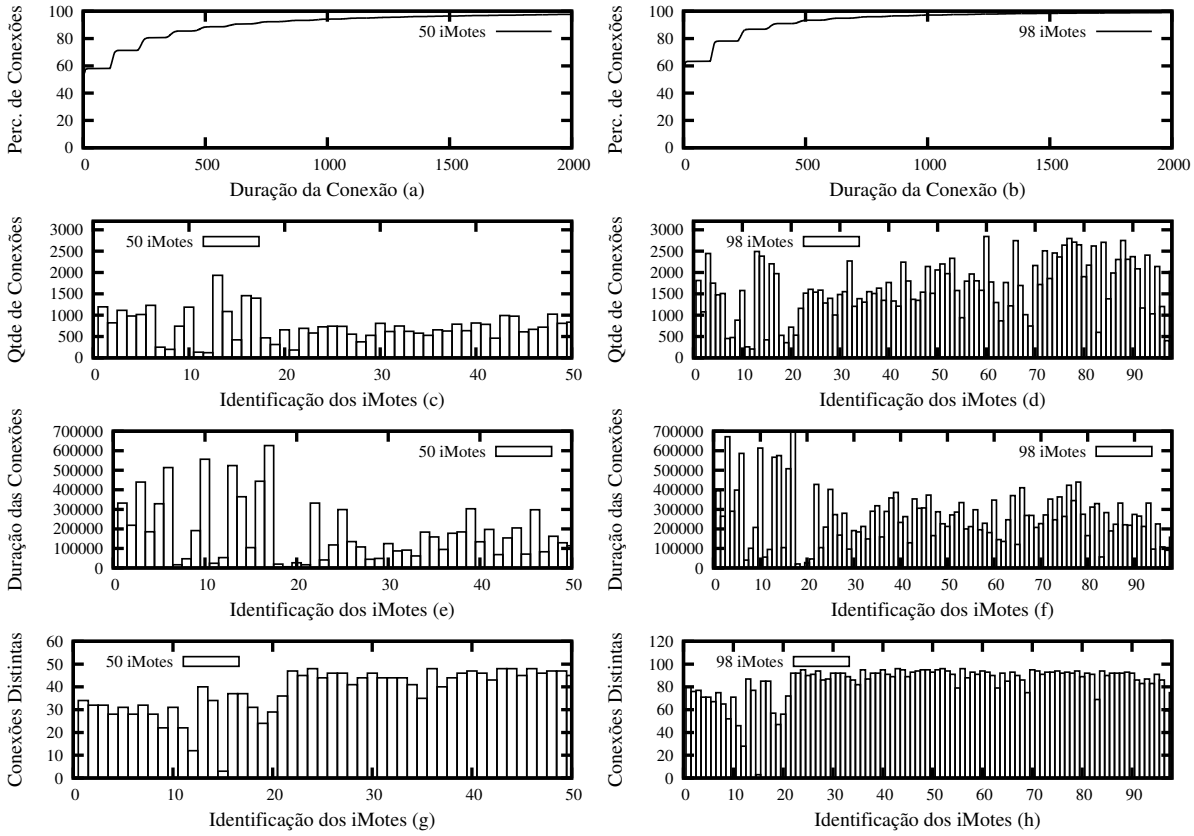

Figura A.3: Avaliação do cenário Infocom 2006 iMotes

A análise das informações extraídas do cenário *iMotes* possibilita a redação de algumas características particulares. As Figuras A.3(a) e A.3(b) registram que os encontros ocasionais dos participantes, procedentes, possivelmente, de deslocamentos, representam uma parcela significativa da quantidade total de conexões. Assumindo-se que esses encontros ocasionais possuem duração de até cinco segundos, eles seriam responsáveis por cerca de 54,87% e 60,53% das conexões estabelecidas nos cenários com 50 e 98 *iMotes*, respectivamente.

Em função da área limitada e da conduta dos participantes do congresso, que tendem a direcionar-se para pontos de interesse compartilhados, observa-se que os dispositivos numerados de 21 em diante exibem um comportamento mais homogêneo que o apresentado pelos cenários Dartmouth e DieselNet em relação à métrica quantidade de conexões, que se encontra ilustrada através das Figuras A.3(c) e A.3(d). Como consequência, o cálculo do desvio padrão do cenário *iMotes* resultou em valores inferiores se comparados aos valores obtidos para os cenários anteriores. A medida de dispersão, representada pelo desvio padrão, equivale a 47,39% da média para o cenário com 50 *iMotes* e 40,12% da

média para o cenário 98 *iMotes*. Além disso, as Figuras A.3(e) e A.3(f) possibilitam a observação da influência do raio de alcance. No cenário com 50 *iMotes*, o desempenho obtido pelos *iMotes* com raio de alcance de cerca de 100 metros, que foram numerados de 1 a 20, foi 43,92% superior ao desempenho dos demais *iMotes*, cujo raio de alcance foi limitado a 30 metros. A mesma constatação é válida para o cenário com 98 *iMotes*.

O compartilhamento de interesse entre os participantes foi determinante para a alta diversidade de conexões observada, conforme ilustram as Figuras A.3(g) e A.3(h). No cenário limitado a 50 *iMotes*, a média da matriz de conexões alcançou 77,79% das conexões possíveis e, no cenário com 98 *iMotes*, a média foi de 86,95%.

A.4 Helsinki WDM

O cenário identificado por Helsinki WDM foi criado artificialmente e retrata, baseado no modelo WDM (*Working Day Movement Model*) [26], o deslocamento de nós de acordo com um mapa da área central da cidade de Helsinki, na Finlândia. Para esse cenário foram gerados quatro arquivos de movimento, variando-se a quantidade de nós em 75 e 150, e o raio de alcance em 150 e 250 metros. O padrão de mobilidade tenciona representar o comportamento de pedestres, carros e ônibus, com uma distribuição quantitativa na proporção de, respectivamente, 50%, 30% e 20% do total de nós de cada cenário.

Na Tabela A.4 é possível identificar propriedades oriundas dos arquivos de movimento. As informações relativas à duração da conexões encontram-se padronizadas na unidade de tempo segundo e a duração total do experimento foi limitada em 6 horas.

Tabela A.4: Arquivos de movimento - Helsinki WDM

Qtde de nós	Raio de Alcance	Qtde de Registros	Média de Conexões por nó	Qtde de Conexões	Duração Média das Conexões	Duração da Conexão mais longa	Duração da Conexão mais curta
75	150	38,640	128,800	19.320	42,283	1.873,000	0,500
	250	57,358	191,193	28.679	68,982	2.269,000	0,500
150	150	155,354	517,846	77.677	43,423	3.126,500	0,500
	250	227,648	758,826	113.824	70,568	3.823.500	0,500

Como o arquivo de movimento com 75 nós apresenta um comportamento semelhante ao arquivo de movimento com 150 nós, é razoável produzir comentários e análises para apenas um dos arquivos, evitando, consequentemente, a exposição de informações redundantes e desnecessárias. Os comentários a seguir referem-se ao cenário com 150 nós.

Como a velocidade de deslocamento dos veículos motorizados é superior à velocidade

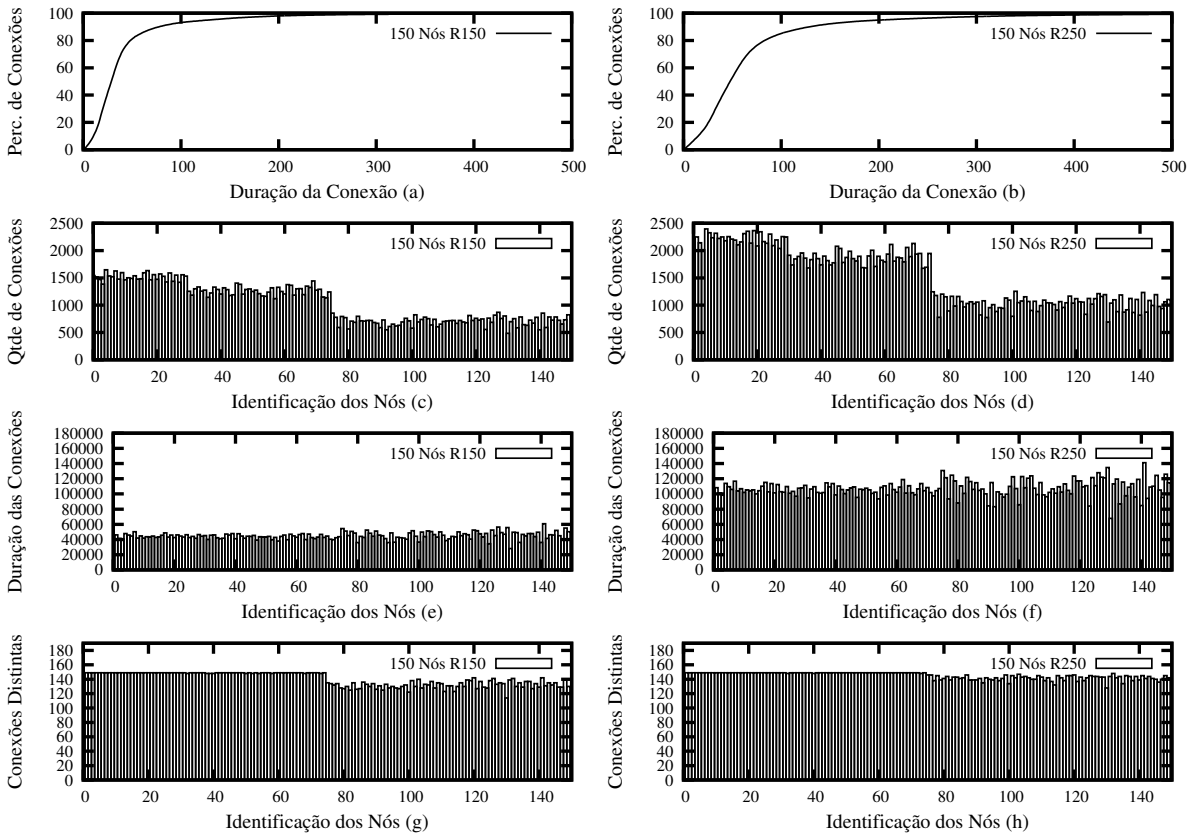

Figura A.4: Avaliação do cenário Helsinki WDM

dos pedestres, existe uma tendência para que as conexões no cenário WDM apresentem duração reduzida, conforme pode ser observado nas Figuras A.4(a) e A.4(b). A ocorrência constante de estabelecimento e término de conexões no cenário WDM, ratificada pela Tabela 6.2, levou a uma alta frequência de conexões com duração reduzida, de tal forma que em 80,43% das conexões a duração manteve-se abaixo dos 50 segundos para o cenário com raio de 150 metros, e em 80,33% das conexões a duração manteve-se abaixo dos 84 segundos para o cenário com raio de 250 metros.

Na realidade, o padrão de mobilidade influencia todas as demais métricas analisadas. No caso da quantidade total de conexões estabelecidas por cada nó, é possível observar nas Figuras A.4(c) e A.4(d) que os nós numerados de 1 a 30 (20% do total de nós) identificam os ônibus, que os nós numerados de 31 a 75 (30% do total de nós) representam os carros, e os demais nós, numerados de 76 a 150, retratam os pedestres (50% do total de nós). Como os ônibus tendem a percorrer distâncias superiores às percorridas por carros e por pedestres, cabe aos ônibus a maior quantidade de conexões.

No cenário WDM, o percentual do desvio padrão da duração acumulada dos contatos, calculado em função média, apresentou os menores valores, se comparados com os valores

obtidos para essa mesma métrica nos demais cenários, sendo responsável por apenas 10,04% no cenário com raio de alcance limitado a 150 metros e a 9,67% no cenário com raio de alcance de 250 metros. As Figuras A.4(e) e A.4(f) ilustram o desempenho comentado, demonstrando uma uniformidade na distribuição dos valores.

Já em relação ao percentual de conectividade, apresentado nas Figuras A.4(g) e A.4(h), é possível identificar que os nós motorizados (ônibus e carros) estabeleceram conexões ao longo do cenário com todos os demais nós. Esse fato implicou o menor desvio padrão entre todos os cenários avaliados, equivalendo a 6,60% e 3,14% para os cenários com raio de alcance de 150 metros e 250 metros, respectivamente. Ademais, conforme destaca a Tabela 6.2, o cenário WDM apresentou o maior grau de conectividade entre todos os cenários selecionados, com valores superiores a 94%.

A.5 Princeton ZebraNet

O projeto Princeton ZebraNet [37, 92, 52, 91] caracteriza-se por apresentar uma visão multidisciplinar, objetivando, sob a ótica das Ciências Biológicas, desenvolver novos estudos sobre o processo de migração e das relações entre diferentes espécies de animais e, sob a ótica da Computação, analisar o comportamento de sistemas de computação e comunicação cientes do posicionamento e do consumo próprio de energia. Essa proposta resultou em dois experimentos reais que foram implementados com a finalidade de monitorar o comportamento de zebras na reserva *Sweetwaters Game Reserve*, localizada no Quênia.

Os animais receberam colares equipados com sensores sem fio e com sistema de posicionamento global que possibilitavam a coleta, o armazenamento e o envio de informações para uma estação base que se movimentava esporadicamente ao longo da reserva. Com intuito de preservar a maior quantidade de dados coletados, os colares também eram capazes de transmitir informações entre si, salto a salto, aumentando a probabilidade de os dados alcançarem a estação base.

O primeiro experimento, realizado no ano de 2004, contou com um total de sete zebras e o segundo, realizado no ano de 2005, com quatro zebras. Como os registros de movimento provenientes do primeiro experimento [87] contêm dados resumidos, os pesquisadores disponibilizaram um programa que permitiu a criação de arquivos com registros de movimento de 30 e 40 zebras com duração de 45 minutos. O fato de os registros indicarem o posicionamento global das zebras possibilitou a variação do raio de

alcance dos colares e a consequente geração de arquivos com registros de início e término de conexão, no formato do arquivo de movimento especificado. A Tabela A.5 apresenta algumas características extraídas desses arquivos de movimento. A unidade de tempo pertinente à duração das conexões é o segundo e que tempo total de duração foi de 45 minutos.

Tabela A.5: Arquivos de movimento - Princeton ZebraNet

Qtde de Zebras	Raio de Alcance	Qtde de Registros	Média de Conexões por zebra	Qtde de Conexões	Duração Média das Conexões	Duração da Conexão mais longa	Duração da Conexão mais curta
30	150	824	13,733	412	180,367	2.699,5	0,500
	250	1.278	21,299	639	281,465	2.699,5	0,500
40	150	1.186	14,825	593	213,615	2.699,5	0,500
	250	1.758	21,975	879	350,315	2.699,5	0,500

Em função do comportamento análogo ao registrado nos arquivos de movimento com 30 e 40 zebras, torna-se coerente efetuar a análise e tecer comentários exclusivamente acerca de um único arquivo de movimento, seguindo o mesmo padrão adotado na Seção A.4. O cenário selecionado foi o cenário com 40 zebras.

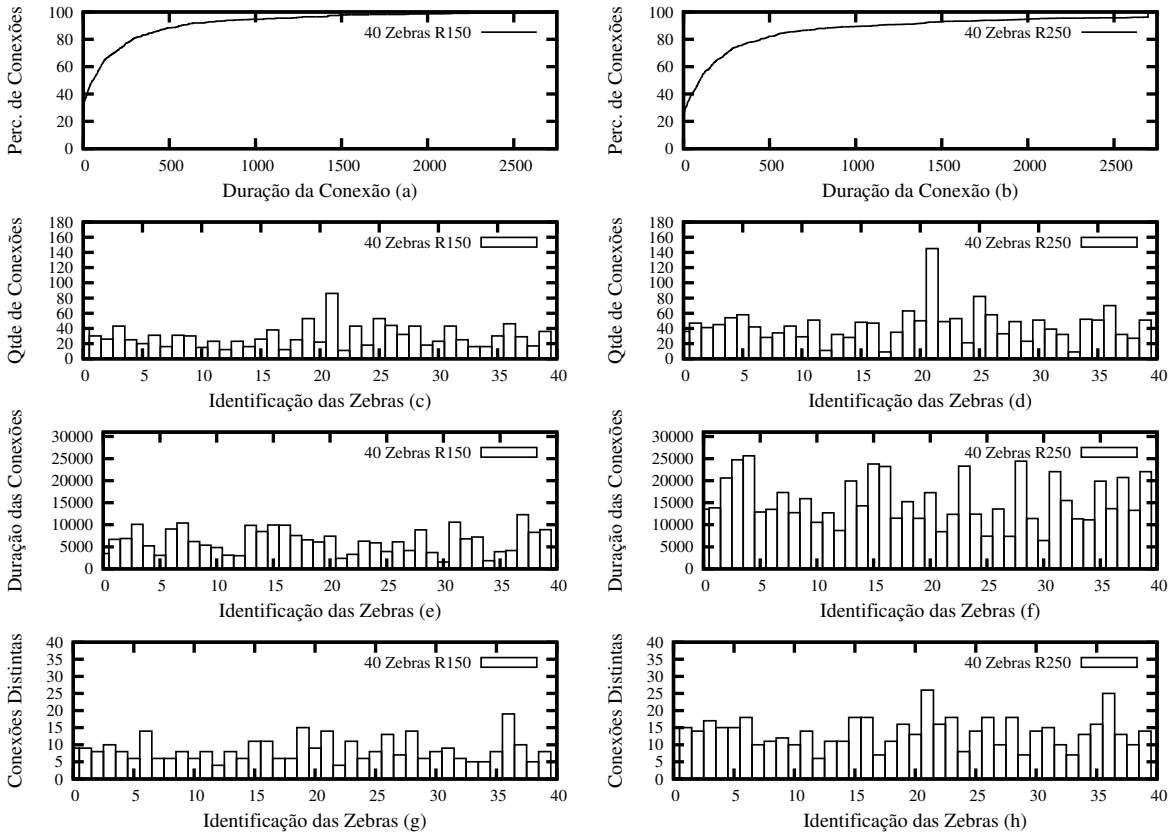

Figura A.5: Avaliação do cenário Princeton ZebraNet

A simples comparação de alguns dados dos cenários ZebraNet com, por exemplo, o

cenário DieselNet possibilita o contraste de características importantes. O comportamento típico de zebras conduz à formação de manadas, o que implica que alguns membros permanecem em contato por longos períodos. Como consequência, a duração média das conexões no cenário ZebraNet foi, aproximadamente, 3.942% superior à duração média do cenário DieselNet. Além disso, em cerca de 80% das conexões do cenário com 40 zebras a duração das conexões esteve entre 0,5 e 366 segundos. As Figuras A.5(a) e A.5(b) apresentam a CDF da quantidade de conexões em função da duração da conexão para o arquivo de movimento com 40 zebras e com raio de alcance limitado a, respectivamente, 150 e 250 metros.

Em relação à métrica quantidade total de conexões, o cenário ZebraNet expressa um comportamento mais homogêneo que o apresentado pelo cenário DieselNet, porém com valores absolutos inferiores devido à longa duração das conexões. Essa constatação é fundamentada pela comparação do percentual do desvio padrão em relação à média que equivale a, respectivamente, 49,55% e 51,5% nos cenários com raio de alcance de 150 metros e 250 metros. As Figuras A.5(c) e A.5(d) ilustram a distribuição da quantidade total de conexões por zebra para os cenários com raio de alcance de 150 e 250 metros.

O estudo da duração acumulada em segundos de todas as conexões realizadas por cada zebra indica, também, uma maior homogeneidade se comparada com o cenário DieselNet, com o desvio padrão alcançando 43,48% e de 34,91% da média para os cenários com raio de alcance de 150 e 250 metros. Esse comportamento pode ser relativo à formação de pequenas manadas que, em função do raio de alcance, possibilita que as zebras de cada manada mantenham-se em contato por um longo período. Ademais, as Figuras A.5(e) e A.5(f) permitem a observação da influência do raio de alcance em relação à duração acumulada de conexões, de forma que o cenário com raio de alcance de 250 metros apresentou um valor médio 63,99% superior ao valor computado para o cenário com 150 metros. Já a análise das Figuras A.5(g) e A.5(h) reforça a conjectura de formação de pequenas manadas de zebras, uma vez que a matriz de conexões identificou o estabelecimento de apenas 21,79% e 34,87% de conexões distintas nos cenários com raio de alcance de, respectivamente, 150 e 250 metros.

Com base nas observações relatadas, é factível deduzir que o cenário ZebraNet apresenta um padrão de movimentação que favorece o estabelecimento de conexões com longa duração, acusa oscilações na quantidade e na duração das conexões e, em função da formação de grupos, revela um percentual limitado de conexões distintas.

APÊNDICE B – Lista de Publicações

1. **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; SILVA, Edelberto; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. Promovendo Adaptação a Contextos em DTNs. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, (Maio 2011), p.119–132.

2. **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. Análise do Protocolo NECTAR em Cenários com Mobilidade e Frequentes Interrupções. Em: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, (Maio 2009), p.771–784.

3. **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. NECTAR: A DTN Routing Protocol Based on Neighborhood Contact History. Em: *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing (SAC)*, (Março 2009), p.359–365.

4. PASSOS, Diego Gimenez; Henrique Bueno; **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. Packet Scheduling and Discard Policies for Diffusion Control in Delay and Disruption Tolerant Networks. Em: *Journal of Communication and Information Systems*, (Abril 2008), vol. 23, p.12–21.

5. Jairo Lino Duarte; PASSOS, Diego Gimenez; Rafael Valle; **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; SAADE, Débora; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. Management Issues on Wireless Mesh Networks. Em: *Latin American Network Operations and Management Symposium (LANOMS)*, (Setembro 2007), p.8–19.

6. **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. Avaliação de Protocolos de Roteamento para Redes Ad hoc e RSSF Aplicados à TV Digital Interativa. Em: *Conferência Latinoamericana de Informática (CLEI)*, (Outubro 2007).

7. **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. PlanetLab: Um Laboratório Virtual para Desenvolvimento de Novas Aplicações para a Internet. Em: *International Conference on Engineering and Computer Education (ICECE)*, (Março 2007).

8. Cloves Seidel; MACEDO, Fernando; **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**. Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) para Engenharia Ambiental. Em: *International Conference on Engineering and Computer Education (ICECE)*, (Março 2007).

9. **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. TV Interativa: Uma Alternativa para o Processo de Aprendizagem. Em: *World Congress on Computer Science, Engineering and Technology Education (WCCSETE)*, (Março 2006).

10. ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de; PROENÇA, Tiago; **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**. TV sobre IP - Arquiteturas para Transmissão em Larga Escala. Em: *Minicurso do XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, (Maio 2006).

11. **OLIVEIRA, Etienne César Ribeiro de**; ALBUQUERQUE, Célio Vinicius Neves de. TV Digital Interativa - Padrões para uma Nova Era. Em: *Minicurso da V Escola Regional de Informática RJ/ES (ERI)*, (Novembro 2005).