

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

ANA CRISTINA BARREIRAS KOCHER VENDRAMIN

**CULTURAL GRANT: UM PROTOCOLO DE
ROTEAMENTO BASEADO EM INTELIGÊNCIA COLETIVA
PARA REDES TOLERANTES A ATRASOS**

TESE

CURITIBA

2012

ANA CRISTINA BARREIRAS KOCHER VENDRAMIN

**CULTURAL GRANT: UM PROTOCOLO DE
ROTEAMENTO BASEADO EM INTELIGÊNCIA COLETIVA
PARA REDES TOLERANTES A ATRASOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências”.

Área de Concentração: Engenharia da Computação.

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

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Myriam Regattieri
De Biase da Silva Delgado

CURITIBA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

- V453 Vendramin, Ana Cristina Barreiras Kochem
Cultural GrAnt: um protocolo de roteamento baseado em inteligência coletiva para redes tolerantes a atrasos / Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin. — 2012.
195 p. : il. ; 30 cm
- Orientadora: Anelise Munaretto Fonseca.
Coorientadora: Myriam Regattieri De Biase da Silva Delgado.
Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2012.
Bibliografia: p. 185-195.
1. Redes de computação – Protocolos. 2. Roteadores (Redes de computação). 3. Redes ad hoc (Redes de computadores). 4. Tolerância a falha (Computação). 5. Inteligência coletiva. 6. Otimização matemática. 7. Algoritmos de formigas. 8. Engenharia elétrica – Teses. I. Fonseca, Anelise Munaretto, orient. II. Delgado, Myriam Regattieri De Biase da Silva, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

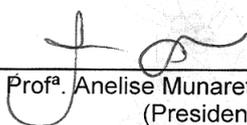
Título da Tese Nº. 75

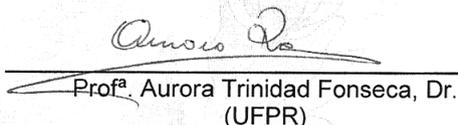
“Cultural Grant: Um Protocolo de Roteamento baseado em Inteligência Coletiva para Redes Tolerantes a Atrasos”

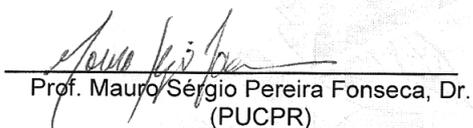
por

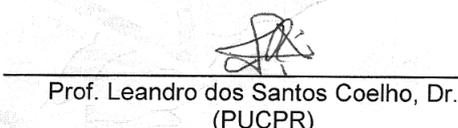
Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin

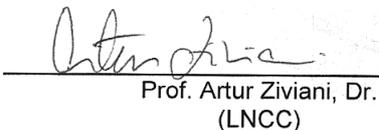
Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em CIÊNCIAS - Área de Concentração: Engenharia de Computação, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Curitiba, às 08h30min do dia 06 de junho de 2012. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

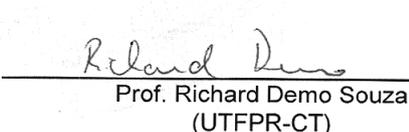

Prof^a. Anelise Munaretto Fonseca, Dr.
(Presidente)


Prof^a. Aurora Trinidad Fonseca, Dr.
(UFPR)


Prof. Mauro Sérgio Pereira Fonseca, Dr.
(PUCPR)


Prof. Leandro dos Santos Coelho, Dr.
(PUCPR)


Prof. Artur Ziviani, Dr.
(LNCC)


Prof. Richard Demo Souza
(UTFPR-CT)

Visto da Coordenação:


Prof. Ricardo Lúders, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar todos os dias da minha vida.

Ao meu marido Joelson Vendramin, ao meu filho Marco Antônio, aos meus pais Lúcia e Antônio e à minha irmã Vera, aos quais devo toda a minha vida, pelo grande carinho e apoio. À minha sogra Inês por ajudar a cuidar do meu filho durante o desenvolvimento desta tese.

Às professoras Anelise Munaretto Fonseca e Myriam Regattieri Delgado, pela paciência, dedicação e profissionalismo na orientação desta tese.

À pesquisadora Aline Carneiro Viana do INRIA Saclay pelas inúmeras sugestões oferecidas para aprimoramento desta tese.

A todos os professores-colegas do Departamento Acadêmico de Informática (DAINF), pela convivência e momentos de descontração.

E a todos que de alguma forma contribuíram com esta tese.

RESUMO

VENDRAMIN, Ana Cristina. CULTURAL GRANT: UM PROTOCOLO DE ROTEAMENTO BASEADO EM INTELIGÊNCIA COLETIVA PARA REDES TOLERANTES A ATRASOS. 195 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Esta tese apresenta um novo protocolo de roteamento voltado para as Redes Tolerantes a Atrasos que exibem comportamentos complexos e dinâmicos. O protocolo proposto chama-se Cultural GrAnt (do inglês *Cultural Greedy Ant*) uma vez que este utiliza um sistema híbrido composto por um Algoritmo Cultural (AC) e uma versão gulosa da metaheurística de Otimização por Colônia de Formigas (ACO). No Cultural GrAnt, o ACO representa o espaço populacional de um AC e utiliza uma regra de transição gulosa de modo a intensificar bons caminhos já encontrados ou explorar novos caminhos através da seleção, dentre um conjunto de candidatos, dos nós encaminhadores de mensagens mais promissores. A principal motivação para o uso do ACO é tirar proveito da sua busca baseada em população de indivíduos e da adaptação da sua estrutura de aprendizado. O AC obtém informações durante o processo evolucionário e as utiliza para guiar a população e, então, acelerar o aprendizado enquanto provê soluções mais eficientes. Considerando informações de funções heurísticas, concentração de feromônio e conhecimentos armazenados no espaço de crenças do AC, o protocolo Cultural GrAnt inclui três módulos: roteamento; escalonamento; e gerenciamento de *buffer*. Esse é o primeiro protocolo de roteamento que emprega ACO e AC de modo a: inferir os melhores encaminhadores de mensagens através de informações oportunistas sobre a conectividade social entre os nós; determinar os melhores caminhos que uma mensagem deve seguir para eventualmente alcançar o seu destino final, enquanto limita o número de replicações e descartes de mensagens na rede; determinar a ordem de escalonamento das mensagens; e gerenciar o espaço de armazenamento do *buffer* dos nós. O protocolo Cultural GrAnt é comparado com os protocolos Epidêmico e PROPHET em dois cenários de mobilidade distintos: um modelo de movimento baseado em atividades, onde simula-se o dia-a-dia de pessoas em suas atividades de trabalho, lazer e descanso; e um modelo de movimento baseado em comunidades de pessoas. Os resultados de simulações obtidos através do simulador ONE mostram que em ambos os cenários, o protocolo Cultural GrAnt alcança uma taxa mais alta de entrega de mensagens, uma replicação menor de mensagens e um número menor de mensagens descartadas se comparado com os protocolos Epidêmico e PROPHET.

Palavras-chave: Redes Tolerantes a Atrasos. Redes Ad-hoc Oportunísticas. Protocolo de Roteamento. Métricas Sociais. Otimização por Colônia de Formigas. Algoritmos Culturais.

ABSTRACT

VENDRAMIN, Ana Cristina. CULTURAL GRANT: A ROUTING PROTOCOL BASED ON SWARM INTELLIGENCE FOR DELAY TOLERANT NETWORKS. 195 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

This work presents a new routing protocol for complex and dynamic Delay Tolerant Networks (DTN). The proposed protocol is called Cultural GrAnt (Greedy Ant), as it uses a hybrid system composed of a Cultural Algorithm and a greedy version of the Ant Colony Optimization (ACO) metaheuristic. In Cultural GrAnt, ACO represents the population space of the cultural algorithm and uses a greedy transition rule to either exploit previously found good paths or explore new paths by selecting, among a set of candidates, the most promising message forwarders. The main motivation for using ACO is to take advantage of its population-based search and adaptive learning framework. Conversely, CA gathers information during the evolutionary process and uses it to guide the population and thus accelerate learning while providing more efficient solutions. Considering information from heuristic functions, pheromone concentration, and knowledge stored in the CA belief space, the Cultural GrAnt protocol includes three modules: routing, scheduling, and buffer management. To the best of our knowledge, this is the first routing protocol that employs both ACO and CA to infer the best message forwarders using opportunistic information about social connectivity between nodes, determine the best paths a message must follow to eventually reach its destination while limiting message replications and droppings, and perform message transmission scheduling and buffer space management. Cultural GrAnt is compared to the Epidemic and PROPHET protocols in two different mobility scenarios: an activity-based movement model, which simulates the daily lives of people in their work, leisure and rest activities; and a community-based movement model. Simulation results obtained by the ONE simulator show that, in both scenarios, Cultural GrAnt achieves a higher delivery ratio, lower message replication, and fewer dropped messages than Epidemic and PROPHET.

Keywords: Delay Tolerant Networks. Opportunistic Ad-hoc Networks. Routing Protocol. Social Metrics. Ant Colony Optimization. Cultural Algorithms.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	–	Transferência de Custódia de Mensagens.	32
FIGURA 2	–	Pilha de Protocolos de uma DTN.	33
FIGURA 3	–	Nomes de Nós e Regiões DTN.	35
FIGURA 4	–	Pontos de Extremidade DTN.	35
FIGURA 5	–	Ciclo Básico de um Algoritmo Cultural.	61
FIGURA 6	–	Representação do Conhecimento Normativo	63
FIGURA 7	–	Representação do Conhecimento Topográfico	65
FIGURA 8	–	Representação do Conhecimento Situacional	66
FIGURA 9	–	Representação do Conhecimento Histórico.	67
FIGURA 10	–	Classificação de algoritmos de ACO.	86
FIGURA 11	–	Espaços de Crenças Distribuídos.	106
FIGURA 12	–	Espaço de Crenças: Interação com o Espaço Populacional.	106
FIGURA 13	–	Modos de Busca do Protocolo Cultural GrAnt.	107
FIGURA 14	–	Funcionamento Geral do Protocolo Cultural GrAnt	108
FIGURA 15	–	Mapeamento das Métricas nos Espaços Populacional e de Crenças.	115
FIGURA 16	–	Conhecimento de Domínio do Cultural GrAnt.	119
FIGURA 17	–	Conhecimento Histórico do Cultural GrAnt.	121
FIGURA 18	–	Conhecimento Situacional do Cultural GrAnt.	123
FIGURA 19	–	Fluxo de Execução de um Agente de Formiga no Cultural GrAnt.	127
FIGURA 20	–	Teste ANOVA para Análise da Taxa de Evaporação de Feromônio.	147
FIGURA 21	–	Teste ANOVA para Análise da Função Heurística.	148
FIGURA 22	–	Teste ANOVA para Análise da Concentração de Feromônio.	149
FIGURA 23	–	Teste ANOVA para Análise da Utilidade dos Nós.	150
FIGURA 24	–	Teste ANOVA para Análise da Importância das Mensagens.	152
FIGURA 25	–	Mensagens Entregues em relação ao Tamanho do <i>Buffer</i>	158
FIGURA 26	–	Mensagens Replicadas em relação ao Tamanho do <i>Buffer</i>	159
FIGURA 27	–	Mensagens Descartadas em relação ao Tamanho do <i>Buffer</i>	161
FIGURA 28	–	Atraso de Entrega de Mensagens em relação ao Tamanho do <i>Buffer</i>	163
FIGURA 29	–	Mensagens Entregues em relação ao TTL das Mensagens	165
FIGURA 30	–	Mensagens Replicadas em relação ao TTL das Mensagens	167
FIGURA 31	–	Mensagens Descartadas em relação ao TTL das Mensagens	168
FIGURA 32	–	Atraso de Entrega de Mensagens em relação ao TTL das Mensagens	169
FIGURA 33	–	Custo de Armazenamento em diferentes Tempos de Simulação	176

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Comparação de Abordagens Relacionadas ao Cultural GrAnt	.....	103
TABELA 2	–	Probabilidades de Seleção de Destino	.....	142
TABELA 3	–	Alocação de Nós no Cenário WD	.....	143
TABELA 4	–	Parâmetros Utilizados nas Simulações	.....	145
TABELA 5	–	Análise Aditiva dos Componentes do Protocolo Cultural GrAnt	..	154
TABELA 6	–	Análise Eliminatória dos Componentes do Protocolo Cultural GrAnt		156
TABELA 7	–	Ganho de Desempenho dos Protocolos em um <i>Buffer</i> de 260MB.	..	170
TABELA 8	–	Entrega de Mensagens em diferentes Tempos de Simulação	.....	172
TABELA 9	–	Custo de Armazenamento em diferentes Tempos de Simulação	....	176

LISTA DE SIGLAS

ABMF	<i>Ant-Based Message Forwarding</i>
AC	<i>Algoritmo Cultural</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
ACRP	<i>Ant-Colony-based Routing Protocol</i>
ACS	<i>Ant Colony System</i>
ADUs	<i>Application Data Units</i>
AMR	<i>Ant Colony based Multi-path Routing</i>
ANOVA	<i>ANalysis Of VAriance</i>
ARAMA	<i>Ant Routing Algorithm for Mobile Ad-hoc networks</i>
AS	<i>Ant System</i>
CACA-QoS	<i>Cultural-Ant Colony Algorithms QoS</i>
CoS	<i>Class of Service</i>
DAR	<i>Distributed Ant Routing</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DTN	<i>Delay Tolerant Networks</i>
DTNRG	<i>Delay Tolerant Network Research Group</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
GrAnt	<i>Greedy Ant</i>
IDs	<i>Identifiers</i>
IPNSIG	<i>InterPlaNetary Internet Special Interest Group</i>
IRTF	<i>Internet Research Task Force</i>
LBE-ARAMA	<i>Load Balancing and Energy ARAMA</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc Networking</i>
MULE	<i>Mobile Ubiquitous LAN Extensions</i>
PDA's	<i>Personal Digital Assistants</i>
PDU's	<i>Protocol Data Units</i>
PoIs	<i>Points of Interest</i>
PROPHET	<i>Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity</i>
PSNs	<i>Pocket Switched Networks</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RWP	<i>Random Waypoint</i>
S-ACO	<i>Simple Ant Colony Algorithm</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
The ONE	<i>The Opportunistic Network Environment</i>
TIR	<i>Time Interval Routing</i>
TSP	<i>Travelling Salesman Problem</i>
TTL	<i>Time To Live</i>
WD	<i>Working Day</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	22
1.2	MOTIVAÇÕES	24
1.3	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.4	CONTRIBUIÇÕES	26
1.5	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	28
2	REDES TOLERANTES A ATRASOS	29
2.1	ARQUITETURA	30
2.1.1	Transferência de Custódias	31
2.1.2	Camada de Agregação	32
2.1.3	Nós e Regiões	34
2.1.4	Roteamento em DTN	35
2.1.5	Tipos de Contatos	36
2.1.6	Congestionamento em DTN	38
2.2	REVISÃO DA LITERATURA	38
2.2.1	Protocolos de Roteamento Replicadores de Mensagens	39
2.2.2	Protocolos de Roteamento Baseados em Previsões sobre o Estado da Rede	40
2.2.2.1	Protocolos de Roteamento orientados por Informações de Redes Sociais	43
2.2.3	Políticas de Gerenciamento de Mensagens em <i>Buffer</i>	48
2.3	DISCUSSÕES	49
3	INTELIGÊNCIA COLETIVA	53
3.1	ALGORITMOS CULTURAIS	56
3.1.1	Definição de Cultura	57
3.1.2	Características de um Algoritmo Cultural	58
3.1.3	Funcionamento Básico de um Algoritmo Cultural	60
3.1.4	Espaço de Crenças	62
3.1.4.1	Conhecimento Normativo	63
3.1.4.2	Conhecimento Topográfico	65
3.1.4.3	Conhecimento Situacional	66
3.1.4.4	Conhecimento Histórico ou Temporal	66
3.1.4.5	Conhecimento de Domínio	68
3.1.5	Funções de Aceitação e Influência	69
3.1.5.1	Função de Aceitação	69
3.1.5.2	Função de Influência	70
3.1.6	Trabalhos Relacionados	70
3.2	OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	72
3.2.1	Experimentos Iniciais com Formigas	72
3.2.2	Princípios Básicos da Meta-heurística ACO	74
3.2.3	Algoritmos de ACO	76
3.2.3.1	Algoritmo Simples de ACO (S-ACO)	76
3.2.3.2	Algoritmo AS	80
3.2.3.3	Algoritmo ACS	81

3.2.4	Trabalhos Relacionados	82
3.2.4.1	Roteamento em MANETs via ACO	85
3.2.4.2	Protocolos baseados em ACO para Redes Móveis com Conectividade Limitada	88
3.3	DISCUSSÕES	90
4	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PROPOSTA	93
4.1	PROBLEMA DE ROTEAMENTO EM DTN	93
4.2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÕES	94
4.3	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PROPOSTA	98
5	PROTOCOLO DE ROTEAMENTO CULTURAL GRANT	105
5.1	VISÃO GERAL DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT	105
5.2	MÉTRICAS DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT	109
5.2.1	Qualidade do Caminho	110
5.2.2	Proximidade Social	111
5.2.3	Utilidade do Nó	112
5.2.4	Grau de Estagnação da Rede	113
5.2.5	Utilidade de Intermediação da Rede	113
5.3	COMPONENTES DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT	114
5.3.1	Espaço Populacional	115
5.3.2	Espaço de Crenças	117
5.3.2.1	Conhecimento de Domínio	118
5.3.2.2	Conhecimento Histórico	120
5.3.2.3	Conhecimento Situacional	122
5.3.2.4	Discussão sobre os Componentes do Protocolo Cultural GrAnt	124
5.4	MÓDULO DE ROTEAMENTO	126
5.4.1	Fase de Avanço das Formigas	126
5.4.1.1	Avanço da Formiga: Etapa de Encaminhamento de Mensagens	128
5.4.1.2	Avanço da Formiga: Etapa de Medida de Qualidade de Caminho	132
5.4.2	Fase de Retorno das Formigas	133
5.5	MÓDULO DE ESCALONAMENTO	136
5.6	MÓDULO DE GERENCIAMENTO DE <i>BUFFER</i>	137
6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	139
6.1	CENÁRIOS DE MOBILIDADE E SEUS PARÂMETROS	140
6.1.1	Modelo de Movimento Baseado em Comunidades	141
6.1.2	Modelo de Movimento Baseado em Atividades	142
6.1.3	Parâmetros Gerais de Simulação	144
6.2	ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT	144
6.2.1	Análise dos Operadores do ACO	146
6.2.1.1	Análise da Taxa de Evaporação de Feromônio	146
6.2.1.2	Análise da Métrica Associada à Função Heurística	146
6.2.1.3	Análise da Métrica Associada à Concentração de Feromônio	148
6.2.2	Análise da Composição da Utilidade dos Nós	150
6.2.3	Análise da Importância das Mensagens	151
6.3	ANÁLISE DOS COMPONENTES DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT	152
6.3.1	Análise Aditiva e Eliminatória dos Componentes do Protocolo Cultural GrAnt	153
6.3.2	Análise das Mensagens de Formigas de Retorno	156
6.4	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT	157
6.4.1	Análise de Desempenho para Variação no Tamanho do <i>Buffer</i>	157
6.4.2	Análise de Desempenho para Variação no TTL das Mensagens	164
6.4.3	Análise de Desempenho para Valores Limites de <i>Buffer</i> e TTL das Mensagens	169

6.4.4	Análise de Desempenho para Variação no Tempo de Simulação	171
6.4.5	Análise do Custo de Operação	172
7	CONCLUSÕES	179
7.1	PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS	181
7.2	TRABALHOS FUTUROS	182
	REFERÊNCIAS	185

1 INTRODUÇÃO

A Internet da próxima geração interligará uma variedade de dispositivos de comunicação ao redor do mundo e proporcionará um ambiente altamente heterogêneo em termos de condições de operação e tipos de redes que interconecta. Dois fenômenos principais estão acelerando essas mudanças: (1) a proliferação de dispositivos portáteis sem fio, como os *smartphones*, como um meio de comunicação comumente utilizado; e (2) a linha de indefinição entre os amigos “reais” e “virtuais”, a partir de aplicações de redes sociais. Esses fenômenos estão mudando a maneira como as pessoas se comunicam. Além disso, espera-se que as comunicações ocorram a qualquer momento e em qualquer lugar, mesmo que nenhuma infra-estrutura de rede esteja disponível. Como consequência, novas necessidades surgem em termos da utilização de oportunidades de conectividade e adaptação às constantes mudanças nas redes. Na literatura, tais redes complexas e dinâmicas recebem o nome de Redes Tolerantes a Atrasos (DTN - *Delay Tolerant Networks*) ou Redes Tolerantes a Interrupções (DTN - *Disruption-Tolerant Networks*) (FALL, 2003) (FALL; FARREL, 2008).

Uma DTN é uma classe específica de redes sem fio que está sujeita a constantes mudanças em sua topologia devido à mobilidade de seus usuários, obstáculos e/ou recursos limitados o que pode resultar em desconexões frequentes e atrasos longos e variáveis nas comunicações. Como em uma DTN um enlace fim-a-fim entre quaisquer dois nós comunicantes pode não existir todo tempo, de modo a alcançar uma taxa mínima de entrega de mensagens, um mecanismo do tipo armazena-transporta-encaminha é empregado nos nós intermediários até alcançar o destino de uma comunicação. Esses nós podem precisar armazenar mensagens de outros nós em seu *buffer* por um longo período de tempo e transportá-las ao longo do seu caminho até que uma oportunidade de contato surja e que o encaminhamento de mensagens seja efetivado (WARTHMAN, 2003) (CERF et al., 2007). Adicionalmente, o encaminhamento de réplicas de mensagens podem ser necessárias para aumentar a probabilidade de entrega bem sucedida destas. Entretanto, alguns problemas surgem em um cenário com recursos limitados: as replicações são indesejáveis uma vez que estas competem com as mensagens de dados válidas que estão nos caminhos para um

destino; devido ao tamanho limitado do *buffer* dos nós, o armazenamento de mensagens de nós encontrados pode se tornar um inconveniente.

Considerando todos esses aspectos, é importante: manter uma visão atualizada da dinâmica das DTNs através da busca e análise periódica de informações sobre os nós; e selecionar mais de um caminho para encaminhar cada mensagem enquanto limita o número de réplicas de mensagens em circulação na rede. Além disso, o comportamento dos usuários (nós) da rede, os quais compõem cada solução (caminho) em DTNs oportunistas, apresentam algumas similaridades que podem ser bem exploradas. Tais premissas caracterizam uma DTN como um ambiente favorável à aplicação de paradigmas baseados em inteligência coletiva; A adaptação na natureza e na sociedade é um processo contínuo e permanente e, assim como ocorre nas redes biológicas, a maior parte das redes sem fio demonstra características topológicas não-triviais, com padrões de conectividade que não são puramente regulares nem puramente aleatórios. Assim, a presente tese propõe investigar o uso da Otimização por Colônia de Formigas (ACO - *Ant Colony Optimization*) como espaço populacional de um Algoritmo Cultural (AC) voltado para as DTNs.

A meta-heurística ACO é inspirada no comportamento coletivo de formigas reais em busca de caminhos mais curtos do seu ninho até fontes de alimento (DORIGO et al., 1996). O AC é derivado do processo evolucionário cultural (REYNOLDS, 1994). A motivação para o uso do ACO é tirar vantagem de sua busca baseada em população de soluções e sua estrutura de aprendizado adaptativa. Um AC busca conhecimentos durante um processo evolucionário e os utiliza para guiar a população e acelerar o aprendizado enquanto provê soluções mais eficientes.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme discutido anteriormente, em DTNs não existe necessariamente um caminho fim-a-fim entre quaisquer dois nós. Nesses ambientes, perdas de conectividade, atrasos longos e um consumo grande de recursos são enfrentados durante o envio de mensagens entre um nó de origem e seu destino. Como não há um protocolo comum capaz de prover o transporte confiável em uma DTN, tal confiabilidade é alcançada pela transferência de custódia de mensagens entre os nós participantes, porém com um custo maior relacionado à capacidade dos enlaces de comunicação, ao espaço de armazenamento em cada nó e ao atraso total para se transferir uma mensagem da origem ao destino. O uso inadequado de cada enlace e da área de armazenamento de cada nó pode fazer com que os mesmos sejam ocupados por mensagens desnecessárias. Conseqüentemente, o desem-

penho pode cair se, por exemplo, a mensagem descartada de um *buffer* em um nó ainda não tiver sido entregue. É possível também que somente um contato esteja disponível em um determinado tempo e que este não tenha recursos suficientes para receber todas as custódias de mensagens. Nesses cenários típicos das DTNs, os novos protocolos de encaminhamento precisam considerar os seguintes desafios:

- Devido à possível duração limitada de cada contato na rede, é importante determinar quais e em qual ordem as mensagens devem ser transmitidas quando uma oportunidade de contato surgir;
- Se existir mais de um contato disponível em um determinado momento, é necessário determinar o(s) contato(s) mais promissor(es) para o(s) qual(is) cada mensagem deve ser encaminhada. Se forem considerados *buffers* e largura de banda infinitos, quanto maior for o número de encaminhamentos de cada mensagem, maior será a chance de esta mensagem ser entregue ao seu destino final. Entretanto, os recursos são normalmente escassos em DTNs, tornando necessário determinar de forma dinâmica e eficiente, o número de cópias de custódias de mensagens que devem ser encaminhadas;
- Se o *buffer* de um nó atingir o limite de sua ocupação e uma nova mensagem for recebida, é importante determinar qual mensagem deve ser descartada para acomodar a nova custódia;
- Analisar quais conhecimentos podem ser obtidos da dinâmica da rede de modo a inferir os melhores encaminhadores de mensagens e aumentar a probabilidade de sucesso de entrega das mensagens ao mesmo tempo em que limita o número de réplicas e descartes destas.

Entende-se, então, que o processo de roteamento e escalonamento de mensagens, e gerenciamento de *buffer* dos nós em redes tolerantes a atrasos e interrupções representa um problema complexo e dinâmico no qual o uso dos algoritmos culturais associado à meta-heurística de otimização por colônia de formigas ainda não foi explorado. Tendo em vista que a adaptação na sociedade e na natureza é um processo contínuo e permanente, e considerando-se que ambas as meta-heurísticas têm muito em comum com a evolução natural e caracterizam-se como técnicas auto-adaptativas, justifica-se o uso destas técnicas como um mecanismo híbrido adaptativo e auto-organizável capaz de realizar uma busca local e global em um espaço de soluções amplo e dinâmico além de prover uma diversidade de soluções para o problema.

1.2 MOTIVAÇÕES

Embora muitos trabalhos tenham sido desenvolvidos no âmbito das DTNs, a maioria deles tem como meta o desenvolvimento de técnicas de encaminhamento de mensagens que objetivam principalmente e, quase que unicamente, uma taxa maior de entrega de mensagens. Mensagens são, normalmente, encaminhadas na ordem em que chegam aos nós sem considerar a importância de cada uma em cada oportunidade de contato.

Além disso, grande parte do estado da arte dos protocolos de roteamento para DTNs toma decisões de encaminhamento de mensagens com base somente em informações locais de vizinhos a um ou dois saltos (LINDGREN et al., 2004) (DALY; HAAHR, 2007) (ZHOU et al., 2009). Nesses casos, pode ocorrer de existir um nó com qualidade boa próximo ao nó de origem e vários nós com baixa qualidade próximos ao destino o que tornará mais onerosa a entrega de uma mensagem ao seu destino.

Na presente tese, a técnica de otimização por colônia de formigas é utilizada como parte do espaço populacional de um algoritmo cultural. Esta técnica é usada para direcionar o tráfego DTN através de um subconjunto de bons encaminhadores de modo a melhorar a taxa de entrega de mensagens enquanto limita o número de réplicas de mensagens transmitidas e mensagens descartadas por falta de recursos nos nós.

As principais motivações para o uso das meta-heurísticas ACO e AC se baseiam nas seguintes observações:

- O processo de roteamento em DTNs, o qual muitas vezes necessita manter mais de um caminho para o encaminhamento de mensagens, pode se beneficiar dos paradigmas baseados em populações de soluções, característica das técnicas da Computação Natural¹, tais como o ACO e o AC;
- O ACO tem sido aplicado com sucesso na área de redes de computadores, em especial em problemas de roteamento. Entretanto, até o presente momento, algoritmos de ACO combinados com outras técnicas da computação natural não foram aplicados para interconectar redes heterogêneas que apresentem conectividade limitada e atrasos longos na comunicação como é o caso das DTNs. Embora pouco explorado no contexto da aplicação considerada, o ACO reúne características importantes para roteamento em DTNs: capacidade de executar uma busca tanto global quanto local em um espaço amplo e dinâmico mantendo uma diversidade de soluções, aliada às

¹A computação natural é definida como o campo de pesquisa que, com base ou inspirado pela natureza, permite o desenvolvimento de técnicas computacionais para solucionar problemas (CASTRO, 2006).

características de auto-organização, adaptabilidade, boa escalabilidade e necessidade de pouca informação global sobre o estado da rede;

- Enquanto a maioria dos algoritmos da computação natural suporta a auto-adaptação em nível do componente individual, a ideia por trás do uso dos algoritmos culturais é prover suporte à auto-adaptação no nível individual e populacional de modo que as experiências obtidas ao longo de gerações sejam utilizadas para guiar novas populações de indivíduos tendendo a gerar soluções mais eficientes e de forma mais rápida. Segundo Garcia-Retamero et al. (2010), como as pessoas frequentemente utilizam o conhecimento e comportamentos de outros indivíduos como uma fonte importante de informações para fazer inferência e solucionar problemas complexos, o aprendizado social e cultural podem ser efetivos para tomada de decisões sem a necessidade de uma exploração custosa do ambiente por parte de um único indivíduo. No caso dos Algoritmos Culturais, por serem um paradigma novo no contexto da aplicação considerada nesta tese, o aspecto de inovação fica ainda mais destacado.

1.3 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta tese é apresentar um novo protocolo de roteamento para DTNs oportunistas nas quais a mobilidade e a conectividade dos nós são utilizadas para determinar as oportunidades de comunicação. O protocolo proposto é chamado Cultural GrAnt (*Greedy Ant*) uma vez que faz uso de um sistema híbrido que usufrui das vantagens de um AC e de um ACO guloso para direcionar o tráfego da rede para os nós mais promissores com os objetivos de melhorar a taxa de entrega de mensagens enquanto limita o número de réplicas e descartes destas. O termo guloso sugere o uso de regras de decisão determinísticas onde o melhor é sempre escolhido, ao invés das regras probabilísticas comumente utilizadas por algoritmos que empregam a meta-heurística ACO.

Em particular, a presente tese propõe os seguintes objetivos específicos:

- Investigar aspectos inexplorados dos algoritmos culturais como o uso de um AC distribuído onde suas instâncias possam ser utilizadas por cada nó da rede;
- Investigar quais mudanças podem ser incorporadas a um ACO de modo que este se adapte melhor às redes com desconexões frequentes e altamente dinâmicas como as DTNs;
- Utilizar conjuntamente as técnicas de ACO e AC de forma a obter ganhos de desempenho considerando os diversos aspectos inerentes ao processo de roteamento.

Isso deverá ser obtido aumentando a forma de cooperação entre os agentes de formiga de modo que estes possam trocar informações indiretamente sobre caminhos já conhecidos;

- Manter atualizadas e distribuídas as informações sobre a dinâmica da rede através de uma busca completa guiada por conhecimentos globais e locais;
- Capturar e analisar os aspectos sociais mais relevantes da rede que focam nos relacionamentos entre os indivíduos e nos atributos específicos dos nós DTNs;
- Determinar o(s) melhor(es) caminho(s) que cada mensagem deve seguir para alcançar seu destino final;
- Estabelecer uma disciplina de escalonamento para determinar a ordem na qual as mensagens são encaminhadas;
- Propor uma política de descarte para indicar qual mensagem pode ser descartada quando não houver espaço no *buffer* suficiente para armazenar uma nova mensagem.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

Até o presente momento não foram encontradas pesquisas que propõem o uso das meta-heurísticas algoritmos culturais e otimização por colônia de formigas (AC + ACO) para prover o roteamento em redes de comunicação móveis. Embora o ACO tenha sido aplicado a diversos problemas de roteamento, a utilização desta meta-heurística em ambientes com conexões esparsas como as DTNs ainda não foi explorada. Poucos protocolos de roteamento propõem o uso de AC e estes são voltados para redes de comunicação com topologias estáticas. Deste modo, esta tese representa uma importante contribuição no sentido de investigar as meta-heurísticas ACO e AC no âmbito de uma classe específica de redes sem fio que estão sujeitas a constantes mudanças em sua topologia o que pode resultar em desconexões frequentes e atrasos longos e variáveis nas comunicações.

Nesse sentido, a principal contribuição dessa tese é prover a obtenção de um sistema híbrido natural que visa se beneficiar das vantagens específicas das meta-heurísticas ACO e AC, tais como a natureza auto-organizável e a adaptação da estrutura de aprendizado do ACO e a capacidade do AC de memorizar e reutilizar as experiências obtidas ao longo do processo de busca de modo a influenciar buscas futuras e acelerar o aprendizado.

O protocolo Cultural GrAnt realiza buscas locais e globais, analisa as informações sobre o estado da rede e dos nós e as armazena na forma de diferentes conhecimentos. Tais

conhecimentos são reutilizados em buscas futuras de modo a reduzir o espaço de busca às melhores soluções e consumir menos tempo na obtenção de soluções para o problema de roteamento, escalonamento e descarte de mensagens em DTNs.

As seguintes contribuições para as DTNs estão associadas ao Cultural GrAnt:

1. Na tentativa de evitar a convergência do algoritmo para apenas uma ou mais soluções (isto é, caminhos compostos por nós), o protocolo Cultural GrAnt permite a manutenção de um conjunto de caminhos. Tendo em vista que as DTNs são em geral esparsas, o protocolo proposto visa evitar que bons caminhos encontrados sejam perdidos por processos de evaporação realizados periodicamente ou que os mesmos sejam sempre utilizados;
2. Para reduzir o número de mensagens de controle em circulação na rede, a fase de busca por caminhos do Cultural GrAnt é realizada apenas sob-demanda, quando for necessário estabelecer um caminho entre dois nós que desejam trocar mensagens. Porém, tendo em vista que um nó de origem pode levar um tempo longo para encontrar um caminho até um determinado destino, no protocolo Cultural GrAnt os indivíduos que constroem tais caminhos, chamados de Formigas de Avanço (FAs), encapsulam as mensagens de dados;
3. No protocolo Cultural GrAnt o número de indivíduos (FAs) criados para buscar caminhos é definido de forma dinâmica;
4. Ao invés de uma regra de transição probabilística, o protocolo Cultural GrAnt toma suas decisões de encaminhamento de mensagens com base em uma regra de transição gulosa onde a melhor solução corrente é sempre escolhida. Para essa escolha, consideram-se funções heurísticas e concentrações de feromônio obtidos pela população do ACO e conhecimentos armazenados no espaço de crenças do AC;
5. Devido a não existência de um elemento central que possibilite o armazenamento e disponibilização das informações obtidas durante a fase de busca por soluções, os componentes de conhecimento do AC são armazenados em diferentes espaços de crenças e estes são distribuídos em cada nó da rede. De modo similar, do ponto de vista de cada nó, apenas uma parte das informações provida pelo espaço populacional é armazenada nos operadores do ACO de cada nó;
6. A comunicação entre o espaço de crenças e o espaço populacional de cada nó ocorre de forma distribuída podendo ser intermediada por métricas específicas propostas pelo protocolo Cultural GrAnt.

Os resultados do trabalho foram disseminados através das seguintes publicações:

1. VENDRAMIN, A. C. B. K.; MUNARETTO, A.; DELGADO, M.; VIANA, A. C. CGrAnt: a Swarm Intelligence-based Routing Protocol for Delay Tolerant Networks. In: Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2012), Philadelphia, Pennsylvania, USA (Aceito para publicação);
2. VENDRAMIN, A. C. B. K.; MUNARETTO, A.; DELGADO, M.; VIANA, A. C. GrAnt: Inferring Best Forwarders from Complex Networks' Dynamics through a Greedy Ant Colony Optimization. Computer Networks, Fev. 2012, v. 56, n. 3, p. 997-1015. ISSN: 1389-1286. DOI= <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2011.10.028>;
3. VENDRAMIN, A. C. B. K.; MUNARETTO, A.; DELGADO, M.; VIANA, A. C. A Greedy Ant Colony Optimization for Routing in Delay Tolerant Networks. In: First International Workshop on Smart Communication Protocols & Algorithms (SCPA 2011) in GLOBECOM 2011, 2011, Houston, Texas. Proceedings of IEEE GLOBECOM Workshops 2011, 2011. v. 1. p. 1127-1132;
4. VENDRAMIN, A. C. B. K.; MUNARETTO, A.; DELGADO, M.; VIANA, A. C. Protocolo de Roteamento para DTNs através de uma Otimização Gulosa por Colônia de Formigas. In: SBrT - XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2011, Curitiba. Anais do SBrT 2011. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2011. v. 1. p. 1-5.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A presente tese está organizada em sete capítulos. Após esta introdução, o segundo capítulo descreve as principais características e desafios enfrentados em redes tolerantes a atrasos, e as principais pesquisas relacionadas com a área. O terceiro capítulo apresenta em detalhes as características, funcionamento e as principais aplicações dos algoritmos culturais e da técnica de otimização de colônia de formigas. O quarto capítulo apresenta o contexto da proposta e o quinto capítulo descreve o protocolo Cultural GrAnt proposto para DTNs. O sexto capítulo apresenta o ambiente de simulação seguido pela avaliação de desempenho dos protocolos para DTNs. Finalmente, conclusões e trabalhos futuros são fornecidos no sétimo capítulo.

2 REDES TOLERANTES A ATRASOS

O grupo de pesquisas IPNSIG (*InterPlaNetary Internet Special Interest Group*) conduz o projeto de Internet InterPlaNetária (IPN) com o objetivo de definir uma arquitetura de redes que permita a interoperabilidade da Internet convencional “terrestre” com uma rede interplanetária que envolve outros planetas e/ou naves espaciais em trânsito (IPNSIG, 2009). Com o auxílio de satélites de comunicação inseridos no espaço, uma estação na Terra pode enviar/receber informações para/de veículos posicionados na superfície de outros planetas. As comunicações nesse ambiente incluem enlaces de grande distância com atrasos longos de transmissão e propagação.

Como as soluções desenvolvidas para o projeto IPN também atendiam aos problemas de desconexões frequentes comuns em algumas redes terrestres, em 2002 a IRTF (*Internet Research Task Force*) criou um Grupo de Pesquisa em Redes Tolerantes a Atrasos (DTNRG - *Delay Tolerant Network Research Group*) (WOOD, 2009). O intuito era estender o projeto IPN a outros tipos de redes e padrões de conectividade, especialmente as redes sem fio terrestres, que também sofrem problemas de atrasos longos e quebras de conexões frequentes devido às mudanças constantes que podem ocorrer em suas topologias (FALL; FARREL, 2008).

Diante da ubiquidade de dispositivos capacitados para operar nas redes móveis e sem fio existentes, é desejável prover a interoperabilidade entre esses dispositivos em qualquer lugar e em qualquer instante de tempo mesmo na ausência de uma infra-estrutura de rede. Nesse cenário, uma arquitetura para DTNs tem como propósito possibilitar a interligação dos diferentes tipos de redes de comunicação existentes visando solucionar os problemas da conectividade não contínua, atrasos longos e limitação de recursos.

Para entender melhor o funcionamento das DTNs, o presente capítulo descreve em detalhes a especificação de sua arquitetura e os estudos principais direcionados a essa área de pesquisa. Ao final do capítulo são providas discussões sobre os desafios que ainda precisam ser solucionados.

2.1 ARQUITETURA

A proposta de uma arquitetura para DTNs é definida pela RFC 4838 que a descreve como um método comum para interconectar *gateways* de regiões heterogêneas e superar problemas de desconexões (CERF et al., 2007). Segundo Warthman (2003), como exemplos de regiões que podem existir em DTNs tem-se:

- Redes sem fio terrestres: podem ser inesperadamente particionadas devido à mobilidade dos seus nós, obstáculos físicos, recursos limitados ou interferência na interface aérea. Seres humanos ou meios de transporte públicos ou particulares equipados com dispositivos móveis e sem fio são exemplos desse tipo de rede de comunicação. Como esses meios viajam por vários lugares, eles podem fornecer um serviço de entrega de mensagens entre nós desconectados. Um exemplo de redes sem fio terrestres são as Redes Móveis Ad Hoc (*MANET - Mobile Ad hoc Networking*) tolerantes a atrasos e desconexões. Essas redes são dinâmicas, possuem uma população dispersa de nós e operam com pouca ou até nenhuma infra-estrutura fixa (DALY; HAAHR, 2010). Assim como em uma MANET comum, cada nó pode atuar como um roteador, encaminhando mensagens para outros nós (PERKINS, 1997);
- Redes de sensores: existem em larga escala e são caracterizadas por conectividade intermitente e recursos extremamente limitados tais como memória, processador e principalmente bateria;
- Redes de táticas militares conectando tropas, aeronaves e satélites;
- Redes submarinas: redes com atrasos moderados e interrupções frequentes devido a fatores ambientais;
- Redes de satélites: incluem atrasos moderados e conectividade periódica conhecida tais como os satélites de baixa órbita terrestre (*LEO - Low Earth Orbit*).

A arquitetura tradicional das redes TCP/IP (*Transmission Control Protocol/ Internet Protocol*) não satisfaz os requisitos para o funcionamento das regiões DTN, pois estas podem possuir as seguintes características (WARTHMAN, 2003) (CERF et al., 2007):

- Conectividade Intermitente: não é possível garantir uma conectividade fim-a-fim entre dois nós quaisquer de uma DTN, seja por ela nunca existir ou por ser intermitente. Na Internet, os pacotes que não são imediatamente encaminhados são

normalmente descartados e se este descarte for muito severo o TCP eventualmente termina a sessão podendo causar a falha da aplicação (KUROSE; ROSS, 2010);

- Atrasos longos e/ou variáveis: atrasos de transmissão, atrasos de propagação e tempos de espera longos em filas nos nós contribuem para um maior atraso fim-a-fim o que dificulta o funcionamento de protocolos que confiam em entregas rápidas de dados;
- Os enlaces DTNs podem sofrer alta taxa de erros. Os protocolos TCP/IP são projetados para operar em enlaces de comunicação com baixas taxas de erros de dados (KUROSE; ROSS, 2010);
- Roteadores DTN precisam de meios de armazenamento maiores e persistentes, pois uma mensagem pode precisar ser retransmitida ou um canal de comunicação com um próximo nó pode não estar disponível por um longo tempo. Ao contrário, na Internet os roteadores utilizam meios de armazenamento pequenos apenas para armazenar pacotes por poucos milissegundos enquanto analisam sua tabela de roteamento para determinar o próximo salto e a porta de saída para o pacote em questão, ou enquanto aguarda devido a atrasos de transmissão (KUROSE; ROSS, 2010).

As desconexões em DTNs podem ocorrer sem a pré-existência de uma falha. Essas desconexões surgem principalmente em decorrência de fatores como a alta mobilidade dos nós que pode provocar constantes mudanças na topologia da rede, a economia de recursos dos nós devido ao seu baixo tempo de vida, obstáculos, grandes distâncias entre os nós, entre outros. Para superar o problema das desconexões frequentes entre os nós, as DTNs empregam a transferência de custódia de mensagens nó a nó. O processo de transferência de custódia está descrito a seguir.

2.1.1 TRANSFERÊNCIA DE CUSTÓDIAS

Como não há um protocolo de transporte comum capaz de prover a transmissão fim-a-fim e confiável de mensagens em uma DTN, tal confiabilidade é provida através da técnica de repasse de mensagens (WARTHMAN, 2003). Quando uma mensagem precisa ser enviada, esta é armazenada, transportada e encaminhada nó a nó ao longo do seu caminho desde a origem até alcançar o seu destino final. Essa técnica de repasse de mensagens do tipo armazena-transporta-encaminha é denominada Transferência de Custódias (CERF et al., 2007).

Como as DTNs podem operar em enlaces que não estão sempre disponíveis, espera-se que os nós participantes da rede armazenem as mensagens durante longos períodos de tempo. Com isso, pode-se observar que a transferência de custódias causará um custo maior relacionado à capacidade de armazenamento em cada nó além de um atraso total maior para se transferir uma mensagem da origem ao destino. Porém, o objetivo principal é utilizar a própria mobilidade dos nós participantes da rede na tentativa de estes eventualmente encontrarem o destino da mensagem.

A Figura 1 ilustra o funcionamento de uma transferência de custódia de mensagem em uma DTN onde um nó A deseja enviar uma mensagem para um nó C, porém não há um caminho disponível entre eles. Nesse exemplo, a mobilidade dos nós ao longo do tempo permite que a mensagem primeiramente seja encaminhada para o nó B e, finalmente, para o seu destino final (nó C).

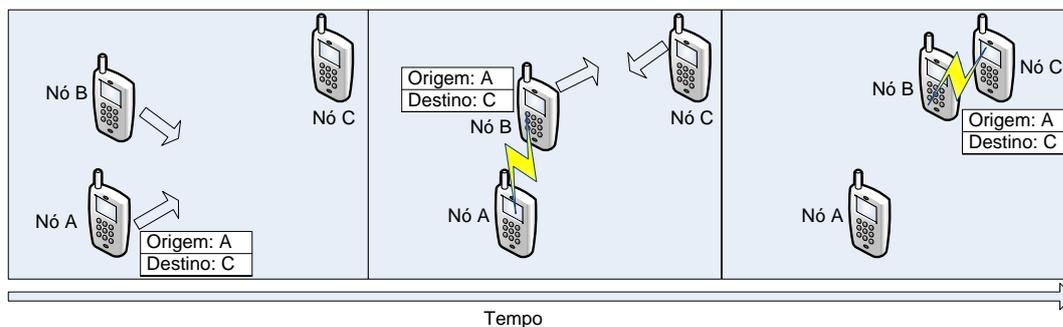


Figura 1: Transferência de Custódia de Mensagens.

2.1.2 CAMADA DE AGREGAÇÃO

A arquitetura DTN emprega o repasse de mensagens do tipo armazena-transporta-encaminha, descrita na seção anterior, sobrepondo uma nova camada de protocolo chamada camada de agregação (*bundle layer*) (SCOTT; BURLEIGH, 2007) em cima das camadas mais baixas específicas de cada região DTN (ver Figura 2). Isso permite que as aplicações em uma DTN possam se comunicar ao longo de várias regiões.

A pilha de protocolos de todos os nós inclui a camada de aplicação, a camada de agregação e as camadas mais baixas da rede na qual o nó se encontra.

Uma aplicação DTN cria mensagens de tamanhos arbitrários chamadas de Unidades de Dados da Aplicação (ADUs - *Application Data Units*). As ADUs são transformadas pela camada de agregação em uma ou mais Unidades de Dados de Protocolo (PDUs - *Protocol Data Units*) chamadas agregados (“*bundles*”) que são armazenados, transportados

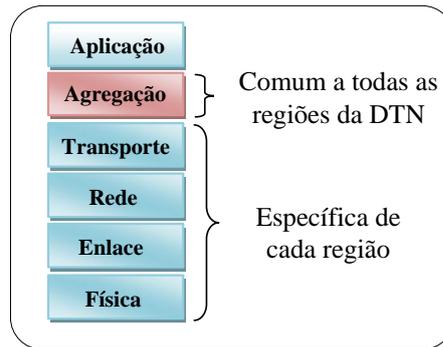


Figura 2: Pilha de Protocolos de uma DTN.

e encaminhados pelos nós da DTN (SCOTT; BURLEIGH, 2007). O termo agregado foi escolhido para ser usado em DTNs para indicar que cada mensagem deve conter o maior número possível de informações de modo que esta seja enviada em uma única viagem ao seu destino (CERF et al., 2007). Por simplicidade, na presente tese, o termo mensagem e agregado são utilizados indistintamente.

Quando a camada de agregação de um nó origem precisa enviar uma mensagem para um nó vizinho, ela primeiramente pergunta a este nó se ele aceita uma transferência de custódia. Nesse momento, um temporizador é inicializado para aguardar a resposta. Se o nó receptor aceitar a custódia, ele retornará uma confirmação. Caso o temporizador expire, o nó emissor retransmitirá a mensagem. O nó que recebe uma custódia deve armazenar a mensagem em um meio persistente até que um novo nó aceite a custódia da mensagem ou que o tempo de vida (TTL - *Time To Live*) da mensagem expire.

Cada mensagem DTN consiste de dois blocos. O primeiro bloco, chamado de bloco primário, é obrigatório e único por mensagem (SCOTT; BURLEIGH, 2007). Esse bloco contém as informações essenciais para possibilitar o encaminhamento da mensagem até o seu destino. O segundo bloco deve conter o campo de carga útil (*payload*) da mensagem, isto é, os dados propriamente ditos e seu tamanho.

Os principais campos presentes no bloco primário de uma mensagem DTN são (CERF et al., 2007): Versão do protocolo; Identificação dos nós de origem e destino; Identificação dos nós que possuem a custódia da mensagem em trânsito por um determinado caminho. Essa identificação é atualizada antes da mensagem ser encaminhada para um próximo nó; *Timestamp* da mensagem; Tempo de vida da mensagem em segundos; Tamanho do bloco em bytes; *Flags* que indicam circunstâncias especiais associadas com a mensagem tais como (FALL; FARREL, 2008): indicação da sua Classe de Serviço (CoS - *Class of Service*) a qual especifica a classe de prioridade requerida pela sua aplicação.

Para atender melhor às necessidades de cada aplicação três classes de prioridade são especificadas na arquitetura DTN (CERF et al., 2007):

- **Baixa (*Bulk*):** para aplicações de “melhor esforço”. Nenhuma mensagem dessa classe será entregue até que todas as mensagens pertencentes a um mesmo par origem-destino das outras classes sejam entregues;
- **Normal:** mensagens desta classe devem ser transmitidas antes das mensagens da classe baixa;
- **Expressa (*Expedited*):** classe com a prioridade maior. As mensagens pertencentes a esta classe devem ser enviadas com prioridade sobre as outras duas classes.

Embora a classe de prioridade de cada mensagem especifique a ordem de prioridade entre mensagens pertencentes a um mesmo par origem-destino, variações podem ser feitas dependendo da política de escalonamento adotada em cada nó particular da DTN. Em alguns nós, por exemplo, as mensagens expressas podem ser sempre encaminhadas antes de qualquer mensagem de prioridade baixa, independente de sua origem. Tais decisões podem afetar tanto a probabilidade quanto o tempo de entrega de cada mensagem.

2.1.3 NÓS E REGIÕES

Os nós que compõem uma região DTN podem ser um *host*, um roteador ou um *gateway*. Um *host* pode enviar ou receber mensagens dentro da sua região. Quando um *host* aceita transferir mensagens em nome de outros nós dentro de uma região ele é chamado de roteador. Um *gateway* é responsável por encaminhar mensagens entre duas ou mais regiões DTNs (WARTHMAN, 2003).

Para que possam ser utilizados no contexto do protocolo de agregação, que provê o serviço básico de entrega de mensagens em DTNs, os nós e as regiões devem possuir identificadores (IDs - *Identifiers*).

As decisões de roteamento são relativamente diretas, baseadas primeiramente no ID da região e depois no ID do nó. Então, conforme ilustra a Figura 3, o nome de cada nó seria composto de duas partes: (1) o ID da região a qual pertence; (2) e o ID do seu ponto de extremidade (EID)¹. Os *gateways* possuem os IDs de regiões e duas ou mais pilhas de protocolos das camadas de baixo nível pertencentes a essas regiões que deseja

¹Um ponto de extremidade é semelhante a um grupo *multicast* em redes IP. Porém, um ponto de extremidade pode conter apenas um nó.

interconectar. Já os roteadores, por proverem o roteamento dentro de uma mesma região, utilizam apenas o ID dos nós.

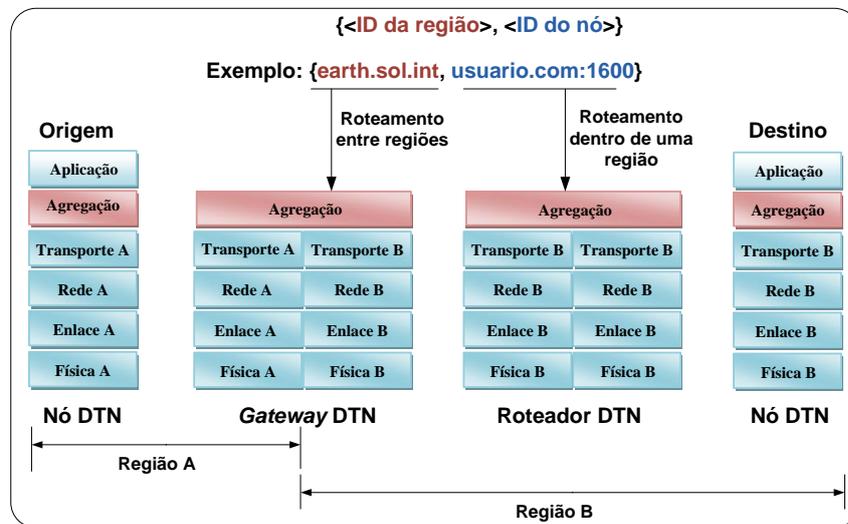


Figura 3: Nomes de Nós e Regiões DTN.
Fonte: Adaptado de Warthman (2003)

Um ponto de extremidade pode se referir a um único nó (*unicast*), qualquer nó da região (*anycast*) ou a um grupo de nós (*multicast*). Além disso, nós podem ser membros de um ou mais pontos de extremidade DTN. A Figura 4 ilustra o conceito de EIDs em DTNs. Nessa figura, dois pontos de extremidades são representados por P1 e P2 sendo que cada um possui, respectivamente, quatro e três nós. A Figura 4 também ilustra o caso de um nó DTN (nó A) ser membro de dois pontos de extremidades simultaneamente.

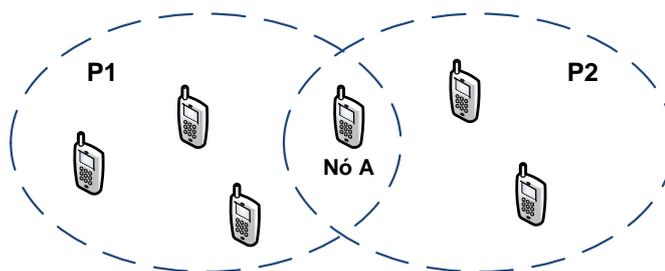


Figura 4: Pontos de Extremidade DTN.

2.1.4 ROTEAMENTO EM DTN

Devido à existência de dois ou mais caminhos possíveis entre quaisquer dois nós de uma rede de comunicação, um serviço de roteamento clássico se faz necessário de modo a encontrar o melhor caminho disponível para transmitir mensagens fim-a-fim entre

esses dois nós. Os dispositivos responsáveis por esse serviço são denominados roteadores. Cada roteador possui uma tabela de roteamento que mapeia os endereços de destino com o endereço do próximo nó da rede para o qual a mensagem deve ser encaminhada e a interface de saída através da qual esse nó pode ser alcançado (KUROSE; ROSS, 2010).

O roteamento pode ser baseado na fonte ou salto a salto. No roteamento baseado na fonte o caminho completo de uma mensagem é determinado no nó de origem e codificado de alguma forma na mensagem podendo gerar um grande *overhead* em redes de diâmetro grande. Uma vez determinado, o caminho não é mais alterado enquanto a mensagem trafega pela rede. Por outro lado, o roteamento salto a salto permite que uma mensagem utilize informações locais de cada nó por onde passa, informações estas não disponíveis no nó de origem (JAIN et al., 2004). Como em uma DTN um enlace fim-a-fim pode não existir o tempo todo, pode-se obter um desempenho melhor com o roteamento salto a salto.

2.1.5 TIPOS DE CONTATOS

Um contato é um conceito importante em DTNs, pois ele determinará uma oportunidade para que dois ou mais nós possam trocar informações (WARTHMAN, 2003). Segundo Hossmann et al. (2011) os contatos ocorrem devido a mobilidade dos usuários que transportam dispositivos e refletem a estrutura complexa da movimentação das pessoas que encontram estranhos por acaso, colegas, amigos e familiares por intenção e/ou estranhos familiares devido a similaridade no seu padrão de mobilidade. Como indicadores da força da ligação existente entre dois nós várias medidas podem ser utilizadas, tais como (HOSSMANN et al., 2011): (a) frequência dos contatos que se for alta implicará em vários encontros e, conseqüentemente, em muitas oportunidades de encaminhamento de mensagens; (b) duração agregada dos contatos que se for longa poderá resultar em uma grande quantidade de mensagens transferida; (c) idade do encontro entre dois nós que representa o tempo que se passou desde o contato mais recente entre esses nós. Essas medidas refletem a quantidade de correlação de mobilidade (no tempo e no espaço) entre os nós da rede.

A arquitetura DTN especifica cinco tipos de contatos (CERF et al., 2007): persistentes, sob-demanda, programados, previsíveis e oportunistas.

Os contatos **persistentes**, como o próprio nome sugere, estão sempre disponíveis. Um exemplo desse tipo de contato são as conexões com a Internet através da tecnologia DSL (*Digital Subscriber Line*). Os contatos **sob-demanda** requerem uma ação para

iniciar uma conexão. Após o início, o contato persiste até o término da conexão. Uma rede de sensores que requer o envio de mensagens específicas para “acordá-los” pode gerar contatos sob-demanda. Os contatos **programados** são estabelecidos em um determinado horário por uma determinada duração. As aplicações espaciais são um exemplo de rede com contatos programados, pois é possível conhecer de antemão o movimento de um satélite de baixa órbita terrestre ao redor de um corpo celeste.

Os contatos **previsíveis** não possuem um horário fixo para surgirem. Ao invés disso, os tempos de cada contato e a sua duração são previstos com base em informações obtidas de históricos de contatos previamente observados. O itinerário de um veículo de transporte público que atua como um mensageiro móvel de dados é um exemplo de contato previsível. Esses mensageiros são também conhecidos como “mula de dados” (*DataMULE - Data Mobile Ubiquitous LAN Extensions*) (SHAH et al., 2003). Uma mula de dados se refere ao uso de veículos motorizados, pessoas ou animais que são equipados com um ponto de acesso e um dispositivo de armazenamento de modo a encaminhar mensagens entre nós desconectados.

Os contatos **oportunistas** são aqueles que, devido ao seu movimento, eventualmente entram na linha de visada de algum outro nó possibilitando uma comunicação. Independentemente da tecnologia existente, as redes móveis oportunistas permitirão que usuários, equipados com dispositivos eletrônicos móveis e portáteis como telefones celulares, *laptops* e PDAs (*Personal Digital Assistants*), se comuniquem de uma forma efetiva e natural, tirando vantagem da mobilidade e localidade para aumentar as oportunidades de troca de informações (ZYBA et al., 2011). Tais situações prevalecem em muitas regiões onde o acesso à infra-estrutura de banda larga tem cobertura limitada. Então, usuários possuem ilhas de conectividade (por exemplo, casa ou trabalho), mas possuem probabilidade de esporadicamente entrarem em contato com outros usuários de outras ilhas. É importante notar também que a infra-estrutura de acesso é vulnerável a desastres ou outras falhas e que, em tais situações, as redes oportunistas podem ser a única maneira factível para transportar os dados (HUI et al., 2005). As redes que trabalham com contatos oportunistas utilizam a capacidade dos nós de se comunicarem localmente com os seus vizinhos para criar possibilidades de comunicação com outros nós que estão fora do seu alcance. Os contatos oportunistas caracterizam um novo tipo de redes DTNs onde a mobilidade humana e a conectividade são utilizadas para determinar as oportunidades de comunicação - as PSNs (*Pocket Switched Networks*) (HUI; CROWCROFT, 2008) (HUI et al., 2005).

2.1.6 CONGESTIONAMENTO EM DTN

Quando uma taxa agregada de tráfego na qual todas as fontes injetam mensagens na rede excede a taxa de entrega de dados além da capacidade de armazenamento da rede isso é caracterizado um problema de congestionamento (KUROSE; ROSS, 2010). Pode-se dizer que um congestionamento em DTNs ocorre quando os recursos de armazenamento dos nós se tornam escassos devido à presença de muitas mensagens na rede.

Segundo Fall e Farrel (2008), um nó que experimenta um congestionamento pode solucionar o problema tomando as seguintes decisões em ordem de precedência: descartar mensagens cujo tempo de vida (em minutos) tenha expirado (atividade que deve ser regularmente executada); mover mensagens para o primeiro contato que estiver disponível; não aceitar mais pedidos de transferência de custódia de mensagens; não aceitar mais mensagens regulares se desconectando dos seus vizinhos por um determinado período de tempo; e descartar mensagens não expiradas. Ainda segundo Fall e Farrel (2008), o gerenciamento de congestionamento tem recebido pouca atenção dos pesquisadores. Os autores concluem que essa situação pode ser um resultado de um uso insuficiente da rede (por exemplo, pode não haver congestionamento significativo nos enlaces de comunicação). Devido à habilidade de as DTNs armazenarem mensagens por períodos de tempo significativos até que um contato seja estabelecido, taxas altas de transmissões podem ser necessárias durante uma oportunidade de conexão. Para nós receptores com recursos limitados tais transmissões em “rajadas” podem requerer mecanismos que determinem quais mensagens devem ser escalonadas durante uma oportunidade de contato.

A próxima seção apresenta inúmeras pesquisas relacionadas com a área das DTNs.

2.2 REVISÃO DA LITERATURA

Conforme descrito anteriormente, os protocolos de roteamento tradicionais não foram projetados para operar em redes com conexões intermitentes, onde é possível que nunca exista um caminho fim-a-fim entre quaisquer dois nós. Para assegurar uma comunicação adequada e robusta em redes com atrasos longos e conexões esporádicas, novos protocolos de roteamento foram concebidos para operar em DTNs. Esses protocolos podem ser classificados em três categorias (HUA et al., 2009):

- **Protocolos Replicadores** (VAHDAT; BECKER, 2000), (SPYROPOULOS et al., 2005): encaminham mensagens para todos ou quase todos os nós encontrados sem prever quais destes são bons encaminhadores de mensagens;

- **Protocolos baseados em Previsões** (LINDGREN et al., 2004) (DALY; HAAHR, 2007) (CHEN et al., 2009) (PUJOL et al., 2009) (HUI; CROWCROFT, 2008) (CAO; SUN, 2012): tentam prever quais nós são úteis para entregar mensagens com base em histórico de encontros entre os nós, informações de contexto dos nós, padrões de visitas a certas localizações e informações sociais;
- **Protocolos Escalonadores** (ZHAO et al., 2005) (BURNS et al., 2005) (CHUAH; YANG, 2005) (CHATURVEDI et al., 2006) (CHUAH; YANG, 2007) (CHUAH; MA, 2007): confiam na tarefa complexa de controlar a trajetória/movimento de nós especiais, chamados de *message ferries*, isto é, meios de transporte particulares ou públicos, para transferir mensagens entre regiões de nós desconectadas e melhorar a taxa de entrega de mensagens. Esta categoria de protocolos é especialmente utilizada em redes esparsas e sua complexidade de realização, devido ao controle da trajetória dos nós, traz custos grandes ao sistema (HUA et al., 2009) além de limitar a utilidade da rede que somente pode ser utilizada em ambientes específicos onde os nós terão influência sobre suas trajetórias (DALY; HAAHR, 2010).

As duas primeiras categorias de protocolos são de interesse da presente tese tendo em vista que elas podem operar em vários ambientes com modelos de mobilidade de nós diferentes. O estado da arte destas categorias está descrito em detalhes nas Subseções 2.2.1 e 2.2.2. Outras pesquisas encontradas na literatura relacionadas às DTNs propõem esquemas de gerenciamento de mensagens em *buffer* e estas são apresentadas na Seção 2.2.3.

2.2.1 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO REPLICADORES DE MENSAGENS

Em relação à quantidade de cópias de mensagens que são trocadas entre os nós DTN, alguns protocolos de roteamento são classificados como replicadores, no sentido em que repassam cópias de todas (ou quase todas) as mensagens armazenadas em seu *buffer* para todos (ou quase todos) os nós que encontram em seus caminhos até o destino. Essa estratégia é empregada quando os nós não possuem informações sobre o estado da rede de modo que não é possível realizar o cálculo dos melhores caminhos a seguir para encaminhar uma mensagem. Segundo Daly e Haahr (2007), essa categoria de protocolos somente pode ser efetiva quando o *buffer* dos nós é infinito o que não é uma realidade em redes de comunicação sem fio. Com o aumento da escala na rede, essa categoria de protocolos ocupa muitos recursos fazendo com que seu desempenho caia rapidamente.

Os autores Vahdat e Becker (2000) propõem o primeiro protocolo para DTNs, chamado protocolo de roteamento epidêmico, no qual as mensagens são rapidamente dis-

tribuídas pela rede como uma epidemia. A cada novo contato entre os nós, ocorre uma troca de vetores com o resumo das mensagens contidas em cada *buffer*. Ao receber esse vetor, cada nó solicitará as mensagens que não possui ao outro nó. Dessa forma, o *buffer* de mensagens dos nós são “espelhados”, a não ser que a capacidade de armazenamento de algum nó estoure. Os resultados desse protocolo indicam que quanto mais nós existirem na rede, maior será a probabilidade do destino ser alcançado, porém a um custo alto em relação à taxa alta de transmissão de cópias das mensagens e ao consumo de recursos. Portanto, o protocolo epidêmico não é considerado escalável quando a carga de tráfego na rede cresce. Para limitar o uso de recursos, um contador de saltos pode ser configurado em cada mensagem. Quando o *buffer* alcança sua capacidade máxima e uma nova mensagem precisa ser recebida, a mensagem mais velha do *buffer* é descartada.

Alguns protocolos de roteamento como o *Spray and Wait* (SPYROPOULOS et al., 2005) tentam controlar o número de mensagens replicadas na rede. Nesse protocolo, para cada mensagem originada em um nó, cópias desta são inicialmente replicadas para todos os vizinhos de um nó e na sequência esperam até que um dos nós encontre o destino da mensagem e retorne uma confirmação.

2.2.2 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO BASEADOS EM PREVISÕES SOBRE O ESTADO DA REDE

Os protocolos de roteamento descritos na Seção 2.2.1 lidam com a incerteza nas informações de roteamento através da replicação de mensagens de modo que vários caminhos possam ser explorados. A replicação executada de forma independente do estado da rede cria um potencial para congestionamentos tendo em vista que cópias da mesma mensagem são criadas na rede e ocupam recursos desta. Segundo Wittie et al. (2009), o alto grau de replicação de mensagens nas DTNs entra em desacordo com a duração limitada de contato entre os nós. Nesse caso, congestionamentos podem ocorrer quando uma grande quantidade de mensagens é armazenada no *buffer* dos nós e espera-se transferi-las quanto uma oportunidade de contato surge.

Com o intuito de aumentar o desempenho das DTNs, alguns protocolos de roteamento sugerem a obtenção de informações sobre o estado da rede. Com base nessas informações, um nó é capaz de decidir para qual(is) nó(s) uma mensagem pode ser encaminhada de modo a alcançar eventualmente seu destino.

Jain et al. (2004) apresentam diferentes algoritmos de roteamento para DTNs que se diferenciam em relação aos conhecimentos adquiridos sobre a rede. Os autores afirmam

que as redes que têm um número grande de oportunidades de conexão requerem algoritmos de roteamento menos inteligentes. Porém, quando os recursos se tornam escassos, mais informação sobre a rede é necessária para melhorar o desempenho. Os autores propõem obter, em determinados instantes de tempo, diferentes tipos de informações: tempo médio de espera até que um novo contato seja estabelecido entre dois nós; início e duração de todos os contatos entre dois nós quaisquer; ocupações de filas nos nós; demanda de tráfego presente e futuro. As informações obtidas são determinísticas uma vez que o caminho fim-a-fim entre uma origem e seu destino é determinado antes de as mensagens serem transmitidas. Entretanto, a importância deste trabalho está na classificação dos tipos de informações que podem ser obtidas em DTNs para auxiliar um protocolo de roteamento.

Lindgren et al. (2004) propõem o protocolo de roteamento PROPHET (*Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity*) o qual utiliza um histórico de encontros e transitividade dos nós. Vetores de informações são trocados entre os nós da rede indicando a probabilidade de cada nó entregar as mensagens armazenadas em seu *buffer* para cada destino conhecido b . Essa probabilidade aumenta cada vez que esses dois nós se encontram ($P(a,b) = P(a,b)_{antiga} + (1 - P(a,b)_{antiga}) \times P_{Inic}$, onde P_{Inic} é uma constante de inicialização para a previsão de entrega) e diminui se eles deixam de se encontrar com frequência ($P(a,b) = P(a,b)_{antiga} \times \gamma^{TUnid}$, onde γ é a constante de redução da previsão de entrega e $TUnid$ é o número de unidades de tempo que se passou desde a última vez em que a métrica foi reduzida). Como estratégia de encaminhamento, quando um nó a encontra um nó b , uma mensagem é enviada para b se a previsão de entrega da mensagem para o destino que este nó possui for maior se comparada à previsão de a . Uma vez que o nó a ainda pode encontrar um nó melhor ou até mesmo o destino final da mensagem, a mensagem não é excluída do seu *buffer* enquanto existir capacidade de armazenamento disponível. Quando o *buffer* atinge sua capacidade máxima e uma nova mensagem é recebida, a mensagem mais antiga do *buffer* é descartada, isto é, emprega-se a técnica de descarte de mensagens FIFO (*First In First Out*). A probabilidade de entrega também possui uma propriedade transitiva ($P(a,c) = P(a,c)_{antiga} + (1 - P(a,c)_{antiga}) \times P(a,b) \times P(b,c) \times \varphi$, onde φ é uma constante de dimensionamento da propriedade de transitividade) que se baseia na seguinte observação: se um nó a encontra um nó b com frequência e este nó b encontra frequentemente o nó c , então, o nó c provavelmente é um bom nó para encaminhar mensagens destinadas ao nó a . Através dessa troca de vetores os nós podem solicitar de outros nós as mensagens que possuem uma probabilidade maior de serem entregues ao destino através dele. Quando houver mais de uma mensagem para ser transmitida em um determinado tempo, a mensagem cujo destino é mais provável de ser encontrado será

transmitida primeiro. Se as mensagens possuírem as mesmas probabilidades, a mais velha será transmitida primeiro.

O protocolo de roteamento TIR (*Time Interval Routing*), proposto por Lu et al. (2009), e o protocolo de Chen et al. (2009) também consideram um histórico de encontros para determinar para quais nós uma mensagem deve ser entregue. Porém, no protocolo de Chen et al. (2009) uma única cópia de cada mensagem estará em circulação na rede.

Hay e Giaccone (2009) investigam uma DTN determinística e centralizada na qual os tempos de contato entre os nós são conhecidos a priori (ou podem ser precisamente previstos). Os autores propõem a modelagem de uma DTN como um grafo orientado a eventos e independente do tempo para expressar a ordem cronológica de contatos entre os nós. Esse grafo serve de entrada para que algoritmos possam encontrar uma sequência de nós por onde os dados devem seguir entre uma origem e seu destino e calcular os tempos de contato nos quais esses dados devem ser transmitidos. Para pontuar cada arco do grafo, os autores consideram para cada enlace o seu tempo de propagação e sua largura de banda, e para cada nó o tamanho do seu *buffer* e a quantidade de energia disponível.

Os autores Ling e Wei (2009) propõem um algoritmo de roteamento no qual a influência de roteamento dos nós é avaliada de acordo com o retorno dos resultados de cada processo de roteamento. Dessa forma, os nós que completam um roteamento o maior número de vezes são os que mais auxiliarão nos próximos processos de roteamento.

Ding et al. (2009) propõem a construção de um sub-grafo local que inclui todos os vizinhos de cada par de contato n e m . Esses vizinhos são descobertos quando os nós n e m se encontram e trocam uma lista de seus vizinhos conectados diretamente. A partir desse grafo é possível encontrar os nós de articulação, isto é, pontos de articulações que se removidos desconectarão o grafo. Esses nós são, então, considerados os mais capazes de entregar mensagens fora da sua área local.

Wittie et al. (2009) assumem a existência de um canal de controle separado do canal de dados onde são trocadas informações globais de estado da rede. Com as informações globais obtidas, as mensagens armazenadas nas filas dos nós são ordenadas de modo que aquelas que estiverem mais próximas do destino em questão são encaminhadas primeiro. Para isso, cada nó calcula a distância de cada mensagem em sua fila até seu destino através do uso de informações de posições de todos os nós disseminadas pelo canal de controle da rede.

Cao et al. (2012) propõem um sistema híbrido que determina quando uma mensagem deve ser replicada na rede com base em informações geográficas e utilidades dos

nós. As informações geográficas são utilizadas para superar o problema que um nó, com a custódia de uma mensagem, enfrenta quando encontra um nó vizinho cuja utilidade seja inferior a sua, fazendo com que a entrega da mensagem seja adiada até que um candidato melhor seja encontrado. Nesta situação, os autores propõem que cada nó da rede tome a decisão sobre a replicação de uma mensagem considerando um histórico de informações geográficas sobre todos os nós já encontrados. Em cada encontro, um nó armazena a identificação do nó encontrado, suas coordenadas geográficas, sua velocidade de movimento e o horário do encontro. Com essa informação, estima-se a faixa de movimentação de cada nó da rede. Assim, uma mensagem será replicada para um nó candidato caso este nó esteja se aproximando ou localizado na faixa de movimentação do destino da mensagem. Entretanto, dado o ambiente esparsos e de alta mobilidade das DTNs, o desafio dessa proposta está na obtenção de informações geográficas corretas sobre cada nó. Para determinar a utilidade dos nós são utilizadas informações sobre os nós em comum encontrados por ambos o destino d da mensagem e o nó i que possui a custódia da mensagem, o número total de nós encontrados por i e o número de encontros entre i e d . Como outros critérios para decisão de roteamento tem-se: o número de vezes que cada mensagem foi transmitida corretamente, o número de falhas no encaminhamento de cada mensagem, o tempo de vida inicial e restante para cada mensagem.

Em Cao e Sun (2012) é fornecido um levantamento detalhado das aplicações voltadas para DTNs desenvolvidas entre os anos de 2006 até 2010. Khabbaz et al. (2012) apresentam um levantamento realizado em uma seleção de 80 artigos que os autores consideram mais relevantes nas seguintes áreas de pesquisa em DTNs: roteamento, controle de fluxo e congestionamento e gerenciamento de *buffer*.

Outros protocolos de roteamento baseados em informações sobre a rede propõem analisar aspectos das redes sociais para explorar as características de propagação de mensagens em DTNs. Antes de descrever esses protocolos, a Seção 2.2.2.1 apresenta alguns conceitos importantes sobre como os aspectos das redes sociais podem atuar nas DTNs.

2.2.2.1 Protocolos de Roteamento orientados por Informações de Redes Sociais

Como parte do surto de pesquisas em redes complexas e repletas de desafios, uma atenção especial tem sido dedicada à análise computacional das redes sociais.

Segundo Wasserman e Faust (1994), as redes sociais são uma maneira de compreender e analisar a interação e a organização social de um grupo de indivíduos. Newman (2001b) define uma rede social como uma coleção de pessoas, cada uma das quais familiar

a algum subconjunto de outras pessoas. Essa rede pode ser representada por um conjunto de pontos que representam as pessoas unidas por enlaces que representam a comunicação, colaboração, interação ou influência entre elas. Liben-Nowell e Kleinberg (2003) destacam que as redes sociais são objetos altamente dinâmicos; elas crescem e mudam rapidamente no decorrer do tempo através da adição de novos enlaces. A análise de redes sociais foca, então, nas ligações, isto é, nos relacionamentos entre esses indivíduos, também chamados de nós, e não nos nós indivíduos e seus atributos (HANNEMAN; RIDDLE, 2005).

Como não se espera que nas DTNs os contatos entre as pessoas sejam estabelecidos aleatoriamente, mas sim com base nas relações sociais entre as pessoas envolvidas, acredita-se que o grau de sociabilidade entre os nós se torna um fator fundamental na determinação de oportunidades de comunicação. Por esse motivo, algumas questões sobre contatos e influências em uma rede levantadas pelos pesquisadores Pool e Kochen (1978) são discutidas na presente seção:

- Quantos indivíduos conhecem cada um dos membros de uma rede?
- Quais tipos de indivíduos têm o maior número de contatos? São estes os indivíduos mais influentes na rede?
- Como esses contatos se organizam? Qual é a estrutura da rede?
- Qual é a probabilidade de dois indivíduos escolhidos aleatoriamente se conhecerem?
- Qual é a probabilidade da comunicação entre dois indivíduos necessitar de nós intermediários?

Na tentativa de refletir sobre essas perguntas, medidas de centralidade são bastante empregadas na teoria de grafos focando o interesse na posição de determinadas pessoas e no papel que assumem dentro da estrutura global de uma rede (FREEMAN, 1977). Um nó de uma rede é considerado importante ou proeminente se os seus relacionamentos o tornam particularmente visível aos outros nós da rede (WASSERMAN; FAUST, 1994). Esse nó considerado central terá uma probabilidade maior de se conectar ou se relacionar com outros membros da rede.

Existem várias formas de medir a centralidade de um nó em uma rede. Algumas medidas de centralidade amplamente utilizadas são (FREEMAN, 1977) (FREEMAN, 1979) (SABIDUSSI, 1966):

- **Centralidade de Grau:** na centralidade de grau (*Degree Centrality*), o nó mais central é aquele que mantém o maior número de contatos diretos com outros nós

na rede. Esses nós podem ser vistos como os nós mais populares da rede. Em contrapartida, nós com grau pequeno ocupam uma posição periférica na rede. O grau de centralidade de um nó n_i é calculado por:

$$C_{grau}(n_i) = \frac{\sum_{j=1}^n (n_i, n_j)}{(n-1)}, \quad (2.1)$$

onde $(n_i, n_j) = 1$ se existe um enlace direto entre os nós n_i e n_j e n indica o número total de nós da rede;

- **Centralidade de Intermediação:** a centralidade de intermediação (*Betweenness Centrality*) considera que as interações entre dois nós não adjacentes dependem de nós intermediários que se localizam no caminho mais curto entre eles. Bavelas (1948) sugere que quando uma pessoa em um grupo está estrategicamente localizada no caminho de comunicação mais curto conectando pares de outros nós, essa pessoa está em uma posição central. Tais pessoas influenciam outros membros controlando o fluxo de informações na rede. Para ter uma alta centralidade de intermediação, um nó deve estar no caminho mais curto entre pares de outros nós. Então, a centralidade de intermediação de um determinado nó n_i é dada por Freeman (1977):

$$C_{inter}(n_i) = \sum_j^n \sum_k^n \frac{c_{j,k}(n_i)}{c_{j,k}}, \quad (2.2)$$

onde $c_{j,k}$ é o número total de caminhos mais curtos, calculados sob alguma outra métrica, que interligam os nós j e k . $c_{j,k}(n_i)$ representa o número desses caminhos mais curtos que incluem o nó n_i sendo que $j \neq k \neq n_i$.

Segundo Freeman (1977), as métricas de centralidade são baseadas na análise de uma rede completa que algumas vezes é referenciada como uma rede sociocêntrica. Tais métricas se tornam difíceis de avaliar em redes com um grande número de nós porque elas precisam adquirir o conhecimento sobre toda a topologia da rede. De modo a limitar esse conhecimento, o protocolo SimBet (DALY; HAAHR, 2007)) explora o conceito de redes egocêntricas² (MARSDEN, 2002) onde, devido à complexidade de se obter informações sobre toda a topologia de uma rede, se faz uso apenas de informações obtidas localmente de vizinhos para construir um grafo local e analisar os encontros entre os nós. Os autores destacam que as redes sociais exibem o fenômeno da teoria do mundo pequeno que vem da observação de que os indivíduos estão frequentemente interligados por uma cadeia

²Uma rede ego é composta por um único nó/ator (ego) juntamente com os atores/nós que estão ligados diretamente a ele. Consequentemente, a análise em uma rede ego pode ser feita localmente pelos nós individuais sem o conhecimento completo da rede.

pequena de relações ((MILGRAM, 1967) apud (DALY; HAAHR, 2007)). São utilizados os conceitos de similaridade social de Newman (2001a) e de centralidade de intermediação proposto por Freeman (1977) para medir a utilidade de um nó no encaminhamento de mensagens. O primeiro conceito define a similaridade de dois nós com base nos vizinhos que eles têm em comum (LIBEN-NOWELL; KLEINBERG, 2003). O segundo conceito define o número de vezes que um nó esteve no caminho mais curto entre outros dois nós. Essas métricas são baseadas somente em informações locais e em informações de vizinhos a dois saltos. Quando um novo nó é encontrado por um nó i , o novo nó envia para o nó i uma lista de nós que ele encontrou. Nesse momento, uma nova entrada é inserida em uma matriz de adjacência A de $n \times n$ posições (onde n é o número de contatos do nó i) que representa os contatos a dois saltos do nó i . Cada entrada da matriz $A_{i,j}$ recebe o valor 1 se existir um contato entre i e j , e o valor zero caso contrário. A centralidade de intermediação é calculada pela soma da recíproca das entradas de $A^2[1 - A]$. Assim, quando dois nós se encontram eles trocam uma lista de nós de destino para os quais eles possuem mensagens com seus respectivos valores de similaridade e centralidade de intermediação. As utilidades dos nós são calculadas e as mensagens são encaminhadas para o nó que possuir a maior pontuação. Ao contrário das estratégias de múltiplas cópias, uma única cópia de cada mensagem percorre a rede na busca pelo destino.

Miklas et al. (2007) caracterizam duas categorias de interações: (1) entre amigos - quando pessoas se encontram com regularidade e por longos períodos de tempo, e o conjunto de seus vizinhos são similares; (2) entre estranhos - quando o encontro entre as pessoas ocorre esporadicamente. O objetivo do trabalho é demonstrar o desempenho de sistemas móveis na presença e na ausência de informações sociais. Objetivando dar preferências aos nós intermediários que são amigos do nó da origem ou do nó destino, os resultados demonstram que o desempenho de quatro protocolos de roteamento propostos na literatura para as DTNs (encaminhamento de mensagens apenas para o destino final, encaminhamento para um único nó intermediário, para no máximo dois nós intermediários e para todos os nós encontrados (epidêmico)) pode ser substancialmente melhorado se informações sociais forem incorporadas.

O objetivo do trabalho apresentado por Hui e Crowcroft (2008) é demonstrar que a mobilidade humana pode ser prevista com base no seu dia a dia e que tal previsão pode melhorar a taxa de entrega das mensagens. Como algoritmo de roteamento, os autores propõem o uso de nós centrais para disseminar dados e, então, analisar o quão bem a centralidade de um nó no passado pode prever a centralidade deste no futuro. Tal centralidade é quantificada através do indicador de centralidade de intermediação.

Cada nó sabe apenas a sua própria centralidade e a centralidade dos nós que ele encontra. Conseqüentemente, ele não sabe qual nó possui a maior centralidade em toda a rede. A estratégia utilizada, chamada RANK, é simples: as mensagens são encaminhadas para todos os nós encontrados cuja centralidade seja maior que a do nó corrente até que o destino seja encontrado ou que o tempo da mensagem expire.

Pujol et al. (2009) propõem um algoritmo de roteamento para DTNs que confia na força das interações percebidas e na assortatividade das redes sociais. O primeiro conceito foi desenvolvido da influência social (GRANOVETTER, 1976) que representa a avaliação subjetiva da força de uma ligação social entre dois indivíduos. Quanto maior for essa força, maior a probabilidade de um contato ser mantido no tempo. Então, as mensagens são preferencialmente encaminhadas aos usuários que têm uma relação social mais forte com o alvo da mensagem. E a assortatividade limita a troca de mensagens àqueles usuários com status social similar.

Trabalhos como os de Cao e Sun (2012) e Zhu et al. (2012) apresentam diferentes propriedades sociais para as DTNs e fornecem um resumo de protocolos de roteamento para DTNs baseados em aspectos sociais. Segundo Zhu et al. (2012) esses protocolos de roteamento podem considerar:

- Características sociais positivas da rede que podem auxiliar na seleção de nós encaminhadores de mensagens e melhorar o desempenho do roteamento. Dentre essas características, destacam-se:
 - Detecção de comunidades ou agrupamentos de nós em redes sociais (SATULURI et al., 2011);
 - Medidas de centralidade dos nós e similaridade entre os nós, conforme os trabalhos relacionados anteriormente;
 - Medidas para detectar a qualidade de uma amizade entre um par de nós. Essas medidas normalmente consideram dois nós como amigos se eles se encontram com frequência e têm contatos de longa duração. Bulut e Szymanski (2010) propõem o uso de um histórico de encontros entre cada par de nós para calcular a qualidade de cada enlace e permitir que um nó i construa sua própria comunidade de amizades. A comunidade de i conterá um conjunto de nós j cuja qualidade de enlace consigo mesmo seja maior do que um limite pré-definido. Assim, quando um nó i tiver uma mensagem a ser enviada para um destino d , e este encontrar um nó j , o nó i somente encaminhará a mensagem para j se j

e d pertencerem a mesma comunidade de amizade e se j for mais amigo de d do que i ;

- Características sociais negativas que podem afetar o desempenho da rede, tais como o comportamento egoísta dos nós. Uma vez que os nós móveis em DTNs são controlados por entidades racionais, como pessoas ou organizações, estas podem se comportar de forma egoísta, isto é, tentando maximizar suas próprias utilidades e conservando seus recursos limitados. Assim, nós egoístas podem relutar em servir como encaminhadores de mensagens para outros nós. Como se espera que o roteamento em DTNs seja uma atividade inerentemente cooperativa, o processo de encaminhamento de mensagens pode ser criticamente prejudicado por comportamentos egoístas dos nós. Motivadas por essa observação, propostas como as de Li et al. (2010) e Mei e Stefa (2012) tentam desenvolver mecanismos de incentivo para estimular os nós egoístas a cooperarem no encaminhamento de mensagens em nome de outros nós. A característica de egoísmo pode ser definida como *individual* onde um nó egoísta é considerado como possuindo o mesmo nível de egoísmo para todo outro nó da rede (MEI; STEFA, 2012) ou *social* onde um nó egoísta pode possuir níveis diferentes de egoísmo para grupos distintos de nós (LI et al., 2010), podendo neste último caso um nó egoísta encaminhar mensagens somente em nome de outros nós que possuam relações sociais com ele.

2.2.3 POLÍTICAS DE GERENCIAMENTO DE MENSAGENS EM *BUFFER*

Em relação às políticas de escalonamento de mensagens em DTNs, a maior parte das propostas encontradas na literatura encaminha as mensagens conforme sua ordem de chegada (FIFO) em cada *buffer* por onde passa. Em relação à política de descarte empregada para liberar espaço nos *buffers* dos nós de modo a possibilitar a alocação de novas mensagens, a maioria dos trabalhos descarta as mensagens mais antigas armazenadas. A seguir são apresentadas algumas pesquisas propostas na literatura para gerenciar de forma mais eficaz o *buffer* dos nós.

Conforme visto na Seção 2.2.2, quando houver mais de uma mensagem para ser transmitida em um determinado tempo, o protocolo PROPHET prioriza o encaminhamento da mensagem cujo destino é mais provável de ser encontrado. Caso as mensagens possuam as mesmas probabilidades de entrega, a mais velha é transmitida primeiro.

Lu et al. (2009) propõem um esquema de escalonamento onde se prioriza o encaminhamento das seguintes mensagens: mensagens com menor tamanho; mensagens com

menor número de falhas na tentativa de transferência para um próximo salto e mensagens que foram menos encaminhadas.

A política de escalonamento de Guedes et al. (2008) prioriza as mensagens na seguinte ordem: (1) mensagens destinadas ao próximo nó receptor; (2) mensagens que foram menos encaminhadas com o intuito de aumentar a propagação destas pela rede; Se houver um empate, são priorizadas as mensagens originadas pelo próprio nó emissor; Por fim, escolhe-se a mensagem mais antiga do *buffer* (FIFO). Como política de descarte, os autores descartam as mensagens mais encaminhadas.

Em Davis et al. (2001) são apresentadas algumas políticas de descarte de mensagens: descarte aleatório; descarte da mensagem mais antiga armazenada no *buffer* (FIFO); descarte da mensagem mais antiga na rede; e descarte baseado na probabilidade de entrega de uma mensagem. Neste último, o protocolo mantém informações sobre a localização, movimento e encontro entre os nós.

Os protocolos SWIM (SMALL; HAAS, 2005) e MaxProp (BURGESS et al., 2006) fazem uso de listas de reconhecimentos de mensagens trocadas entre os nós para controlar as mensagens que não são mais necessárias manter em *buffer*. No protocolo SWIM, assim que uma mensagem é encaminhada a um nó intermediário, não necessariamente seu destino final, o identificador dessa mensagem é inserido na lista de reconhecimentos. Em MaxProp, o identificador apenas é acrescentado à lista quando a mensagem é entregue ao seu destino final. Para descobrir quando as mensagens foram devidamente entregues ao seu destino, a lista completa de mensagens reconhecidas são trocadas entre os nós.

2.3 DISCUSSÕES

O presente capítulo introduziu o conceito de redes tolerantes a atrasos, demonstrou a sua arquitetura, apresentou os diferentes protocolos de roteamento desenvolvidos para as DTNs e as técnicas criadas para gerenciar a ocupação da áreas de armazenamento dos nós. Analisando as características de uma DTN e o seu estado da arte é possível constatar que muitos desafios ainda precisam ser solucionados pela comunidade de pesquisa dentre os quais destacam-se:

- Em um ambiente de comunicação onde o espaço de armazenamento dos nós e a largura de banda dos enlaces de comunicação são infinitos, os protocolos replicadores de mensagens, descritos na Seção 2.2.1, fornecem uma boa solução para o problema de roteamento em redes conectadas intermitentemente com respeito à taxa

de mensagens entregues ao seu destino e à latência de cada entrega. Protocolos com replicação controlada de mensagens tentam reduzir o número de encaminhamentos através da inserção de um campo em cada mensagem que limita o número de saltos que ela pode percorrer. Porém, tal limite é difícil de estipular tendo em vista que é altamente dependente do diâmetro da rede. Considerando que em DTNs os recursos são escassos, é de grande valia encontrar uma alternativa aos protocolos replicadores que otimize o uso de recursos, minimizando o número de mensagens replicadas e o número de mensagens descartadas por falta de espaço em *buffer*, ainda que maximizando ou mantendo um desempenho aceitável em relação à taxa de entrega das mensagens;

- Diante do problema encontrado pelos protocolos replicadores em reduzir o número de encaminhamento de mensagens, é importante determinar de forma dinâmica o número de nós para o qual uma determinada mensagem deve ser encaminhada de modo a, eventualmente, alcançar o seu destino. Quanto maior este número, melhor será a chance de essa mensagem ser entregue ao destino, porém mais recursos, como largura de banda e espaço em *buffer*, serão consumidos;
- Prover protocolos de roteamento que realizem além de buscas locais³ (isto é, na vizinhança de um nó), buscas globais (isto é, em todo o espaço de busca) nas suas tomadas de decisão de roteamento. Se as decisões de roteamento forem tomadas com base apenas em informações locais de vizinhos a um salto, como faz o protocolo PROPHET (ver Seção 2.2.2), ou em informações locais e de vizinhos a dois saltos, como no protocolo SimBet (ver Seção 2.2.2.1), pode ocorrer de existir um nó com qualidade alta próximo ao nó de origem e vários nós com qualidade baixa próximos ao destino o que tornará mais onerosa a entrega das mensagens ao destino desejado. Isso é particularmente verdadeiro se no caminho entre quaisquer dois nós existirem vários nós intermediários;
- Devido à dinâmica das DTNs, a escolha do melhor caminho para cada destino não deve ser o principal objetivo de um protocolo de roteamento. É importante manter um grande número de caminhos, prevenindo que as mensagens sejam sempre encaminhadas para os mesmos nós intermediários;

³Segundo Milss et al. (2004), um algoritmo de busca local consiste de uma função que gera um conjunto de soluções vizinhas $N(x)$ de uma solução x , uma função de custo para avaliar a qualidade $f(x)$ de cada solução x e alguma heurística para escolher entre as soluções candidatas. Entretanto, os algoritmos de busca local têm uma desvantagem; após pequenas mudanças nas soluções para as soluções vizinhas, pode ocorrer de a função de custo $f(x)$ não poder mais ser melhorada e o algoritmo convergir prematuramente para o que é conhecido como um ótimo local.

- Determinar as métricas que devem ser utilizadas pelos protocolos de roteamento para auxiliá-los nas decisões de encaminhamento. Se um protocolo de roteamento confiar inteiramente em uma única métrica como, por exemplo, no nó com maior popularidade para entregar as mensagens, mais espaço de armazenamento será necessário nesse nó provendo assim uma distribuição injusta da carga de tráfego na rede. Então, sempre que possível os protocolos de roteamento devem considerar métricas sobre o perfil de comportamento dos nós e da rede de modo a tomar melhores decisões no direcionamento do tráfego da rede;
- Conforme destacado em Zhang (2006), algoritmos adaptativos e de auto-aprendizado devem ser desenvolvidos de modo que a rede seja cognitiva e, então, decisões inteligentes sejam tomadas sobre o escalonamento e o encaminhamento de mensagens;
- Como em uma DTN não é possível garantir um caminho fim-a-fim entre um nó que origina uma mensagem e o destino desta, a transferência de custódia das mensagens é requisitada aos nós intermediários da rede (ver Seção 2.1.1). Isso implica que alguns nós podem precisar armazenar várias mensagens em seu *buffer* por períodos longos de tempo e, então, tentar transmiti-las em uma oportunidade de contato. Porém, pode ocorrer de apenas um contato estar disponível em um instante de tempo e este não ter recurso suficiente (energia ou espaço em memória) para receber todas as mensagens. Diante desse cenário e da duração limitada de cada contato na rede, é necessária uma disciplina de escalonamento de mensagens para determinar a ordem na qual as mensagens devem ser transmitidas;
- Conforme destacado por Zhang (2006), quando múltiplas cópias de uma mesma mensagem estão em circulação na rede, é necessário algum método que permita que cópias desnecessárias sejam descartadas reduzindo assim a taxa de ocupação do *buffer* dos nós. Por exemplo, quando as mensagens são recebidas com sucesso no seu destino, os nós intermediários podem ser informados desse evento de modo a descartar tais mensagens. Essa informação consome recursos extras na rede, porém pode aumentar a eficiência do gerenciamento de *buffers*. Esquemas de gerenciamento de *buffer* apropriados também devem indicar quais mensagens podem ser descartadas quando um *buffer* atingir sua capacidade.

Diante dos desafios supracitados, conclui-se que ainda há muito a ser explorado na área das DTNs. A presente tese visa investigar esses desafios e, então, propor componentes para resolvê-los conforme é apresentado no Capítulo 5.

3 INTELIGÊNCIA COLETIVA

O termo inteligência coletiva, originário do termo em inglês *Swarm Intelligence*, foi cunhado no final dos anos 1980 para referenciar sistemas de robótica celular nos quais uma coleção de unidades autônomas ou agentes¹ interage localmente em um ambiente com base em regras simples de comportamento (BENI, 1988). Atualmente, o termo agente está associado a algoritmos voltados para a solução de problemas tendo por base o comportamento coletivo de organismos sociais, desde colônias de insetos até sociedades humanas. Pode-se dizer que a inteligência coletiva possui, então, duas frentes: algoritmos baseados no comportamento coletivo de insetos sociais (BONABEAU et al., 1999) úteis para solucionar problemas de otimização² combinatória³; e algoritmos baseados na cultura ou cognição social (REYNOLDS, 1994) que demonstram eficácia na aceleração da busca e otimização em espaços contínuos. Nesta tese, pretende-se agregar estas duas frentes através da proposta de um protocolo híbrido de roteamento para as DTNs, o qual se beneficiará das características complementares destas duas frentes.

A inteligência coletiva pode ser considerada um ramo de uma área mais ampla denominada Computação Natural. Segundo Ballard (1999), a Computação Natural é a terminologia utilizada para descrever os sistemas computacionais desenvolvidos com inspiração ou utilização de algum mecanismo biológico ou natural de processamento de informação.

¹O termo agente é atualmente utilizado para designar qualquer coisa entre uma mera sub-rotina de um programa de computador e um organismo inteligente como um ser humano. Intuitivamente, para ser considerado um agente, deve-se apresentar algum grau de autonomia ou identidade; isto é, o agente deve ser distinguível de seu ambiente por alguma fronteira espacial, temporal ou funcional (CASTRO, 2006).

²O conceito de otimização é empregado em problemas de decisões complexos que envolvem a seleção de valores para variáveis inter-relacionadas com foco em um objetivo projetado para quantificar o desempenho e medir a qualidade de cada decisão (LUENBERGER, 2003). Esse objetivo é maximizado (ou minimizado dependendo da formulação do problema) e pode estar sujeito a uma série de restrições que limitam a seleção dos valores das variáveis de decisão.

³O termo otimização combinatória é reservado para problemas nos quais as variáveis de decisão são discretas, isto é, onde a solução é uma sequência de inteiros ou outros objetos discretos (RAYWARD-SMITH et al., 1996). O problema de encontrar soluções ótimas através da permutação de tais variáveis de decisão é, portanto, conhecido como problema de otimização combinatória. Segundo Blum e Roli (2003), em uma otimização combinatória não existe um método ótimo para encontrar os valores de soluções globais. Para resolvê-los, pode-se considerar satisfatórios os valores próximos aos ótimos globais.

Castro (2006) fornece algumas dicas indicando que a computação natural pode ser utilizada quando:

- O problema a ser resolvido é complexo, isto é, envolve um número grande de variáveis ou soluções;
- O problema a ser resolvido é dinâmico, isto é, quando os estados de um ambiente podem mudar em qualquer escala de tempo, periodicamente ou em intervalos de tempo irregulares, e essas mudanças podem ocorrer em relação à localização das soluções ótimas no espaço de busca e/ou em relação à qualidade destas soluções;
- Não é possível garantir que uma solução encontrada seja ótima, mas é possível encontrar uma medida de qualidade que permita a comparação entre as soluções encontradas;
- Quando a diversidade é importante; isto é, uma única solução não é o suficiente.

Os algoritmos baseados em inteligência coletiva são capazes de encontrar inúmeras soluções de modo paralelo e iterativo devido ao método ser baseado em uma população de indivíduos. O comportamento que emerge é o de um grupo de indivíduos relativamente simples que interagem através de regras simples e dinamicamente se auto-organizam⁴ mantendo suas posições ao redor de localizações consideradas ótimas, isto é, uma vez encontrada uma solução, grande parte dos indivíduos ficarão agrupados ao redor desta. A esses sistemas que se desenvolvem e evoluem através da adição constante de novas partes até que um determinado critério ou estado de maturidade seja alcançado dá-se o nome de sistemas *bottom-up* (CASTRO, 2006).

Nos sistemas *bottom-up*, os indivíduos que residem em um nível baixo começam a produzir comportamentos em um nível ou escala superior: insetos sociais como as formigas constroem colônias; as pessoas formam sociedades humanas e cidades; os animais sociais criam rebanhos, bandos, cardumes; neurônios formam cérebros; células e moléculas compõem o sistema imunológico.

Frente a essas características, pesquisas propõem a modelagem da vida e inteligência natural e biológica para a resolução de problemas computacionais complexos em vários domínios, da engenharia à biologia. Tais pesquisas se inspiram no comportamento

⁴Sistemas auto-organizáveis são normalmente compostos de um número grande de elementos que interagem entre si e com seu meio ambiente. A multiplicidade de interações que caracteriza tais sistemas enfatiza que eles são dinâmicos e requerem interações contínuas para produzir e manter a estrutura (CASTRO, 2006).

de indivíduos que, em grupo, desenvolvem características adaptativas⁵ cada vez mais complexas.

Segundo Hoffmeyer (1994), um grupo de agentes não sofisticados (geralmente móveis) que se comunicam direta ou indiretamente através de ações no seu ambiente local e que coletivamente buscam uma solução para um problema distribuído pode ser referenciado como um *swarm*.

Em Millonas (1994) sugerem-se cinco princípios básicos de um sistema de inteligência coletiva:

- Proximidade: indivíduos devem ser capazes de interagir e formar enlaces sociais;
- Qualidade: indivíduos devem ser capazes de avaliar suas interações com o ambiente e com os outros indivíduos;
- Diversidade: melhora a capacidade de o sistema reagir a situações desconhecidas e inesperadas;
- Estabilidade: indivíduos não devem modificar seus comportamentos de um modo para outro em resposta a todas as flutuações ambientais;
- Adaptabilidade: capacidade de se adaptar às mudanças ambientais e populacionais.

Uma vez que não se tem um conhecimento global de um ambiente, os indivíduos simples (agentes) de um grupo interagem entre si e com o seu meio ambiente na busca por solucionar um problema. Ao final de cada processo as informações coletadas são propagadas para todo o grupo (ou parte dele) de modo que um problema seja solucionado de forma mais eficiente do que se fosse tratado por um único indivíduo. Segundo Johnson (2002), nesse sistema *bottom-up* os agentes começam a produzir comportamentos cada vez mais complexos e a inteligência surge como resultado do padrão de interações simples entre eles no tempo.

Considerando que o roteamento em DTNs é um problema que depende da própria dinâmica da rede, a presente tese buscar atender alguns requisitos desejáveis para o sucesso de uma busca dinâmica, tais como:

- Utilizar alguma forma de memória de curto ou longo prazo (separada da população de soluções) para guardar algumas soluções boas encontradas no passado. Segundo

⁵A adaptação é definida como a habilidade de um sistema ajustar sua resposta a um estímulo dependendo do ambiente. O termo faz, então, referência a um organismo, um dispositivo ou um mecanismo que é alterado de modo a se tornar mais adequado a uma nova aplicação ou situação (CASTRO, 2006).

Branke e Schmeck (2003), solucionar um problema sem reutilizar informações do passado pode consumir bastante tempo, a solução para o novo problema pode não divergir muito da solução antiga ou uma mudança pode não ser identificável diretamente, isto é, seria preciso detectar o estado não estacionário do ambiente o que nem sempre é possível;

- Utilizar algoritmos populacionais para realizar uma busca por várias soluções paralelamente no espaço de busca (ao invés de se concentrar em uma única solução). Segundo França (2005), o controle dinâmico do número de indivíduos em uma população facilita o acompanhamento da dinâmica do problema e promove a manutenção de diversidade mantendo cada solução em uma região diferente do espaço de busca e evitando a convergência prematura das soluções.

Com o intuito de se beneficiar dos paradigmas baseados em populações de soluções e que fazem uso de diferentes formas de memória na resolução de problemas, o protocolo proposto se baseia em duas meta-heurísticas⁶ de inteligência coletiva: os algoritmos culturais (ver Seção 3.1) e a otimização por colônia de formigas (ver Seção 3.2) as quais são descritas no decorrer desse capítulo.

3.1 ALGORITMOS CULTURAIS

Técnicas da computação natural têm sido utilizadas para solucionar inúmeros problemas de otimização e busca devido ao fato de estas técnicas se desenvolverem bem em situações com pouco ou nenhum conhecimento (FOGEL, 1995).

Entretanto, a incorporação de mecanismos baseados em conhecimentos pode melhorar consideravelmente o desempenho de um algoritmo natural quando o conhecimento adquirido durante a evolução for usado para influenciar o processo de solucionar problemas de gerações futuras de modo a identificar padrões em um ambiente (CHUNG; REYNOLDS, 1996). Diante desse fato, surgem os Algoritmos Culturais (ACs) propostos por Reynolds (1994) como um complemento à metáfora evolutiva utilizada na maioria das técnicas da computação natural.

De acordo com Jin e Reynolds (1999) o modelo de evolução do componente cultural de um sistema de inteligência coletiva provê um mecanismo para adquirir, armazenar

⁶Osman e Laporte (1996) definem uma meta-heurística como um processo de geração iterativo que guia uma heurística subordinada através da combinação de conceitos diferenciados de inteligência para explorar e intensificar o espaço de busca. Estratégias de aprendizado são utilizadas para estruturar informações e encontrar de forma eficiente as soluções quase ótimas. Em cada iteração, pode-se manipular uma ou várias soluções.

e integrar a experiência e comportamento de indivíduos no processo de solução de problemas. Os padrões de conhecimento identificados durante a busca por soluções podem ser usados para guiar a geração de novas soluções de modo a promover mais instâncias de soluções candidatas promissoras ou reduzir o número de soluções candidatas indesejáveis facilitando assim o processo de otimização.

Algumas técnicas da computação natural como os algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975) (HOLLAND, 1992) modelam uma evolução biológica baseada no princípio da herança genética. Em sistemas naturais, a evolução genética pode ser um processo lento. Para Reynolds e Ali (2008), a evolução cultural, por outro lado, permite que as interações sociais entre os indivíduos sejam modeladas em dimensões bem superiores de tempo e espaço. Isso permite que sociedades se adaptem a mudanças ambientais em taxas que excedem àquelas providas pela evolução biológica com base apenas na herança genética (REYNOLDS; ZANONI, 1992).

Um AC também tem mostrado resultados promissores quando aplicado em ambientes dinâmicos por conter agentes naturalmente auto-adaptativos capazes de reagir a mudanças (SALEEM; REYNOLDS, 2000). De acordo com Jiang et al. (2009), o uso da herança cultural auxilia os novos indivíduos a se adaptarem a seus ambientes, tendendo a gerar soluções mais eficientes e de forma mais rápida. Sem tais informações, a única maneira de um indivíduo se adaptar a uma mudança no ambiente, para a qual ele não tem experiência prévia, seria via tentativa e erro.

Nas seções a seguir são apresentadas definições sobre o termo cultura (ver Seção 3.1.1), as características (ver Seção 3.1.2), o funcionamento (ver Seção 3.1.3) e os componentes de um algoritmo cultural (ver Seções 3.1.4 e 3.1.5). Na Seção 3.1.6 são discutidos os usos de ACs em alguns problemas de otimização específicos.

3.1.1 DEFINIÇÃO DE CULTURA

O termo cultura foi inicialmente definido por Tylor (1924) como “o todo complexo que inclui conhecimento, crenças, arte, morais, costumes, e quaisquer outras habilidades adquiridas pelo homem como um membro da sociedade”. Segundo Reynolds e Zhu (2001), o termo cultura é entendido como um veículo de armazenamento de informações acessíveis globalmente por todos os membros de uma sociedade e que pode ser útil para direcionar as atividades futuras dos indivíduos de uma população na busca pela solução de problemas.

De um ponto de vista antropológico, a cultura pode ser definida como “um sistema de fenômenos conceitualmente codificados por símbolos que são socialmente e historica-

mente transmitidos dentro e entre grupos sociais” (DURHAM, 1994). Em termos da computação natural, a cultura é modelada como a fonte de dados que influencia o comportamento dos indivíduos dentro de uma população e em várias gerações. Isso difere de outras técnicas da computação natural onde apenas as características comportamentais dos indivíduos da geração corrente são modeladas usando fenótipos.

3.1.2 CARACTERÍSTICAS DE UM ALGORITMO CULTURAL

As principais características encontradas em um AC são (RODRIGUES, 2007):

- **Mecanismo de Herança Dupla:** são herdadas características no nível populacional e no nível de conhecimento (culturais). De forma geral, avalia-se que o objetivo da herança dupla é aumentar as taxas de aprendizado da população e acelerar a taxa de convergência dos algoritmos naturais de modo a prover uma melhor resposta para uma grande variedade de problemas.
- **Suporta Hierarquização:** a população e o espaço de conhecimentos podem ser organizados hierarquicamente permitindo a criação de nichos e uma distribuição dos conhecimentos adquiridos;
- **Conhecimento sobre o Domínio separado dos Indivíduos:** o conhecimento adquirido por cada indivíduo é armazenado em um repositório chamado espaço de crenças. Este repositório é compartilhado entre os indivíduos de uma sociedade. Portanto, quando um indivíduo é eliminado de uma população, o conhecimento adquirido por ele permanece armazenado no espaço de crenças. Os métodos para adquirir e manipular cada conhecimento podem ser adaptados ao domínio de uma aplicação sem mudanças grandes na manipulação dos indivíduos de uma população ou do algoritmo evolutivo em uso;
- **Evolução Guiada pelo Conhecimento:** o conhecimento adquirido durante a evolução guia os indivíduos de uma população na melhor direção;
- **Suporte a Auto-Adaptação em Vários Níveis:** um AC permite que a população e o conhecimento sejam auto-adaptados. Isto é, os parâmetros de controle, a representação de um problema, os operadores específicos do espaço populacional e os operadores sociais, a avaliação dos indivíduos e o protocolo de comunicação podem ser alterados em qualquer momento da evolução;

- **Flexibilidade no nível de Interação entre seus Componentes** (população e conhecimento): permite que um AC seja utilizado em ambientes fracamente ou fortemente acoplados.

Diante desse cenário, um algoritmo cultural pode ser caracterizado como um sistema híbrido de herança dupla que modela a interação e cooperação mútua entre dois níveis distintos de evolução (REYNOLDS, 1994) (REYNOLDS; ALI, 2008):

- **Nível Macro-evolucionário:** ocorre dentro de um espaço de crenças. Nesse nível modela-se o conhecimento adquirido pelos indivíduos ao longo das gerações.
 - **Espaço de crenças:** repositório ou memória de longo prazo onde são armazenados os conhecimentos e as experiências adquiridas pelos indivíduos de uma população durante o processo de evolução. As informações desse repositório devem estar acessíveis a qualquer indivíduo, de modo que este possa usá-lo para modificar seu comportamento. O espaço de crenças é responsável por modelar o componente cultural sobre uma população de indivíduos e equivale a um mapa (individual e de uma sociedade) como proposto por Renfrew (1994). Os indivíduos são capazes de gerar o mapa que contém as crenças generalizadas de suas experiências. Essas crenças generalizadas podem servir para restringir o comportamento dos indivíduos dentro da população;
- **Nível Micro-evolucionário:** ocorre no espaço populacional. Nesse nível modela-se a herança deixada pelos indivíduos pais a seus descendentes por meio de um número de operadores motivados socialmente.
 - **Espaço populacional:** engloba um conjunto de soluções possíveis para um determinado problema podendo ser representado por qualquer modelo computacional baseado em população de indivíduos, tais como os Algoritmos Genéticos (HOLLAND, 1975) (HOLLAND, 1992), Programação Evolucionária (FOGEL, 1962), Otimização por Nuvem de Partículas (PSO do inglês *Particle Swarm Optimization*) (KENNEDY; EBERHART, 1995), Otimização por Colônia de Formigas (ACO do inglês *Ant Colony Optimization*) (DORIGO, 1994), entre outros. Cada indivíduo de uma população é representado por um conjunto de características e comportamentos independentes (que podem ou não ser socialmente aceitos) e uma representação generalizada (ou mapa) de suas experiências conforme sugerido por Renfrew (1994). Avalia-se a qualidade de cada indivíduo na solução de um determinado problema (como geralmente

ocorre na maioria dos algoritmos baseados em populações) e, através do tempo, tais indivíduos podem ser modificados após aplicar um conjunto de operadores. Na presente tese, o ACO representa o espaço populacional do AC e este é detalhado na Seção 3.2.

É possível armazenar vários mapas em um espaço de crenças, cada um suportado por um subconjunto da população podendo, portanto, gerar diferentes soluções para o mesmo problema (REYNOLDS, 1994). Este processo pode dar origem a nichos especializados que podem explorar de forma mais eficiente partes do espaço de busca associados ao problema em questão.

Vale salientar que a maioria das características dos ACs discutidas nesta seção é incorporada ao protocolo de roteamento sendo proposto uma vez que, além da evolução das soluções com base no paradigma de otimização por colônia de formigas (nível micro-evolucionário), a cultura, armazenada de forma distribuída em cada espaço de crenças dos nós que compõem a rede (nível macro-evolucionário), está acessível aos indivíduos (formigas) que compõem o espaço populacional. No ambiente de aplicação considerado, existe a possibilidade de criação de nichos especializados, uma vez que um conjunto de soluções (caminhos ou rotas) deve ser buscado paralelamente por um conjunto de formigas independentes, sendo cada caminho associado a uma mensagem específica (com par origem-destino). Dessa forma, cada nicho representa uma especialização para os caminhos encontrados (espaço populacional) e conhecimentos específicos (espaço de crenças).

3.1.3 FUNCIONAMENTO BÁSICO DE UM ALGORITMO CULTURAL

Como descrito na Seção 3.1.2, os ACs são compostos por dois espaços de evolução: espaço de crenças e espaço populacional. O espaço de crenças e o espaço populacional afetam um ao outro, ou seja, um influencia na evolução e no desempenho obtido pelo outro. Conforme ilustra a Figura 5, esta interferência ocorre através de um protocolo de comunicação composto por uma função de aceitação e uma função de influência.

A função de aceitação é usada para avaliar a experiência de cada indivíduo de modo a constatar a qualidade dos conhecimentos (soluções) adquiridos através da função objetivo especificada para a resolução do problema. Toda vez que um novo conhecimento é aceito, a função de atualização é executada para atualizar o espaço de crenças, eliminando ou acrescentando informações. A função de influência utiliza, então, o conhecimento armazenado no espaço de crenças para guiar o comportamento dos novos indivíduos (PENG et al., 2003).



Figura 5: Ciclo Básico de um Algoritmo Cultural.
Fonte: (KUK, 2009)

O funcionamento básico de um AC é descrito pelo Algoritmo 1. O algoritmo inicia com a criação do espaço populacional e do espaço de crenças. Então, ele entra em um *loop* de evolução até que uma condição de término seja alcançada. Os indivíduos no espaço populacional são primeiramente avaliados através de uma função objetivo $f(x)$. Uma função de aceitação *aceita* é, então, usada para determinar quais indivíduos podem atualizar o espaço de crenças. Dessa forma, as experiências dos melhores indivíduos irão atualizar o espaço de crenças através da função *atualiza* e este conhecimento poderá influenciar, através da função *influencia*, os indivíduos para a próxima geração (REYNOLDS; ALI, 2008) (PENG et al., 2003).

Algoritmo 1 - Pseudocódigo de um Algoritmo Cultural

Fonte: Adaptado de Iacoban et al. (2003).

- 1: Inicialize o contador de gerações $t \leftarrow 0$
 - 2: Crie e Inicialize o Espaço Populacional P^t de soluções candidatas
 - 3: Crie e Inicialize o Espaço de Crenças C^t
 - 4: **repita**
 - 5: Avalie o desempenho de cada solução $x(t) \in P^t$ através de uma função objetivo $f(x)$
 - 6: Atualize o Espaço de Crenças com as soluções selecionadas através da Função de Aceitação: $atualiza(C^t, aceita(P^{t+1}))$
 - 7: Gere a Próxima População a partir da atual P^t considerando a Função de Influência: $gera(P^t, influencia(C^t))$
 - 8: $t \leftarrow t + 1$
 - 9: Selecione a nova população P^{t+1} de P^t
 - 10: **até** a condição de término ser satisfeita
-

3.1.4 ESPAÇO DE CRENÇAS

Nos algoritmos culturais a informação adquirida por um indivíduo pode ser compartilhada de forma simbólica e cognitiva com o restante da população, diferente da maioria das técnicas da computação natural, onde a informação pode ser compartilhada apenas com os descendentes de cada indivíduo (LIN et al., 2009).

Existem cinco componentes de conhecimento com os quais se acredita ser possível representar qualquer padrão de comportamento social entre indivíduos de um espaço populacional: Conhecimento Normativo, Conhecimento Topográfico, Conhecimento Situacional, Conhecimento Histórico e Conhecimento de Domínio (REYNOLDS; CHUNG, 1997) (SALEEM; REYNOLDS, 2000).

Os conhecimentos normativos, topográficos e situacionais têm sido utilizados individualmente para solucionar problemas de otimização em ambientes estáticos ((CHUNG, 1997) apud (SALEEM; REYNOLDS, 2000)). Já os conhecimentos histórico e de domínio foram adicionados visando o uso destes em ambientes dinâmicos (SALEEM, 2001). A diferença entre esses dois últimos conhecimentos quando aplicados em ambientes dinâmicos é que a estrutura do conhecimento histórico foi projetada para refletir sobre dinâmicas globais e o conhecimento de domínio para suportar a análise de dinâmicas locais. Qualquer combinação dos componentes de conhecimento pode ser utilizada dependendo da natureza do problema e dos objetivos a serem alcançados.

Para Reynolds e Ali (2008), o que torna um AC diferente de outras meta-heurísticas como o PSO e o ACO é o fato de um AC poder utilizar esses cinco tipos de conhecimentos básicos no processo de solução de problemas ao invés de apenas um ou dois valores transmitidos localmente. O autor ainda destaca que há uma grande evidência no campo da ciência de que cada um desses conhecimentos seja suportado por várias espécies de animais ((WYNNE, 2001) apud (REYNOLDS; ALI, 2008)) e assume-se que sistemas sociais humanos também suportem cada um desses conhecimentos. Então, uma justificativa para o uso de um AC é quando se tem uma função objetivo que exercerá um comportamento diferenciado em relação ao tempo, necessitando assim uma análise de séries históricas, não bastando para tal uma única análise de uma única solução em um ponto do espaço de busca.

A seguir são descritos em detalhes os cinco componentes de conhecimento que podem compor um espaço de crenças. Grande parte das equações apresentadas no decorrer do presente capítulo para a atualização dos conhecimentos do espaço de crenças foram extraídas da tese de Saleem (2001). O objetivo do autor era mostrar que um sis-

tema cultural é menos sensível às mudanças ambientais se comparado a um sistema de programação evolutiva puro e auto-adaptativo, particularmente quando a frequência de mudança se torna excessiva. O autor investiga quais componentes de conhecimentos são mais úteis na solução de uma determinada classe de problemas dinâmicos e contínuos: encontrar o pico mais alto em uma paisagem de múltiplos picos e multidimensional.

3.1.4.1 Conhecimento Normativo

Em geral, o conhecimento normativo provê padrões para guiar o comportamento dos indivíduos em algoritmos evolutivos através da aplicação de ajustes nesses indivíduos (REYNOLDS; CHUNG, 1997).

Conforme ilustra a Figura 6, o conhecimento normativo N é representado por um conjunto de intervalos I , um para cada dimensão X ou característica do problema a ser resolvido. O objetivo é que cada intervalo contenha as boas soluções encontradas (SALEEM, 2001) (IACOBAN et al., 2003). Segundo Peng et al. (2003), esses intervalos são utilizados para guiar os novos indivíduos em direção a essas áreas promissoras.

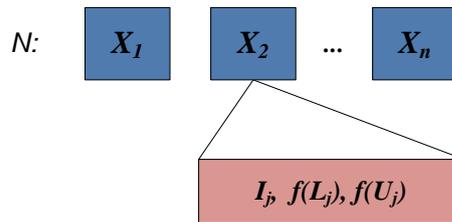


Figura 6: Representação do Conhecimento Normativo.
Fonte: (SALEEM, 2001)

O componente normativo é representado por (JIN; REYNOLDS, 1999) (REYNOLDS; CHUNG, 1997):

$$N(t) = (X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)), \quad (3.1)$$

onde, para cada dimensão $X_j(t)$, as seguintes informações são armazenadas:

$$X_j(t) = (I_j(t), f(L_j(t)), f(U_j(t))), \quad (3.2)$$

sendo $I_j(t)$ o intervalo fechado $I_j(t) = [L_j(t), U_j(t)]$ onde:

- $L_j(t)$ representa o limite inferior do intervalo;
- $U_j(t)$ representa o limite superior do intervalo;

- $f(L_j(t))$ é o valor de desempenho para o limite inferior;
- $f(U_j(t))$ é o valor de desempenho para o limite superior.

Kuk (2009) destaca que a atualização do conhecimento normativo pode ocorrer de duas maneiras: caso algum indivíduo aceito no espaço de crenças apresente características que não se encontram dentro dos intervalos atuais, há uma expansão (apenas nos intervalos específicos onde houve a extrapolação); caso todos os indivíduos aceitos apresentem características pertencentes aos intervalos atuais há uma contração se, e somente se, a qualidade dos indivíduos aceitos for melhor do que dos indivíduos associados aos extremos. Assim, na contração os extremos passam a ser definidos pelos indivíduos de melhor qualidade.

Reynolds e Chung (1997) caracterizam a atualização do conhecimento normativo como: conservadora quando o intervalo é estreitado; e progressiva quando o intervalo é ampliado. Os exemplos abaixo demonstram uma atualização do conhecimento normativo.

Assumindo que no componente normativo, $x_{i,j}(t)$ representa o j -ésimo elemento (parâmetro) do i -ésimo indivíduo, o limite inferior $L_j(t)$ e seu valor de desempenho $f(L_j(t))$ na geração t são atualizados de acordo com Reynolds e Chung (1997) e Jin e Reynolds (1999) (considerando um problema de otimização de minimização):

$$L_j(t+1) = \begin{cases} x_{i,j}(t) & \text{se } x_{i,j}(t) \leq L_j(t) \text{ ou } f(x_i(t)) < f(L_j(t)) \\ L_j(t) & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$f(L_j(t+1)) = \begin{cases} f(x_i(t)) & \text{se } x_{i,j}(t) \leq L_j(t) \text{ ou } f(x_i(t)) < f(L_j(t)) \\ f(L_j(t)) & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.4)$$

Assumindo agora que um indivíduo k afeta o limite superior para um parâmetro j no componente normativo, o limite superior $U_j(t)$ e seu valor de desempenho $f(U_j(t))$ na geração t são atualizados no componente normativo de acordo com (REYNOLDS; CHUNG, 1997) (JIN; REYNOLDS, 1999):

$$U_j(t+1) = \begin{cases} x_{k,j}(t) & \text{se } x_{k,j}(t) \geq U_j(t) \text{ ou } f(x_k(t)) < f(U_j(t)) \\ U_j(t) & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$f(U_j(t+1)) = \begin{cases} f(x_k(t)) & \text{se } x_{k,j}(t) \geq U_j(t) \text{ ou } f(x_k(t)) < f(U_j(t)) \\ f(U_j(t)) & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.6)$$

3.1.4.2 Conhecimento Topográfico

O conhecimento topográfico foi originalmente proposto para raciocinar sobre os padrões de paisagem funcionais baseados em regiões (JIN; REYNOLDS, 1999). Uma paisagem inteira é dividida em células de acordo com as características espaciais e cada célula mantém o melhor indivíduo em sua região.

O conhecimento topográfico é, então, usado para criar um mapa da qualidade das soluções de um problema durante um processo evolutivo. Ele extrai padrões de comportamento do espaço de busca e explora diversas áreas do mesmo, identificando regiões promissoras. Segundo Peng et al. (2003), o conhecimento topográfico auxilia os indivíduos a emularem as melhores células (similar ao ótimo local).

Existem várias formas de representar um conhecimento topográfico. No trabalho de Saleem (2001), conforme ilustra a Figura 7, a estrutura de dados do conhecimento topográfico é representada por uma grade multidimensional com uma célula descrita por C_1, \dots, C_z onde z é o número de dimensões e C_p é o tamanho da célula para a p -ésima dimensão. A estrutura do conhecimento é inicializada inserindo a amostra de uma solução em cada célula da grade e criando um vetor de tamanho v , onde v é o número das melhores células na grade.

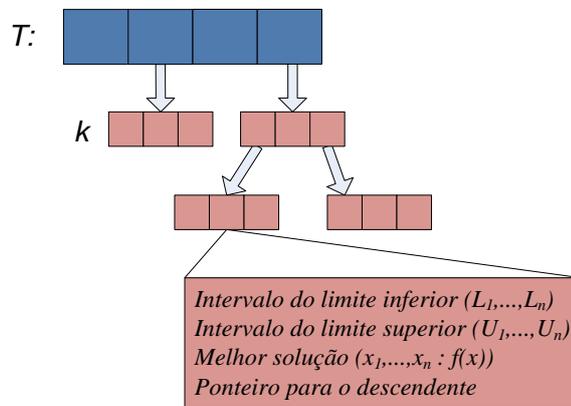


Figura 7: Representação do Conhecimento Topográfico.
Fonte: (SALEEM, 2001)

A função de atualização divide cada célula do vetor em uma lista com k células novas e menores chamadas descendentes. Uma célula irá gerar um descendente se o valor da qualidade de um novo indivíduo aceito for melhor que a qualidade do melhor indivíduo até então na célula. Assim, cada célula acompanha o melhor indivíduo em sua região.

A cada evento de mudança, as novas células são reavaliadas de modo a atualizar o vetor das melhores células. Cada célula conterá o limite inferior e superior para cada um

dos n parâmetros indicando assim as faixas associadas às melhores soluções encontradas na célula e um ponteiro para o seu descendente.

3.1.4.3 Conhecimento Situacional

O conhecimento situacional armazena os melhores indivíduos ou soluções encontrados durante um processo de busca sendo útil para interpretar cada experiência individual (PENG et al., 2003) (IACOBAN et al., 2003). O conjunto de indivíduos armazenados servirá de exemplo para o restante da população.

Conforme ilustra a Figura 8, o conhecimento situacional S é representada por meio de uma lista de e indivíduos exemplares, onde cada indivíduo contém um valor para cada parâmetro (x_1, x_2, \dots, x_n) e a qualidade da solução $f(x)$ encontrada para o problema.

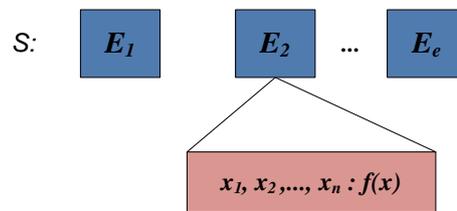


Figura 8: Representação do Conhecimento Situacional.

Fonte: Adaptado de (SALEEM, 2001)

A atualização do conhecimento situacional ocorre quando surge na população um novo indivíduo que possui uma qualidade superior ao pior indivíduo armazenado no conhecimento. Então, a função de aceitação incorpora a experiência desse indivíduo ao conhecimento e o pior indivíduo é eliminado.

3.1.4.4 Conhecimento Histórico ou Temporal

A fonte de conhecimento histórico ou temporal foi introduzida nos algoritmos culturais como uma forma de se adaptar a mudanças ocorridas em um ambiente (REYNOLDS; PENG, 2004).

Como o nome sugere, esse conhecimento armazena um histórico sobre os eventos ocorridos durante um processo de evolução, fazendo com que os indivíduos possam consultar as informações em termos de mudanças na distância e direção da solução ótima em um espaço de busca. Segundo Saleem (2001), o conhecimento histórico calcula as seguintes informações sobre os padrões de comportamento temporais de um ambiente: a mudança média nos valores dos parâmetros dentro de uma região; o tamanho de uma janela; e a previsão sobre a direção da mudança na solução ótima com base na posição anterior.

Uma representação do conhecimento histórico pode ser vista na Figura 8, onde:

- w representa o tamanho máximo da memória ou janela, isto é, o número máximo de eventos que podem ser representados na lista de histórico;
- e_1 até e_w são os eventos que representam as mudanças em um ambiente;
- ds_1 até ds_n e dr_1 até dr_n representam as mudanças ambientais médias na distância e direção, respectivamente, para cada um dos n parâmetros.

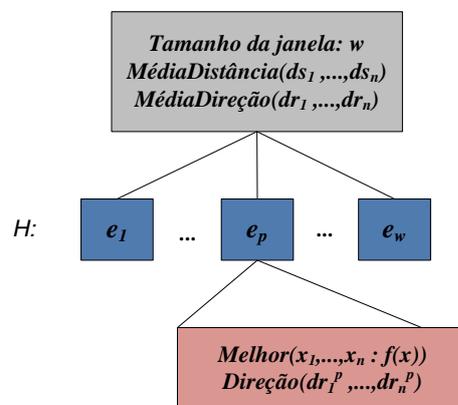


Figura 9: Representação do Conhecimento Histórico.
Fonte: (SALEEM, 2001)

Para cada evento de mudança, a melhor solução corrente no ambiente anterior e a direção de movimento de cada parâmetro (dimensão do problema) relativo a essa melhor solução são armazenados na lista de histórico para a janela w .

Quando uma mudança ocorre no tempo t , a melhor solução corrente $(x_1, \dots, x_n : f)$ é armazenada com a mudança direcional (dr_1, \dots, dr_n) nos parâmetros da melhor solução corrente e daqueles da melhor solução encontrada no ambiente anterior.

A direção dr_n assume um dos valores (SALEEM, 2001) (IACOBAN et al., 2003):

- 1 indicando que o parâmetro aumentou;
- -1 indicando que o parâmetro diminuiu;
- 0 caso o parâmetro tenha permanecido igual.

A seguinte função é utilizada para atualizar a direção do parâmetro j do evento p (SALEEM, 2001) (IACOBAN et al., 2003):

$$dr_j^p = \begin{cases} 1 & \text{se } (X_j^p - X_j^{p-1}) > 0 \\ -1 & \text{se } (X_j^p - X_j^{p-1}) < 0 \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3.7)$$

onde X_j^p é o valor do parâmetro j para a melhor solução encontrada quando ocorre o evento p .

Então, quando um evento de mudança ocorre, o tamanho médio do movimento é calculado por (SALEEM, 2001) (IACOBAN et al., 2003):

$$Media(ds_j) = \frac{\sum_{p=1}^{w-1} |X_j^p - X_j^{p+1}|}{w-1}. \quad (3.8)$$

A direção do movimento para o parâmetro j pode ser calculada através dos valores resultantes da Equação 3.7 da seguinte forma (SALEEM, 2001) (IACOBAN et al., 2003):

$$dr_j = \begin{cases} 1 & \text{se } \sum_{p=1}^w dr_j^p > 0 \\ -1 & \text{se } \sum_{p=1}^w dr_j^p < 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.9)$$

Indivíduos guiados pelo conhecimento histórico podem consultar as informações armazenadas para guiá-los na seleção da próxima direção a seguir.

3.1.4.5 Conhecimento de Domínio

Segundo Saleem (2001), o conhecimento de domínio pode representar o conhecimento sobre os objetos de domínio do problema para guiar a busca de uma forma eficiente. Por exemplo, em uma paisagem funcional composta por muitos picos ou cones, o conhecimento sobre a forma dos cones e seus parâmetros relacionados será útil no momento de raciocinar sobre o domínio do problema durante um processo de busca (PENG et al., 2003). Assim, mudanças na paisagem refletem ajustes nesses picos auxiliando na previsão sobre a direção e magnitude das mudanças.

Considerando que o conhecimento de domínio pode representar uma heurística específica para o domínio de um problema a ser otimizado, sua função de atualização será totalmente dependente do ambiente no qual atuará.

Segundo Saleem (2001), enquanto o conhecimento histórico provê uma perspectiva global de uma mudança, o conhecimento de domínio pode ser utilizado para interpretar uma mudança local em um ambiente.

Os conhecimentos situacional, histórico e de domínio são utilizados pelo protocolo que está sendo proposto nesta tese, conforme detalhado no Capítulo 5. O conhecimento situacional é introduzido para guardar uma memória da melhor solução para cada nicho do problema a ser resolvido. O conhecimento histórico reflete a dinâmica global de um nó enquanto participante de um caminho (solução) que foi completado, enquanto que o conhecimento de domínio é utilizado para auxiliar o protocolo proposto a refletir (com base em uma heurística específica para as DTNs) sobre a dinâmica local da mobilidade de um nó perante a sua rede de relacionamentos.

3.1.5 FUNÇÕES DE ACEITAÇÃO E INFLUÊNCIA

O protocolo de comunicação do AC determinará as regras relacionadas ao tipo de informação que pode ser trocada entre o espaço populacional e o espaço de crenças, sendo composto por (JIN; REYNOLDS, 1999) (SALEEM; REYNOLDS, 2000):

- **Uma Função de Aceitação:** determina quais indivíduos de uma população são considerados durante a atualização do espaço de crenças. Em outras palavras, é a maneira pela qual a população interage com o espaço de crenças;
- **Uma Função de Influência:** determina como um conhecimento armazenado no espaço de crença influencia novos indivíduos. Em outras palavras, é a maneira pela qual o espaço de crenças interage com a população.

3.1.5.1 Função de Aceitação

A função de aceitação é usada para avaliar a experiência dos indivíduos de modo a constatar a qualidade dos conhecimentos adquiridos através da função objetivo especificada para a resolução do problema. É possível selecionar quais indivíduos e seus comportamentos podem causar impacto na formação do conhecimento armazenado no Espaço de Crenças (JIN; REYNOLDS, 1999).

Segundo Jin e Reynolds (1999), o processo de atualização do espaço de crenças é análogo à formação de uma sociedade onde diversos conhecimentos, oriundos de diferentes seres humanos, podem ser agregados.

As Funções de Aceitação podem ser divididas em (ENGELBRECHT, 2007):

- **Aceitação Estática:** o número de indivíduos (ou informações associadas a eles) aceitos para ajustar um espaço de crenças permanece sempre o mesmo;
- **Aceitação Dinâmica:** o número de indivíduos aceitos para ajustar o espaço de crenças pode variar a cada iteração do processo evolutivo. Pode ser utilizado, por exemplo, o *ranking* relativo, onde apenas os indivíduos acima de uma determinada média de desempenho são selecionados. Outra estratégia que pode ser adotada é a seguinte: tornar a seleção menos restrita no início do processo através da aceitação de muitos indivíduos; e tornar a seleção mais restrita quando o número de iterações aumenta tendo em vista que já se adquiriu uma grande quantidade de conhecimento e que já se sabe quais conhecimentos causam impacto no espaço de crenças.

Toda vez que um novo indivíduo é aceito, uma função de atualização é executada para modificar o espaço de crenças, acrescentando (mesclando, generalizando e especializando) novas informações ou eliminando algum conhecimento não mais utilizado.

3.1.5.2 Função de Influência

A função de influência utiliza o conhecimento armazenado no espaço de crenças para guiar o comportamento dos indivíduos podendo, portanto, gerar soluções diferentes para um mesmo problema. Segundo Reynolds e Ali (2008), a escolha da função de influência tem um grande impacto na fase de solução de um problema. Algumas funções de influência podem ser mais bem sucedidas e mais úteis como medida do sucesso dos indivíduos que cada uma influenciou no passado e dependendo do comportamento dinâmico do ambiente e do conhecimento necessário para seguir tal comportamento. Com um número maior de comportamentos dinâmicos, o sistema pode precisar de mais de um tipo de conhecimento e mais de uma função de influência.

Normalmente, utiliza-se uma função de influência independente para cada tipo de conhecimento, a qual consiste em um operador modificado para utilizar o conhecimento em determinado momento. Porém, as funções de influência também podem ser utilizadas em conjunto (SALEEM, 2001).

3.1.6 TRABALHOS RELACIONADOS

A presente seção apresenta dois estudos que aplicam o AC em problemas de otimização mais diretamente relacionados ao domínio da aplicação considerada nesta tese.

Em Ma et al. (2008) é proposto o uso de algoritmos culturais e algoritmo de temperatura simulada para solucionar problemas de roteamento de agentes móveis em uma topologia fixa de nós. A temperatura simulada é uma técnica de busca local e probabilística que se fundamenta numa analogia com a termodinâmica; ela é uma metáfora de um processo térmico, chamado recozimento, utilizado em metalúrgica para obtenção de estados de baixa energia em um sólido (KIRKPATRICK et al., 1983). A solução ótima encontrada através da técnica de temperatura simulada é aceita no trabalho de Ma et al. (2008) de modo a otimizar a evolução do espaço de crenças do algoritmo cultural. O objetivo do uso da combinação dessas técnicas é assegurar a qualidade das soluções ótimas encontradas e também melhorar a velocidade de convergência da busca. O problema de roteamento do agente móvel é encontrar um caminho ótimo com várias restrições de um nó de origem até um destino. Essas restrições estão relacionadas ao peso de cada enlace de comunicação entre dois nós: largura de banda necessária para transportar a quantidade de dados carregados pelo agente ao longo do seu caminho; atraso mínimo de propagação nos enlaces; e taxa mínima de perda de pacotes. Os autores utilizam apenas os conhecimentos situacional e normativo e estes são armazenados em um único espaço de crenças.

Zhang et al. (2010a) propõe um algoritmo de roteamento de QoS (do inglês *Quality of Service*) através do uso das meta-heurísticas AC e ACO. O algoritmo é chamado CACA-QoS (do inglês *Cultural-Ant Colony Algorithms QoS*). Assim como no trabalho descrito anteriormente, o objetivo do CACA-QoS é encontrar um caminho ótimo entre um único par de nós estabelecido *a priori* (origem-destino) em uma topologia fixa de nós que tenha recursos suficiente para atender as restrições de QoS (largura de banda mínima e atraso máximo) e convergir mais rapidamente para essa solução. O algoritmo é executado para um número fixo de iterações e em cada iteração gera-se um número fixo de formigas. Os autores também utilizam apenas os conhecimentos situacional e normativo de um AC centralizado. Porém, aqui esses conhecimentos influenciarão no valor da concentração de feromônio a ser depositada nos enlaces.

O protocolo Cultural GrAnt proposto nesta tese utiliza a meta-heurística ACO como espaço populacional de um AC para solucionar o problema de roteamento em uma classe específica de redes sem fio que são as DTNs. Diferente dos trabalhos relacionados descritos anteriormente, a topologia dos nós em uma DTN é dinâmica o que pode resultar em desconexões frequentes. Além disso, os conhecimentos situacional, histórico e de domínio são utilizados e armazenados em diferentes espaços de crenças sendo que estes são distribuídos em cada nó da rede. Detalhes das contribuições fornecidos pela protocolo Cultural GrAnt são fornecidos no próximo capítulo.

3.2 OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

As redes de comunicação estão se tornando cada mais complexas sendo desejável que estas possam se auto-organizar e se adaptar a constantes mudanças em termos da carga de tráfego, diversidade de serviços, etc.

Ao projetar protocolos de roteamento para esses ambientes vários aspectos precisam ser analisados: técnicas centralizadas podem sofrer problemas de escalabilidade; técnicas estáticas não são capazes de manter-se atualizadas com as mudanças que podem ocorrer e algoritmos dinâmicos podem sofrer problemas de oscilações frequentes devido às mudanças na topologia da rede. Constata-se, então, a necessidade de desenvolver algoritmos com as seguintes propriedades: robustez, baixo custo computacional, trabalho de modo distribuído, capacidade de observar as mudanças na rede e se adaptar a elas.

Os sistemas que são por natureza auto-organizáveis como as sociedades de insetos artificiais possuem as propriedades citadas anteriormente. Tais sistemas fazem uso de um número relativamente simples de agentes biológicos de modo a gerar comportamentos diferenciados através da interação local desses agentes com seu meio ambiente.

Segundo Lv e Su (2008), a eficácia dos comportamentos coletivos com respeito a variações nas condições do ambiente são aspectos essenciais no sucesso biológico dos agentes. Conforme discutido no início deste capítulo, esse tipo de sistema é referenciado como inteligência coletiva. A inteligência coletiva, inspirada no comportamento social de insetos em suas buscas por alimento através de um aprendizado distribuído dos melhores caminhos, tem resultado na aplicação bem sucedida da meta-heurística ACO em problemas de otimização combinatória dinâmica, em especial na área de redes de computadores.

O objetivo desta seção é apresentar uma visão geral do funcionamento da meta-heurística ACO. Inicialmente, são apresentados os primeiros experimentos realizados com o intuito de estudar o comportamento das formigas. Na sequência, são descritos os princípios básicos do ACO e alguns dos principais algoritmos de ACO desenvolvidos. Posteriormente, são descritas aplicações de ACO para prover roteamento em redes de comunicação.

3.2.1 EXPERIMENTOS INICIAIS COM FORMIGAS

Um dos primeiros comportamentos estudados por entomologistas em relação às formigas foi a habilidade de encontrarem o caminho mais curto⁷ entre seu ninho e uma

⁷O caminho mais curto entre dois vértices u e v de um grafo é uma sequência de arestas que, passando por vértices distintos, liga u a v de forma a acumular o menor comprimento (GOLDBARG; LUNA, 2005).

fonte de alimento. A escolha do caminho mais curto permite que as formigas colem a comida mais rapidamente minimizando o risco de que esta comida seja encontrada e monopolizada por um competidor mais forte como uma colônia maior.

Em Pasteels et al. (1989) e Deneubourg et al. (1990) estudou-se o comportamento do forrageamento⁸ de algumas espécies de formigas de modo a desenvolver um modelo formal que descreva seus comportamentos. No experimento referenciado como ponte binária, o ninho das formigas era separado de uma fonte de alimentos por um caminho com duas pontes de mesmo comprimento. Inicialmente, as pontes estavam livres de feromônio⁹. Após um período de tempo finito, uma das pontes era selecionada, com a maioria das formigas seguindo esse caminho mesmo com ambas as pontes sendo do mesmo comprimento. Essa seleção era dada pela concentração maior de feromônio em uma das pontes. Assumiu-se que as formigas depositavam sempre a mesma quantidade de feromônio em cada caminho por onde passavam e que esta substância não evaporava com o tempo. Neste mesmo período, Goss et al. (1989) estenderam o experimento inicial da ponte binária de modo a considerar pontes com comprimentos diferentes. Inicialmente, os caminhos eram escolhidos aleatoriamente com aproximadamente o mesmo número de formigas seguindo ambos os caminhos. Ao longo do tempo, mais e mais formigas começavam a seguir o caminho mais curto tendo em vista que as formigas que seguiam o menor caminho retornavam mais rápido ao seu ninho e mais feromônio era acrescentado nesse caminho. Através de seus experimentos, os autores descobriram que a probabilidade de selecionar um caminho mais curto aumenta com relação à diferença do comprimento entre os dois caminhos. Com base nestes estudos, descobriu-se que a probabilidade de uma formiga escolher um caminho A em um tempo $t + 1$ é dada por:

$$P_A(t+1) = \frac{(c + n_A(t))^\alpha}{(c + n_A(t))^\alpha + (c + n_B(t))^\alpha} = 1 - P_B(t+1), \quad (3.10)$$

onde:

- $n_A(t)$ e $n_B(t)$ representam o número de formigas nos caminhos A e B , respectivamente, no tempo t ;
- c quantifica o nível de atração de uma ponte ainda não explorada. Quanto maior for esse valor, mais depósitos de feromônio serão necessários para escolher o caminho de forma não aleatória;

⁸O forrageamento é a atividade de seleção e transporte de vegetais para o interior de uma colônia.

⁹O feromônio é uma substância química secretada por espécies de animais com o objetivo de promover a comunicação entre indivíduos da mesma espécie. Em colônias, os feromônios são utilizados na orientação do enxame, para sinalizar alarme em situação de perigo, entre outros (SOUZA, 2007).

- α indica a tendência em considerar a quantidade de feromônio no processo de decisão. Quanto maior for esse valor, maior será a probabilidade da próxima formiga seguir o caminho com a maior concentração de feromônio;
- P_B representa a probabilidade da formiga escolher o caminho B em um tempo $t + 1$.

Assim, surgiram os primeiros modelos algorítmicos sobre o comportamento das formigas como o algoritmo desenvolvido por Dorigo (1992). A partir de então, várias pesquisas foram desenvolvidas (BONABEAU et al., 1999) (DORIGO et al., 2000).

Esses modelos de algoritmos também são referenciados como meta-heurísticas de Otimização por Colônia de Formigas (ACO - Ant Colony Optimization) (DORIGO et al., 1996) (DORIGO; GAMBARDELLA, 1997) (DORIGO; CARO, 1999) e têm sido aplicados em diferentes problemas de otimização como o problema clássico do caixeiro viajante e o roteamento em redes de telecomunicações.

Antes de descrever o funcionamento dos principais algoritmos propostos na literatura, a próxima seção apresenta os princípios básicos encontrados no ACO.

3.2.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA META-HEURÍSTICA ACO

A meta-heurística de otimização por colônia de formigas (ACO) estuda o comportamento das formigas em busca de caminhos mais curtos do seu ninho até uma fonte de alimentos de modo a otimizar processos computacionais (DORIGO et al., 1996).

Através de pesquisas sobre o comportamento de colônia de formigas concluiu-se que a inteligência do sistema não se localiza nos agentes individuais, mas sim no resultado das suas interações. O meio que as formigas utilizam para comunicar os menores caminhos encontrados e decidir para onde vão consiste de trilhas de feromônio. Enquanto uma formiga isolada se move aleatoriamente no espaço, outra que encontre uma trilha de feromônio tende a segui-la com maior probabilidade, reforçando ainda mais a trilha com seu próprio feromônio. Isso resulta em uma forma de comportamento “autocatalítico” onde a realimentação positiva¹⁰ sobre um caminho possibilita que este seja seguido cada vez mais por outras formigas (DORIGO, 1994) (DORIGO et al., 1996).

¹⁰O termo realimentação positiva resulta em um tipo de processo de auto-reforço no qual quanto mais vezes um evento ocorre, mais ele tenderá a ocorrer (CASTRO, 2006).

O comportamento de uma colônia de formigas pode ser descrito resumidamente da seguinte forma:

- As formigas saem do seu ninho sem informação sobre a localização exata de uma fonte de alimento;
- Formigas se movimentam de forma aleatória em busca da fonte de alimento;
- Ao encontrar uma fonte de alimentos, as formigas carregam seu alimento de volta ao ninho. Nesse percurso de volta ao ninho, elas depositam uma trilha de feromônio expelida de uma glândula exócrina localizada no seu abdomen (WILSON, 1997). Essa trilha de feromônio criada atrai outras formigas e serve como um guia para a fonte de alimentos;
- A cada momento, mais formigas podem encontrar a trilha de feromônio e reforçá-la.

É através da interação local entre cada formiga com o seu meio ambiente que as formigas conseguem se auto-organizar para encontrar os melhores caminhos até uma fonte de alimentos. A modelagem algorítmica do comportamento das formigas é, então, baseada no conceito de stigmergia¹¹ artificial definido por Caro e Dorigo (1998) como uma forma de controle distribuído baseado na comunicação indireta entre as formigas; localmente as formigas modificam os estados de um ambiente e reagem a essas mudanças conduzindo a uma fase de coordenação global das suas ações.

No contexto do comportamento de forrageamento das formigas, o feromônio artificial executa a função da variável de stigmergia. Em relação a esse processo de stigmergia, é importante considerar um mecanismo que regule os processos de retorno positivo ou auto-reforço, isto é, a quantidade de feromônio depositada nos caminhos por onde passam as formigas. Caso este não seja limitado, o sistema tende a uma convergência rápida ficando instável ou tendo seus recursos exauridos devido à sobrecarga gerada com o excesso de tráfego no caminho de passagem das formigas.

O processo que limita a quantidade de feromônio em determinados caminhos é denominado processo de realimentação negativa ou evaporação (DORIGO; CARO, 1999). Com o passar do tempo, o feromônio de um caminho evapora, evitando que todas as formigas sigam por ele e levando a uma estabilização do nível de feromônio em cada caminho encontrado. Isto permite maior exploração do espaço de busca.

¹¹O termo stigmergia foi formalmente instituído por Grassé (1959) como uma forma de comunicação indireta entre os indivíduos mediada pelas modificações do ambiente. Posteriormente, em Deneubourg et al. (1990) estuda-se um exemplo de stigmergia chamado comunicação feromonal.

De forma a explicar os componentes e comportamentos básicos do ACO, as próximas seções apresentam alguns dos principais algoritmos propostos na literatura para otimização discreta.

3.2.3 ALGORITMOS DE ACO

De modo a prover uma introdução didática aos algoritmos de ACO, a presente seção desconsidera a ordem cronológica na qual os algoritmos de ACO foram desenvolvidos e inicia com a apresentação de um algoritmo simples que emprega a técnica de ACO para encontrar um caminho mais curto em um grafo utilizando apenas informações de feromônio. Na sequência são apresentados algoritmos de ACO que propõem o uso de informações heurísticas para determinar a probabilidade de selecionar um caminho.

3.2.3.1 Algoritmo Simples de ACO (S-ACO)

O comportamento de uma colônia de formigas serviu como base para um algoritmo de otimização bastante útil em especial para busca em grafos. O algoritmo proposto, referenciado como S-ACO (*Simple Ant Colony Algorithm*) (DORIGO; CARO, 1999) (DORIGO; STÜTZLE, 2001), tem por objetivo encontrar a rota mais curta entre dois vértices (nós) de interesse em um grafo.

O S-ACO pode ser descrito da seguinte forma:

- Cria-se um grafo com um conjunto de vértices (nós) e arestas (enlaces de comunicação entre nós);
- Uma concentração de feromônio $\tau_{i,j}$ está associada a cada aresta entre os vértices i e j ;
- Inicialmente, cada aresta recebe um valor aleatório pequeno para indicar sua quantidade de feromônio inicial $\tau_{i,j}(0)$. Então, no início uma formiga seleciona aleatoriamente a próxima aresta a seguir;
- Tem-se K agentes móveis ou formigas (pacotes de controle) no vértice de origem;
- A cada intervalo de tempo t , uma formiga pode se mover de um vértice a outro (um salto), atravessando qualquer aresta. Dessa forma, cada formiga constrói incrementalmente um caminho (solução) para o vértice destino;

- Uma formiga localizada em um vértice i seleciona o próximo vértice j com base na seguinte probabilidade de transição (DORIGO; STÜTZLE, 2001):

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)}{\sum_{j \in N_i^k} \tau_{ij}^\alpha(t)} & \text{se } j \in N_i^k \\ 0 & \text{se } j \notin N_i^k \end{cases} \quad (3.11)$$

onde:

- p_{ij}^k representa a probabilidade de seleção do vizinho j do vértice atual i com respeito à formiga k ;
 - N_i^k representa o conjunto de vértices conectados a i (vizinhança de i);
 - $\tau_{ij}^\alpha(t)$ é o peso da aresta que leva o vértice atual i ao vizinho j no tempo t ;
 - $\sum_{j \in N_i^k}$ é a soma dos pesos das arestas saindo do vértice i para cada vizinho j ;
 - α é uma constante positiva utilizada para amplificar a influência das concentrações de feromônio. Valores altos atribuídos a essa constante atribuem uma importância excessiva ao feromônio, especialmente o feromônio inicial aleatório, o que pode causar uma rápida convergência para caminhos sub-ótimos.
- Ao chegar no destino, cada formiga retornará ao vértice de origem de modo determinístico atualizando a quantidade de feromônio em cada aresta por onde passa;
 - A concentração de feromônio a ser depositada nas arestas é calculada dependendo do problema que está sendo considerado e da função objetivo que se deseja otimizar. No S-ACO essa concentração é proporcional à qualidade da solução (caminho construído) na qual a aresta entre i e j se encontra. Essa qualidade é expressa como o inverso do comprimento do caminho em termos do seu número de saltos:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) \propto \frac{1}{NSaltos^k(t)}. \quad (3.12)$$

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_{i,j}^k(t), \quad (3.13)$$

onde:

- $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ é a intensidade de feromônio depositada pela formiga k em uma aresta entre i e j que faz parte da solução encontrada;
- $NSaltos^k(t)$ é o comprimento, dado pelo número de saltos, do caminho construído pela formiga k no instante t . Assim, quanto menos saltos existirem no caminho, maior será o incremento do feromônio;

- $\tau_{ij}(t+1)$ é a concentração total de feromônio existente na aresta entre i e j no tempo $t+1$.

Os experimentos iniciais do problema da ponte binária descrito na Seção 3.2.1, constataram que as formigas rapidamente convergem para uma solução e que pouco tempo é gasto para explorar caminhos alternativos (DORIGO; CARO, 1999). De modo a permitir que as formigas explorem mais o espaço de busca e prevenir uma convergência prematura, é interessante que seja utilizado um processo de evaporação no feromônio já depositado nos enlaces. Então, a concentração de feromônio em um enlace entre i e j é decrementada a cada instante de tempo t segundo uma taxa pré-estabelecida dada por:

$$\tau_{ij}(t + \Delta t) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t), \quad (3.14)$$

onde a constante $\rho \in (0, 1]$ especifica a taxa de evaporação do feromônio. Esse comportamento faz com que as formigas com o tempo “esqueçam” as decisões anteriores reduzindo a influência do histórico de busca. Assim, quanto maior o processo de evaporação do feromônio, mais aleatória se tornará a busca, explorando de forma mais abrangente o espaço de busca. Se $\rho = 1$ a busca se torna aleatória.

O resumo do algoritmo S-ACO é apresentado no Algoritmo 2. Como critérios para o seu término consideram-se: alcançar o número máximo de iterações; encontrar uma solução aceitável; todas ou a grande maioria das formigas seguirem o mesmo caminho.

Segundo Engelbrecht (2007), é possível evidenciar duas formas de avaliar as soluções em algoritmos de ACO:

1. Avaliação implícita: quando a quantidade de feromônio depositado pelas formigas independe da qualidade da solução e todas as formigas depositam a mesma quantidade da substância;
2. Avaliação explícita: quando a quantidade de feromônio depositado pelas formigas é proporcional a alguma medida de qualidade das soluções.

De modo a melhorar o desempenho de algoritmos que modelam o comportamento de formigas para solucionar problemas de otimização, técnicas propõem o uso de informações heurísticas para auxiliar na busca pelos melhores caminhos, uso de memórias de curto prazo para evitar ciclos repetitivos e regras diferenciadas para a atualização da quantidade de feromônio considerando informações locais e globais sobre um determinado ambiente. Estas técnicas estão descritas nas próximas seções.

Algoritmo 2 - Pseudocódigo do S-ACO

 Fonte: Adaptado de Engelbrecht (2007)

- 1: Inicialize o tempo $t \leftarrow 0$
 - 2: Inicialize o valor do feromônio $\tau_{i,j}(0)$
 - 3: Crie K formigas no nó de origem
 - 4: **repita**
 - 5: **para** cada formiga $k = 1$ to K **faça**
 - 6: {Construindo um caminho $x^k(t)$ }
 - 7: $x^k(t) \leftarrow \emptyset$
 - 8: **repita**
 - 9: Selecione o próximo salto de acordo com a probabilidade da Equação 3.11
 - 10: Adicione o enlace (i, j) ao caminho $x^k(t)$
 - 11: **até** o destino seja alcançado
 - 12: Remova todos os *loops* do caminho $x^k(t)$
 - 13: Calcule a qualidade do caminho $f(x^k(t))$
 - 14: **fim para**
 - 15: **para todo** enlace (i, j) do grafo **faça**
 - 16: {Evaporação do Feromônio}
 - 17: Reduza o feromônio $\tau_{i,j}(t)$ usando a Equação 3.14
 - 18: **fim para**
 - 19: **para** formiga $k = 1$ até K **faça**
 - 20: **para todo** enlace (i, j) de $x^k(t)$ **faça**
 - 21: Atualize a quantidade de feromônio $\tau_{i,j}(t)$ usando as Equações 3.12 e 3.13
 - 22: **fim para**
 - 23: **fim para**
 - 24: $t \leftarrow t + 1$
 - 25: **até** que a condição de parada seja satisfeita
 - 26: **retorne** <caminho $x^k(t)$ de melhor qualidade como a solução>
-

3.2.3.2 Algoritmo AS

O primeiro algoritmo que simula o comportamento de formigas foi desenvolvido por Dorigo (1992) e este é referenciado como *Ant System* (AS) (BONABEAU et al., 1999) (DORIGO et al., 1996).

O AS é aplicado ao problema clássico do caixeiro viajante (TSP - *Travelling Salesman Problem*). O TSP consiste em encontrar uma viagem que possua a menor distância, começando em uma cidade qualquer, entre um conjunto de n cidades, visitando cada cidade uma única vez e regressando à cidade inicial. Então, o TSP pode ser caracterizado como um problema de otimização com duas restrições: todas as cidades devem ser visitadas; e cada cidade deve ser visitada uma única vez (APPLEGATE et al., 2006).

O AS propõe mudar a probabilidade de transição de uma agente, p_{ij}^k , de modo a incluir informações heurísticas e adicionar uma capacidade de memória através de uma Lista de Tabu. O objetivo é se basear na meta-heurística Busca Tabu (GLOVER, 1986) (HERTZ et al., 1995) para registrar os movimentos na busca por soluções em uma ou mais listas Tabu. A intenção desse tipo de memória externa é evitar pontos (cidades) no espaço de busca já visitados. Conseqüentemente, *loops* nas trajetórias de busca são evitados e pode-se escapar de ótimos locais.

No AS, a probabilidade de transição de uma cidade i para uma cidade j com respeito a uma formiga k é dada por (DORIGO et al., 1996):

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{u \in N_i^k(t)} \tau_{iu}^\alpha(t) \eta_{iu}^\beta(t)} & \text{se } j \in N_i^k(t) \\ 0 & \text{se } j \notin N_i^k(t) \end{cases} \quad (3.15)$$

onde:

- p_{ij}^k representa a probabilidade de seleção (por uma formiga k) de uma cidade j a partir da cidade atual i ;
- N_i^k representa o conjunto de cidades interligadas à cidade i . De modo a prevenir *loops*, esse conjunto pode incluir todas as cidades ainda não visitadas pela formiga k . Para esse propósito, uma lista tabu é mantida para cada formiga contendo a identificação de cada cidade visitada. Assim, cidades contidas na lista Tabu são removidas de N_i^k assegurando que nenhuma cidade seja visitada mais de uma vez;
- $\tau_{ij}^\alpha(t)$ representa uma eficácia *a posteriori* de efetuar uma transição da cidade i até a cidade j . Este valor é expresso como a intensidade de feromônio na ligação (i, j)

que indica o quão útil esse caminho foi no passado servindo como um histórico das melhores movimentações anteriores. Essa realimentação positiva através de uma trilha de feromônio encoraja a intensificação de uma solução em particular;

- $\eta_{ij}^\beta(t)$ representa uma eficácia a *priori* de efetuar uma transição da cidade i até a cidade j . Este valor é calculado utilizando alguma heurística e indica uma influência explícita em direção a soluções mais atrativas e convenientes. Portanto, essa informação é uma função dependente do problema sendo considerado. Por exemplo, se o problema de otimização for minimizar a distância (ou custo) de um caminho, então a informação heurística pode ser representada por:

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}, \quad (3.16)$$

onde $d_{i,j}$ é a distância entre a cidade i e j .

- α e β são constantes positivas usadas para indicar a influência das concentrações de feromônio e da heurística empregada, respectivamente. Dessa forma, se $\alpha = 0$ as informações sobre as experiências de buscas passadas são negligenciadas. Se $\beta = 0$ o benefício em potencial de uma determinada movimentação não é considerado e o algoritmo se comporta similarmente ao S-ACO descrito na seção anterior.

3.2.3.3 Algoritmo ACS

O *Ant Colony System* (ACS) foi desenvolvido por Gambardella e Dorigo (1996) para melhorar o desempenho do algoritmo AS descrito na seção anterior para o TSP.

Considerando que quanto maior for a exploração de um espaço de busca, maior será o esforço computacional dispendido na busca (proporcional ao tamanho do espaço), uma das principais contribuições do ACS é a proposta de uma nova regra de transição que visa balancear as habilidades do algoritmo em intensificar ou melhorar a qualidade das boas soluções já encontradas ou explorar o espaço em busca de novas soluções. Assim, uma formiga k , atualmente localizada em um nó (cidade) i , seleciona o próximo nó (cidade) j adotando uma dentre duas estratégias dependendo do resultado de (3.17):

- **Intensificação:** permite que as formigas se movam de forma gulosa para um nó cujo produto do nível de feromônio e valor de heurística seja mais alto;
- **Exploração:** atribui uma probabilidade de selecionar nós candidatos e, então, permite que uma formiga escolha um nó de forma estocástica de acordo com (3.15). Quanto mais promissor um nó for, maior será a probabilidade dele ser escolhido.

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in N_i^k(t) \setminus \{ \tau_{iu}(t) \eta_{iu}^\beta(t) \}} & \text{se } r \leq r_0 \\ J \text{ caso contrário,} & \end{cases} \quad (3.17)$$

onde:

- $r \in [0, 1]$ é uma probabilidade gerada aleatoriamente;
- $r_0 \in [0, 1]$ é um parâmetro especificado pelo usuário. Se $r \leq r_0$, o algoritmo favorece o melhor enlace encontrado. Se $r > r_0$, o algoritmo explora novas soluções. Portanto quanto menor o valor de r_0 , menos os enlaces melhores serão intensificados, enquanto que a busca por novas soluções são mais enfatizadas. É importante notar que se $r > r_0$, a regra de transição é a mesma aplicada no algoritmo AS (ver Equação 3.15) usando o parâmetro $\alpha = 1$;
- $N_i^k(t)$ é o conjunto de nós válidos que podem ser visitados;
- $J \in N_i^k(t)$ é um nó escolhido de acordo com a Equação 3.15.

3.2.4 TRABALHOS RELACIONADOS

O comportamento das formigas na busca por fonte de alimentos através de um aprendizado distribuído dos melhores caminhos tem resultado na aplicação bem sucedida de ACO no processo de roteamento em redes de computadores.

Segundo Caro e Dorigo (1998), as principais funções de um algoritmo de roteamento baseado em ACO são: adquirir, organizar e distribuir as informações sobre o estado da rede; utilizar essas informações para gerar caminhos possíveis maximizando os objetivos de desempenho; encaminhar o tráfego ao longo dos caminhos selecionados.

Uma característica comum de todos os algoritmos de roteamento é a presença de uma estrutura de dados local, chamada tabela de roteamento, em todos os nós-roteadores presentes na rede. Essa tabela mantém as informações necessárias para que o algoritmo possa tomar decisões locais sobre o encaminhamento de mensagens. A tabela de roteamento em cada roteador possui uma ou mais entradas para cada destino conhecido da rede, mapeando a este um roteador vizinho do roteador em questão e o custo para utilizar esse vizinho no encaminhamento de mensagens.

As formigas artificiais empregadas em algoritmos de roteamento são agentes móveis simples que incorporam inteligência e se movem pela rede de um nó a outro atualizando as tabelas de roteamento dos nós-roteadores que elas visitam com as informações que elas obtêm em seu percurso na busca por um destino.

Sim e Sun (2003) fornecem comparações importantes entre o uso de ACO e técnicas tradicionais de roteamento:

- Os algoritmos de roteamento tradicionais normalmente necessitam de um conhecimento completo sobre as redes tais como a sua topologia. Nas técnicas de ACO, cada formiga pode utilizar apenas as informações de seus nós vizinhos. Cada transmissão de pacotes entre roteadores é uma instância independente sendo que suas propriedades, isto é, a quantidade de feromônio, são atualizadas em função da chegada ou não de formigas em um roteador;
- O roteamento de chamadas em alguns algoritmos tradicionais requer a transmissão de tabelas inteiras de roteamento para todos os nós da rede sendo que o tamanho destas tabelas é proporcional ao tamanho da rede. De modo a evitar o tráfego na rede com a transmissão das tabelas de roteamento, pode-se aumentar o intervalo de envio destas. Porém, quanto maior for esse intervalo, maior será o tempo de convergência, isto é, o tempo para que os roteadores se adaptem às mudanças que possam ter ocorrido na topologia da rede. O uso do ACO requer que pequenos pacotes, chamados formigas, sejam enviados pela rede. Os intervalos de transmissão dos pacotes referentes às formigas podem ser reduzidos e, conseqüentemente, pode-se obter um tempo menor de convergência. O cálculo em tempo real da tabela de roteamento é importante porque as redes podem possuir um comportamento dinâmico de forma que a qualidade dos caminhos pode variar com o tempo.

De forma resumida, o ACO reúne as seguintes características que podem auxiliar no processo de roteamento em redes de computadores: auto-organização, adaptabilidade, boa escalabilidade e necessidade de pouca informação global sobre a rede.

Várias pesquisas têm proposto o uso do ACO para auxiliar na escolha dos melhores caminhos entre um nó origem e seu destino seja em redes de comunicação cabeadas ou em redes móveis sem fio.

O protocolo AntNet (CARO; DORIGO, 1997) (CARO; DORIGO, 1998) foi uma das primeiras aplicações de ACO para o roteamento em redes cabeadas. Seu algoritmo é descrito resumidamente a seguir:

- Em intervalos regulares de tempo, cada nó de origem o cria uma Formiga de Avanço ($FA_{o,d}$). Essa formiga é uma mensagem de controle destinada a um nó destino d ;

- As formigas atuam de forma concorrente, independente e se comunicam indiretamente através das informações que são lidas e escritas localmente nos nós por onde passam;
- Inicialmente, o peso probabilístico para a seleção de cada caminho é zero, de forma que a seleção dos próximos vizinhos seja aleatória com distribuição uniforme. A FA percorre nó a nó até chegar ao nó d ;
- Enquanto estão em movimento pela rede, as FAs coletam o identificador de cada nó visitado j e o tempo decorrido desde a sua criação no nó origem até a sua chegada no nó corrente;
- Quando o nó d é alcançado, este cria uma Formiga de Retorno ($FR_{d,o}$) que guarda na memória todos os dados trazidos pela FA correspondente;
- A $FR_{d,o}$ volta ao nó de origem pelo mesmo caminho percorrido pela $FA_{o,d}$ correspondente. Durante seu caminho de volta, duas estruturas de dados são modificadas em cada nó visitado como uma função do caminho seguido e de sua qualidade: tabela de roteamento e uma tabela de estatísticas locais de tráfego em direção a cada destino.

A tabela de roteamento em cada nó relaciona cada destino possível na rede com uma probabilidade P_{jd} que representa a probabilidade de um nó vizinho j ser escolhido como o próximo salto em direção ao destino d . O cálculo dessa probabilidade leva em consideração o estado (tamanho) da fila do enlace entre o nó corrente e cada um de seus vizinhos. Dessa forma, essa tabela fornece uma medida relativa da qualidade para cada par enlace-destino. Já a tabela de estatísticas locais modela a distribuição de tráfego na rede visualizada por cada nó em relação às estimativas de tempo (calculadas sobre os tempos de ida e volta experimentados pelas FAs) para todos os nós da rede.

Em relação aos protocolos de ACO para roteamento em redes sem fio, grande parte destes é voltado para as redes móveis *ad hoc* (MANETs) e até o presente momento poucas propostas se propõem a empregar o ACO em redes móveis com conectividade limitada como é o caso das DTNs. Isto se deve ao fato de as DTNs representarem um ambiente mais desafiador devido às partições frequentes e aos atrasos longos que podem ocorrer nas comunicações. Na próxima seção são descritos alguns desses algoritmos encontrados na literatura para MANETs. Posteriormente, são apresentados os poucos protocolos de roteamento propostos para redes com conectividade limitada como as DTNs.

3.2.4.1 Roteamento em MANETs via ACO

As MANETs são redes com ou sem infra-estrutura, autoconfiguráveis e autogerenciáveis formadas por nós móveis que podem ou não ser roteadores. Esses nós cooperam dentro de uma faixa de comunicação formando uma rede temporária, dinâmica e descentralizada (PERKINS, 1997).

Segundo a classificação apresentada em Rosati et al. (2008) e ilustrada na Figura 10, os algoritmos de ACO para roteamento em MANETs podem ser diferenciados em relação a(o):

1. Modo como as formigas são criadas e como destinos são escolhidos: algoritmo pode adotar um comportamento proativo ou reativo;
 - O comportamento reativo, também conhecido como comportamento direcionado à demanda (*demand-driven*), indica que um algoritmo somente obtém informações de roteamento em resposta a um evento como o início de uma sessão de dados para um novo destino ou a falha de um caminho em uso. Os algoritmos reativos são mais escaláveis tendo em vista que eles reduzem a sobrecarga da rede com informações de controle de roteamento, aspecto importante em redes com recursos limitados. Porém, estes algoritmos podem sofrer oscilações de desempenho se não estiverem preparados para eventos inesperados (DUCATELLE et al., 2005);
 - Já no comportamento proativo, conhecido como comportamento direcionado à tabela (*table-driven*), as informações de roteamento já estão disponíveis quando um evento ocorre, isto é, todos os nós tentam manter rotas para todos os outros nós da rede durante todo o tempo. Isso significa que esses algoritmos precisam manter atualizadas todas as mudanças de topologia, o que pode se tornar muito oneroso se existirem muitos nós na rede ou se existir uma alta mobilidade (DUCATELLE et al., 2005). Dessa forma, quando uma alteração ocorre na rede, protocolos proativos propagam essas atualizações para que todos os nós mantenham uma visão consistente da rede.
2. Tipo de informações que as formigas podem coletar ao longo de cada caminho percorrido: somente a identidade dos nós visitados ou informações mais específicas sobre estes nós;
3. Informações que as formigas podem utilizar para auxiliá-las na escolha do próximo salto a seguir em direção a um destino: concentração de feromônio e/ou informações

sobre os nós visitados que podem ser incorporadas em funções heurísticas de modo a indicar uma influência explícita em direção a informações locais mais úteis;

4. Quantidade de feromônio que as formigas podem depositar em um caminho: uma quantidade constante ou uma quantidade variável de feromônio dependendo das informações obtidas ou de parâmetros locais.

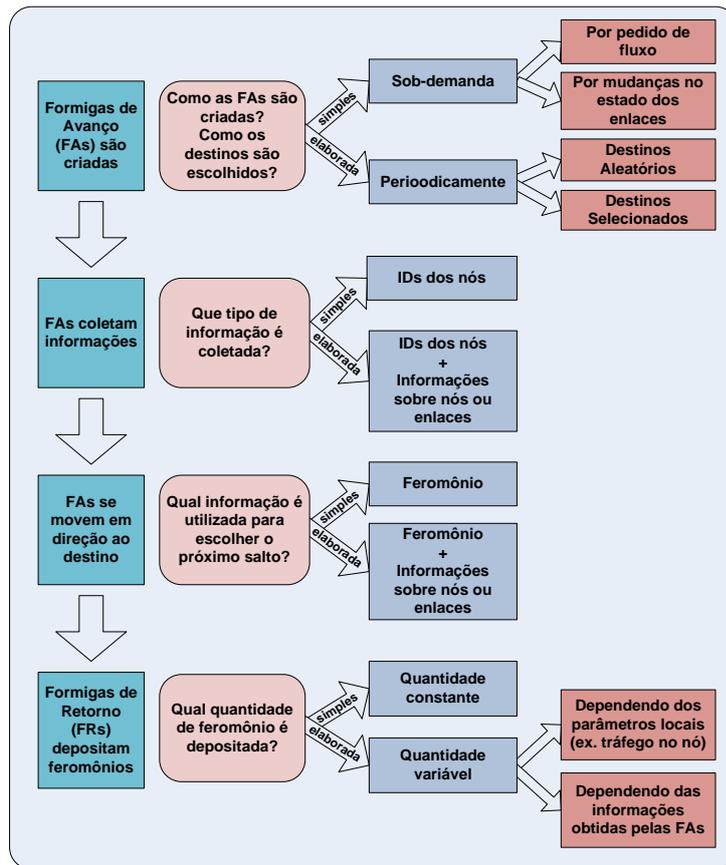


Figura 10: Classificação de algoritmos de ACO.
Fonte: Adaptado de Rosati, Berioli e Reali (2008)

Analisando as vantagens e desvantagens dos comportamentos reativo e proativo propostas tentam combinar vantagens de ambos os comportamentos formando algoritmos denominados híbridos como é o caso do protocolo AntHocNet proposto por Ducatelle et al. (2005).

Ao invés de manter proativamente uma tabela de roteamento o tempo todo para todos os destinos, no AntHocNet cada nó de origem opera de modo reativo estabelecendo um caminho até um destino no início de cada sessão de dados. FAs são transmitidas em *broadcast* para todos os vizinhos de modo a encontrar o melhor caminho até um destino. Os vizinhos também propagam a FA em *broadcast* de modo que o destino seja

rapidamente encontrado. Dessa forma, cada FA criada resulta em um número de recepções/transmissões proporcional ao número de nós na rede. Durante o curso da sessão, o nó de origem usa formigas proativas para monitorar os caminhos já encontrados, buscar alternativas melhores e encontrar novos caminhos.

Vários outros algoritmos de ACO para roteamento em MANETs foram propostos na literatura e estes se diferenciam principalmente de acordo com as características descritas na Figura 10. Como exemplos de alguns desses protocolos pode-se citar:

- AMR (*Ant Colony based Multi-path Routing*) (LIU; FENG, 2005): protocolo de roteamento sob-demanda que visa, através do processo de descoberta de caminhos do ACO, construir em cada nó de origem um grafo com vários caminhos de nós disjuntos. Assim, apenas quando todos os caminhos do grafo falharem, o nó de origem recomeçará o processo de descoberta de novos caminhos. Os autores propõem que em cada nó j visitado por uma FA, seja registrado na tabela de roteamento de j a tripla $\langle ID \text{ destino} - \text{próximo salto} - \text{valor de feromônio} \rangle$ onde o ID da fonte da FA representa o $ID \text{ destino}$, o ID do nó anterior percorrido pela formiga é o próximo salto e o $\text{valor de feromônio}$ depende do número de saltos e do atraso que a formiga precisou para alcançá-lo;
- ARAMA (*Ant Routing Algorithm for Mobile Ad-hoc networks*) (HUSSEIN et al., 2005): tem como objetivo encontrar uma solução ótima de modo a distribuir de forma justa a energia disponível nos nós de uma MANET. Os autores propõem o uso de dois tipos de formigas: as Formigas negativas de retorno que pontuam negativamente os caminhos com *loops* reduzindo a probabilidade de estes serem visitados; e as Formigas de trilha de destino que se movem aleatoriamente do destino à origem alterando as tabelas de roteamento e feromônio nos nós por onde passam;
- LBE-ARAMA (*Load Balancing and Energy ARAMA*) (RANGO; TROPEA, 2009): como o próprio nome sugere as métricas empregadas no LBE-ARAMA para atualizar o valor de feromônio buscam além da preservação da energia dos nós como no ARAMA, o balanceamento de tráfego de dados na rede através de uma avaliação do atraso de ida e volta no caminho entre um nó origem e um destino e o tempo de espera das mensagens no *buffer* dos nós;

De um modo geral, os algoritmos de ACO para roteamento em MANETs descritos anteriormente se propõem a otimizar algumas métricas, tais como a energia consumida nos nós móveis e o balanceamento de tráfego na rede. A análise dessas métricas é particu-

larmente útil para protocolos que operam em ambientes cujo requisito de funcionamento é a existência de uma rede conectada como é o caso das MANETs. Ou seja, todos os nós devem possuir ao menos uma conexão ativa na rede a cada momento com a qual eles podem se comunicar de modo a intermediar uma comunicação para um destino desejado. Esse número de conexões ativas pode ser bem significativo dependendo da densidade da rede e da centralidade de grau de cada nó. Nesse caso, onde há garantia de uma comunicação fim a fim entre dois nós quaisquer que desejam se comunicar, alguns protocolos de roteamento se propõem a evitar a seleção frequente dos mesmos nós para encaminhar uma mensagem a um destino em questão o que causaria uma sobrecarga nestes nós. Além disso, como a maioria dos protocolos de roteamento para MANETs confia nos caminhos completos construídos, se faz necessária uma fase de manutenção das rotas já descobertas de modo a detectar falhas (enlaces ausentes) nestas. Na detecção de uma falha em um enlace, a maioria dos protocolos descarta todas as informações referentes a esse enlace (como por exemplo, sua concentração de feromônio) e reinicia o processo de busca por novos caminhos. Ao contrário, o ambiente em DTNs é mais desafiador no sentido em que as conexões são com frequência esparsas e/ou intermitentes e longos atrasos são enfrentados em cada comunicação. Diante desses desafios, novos aspectos precisam ser considerados pelos protocolos de roteamento que utilizam o ACO para DTNs tais como a análise de aspectos sociais da rede. Porém, conforme pode ser visto na próxima seção, pouco se tem pesquisado a respeito e muito ainda pode ser explorado.

3.2.4.2 Protocolos baseados em ACO para Redes Móveis com Conectividade Limitada

A presente seção apresenta os protocolos de roteamento *unicast* voltados para redes móveis com conectividade limitada como as DTNs. Um protocolo de roteamento *multicast* baseado em ACO foi proposto por Zhufang (2010). Entretanto, esse trabalho está fora do escopo da presente tese cujo objetivo é possibilitar uma comunicação *unicast* entre os nós DTNs.

Rosati, Berioli e Reali (2008) apresentam um algoritmo chamado DAR (*Distributed Ant Routing*) para MANETs com conectividade limitada. Como requisitos para o seu funcionamento tem-se: um tempo de convergência baixo, isto é, rotas precisam ser construídas rapidamente de modo que possam ser utilizadas antes que a topologia da rede mude; e o mínimo de *overhead* de sinalização possível. FAs são criadas sob-demanda e enviadas em uma taxa constante. Essas FAs coletam apenas informações sobre a identificação dos nós por onde passam e se movem na rede considerando apenas o feromônio depositado de modo constante em cada caminho encontrado, isto é, nenhuma informação

sobre os nós em um caminho é considerada. A principal contribuição do DAR está relacionada a um limite de probabilidade Lp imposto para que um nó possa ser considerado como um próximo salto em um caminho até um destino. Se na tabela de roteamento de um nó tem ao menos um nó vizinho com uma probabilidade de seleção $p_i(n)$ maior que o limite de probabilidade Lp ($Lp > p_i(0) = 1/N$), onde N é o número de vizinhos de um nó), então essa entrada é nomeada com uma *flag* indicando que o vizinho está “disponível”. Assim, o limite Lp decide quando uma entrada na tabela é boa o suficiente para ser considerada como disponível. O objetivo é estudar o comportamento do tempo de convergência e da carga de sinalização variando a quantidade de feromônio depositada nos enlaces e o limite Lp de modo a estimar o número mínimo de FRs necessárias em um enlace de modo a alcançar o limite Lp . Os autores chegaram à conclusão de que com quantidades maiores de feromônio (ou menores valores de Lp), menos FRs precisam ser recebidas em um certo enlace de modo a obter um valor de probabilidade de seleção maior que o limite Lp . Além disso, o processo de evaporação de feromônio não é considerado, a única métrica do DAR é maximizar a taxa de entrega de pacotes e o algoritmo não é comparado com nenhum protocolo para DTNs existente.

La e Ranjan (2009) propõem um protocolo para MANETs com conectividade esparsa chamado ABMF (*Ant-Based Message Forwarding*). O objetivo do estudo é apenas investigar a estabilidade do ABMF em relação à taxa de perda de mensagens e ao atraso médio de entrega destas ao empregar o ACO juntamente com o algoritmo *backpressure* (TASSIULAS; EPHREMIDES, 1992). O algoritmo *backpressure* tem como objetivo manter a taxa média de chegada de mensagens dentro de uma região de estabilidade de modo que as filas dos nós não cresçam infinitamente com o tempo. Para isso, o algoritmo confia na criação de fluxos de mensagens guiados por tamanhos de filas com pesos, que não variam com o tempo, diferenciados entre os vizinhos candidatos. A idéia do ABMF é atualizar tais pesos através da informação de feromônio para refletir a dinâmica das filas no tempo. O feromônio é atualizado de duas formas: (1) enquanto um nó não encaminha uma mensagem para outros nós, o seu feromônio vai diminuindo no tempo; (2) quando um nó transmite uma mensagem para outro, seu feromônio aumenta. O feromônio é, então, utilizado como uma estimativa da capacidade extra de cada nó como encaminhador de mensagens de outros nós em função da dinâmica de sua fila (carga efetiva, atraso que cada mensagem experimenta na fila) e equalizar o tamanho normalizado das filas dos nós. Como regra de encaminhamento, uma única mensagem é enviada em direção a cada destino. O algoritmo ABMF não é comparado com outros protocolos de roteamento para DTNs, ele é somente comparado com o algoritmo *backpressure* puro (isto é, sem o ACO).

No protocolo ACRP (*Ant-Colony-based Routing Protocol*) (ZHANG et al., 2010b) cada nó mantém duas tabelas: uma tabela do atraso médio e concentração de feromônio para outros nós da rede; uma segunda tabela contendo informações locais (heurística) como a taxa de mudança de conectividade e a carga do nó. Três tipos de formigas são empregados: as FAs e FRs para estabelecer o feromônio nos enlaces e as formigas de dados que são geradas após o estabelecimento do feromônio. O protocolo de roteamento Epidêmico é utilizado para encaminhar as FAs, isto é, os nós trocam todas as cópias das FAs quando se encontram. Durante a construção de um caminho, ao chegar em um nó intermediário, a FA armazena a identificação do nó e o tempo de atraso até esse nó. Na sequência, o nó intermediário atualiza a tabela de feromônio acrescentando o inverso desse tempo de atraso. Ao chegar no destino, o valor de feromônio para todos os nós que compõe o caminho construído são atualizados. Então, a FR é gerada e inundada pela rede, também seguindo o protocolo Epidêmico. Em cada nó visitado, a concentração de feromônio é atualizada e se este nó tiver uma FA correspondente, esta é removida. Todas as concentrações de feromônio são evaporadas de tempos em tempos. Uma vez estabelecidos os feromônios nos nós, o nó de origem irá gerar as formigas de dados contendo a mensagem propriamente dita e esta será enviada de modo probabilístico considerando a soma do feromônio e da informação de heurística local. Uma vez encaminhada uma mensagem de dados, o nó corrente apenas manterá uma cópia desta se a sua concentração de feromônio para o destino for maior ou igual a concentração de feromônio do vizinho escolhido para o destino. O desempenho do protocolo é comparado com outros protocolos para DTNs apenas em relação às métricas de *overhead* e atraso médio, isto é, a métrica principal de roteamento para DTNs que é a taxa de entrega de mensagens não é avaliada.

3.3 DISCUSSÕES

Os modelos e conceitos encontrados na biologia têm sido fontes de inspiração para a resolução de inúmeros problemas computacionais. Diante dessa perspectiva, surgiram os algoritmos culturais (ACs) e a otimização por colônia de formigas (ACO). Conforme descrito na Seção 3.1, os ACs têm fornecido ótimos resultados em diferentes problemas de otimização sejam eles estáticos ou dinâmicos. A meta-heurística ACO, conforme descrito na Seção 3.2, também têm obtido sucesso em inúmeros problemas de otimização, mas em especial no processo de roteamento em redes.

Segundo Reynolds e Ali (2008), a evolução cultural possibilita que as interações sociais entre os indivíduos sejam modeladas em dimensões superiores de tempo e espaço.

Isso permite que os indivíduos se adaptem a mudanças ambientais em taxas que excedem àquelas providas pela evolução biológica com base apenas na herança. Saleem e Reynolds (2000) destacam também a importância em reutilizar informações obtidas no passado de modo a consumir menos tempo na resolução de problemas futuros. O objetivo é que as informações obtidas durante uma evolução possam direcionar as atividades futuras dos indivíduos de uma população na busca por solução de problemas. Com isso é possível identificar padrões e comportamentos em um determinado ambiente e reagir a estes.

Analisando os algoritmos descritos na Seção 3.2, é possível evidenciar inúmeras vantagens que podem ser obtidas ao empregar a técnica de ACO na resolução de problemas de otimização e estas são destacadas a seguir:

- As formigas executam operações simples, pois a busca por uma solução para um problema em questão é executada de forma distribuída.
 - As formigas chegam a um nó e podem calcular o próximo salto a partir da quantidade de feromônio depositado em cada enlace em um caminho. O custo computacional dessa operação é baixo, não causando influência significativa na carga de processamento de cada nó e na carga de tráfego da rede;
- As formigas não necessitam de informações globais sobre o sistema: cada agente pode obter apenas informações sobre o nó corrente e sobre os enlaces que saem deste. Não se faz necessário conhecer outros parâmetros globais do ambiente;
- Capacidade de se adaptar a mudanças no ambiente: as formigas são capazes de encontrar um novo caminho mais curto sempre que um caminho antigo não está mais disponível (essa busca pode se tornar mais ou menos exploratória dependendo da taxa de evaporação considerada ou dos parâmetros utilizados nas definições da probabilidade de escolha de um nó).

Um algoritmo de ACO faz uso de um número variado de parâmetros de controle que influenciam diretamente a qualidade das soluções encontradas. Dorigo et al. (1996) e Dorigo e Gambardella (1997) estudaram a influência do número de formigas no desempenho dos algoritmos de ACO. Em geral, esta influência está relacionada à quantidade das soluções encontradas e à complexidade computacional dos algoritmos. Quanto mais formigas forem utilizadas, mais caminhos serão construídos. Porém, um número grande de formigas nem sempre é benéfico, pois mais cálculos de feromônios serão necessários e pode-se levar um tempo significativo para que a intensidade de feromônio nos enlaces, considerados soluções boas para um determinado problema, aumente para valores mais

altos do que os enlaces considerados como soluções não factíveis. Por outro lado, quanto menos formigas forem utilizadas, menor será a habilidade de exploração do algoritmo e, conseqüentemente, menos informações sobre o espaço de busca estarão disponíveis para as outras formigas. Além disso, uma quantidade menor de formigas pode fazer com que soluções sub-ótimas sejam encontradas ou que uma estagnação prematura ocorra.

O objetivo da presente tese é apresentar um novo protocolo de roteamento para DTNs que faz uso de um sistema híbrido o qual usufrui das vantagens de um AC e de um ACO para direcionar o tráfego da rede. Este direcionamento é feito através de um subconjunto de bons encaminhadores de modo a melhorar a taxa de entrega de mensagens enquanto limita o número de réplicas de mensagens transmitidas e descartadas por falta de recursos nos nós. O próximo capítulo visa contextualizar o protocolo proposto, descrevendo suas contribuições frente aos trabalhos relacionados que estão sendo considerados na presente tese.

4 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PROPOSTA

O objetivo do presente capítulo é apresentar o contexto do protocolo proposto nesta tese, denominado Cultural GrAnt, que tem como base dois paradigmas da Computação Natural: Algoritmos Culturais (AC) e Otimização por Colônia de Formigas (ACO do inglês *Ant Colony Optimization*). Primeiramente, a Seção 4.1 descreve brevemente o problema de roteamento em DTNs como um problema de busca a ser tratado pelo protocolo Cultural GrAnt. A Seção 4.2 traz um resumo dos principais desafios enfrentados pelos protocolos atuais voltados para DTNs que motivaram o desenvolvimento do Cultural GrAnt. Finalmente, na Seção 4.3 são apresentadas as principais contribuições referentes ao protocolo Cultural GrAnt.

4.1 PROBLEMA DE ROTEAMENTO EM DTN

Conforme visto no Capítulo 1, as DTNs são uma classe específica de redes sem fio que estão sujeitas a constantes mudanças em sua topologia devido à mobilidade de seus usuários, obstáculos e/ou recursos limitados. Nesses ambientes podem ocorrer perdas de conectividade, atrasos longos e variáveis e um consumo grande de recursos durante o envio de mensagens entre um nó de origem e seu destino. Diante desse cenário, o problema de roteamento em DTNs pode ser visto como um problema de busca multimodal onde a abordagem proposta para solucioná-lo deve prover um conjunto de soluções de forma que caso haja interrupção na comunicação, outra solução esteja disponível. Portanto, buscam-se os melhores caminhos entre dois nós quaisquer, considerando os seguintes aspectos do funcionamento da rede:

- Entrega de mensagens;
- Descarte de mensagens;
- Replicação de mensagens.

Devido à dificuldade de se avaliar os aspectos citados anteriormente ao longo do próprio processo de busca, no protocolo proposto, estes itens são considerados indiretamente através da aquisição, manipulação e avaliação de um conjunto de métricas que juntamente com conhecimentos específicos guiarão o protocolo Cultural GrAnt durante a busca pelas melhores soluções.

O conjunto finito de soluções possíveis, isto é, caminhos compostos por sequências de nós, onde a permutação de nós gera uma nova solução, caracteriza o roteamento em DTNs como um problema de busca combinatória. O problema também pode ser classificado como dinâmico, pois as características do espaço de busca e, conseqüentemente, a localização e valor das soluções mudam com o tempo, devido principalmente à mobilidade dos usuários na rede.

Desta forma, o problema de roteamento em DTNs representa um desafio bastante complexo, com vários aspectos ainda inexplorados pelas abordagens descritas na literatura, conforme detalhado na próxima seção.

4.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÕES

No segundo capítulo foram apresentados diferentes protocolos de roteamento para DTNs (protocolos replicadores de mensagens, protocolos baseados em históricos de contatos, protocolos baseados na mobilidade controlada dos nós, entre outros) e técnicas para gerenciar a ocupação da área de armazenamento dos nós. Analisando o estado da arte e as características de uma DTN é possível constatar que muitos desafios ainda precisam ser solucionados pela comunidade de pesquisa. Dentre estes desafios destacam-se:

- Devido à dinâmica das DTNs, a escolha do melhor caminho não deve ser o principal objetivo de um protocolo de roteamento. É importante manter a diversidade de caminhos, evitando que as mensagens sejam sempre encaminhadas para os mesmos nós intermediários;
- Definir de forma mais clara o(s) objetivo(s) que se deseja alcançar de modo a projetar um protocolo de roteamento mais eficiente. Em um ambiente de comunicação onde o espaço de armazenamento dos nós e a largura de banda dos enlaces de comunicação são infinitos, os protocolos replicadores de mensagens, descritos na Seção 2.2.1, fornecem uma boa solução para o problema de roteamento em redes conectadas intermitentemente com respeito aos seguintes objetivos: maximizar a taxa de mensagens entregues com sucesso ao seu destino; e minimizar a latência de cada entrega.

Protocolos com replicação de mensagens controlada tentam reduzir o número de encaminhamento de mensagens através da inserção de um campo em cada mensagem de modo a limitar o número de saltos que ela pode percorrer. Porém, tal medida é difícil de estipular tendo em vista que é altamente dependente do diâmetro da rede. Considerando que em DTNs os recursos são escassos, é de grande valia encontrar uma alternativa aos protocolos replicadores que otimize o uso de recursos na rede, minimizando a sua taxa de *overhead*, em relação ao número de mensagens replicadas, e o número de mensagens descartadas por falta de espaço em *buffer*, sem no entanto perder de vista o desempenho em relação à taxa de entrega de mensagens;

- Diante do problema encontrado pelos algoritmos replicadores em reduzir o número de encaminhamentos de cada mensagem, é importante determinar de forma dinâmica o número de nós para os quais uma determinada mensagem deve ser encaminhada de modo a, eventualmente, alcançar o seu destino. Quanto maior este número, melhor será a chance de essa mensagem ser entregue ao seu destino final, porém mais recursos, como largura de banda e espaço em *buffer*, serão consumidos;
- Prover algoritmos de roteamento que realizem além de buscas locais, buscas globais nas suas decisões de roteamento. Se as decisões de roteamento forem tomadas com base apenas em informações locais de vizinhos a um salto, como faz o protocolo PROPHET (ver Seção 2.2.2), ou em informações locais e de vizinhos a dois saltos, como no protocolo SimBet (ver Seção 2.2.2.1), pode ocorrer de existir um nó com boa qualidade próximo ao nó de origem e vários nós com baixa qualidade próximos ao destino o que tornará mais onerosa a entrega das mensagens ao destino desejado. Isso é particularmente verdadeiro se no caminho entre quaisquer dois nós existirem vários nós intermediários. Entretanto, se a decisão de roteamento considerar apenas buscas globais, como faz o protocolo DAR (ver Seção 3.2.4.2), estas nem sempre são possíveis, principalmente em redes com conexões intermitentes como as DTNs onde um caminho completo entre quaisquer nós nem sempre está disponível;
- Tirar vantagem de algoritmos reativos para buscas globais na rede. Conforme visto na Seção 3.2.4.1, algoritmos de ACO reativos têm sido estudados extensivamente em MANETs, uma vez que estes se adaptam bem a topologias dinâmicas devido ao seu *overhead* baixo. Entretanto, o roteamento em DTNs é mais desafiador devido a constantes partições na rede e aos longos atrasos fim-a-fim. Um problema associado aos algoritmos reativos típicos é que inicialmente um nó de origem pode levar um longo tempo até encontrar um caminho em direção a um destino. Isso é particular-

mente verdadeiro se a origem estiver muito longe do destino como pode ocorrer nas DTNs. Nesse caso, é necessário considerar uma forma de reduzir tal latência;

- Determinar as métricas que devem ser utilizadas pelos protocolos de roteamento para auxiliá-los nas decisões de encaminhamento de mensagens. Se um protocolo de roteamento confiar inteiramente em uma única métrica, como por exemplo a popularidade de um nó, mais espaço de armazenamento será necessário nesse nó provendo assim um desbalanceamento da carga de tráfego na rede. Então, sempre que possível, os protocolos de roteamento devem considerar um conjunto de métricas (em especial mesclando métricas locais e globais) sobre o perfil de comportamento social dos usuários e da rede de modo a tomar melhores decisões no direcionamento do tráfego da rede;
- Conforme destacado em Zhang (2006), algoritmos adaptativos e de auto-aprendizado devem ser desenvolvidos de modo que a rede seja cognitiva e, então, decisões inteligentes sobre escalonamento e encaminhamento sejam feitas automaticamente;
- Como em uma DTN não é possível garantir um caminho fim-a-fim entre um nó que origina uma mensagem e o destino desta, a transferência de custódia das mensagens é requisitada aos nós intermediários da rede (ver Seção 2.1.1). Isso implica que alguns nós podem precisar armazenar várias mensagens em seu *buffer* por períodos longos de tempo e, então, tentar transmiti-las em uma futura oportunidade de contato. Porém, pode ocorrer de apenas um contato estar disponível em um instante de tempo e este não ter recurso suficiente (energia ou espaço em *buffer*) para receber todas as mensagens. Diante desse cenário e da duração limitada de cada contato na rede, se faz necessária uma disciplina de escalonamento de mensagens para determinar a ordem na qual as mensagens devem ser transmitidas;
- Conforme destacado por Zhang (2006), quando múltiplas cópias de uma mesma mensagem estão em circulação na rede, é necessário algum método que permita que cópias desnecessárias sejam descartadas reduzindo assim a taxa de ocupação do *buffer* dos nós. Por exemplo, quando as mensagens são recebidas com sucesso no seu destino, os nós intermediários podem ser informados desse evento de modo a descartar tais mensagens. Embora essa informação consuma recursos extras na rede, ela pode aumentar a eficiência do gerenciamento de *buffers*. Esquemas de gerenciamento de *buffer* apropriados também devem indicar quais mensagens podem ser descartadas quando um *buffer* atingir sua capacidade máxima.

Diante dos desafios supracitados, conclui-se que ainda há muito a ser explorado na área das DTNs. A presente tese propõe uma abordagem alternativa para resolvê-los. Um protocolo chamado Cultural GrAnt (do inglês *Cultural Greedy Ant*) é modelado e construído de modo a: inferir os melhores encaminhadores de mensagens para determinados destinos buscando direcionar o tráfego DTN de forma mais inteligente, determinar a ordem de transmissão e descarte das mensagens armazenadas no *buffer* de cada nó.

O protocolo Cultural GrAnt é formado por dois espaços distintos de um algoritmo cultural: o espaço de crenças e o espaço populacional. Conforme visto na Seção 3.1.2, o espaço populacional de um AC, o qual engloba um conjunto de possíveis soluções para um determinado problema, pode ser representado por qualquer modelo computacional baseado em população de indivíduos. Tendo em vista que a meta-heurística ACO tem sido utilizada com sucesso em inúmeros problemas de roteamento em redes por ser capaz de encontrar um conjunto de soluções de modo paralelo e iterativo (conforme visto na Seção 3.2.4), o protocolo Cultural GrAnt utiliza o ACO para representar o espaço populacional do AC.

A utilização das duas meta-heurísticas, AC e ACO, prevê a obtenção de um sistema híbrido natural que visa se beneficiar das vantagens específicas de cada técnica:

1. Natureza auto-organizável e adaptação da estrutura de aprendizado do ACO (descrita na Seção 3.2). Espera-se que com o uso de uma população de soluções espalhadas pelo espaço de busca o protocolo Cultural GrAnt possa se adaptar mais rapidamente às mudanças nas DTNs;
2. O ambiente nas DTNs oportunistas exhibe algumas similaridades exploráveis com referência a padrões no comportamento dos usuários da rede (nós) que compõem cada solução (caminho) refletindo o retorno destes usuários a localizações prévias ou próximas destas. Frente a este fato, a memorização e reutilização de experiências obtidas ao longo dos processos de busca por indivíduos de uma sociedade podem ser úteis para influenciar buscas futuras de forma a guiar os novos indivíduos e assim acelerar o processo de aprendizado (ver Seção 3.1).

Os seguintes fatores motivaram o protocolo proposto a utilizar o paradigma de algoritmos culturais e a caracterizar algumas métricas específicas com base nos padrões de conectividade/sociabilidade dos nós:

1. A mobilidade dos nós é utilizada para determinar as oportunidades de comunicação em DTNs;

2. As sociedades são sistemas sociais complexos com características evidentes de redes de relacionamentos (WILKINSON, 2003) e, segundo Yoneki et al. (2009), a propagação de informações é altamente influenciada por redes de conectividade humana;
3. Uma sociedade pode ser entendida como uma rede completa de relações entre os indivíduos afetados pelos sinais recebidos de conhecimento (REYNOLDS; ALI, 2008);
4. Alguns algoritmos de roteamento operam sobre a suposição de que os contatos disponíveis nas redes sem fio são conhecidos *a priori*. Outros assumem que eles surgem em tempos aleatórios. Embora o modelo de mobilidade aleatória tenha sido bastante utilizado em avaliações de protocolos para redes móveis, não é provável que os usuários reais se movam de forma aleatória sem quaisquer correlações, mas sim de um modo previsível com base nos padrões de comportamentos temporais e espaciais repetitivos (LINDGREN et al., 2004) (GONZÁLEZ et al., 2008) (HUI; CROWCROFT, 2008).

4.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PROPOSTA

Frente às inúmeras motivações citadas, o protocolo Cultural GrAnt visa conduzir buscas locais e globais, obter e analisar informações sobre a dinâmica da rede e a utilidade de cada contato DTN como encaminhador de mensagens, armazenar as informações obtidas na forma de diferentes conhecimentos e reutilizar tais conhecimentos em buscas futuras de modo a consumir menos tempo na obtenção das soluções, e reduzir o espaço de busca às melhores soluções o que, conseqüentemente, aumenta a taxa de entrega de mensagens enquanto limita as replicações e descartes de mensagens na rede. Tais conhecimentos são utilizados para auxiliar o protocolo Cultural GrAnt na tarefa de encaminhar, escalonar e descartar, quando necessário, mensagens.

Para se adaptar às grandes variações que uma DTN sofre no tempo em sua topologia e reduzir a latência na entrega das mensagens, conforme detalhado ao longo do Capítulo 5, as seguintes contribuições para DTNs estão associadas ao protocolo Cultural GrAnt:

1. Visando aumentar a confiabilidade em redes dinâmicas como as DTNs, deve-se permitir a existência de múltiplos caminhos como uma tentativa de evitar a convergência do algoritmo para apenas um ou poucos caminhos. Tendo em vista que as DTNs são em geral esparsas, deve-se tentar evitar que os bons caminhos encontrados sejam perdidos por processos de evaporação realizados periodicamente ou que os

mesmos sejam sempre utilizados. Considerando esses aspectos, ao invés de utilizar uma evaporação de feromônio baseado no tempo como fazem os protocolos ABMF e ACRP propostos para DTNs ou não utilizar um processo de evaporação como faz o protocolo DAR (ver Seção 3.2.4.2), o protocolo Cultural GrAnt executa uma evaporação direcionada a eventos, que somente acontece se um nó detecta que um novo caminho para um destino acaba de ser encontrado. Essa evaporação se mostra mais adequada para redes intermitentes como as DTNs;

2. Com o objetivo de minimizar a carga de tráfego na rede com mensagens de controle, a fase de busca por caminhos do Cultural GrAnt é realizada de modo reativo, isto é, ela é iniciada sob-demanda, quando se faz necessário o estabelecimento de um caminho de múltiplos saltos entre dois nós que desejam trocar mensagens. Porém, tendo em vista que um nó de origem pode levar um tempo longo para encontrar um caminho em direção a um destino, diferente dos protocolos descritos na Seção 3.2.4.1, no protocolo Cultural GrAnt as Formigas de Avanço (FAs) encapsulam as mensagens de dados;
3. O protocolo Cultural GrAnt não fixa o número de FAs para encontrar um caminho para um destino desconhecido. Ao invés disso, esse número é definido de forma dinâmica, de acordo com a utilidade dos candidatos a encaminhadores de mensagens, o grau de estagnação dos nós e o reconhecimento do sucesso da entrega das mensagens. Isto é, novas FAs são criadas e enviadas, por qualquer nó da rede seja este a origem de uma mensagem ou um nó intermediário, somente quando melhores encaminhadores surgirem ou enquanto a recepção de sua mensagem respectiva no destino não for conhecida;
4. Apesar de pesquisas como as apresentadas por Caro e Dorigo (1997) terem mostrado resultados encorajadores para um roteamento probabilístico no caso de redes estáticas com topologias relativamente pequenas, conforme relatado em Baras e Mehta (2003) a regra de transição probabilística pode não ser adequada para redes com mudanças rápidas em sua topologia. Então, ao invés de uma escolha probabilística, o protocolo Cultural GrAnt utiliza uma regra de transição gulosa (onde a melhor solução corrente é sempre escolhida) para encaminhar as mensagens para os novos nós que sejam mais promissores ou promover a intensificação de bons encaminhadores já encontrados. Para isso, consideram-se a função heurística e as concentrações de feromônio obtidos pela população do ACO e os conhecimentos armazenados no espaço de crenças do AC. Entretanto, a possível convergência prematura não ocorre,

pois a exploração do espaço em busca de novas soluções continua acontecendo pela própria dinâmica da rede;

5. Como nas DTNs não há um elemento central que possibilite o armazenamento e disponibilização das informações obtidas durante a fase de busca por soluções, os componentes de conhecimento do AC são armazenados em diferentes espaços de crenças. Isto é, os espaços de crenças são distribuídos em cada nó da rede. De modo similar, do ponto de vista de cada nó da rede, apenas uma parte (referente aos seus nichos específicos) das informações provida pelo espaço populacional é armazenada nos operadores do ACO de cada nó (função heurística e feromônio);
6. A troca de informações entre o espaço de crenças de cada nó e o espaço populacional ocorre sempre de forma distribuída mas esta pode ser direta (através da função de influência) ou indireta (através das funções de aceitação e atualização). Neste último caso, a comunicação é intermediada por métricas específicas, conforme discutido no Capítulo 5.

Além das motivações descritas na seção 4.2, até o presente momento não foram encontradas pesquisas que propõem o uso das meta-heurísticas algoritmos culturais e otimização por colônia de formigas (AC + ACO) para prover o roteamento em redes de comunicação móveis. As propostas apresentadas na Seção 3.2.4.2 fazem uso apenas da meta-heurística ACO e ainda apresentam as seguintes limitações: (a) o protocolo DAR desconsidera informações dos nós vizinhos a um salto e faz uso apenas da informação de concentração de feromônio, mas esta nem sempre está disponível nas DTNs; (b) o protocolo ABMF estima a capacidade extra de cada nó como encaminhador de mensagens em função da dinâmica de sua fila, objetivando equalizar o tamanho das filas dos nós de modo que estas não cresçam infinitamente com o tempo. Porém, de nada adianta um nó possuir um espaço de armazenamento grande o suficiente para armazenar várias mensagens se o seu nível de conectividade for baixo a ponto de não possibilitar o encaminhamento das custódias das mensagens armazenadas em seu *buffer*; (c) o protocolo ACRP utiliza o protocolo de roteamento epidêmico para inundar a rede com mensagens de controle associadas às Formigas de Avanço (FAs) e Formigas de Retorno (FRs); (d) nenhuma dessas abordagens considera um aspecto importante em redes esparsas e oportunistas, isto é, que usam a mobilidade dos nós para criar oportunidades de contatos: a análise de métricas sociais entre os nós, como por exemplo sua centralidade de grau e centralidade de intermediação.

As propostas apresentadas em Ma et al. (2008) e Zhang et al. (2010a) fazem uso do AC (na primeira proposta o algoritmo de têmpera simulada representa o espaço populacional do AC e na segunda proposta o ACO é utilizado) para solucionar problemas de roteamento com restri es de QoS em uma topologia est tica. Apesar de ambos se aproximarem do Cultural GrAnt pelo uso de AC para fins de roteamento, os algoritmos propostos nos trabalhos citados se distanciam do Cultural GrAnt pelas seguintes características: opera o em um ambiente est tico, isto é, onde a topologia dos nós é fixa; desconsidera o da análise dinâmica sobre os aspectos sociais da rede para determinar oportunidades de contatos em virtude da característica anterior; busca por um único caminho ótimo (com várias restri es); uso dos conhecimentos situacional e normativo do AC somente para aumentar a velocidade de convergência da busca pelo melhor caminho; uso de um único espaço de crenças centralizado.

A Tabela 1 resume as seguintes características de algumas abordagens relacionadas com a presente tese:

- **Tipo de Problema:** representa o problema para o qual o protocolo se propõe a solucionar. No caso do Cultural GrAnt além do problema roteamento em DTNs, o protocolo propõe o uso de algumas métricas para determinar a ordem de transmissão (escalonamento) e descarte de mensagens;
- **Características do Problema:** descreve as características do problema: dinâmico ou est tico do ponto de vista da mobilidade dos nós; unimodal ou multimodal no sentido da abordagem buscar uma única soluço ou um conjunto de solu es; com ou sem restri es. Como todas as abordagens estão relacionadas com o problema de roteamento, todos os problemas são combinatórios;
- **Heurística ou Meta-heurística:** indica se a abordagem adota alguma heurística ou meta-heurística para auxiliar na busca por uma ou mais solu es;
- **Métricas Utilizadas:** descreve as métricas que são utilizadas pelas abordagens para auxiliá-las durante a busca;
- **Número de Mensagens Replicadas:** representa o número de mensagens de dados replicadas para os nós na rede. Isso somente   válido em DTNs onde a replica o de mensagens é necessária de modo a aumentar a chance de uma mensagem alcançar seu destino. Quando apenas a mensagem original estiver em circula o na rede, seja em DTNs ou em outros tipos de redes, este valor será representado por 1. O termo dinâmico indica que as mensagens são replicadas dinamicamente de acordo

com algum parâmetro definido antes do processo de busca (como é o caso do limiar de probabilidade de seleção da abordagem DAR) ou por meio de métricas que vão sendo atualizadas durante a busca (como as métricas utilizadas no protocolo Cultural GrAnt);

- **Espaço de Crenças:** se a abordagem usar o AC na sua busca, essa característica define se o espaço de crenças contendo os conhecimentos é único e centralizado ou se ele é distribuído entre os nós da rede. No primeiro caso, assume-se que um elemento central disponibilizará todos os conhecimentos a todos os nós da rede o que se torna inviável em uma rede de comunicação sem fio;
- **Conhecimentos do AC:** se a abordagem estiver usando o AC, essa característica representa os conhecimentos do AC utilizados no espaço de crenças: situacional, normativo, histórico, domínio e/ou topográfico;
- **Operadores do ACO:** se a abordagem estiver usando o ACO, essa característica representa os operadores do ACO que são utilizados: concentração de feromônio e/ou função heurística;
- **Geração de Formigas:** se a abordagem estiver usando o ACO, essa característica representa o modo de busca das formigas (conforme visto na Seção 3.2.4.1), se estas atuam de modo reativo (ou sob-demanda), proativamente (ou periodicamente) ou de forma híbrida (reativo e proativo). Além disso, essa característica descreve se as formigas são criadas e enviadas a uma taxa fixa e constante, se são enviadas para um único nó ou para todos os nós da rede, ou se a sua geração é dinâmica como é o caso apenas do protocolo Cultural GrAnt. Aqui ainda é importante destacar que diferente das abordagens consideradas, o Cultural GrAnt envia suas FAs juntamente com as suas mensagens de dados associadas e a sua regra de transição é sempre gulosa.

Conforme detalhado ao longo do Capítulo 5 e comprovado através dos experimentos realizados no Capítulo 6, as contribuições descritas anteriormente, colocam o protocolo Cultural GrAnt como um forte candidato ao estado da arte para o roteamento em DTNs.

Tabela 1: Comparação de Abordagens Relacionadas ao Cultural GrAnt

Abordagem	Tipo de Problema	Características do Problema (Combinatório)	Heurística ou Meta-heurística	Métricas Utilizadas	Número de Mensagens Replicadas	Espaço de Crenças	Conhecimentos do AC	Operadores do ACO	Geração de Formigas
Cultural GrAnt	Roteamento Escalonamento Descarte para DTNs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	AC+ACO	Métricas Sociais Grau de Parentesco Grau de Estagnação Número de Saltos	Dinâmico	Distribuído	Situacional Histórico Domínio	Feromônio Heurística	Reativo Taxa dinâmica
DAR	Roteamento para DTNs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	ACO	Nenhuma	Dinâmico (limiar fixo para probabilidade de seleção)	-	-	Feromônio	Reativo Taxa constante
ABMF	Roteamento para DTNs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	ACO	Carga das filas Atraso de mensagens em filas	1	-	-	Feromônio Heurística	Reativo Uma única formiga enviada para um único destino
ACRP	Roteamento para DTNs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	ACO	Carga do nó Mudança de conectividade Atraso nos enlaces	Dinâmico	-	-	Feromônio Heurística	Reativo Para todos os nós (uso do Epidêmico)
Epidêmico	Roteamento para DTNs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	Nenhuma	Nenhuma	Para todos os nós	-	-	-	-
PROPHET	Roteamento Escalonamento para DTNs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	Heurística Local (vizinhos a um salto)	Histórico de Encontros e Transitividade	Dinâmico	-	-	-	-
SimBet	Roteamento para DTNs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	Heurística Local (vizinhos a dois saltos)	Similaridade Social e Centralidade de Intermediação	Quantidade fixa para replicação	-	-	-	-
AntHocNet	Roteamento para MANETs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	ACO	Número de saltos Atraso caminho	1	-	-	Feromônio	Híbrido FA/FR enviadas para rotas conhecidas se disponível ou para todos os nós caso contrário
AMR	Roteamento para MANETs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	ACO	Número de saltos Atraso no caminho	1	-	-	Feromônio	Reativo FA/FR enviadas para todos os nós
ARAMA	Roteamento para MANETs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	ACO	Energia dos nós Número de saltos	1	-	-	Feromônio Heurística	Reativo Taxa constante
LBE-ARAMA	Roteamento para MANETs	Dinâmico Multimodal Sem restrições	ACO	Energia dos nós Atraso caminho Atraso fila nós	1	-	-	Feromônio Heurística	Reativo Taxa constante
Ma et al. (2008)	Roteamento para Redes Fixas	Estático (Mobilidade Nós) Unimodal (solução ótima) Com restrições	AC + Têmpera Simulada	Largura de Banda Atraso e Perda de Pacotes em um enlace	1	Centralizado	Situacional Normativo	-	-
CACA-QoS	Roteamento para Redes Fixas	Estático (Mobilidade Nós) Unimodal (solução ótima) Com restrições	AC + ACO	Largura de Banda Atraso e Custo de um enlace	1	Centralizado	Situacional Normativo	Feromônio Heurística	Número fixo de iterações e formigas

5 PROTOCOLO DE ROTEAMENTO CULTURAL GRANT

Este capítulo apresenta os detalhes de funcionamento do protocolo Cultural GrAnt proposto nesta tese para prover o roteamento em DTNs. Primeiramente, a Seção 5.1 traz uma visão geral do protocolo. Na sequência, as Seções 5.2 e 5.3 descrevem as métricas utilizadas assim como suas relações com os componentes incorporados ao Cultural GrAnt. Finalmente, os três módulos principais que compõem o protocolo (roteamento, escalonamento e descarte) são apresentados nas Seções 5.4, 5.5 e 5.6, respectivamente.

5.1 VISÃO GERAL DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT

Conforme discutido no Capítulo 4, o protocolo Cultural GrAnt se baseia em Algoritmos Culturais (AC) e Otimização por Colônia de Formigas (ACO). Entretanto, diferente dos sistemas tradicionais baseados em AC, nesta tese algumas mudanças são necessárias na modelagem tendo em vista as particularidades das DTNs as quais representam o ambiente de operação do protocolo proposto.

A primeira diferença diz respeito à distribuição das informações promovidas pelo espaço de crenças e espaço populacional do AC. Como no ambiente (DTN composta por um conjunto de nós) de operação do protocolo não há um componente central para armazenar e disponibilizar todos os conhecimentos adquiridos e as soluções completas (isto é, caminhos completos formados por uma sequência de nós), estes são distribuídos em cada nó da rede. Assim, os conhecimentos do AC são distribuídos em diferentes espaços de crenças e apenas uma parte do espaço populacional é conhecida em cada nó da rede. A troca de informação entre cada espaço de crenças e o espaço populacional também ocorre de forma distribuída conforme ilustra a Figura 11.

Outra modificação frente aos ACs tradicionais está relacionada à forma (direta ou indireta) como ocorrem as comunicações entre o espaço populacional e o espaço de crenças em cada nó. No protocolo Cultural GrAnt, esta comunicação pode ocorrer de forma direta (via função de influência como no AC padrão) e de forma indireta (via funções de aceitação

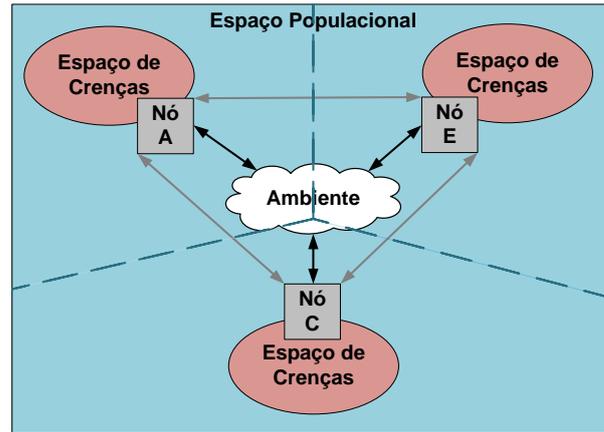


Figura 11: Espaços de Crenças Distribuídos.

e atualização através de alguns indicadores e métricas específicas) conforme detalhado ao longo deste capítulo. A Figura 12 ilustra essa modificação.

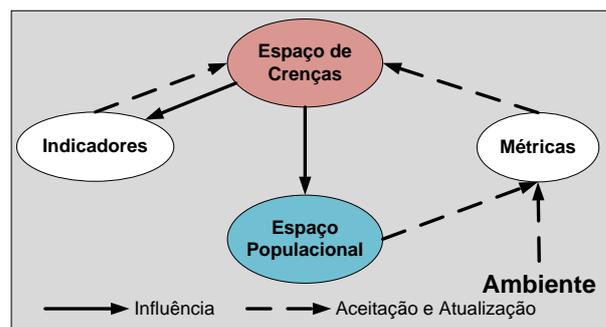


Figura 12: Espaço de Crenças: Interação Direta e Indireta com o Espaço Populacional.

Neste trabalho, as métricas podem ser classificadas considerando-se dois aspectos distintos: origem e escopo da informação armazenada. Em relação à origem da informação armazenada, as métricas podem ser classificadas em **básicas** (informação obtida diretamente do espaço populacional ou dos nós em seu ambiente de operação) e **compostas** (informação obtida a partir da manipulação das métricas básicas). Referente ao escopo da informação armazenada nas métricas básicas, existem as métricas **locais**, específicas dos nós e de sua vizinhança a um salto, e as métricas **globais** que são norteadas por informações sobre caminhos completos construídos.

Assim, conforme mostrado na Figura 12, parte da interação entre o espaço de crenças e o populacional é norteadada por métricas, sejam elas básicas (locais e globais) ou compostas. Isso permite maior flexibilidade ao modelo tendo em vista que, dada a complexidade e dinâmica do ambiente onde o protocolo atua, as métricas compostas permitem uma manipulação da informação obtida através das métricas básicas para que o

nível mais abstrato do modelo (espaço de crenças) possa ser atualizado e, consequentemente, possa influenciar mais corretamente o processo de busca que ocorre no espaço populacional. Além disso, o protocolo pode tirar proveito de informações globais sempre que estas estiverem disponíveis. Porém, dada a característica de intermitência das DTNs, quando as informações globais se tornam inacessíveis o encaminhamento das mensagens pode ser realizado unicamente através das informações armazenadas nas métricas locais.

Outro ponto importante a ser destacado diz respeito aos modos de busca do protocolo proposto. Para direcionar as mensagens aos contatos mais promissores, o Cultural GrAnt faz uso de informações sobre a conectividade social e oportunista entre os nós operando em dois modos de busca: não solicitado e sob-demanda, conforme ilustra a Figura 13.

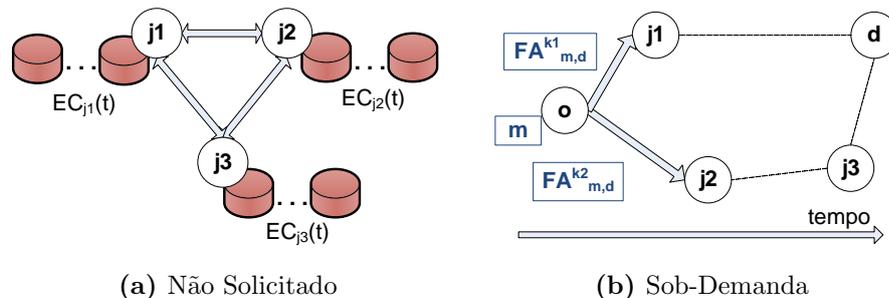


Figura 13: Modos de Busca do Protocolo Cultural GrAnt.

No **modo de busca não solicitado** (Figura 13(a)), mensagens de controle são sempre trocadas localmente com cada nó vizinho j encontrado de modo a atualizar os conhecimentos armazenados em cada Espaço de Crenças (EC) distribuído ao longo da rede. Se for necessário estabelecer uma sessão de dados entre dois nós origem o e destino d , então o Cultural GrAnt entra no **modo de busca sob-demanda** (Figura 13(b)). Assim, em cada nó i que possui uma mensagem m a ser enviada (seja este origem o de m ou um nó j que tenha recebido a custódia de m de outro nó), uma ou mais mensagens de controle referentes às Formigas de Avanço (FA^k) são enviadas juntamente com a mensagem de dados m via um ou mais nós vizinhos j para um destino d .

O caminho para d é construído por cada FA com base nos conhecimentos adquiridos por esta e por outras FAs da colônia. Esses conhecimentos juntamente com outros componentes do protocolo ditarão a decisão de roteamento em cada nó e tentarão inferir os bons encaminhadores para cada destino d conforme detalhado ao longo deste capítulo. A Figura 14 ilustra o funcionamento geral do espaço populacional do protocolo, no modo sob-demanda, considerando a ótica das formigas, tanto em seu processo de avanço iden-

tificado pelas Formigas de Avanço (FAs), quanto no processo de retorno definido pelas Formigas de Retorno (FRs).

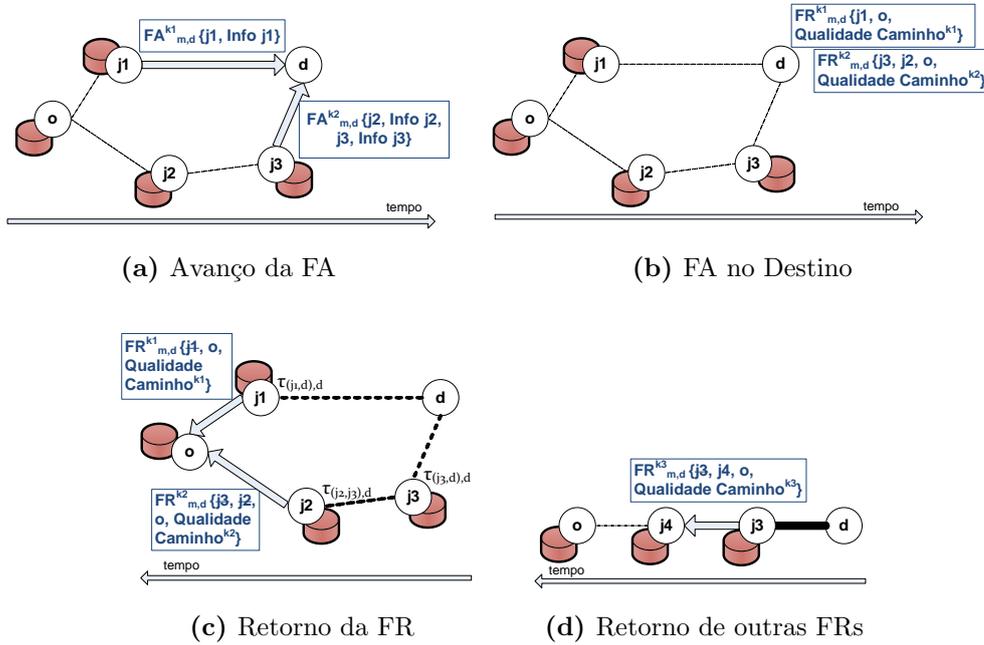


Figura 14: Funcionamento Geral do Protocolo Cultural GrAnt: Avanço e Retorno das Formigas.

Enquanto está sendo enviada, cada FA k coletará informações ($Info$) sobre cada nó j que compõe o caminho para d (Figura 14(a)). Parte dessas informações será utilizada pelas métricas do protocolo na atualização dos conhecimentos distribuídos em cada nó da rede. A outra parte da informação será transportada pela FA até que esta alcance o destino da mensagem m . Uma vez alcançado o destino d , a qualidade do caminho percorrido pela FA será calculada com base nestas informações obtidas. Então, uma FR será criada com as informações obtidas pela FA correspondente (Figura 14(b)), a FA será excluída e a FR será enviada pelo caminho reverso indicado pela FA correspondente. No seu caminho até o alvo final do retorno (ou seja, a origem da FA), a FR atualizará o operador concentração de feromônio (τ) do ACO, de acordo com a qualidade do caminho construído pela FA correspondente, em cada enlace entre os nós que compõem o caminho reverso (Figura 14(c)). A cada nó visitado, sua identificação é removida da memória da FR. Posteriormente, se mensagens subsequentes forem encaminhadas para o mesmo destino d , os operadores do ACO (concentração de feromônio e função heurística), juntamente com os conhecimentos do AC, influenciarão no processo de busca, guiando o comportamento da nova geração de indivíduos (FAs) podendo, portanto, gerar soluções de modo mais rápido e eficiente. Dependendo da influência dos conhecimentos, diferentes caminhos entre o e d podem ser construídos e feromônios já depositados poderão ser reforçados conforme

ocorrido no enlace ($j3 - d$) ilustrado na Figura 14(d). Detalhes sobre o funcionamento do Cultural GrAnt são apresentados no decorrer do presente capítulo.

5.2 MÉTRICAS DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT

O protocolo Cultural GrAnt deve ser capaz de descobrir e explorar as propriedades dinâmicas das DTNs e caracterizar a utilidade de cada nó como encaminhador de mensagens considerando as métricas propostas nesta tese.

Conforme discutido anteriormente, as métricas utilizadas pelo Cultural GrAnt são classificadas segundo sua origem (métricas básicas e compostas) sendo as primeiras subdivididas segundo seu escopo (métricas básicas locais e globais), da seguinte forma:

- **Métricas Básicas**

- Locais

- * *FEnc*: Frequência de Encontro entre um par de nós;
- * *DEnc*: Duração de Encontro entre um par de nós;
- * *QInd*: Qualidade Individual de um nó;
- * *GPar*: Grau de Parentesco de um nó perante uma mensagem;
- * *GEst*: Grau de Estagnação ou Imobilidade de um nó.

- Globais

- * *NSaltos*: Número de Saltos em um caminho completo;
- * *UInterm*: Utilidade de Intermediação de um nó em um caminho completo.

- **Métricas Compostas**

- Qualidade do Caminho: função de *QInd* e *NSaltos*;
- Proximidade Social: função de *FEnc* e *DEnc*;
- Utilidade do Nó: função de *GPar*, da Qualidade do caminho e da Proximidade Social;
- Grau de Estagnação da rede de relacionamentos de um nó (*GEst_{rede}*): função de *GEst*;
- Utilidade de Intermediação da rede de relacionamentos de um nó (*UInterm_{rede}*): função de *UInterm*.

Desta forma, as métricas compostas podem ser obtidas a partir tanto de métricas básicas globais como o número de saltos do caminho estabelecido até um destino ($NSaltos$) ou a utilidade de intermediação de um nó em um caminho completo ($UInterm$), como de métricas básicas locais, associadas a cada nó, como por exemplo: a qualidade individual ($QInd$) deste nó, a frequência ($FEnc$) e duração ($DEnc$) do encontro deste nó com cada outro nó em sua rede de relacionamentos, seu grau de parentesco ($GPar$) com cada mensagem armazenada em seu *buffer* e seu grau de estagnação ($GEst$) no ambiente de operação em que reside.

Uma visão geral das métricas compostas a partir de cada métrica básica associada é descrita a seguir. Detalhes são fornecidos ao longo deste capítulo, em especial na Seção 5.3 que detalha os componentes do Cultural GrAnt. Além das métricas básicas e compostas, o protocolo Cultural GrAnt faz uso de dois indicadores: *melhor_encam* que armazena o melhor encaminhador corrente para uma dada mensagem m e *status_busca* que auxilia na decisão de quando é necessário explorar (através da seleção de novas soluções) ou intensificar (através da seleção de boas soluções previamente encontradas) o espaço de busca. A descrição destes indicadores é fornecida na Seção 5.4.

5.2.1 QUALIDADE DO CAMINHO

A qualidade de cada caminho gerado para um par origem (o) e destino (d) é função da qualidade individual de cada nó que compõe o caminho e do números de saltos, conforme:

$$\text{Qualidade}_{cam_{o,d}^k} = \frac{\sum_{j \in cam_{o,d}^k} QInd_j}{NSaltos_{cam_{o,d}^k}} + \frac{1}{NSaltos_{cam_{o,d}^k}}, \quad (5.1)$$

onde $NSaltos_{cam_{o,d}^k}$ é o número de saltos do caminho (cam) sendo construído pela formiga k entre o nó origem o e o nó destino d da mensagem sendo considerada e $QInd_j$ é uma medida da qualidade individual de cada nó j intermediário pertencente a este caminho.

A métrica básica do número de saltos é considerada pelo protocolo Cultural GrAnt, pois quanto menor for o número de saltos em um determinado caminho, menos recursos da rede (largura de banda, energia e espaço de armazenamento dos nós) serão consumidos e menos interferência de comunicação ocorrerá.

A métrica básica $QInd_j$ pode ser especificada por diferentes medidas conforme a necessidade do usuário. Nesta tese, a qualidade individual de um nó j no que compõe um caminho $cam_{o,d}$ é baseada na previsão da sua popularidade ou centralidade de grau, ou

seja, $\widehat{QInd}_j(t+1) = \widehat{CGrau}_j(t+1)$ ¹. Assume-se, então, que nós com valores bons de centralidade de grau acumulados no passado podem ser bons encaminhadores de mensagens no futuro. Vale lembrar que para o cálculo da centralidade de grau, cada nó i armazena o número total de contatos estabelecidos durante um intervalo de tempo dividido pelo número total de nós ($N - 1$) na rede.

Um método de previsão é utilizado pelo protocolo Cultural GrAnt para estimar o valor de centralidade de grau futuro de um nó. Esse método possui horizonte de previsão igual a um e utiliza uma janela de previsão simples, formada apenas por dois eventos ponderados por pesos, sendo maior o peso do evento mais recente, de acordo com:

$$\widehat{QInd}_i(t+1) = \widehat{CGrau}_i(t+1) = \alpha \times CGrau_i(t-1) + (1 - \alpha) \times CGrau_i(t), \quad (5.2)$$

onde apenas dois eventos são necessários para gerar uma previsão da centralidade de grau de um nó i no tempo $t + 1$ ($\widehat{CGrau}_i(t+1)$): a centralidade de grau de um nó i no tempo $t - 1$ ($CGrau_i(t-1)$); e a centralidade de grau de um nó i no tempo t ($CGrau_i(t)$). O coeficiente α representa o fator de suavização entre 0 e 1.

Assim, quanto maior o valor previsto de popularidade de um nó (ou seja, o nó tem uma previsão de centralidade de grau alta), mais oportunidade ele terá de escolher no futuro o(s) melhor(es) encaminhador(es) de mensagens entre um conjunto de candidatos.

5.2.2 PROXIMIDADE SOCIAL

Uma informação importante a ser inferida a partir da conectividade entre nós DTNs é a proximidade social de cada nó com cada outro nó da rede. Segundo Tan et al. (2008), a probabilidade de entrega bem sucedida de mensagens em redes oportunistas como as DTNs pode ser altamente influenciada pela frequência e duração dos encontros entre dois nós. Quanto menor o intervalo de tempo entre os encontros de dois nós (i e j) em uma janela de tempo T , maior será a frequência de encontros entre eles e maior a probabilidade de i obter êxito na entrega de mensagens para o nó j e vice-versa. Quanto maior a duração do encontro entre os nós mais tempo estes nós terão para trocarem suas mensagens.

¹Na presente tese, o símbolo circunflexo ($\widehat{\quad}$) associado a uma métrica representa o valor previsto para a métrica em questão e o incremento de 1 no tempo ($t + 1$) indica um próximo evento no tempo discreto.

A previsão da proximidade social de um nó i com cada nó j é especificada nesta tese com base na frequência e previsão de duração de contato entre i e j , conforme:

$$\widehat{Prox_Social}_{i,j}(t+1) = FEnc_{i,j}(T) \times \widehat{DEnc}_{i,j}(t+1), \quad (5.3)$$

onde a frequência dos encontros $FEnc_{i,j}(T)$ entre i e j durante a janela de tempo T é dada pelo número de vezes que os nós i e j se encontraram durante o período T . A duração prevista para o encontro ($\widehat{DEnc}_{i,j}(t+1)$) é estimada através de:

$$\widehat{DEnc}_{i,j}(t+1) = \beta \times DEnc_{i,j}(t-1) + (1-\beta) \times DEnc_{i,j}(t), \quad (5.4)$$

onde $DEnc_{i,j}(t-1)$ é a duração do encontro entre i e j no tempo $t-1$, $DEnc_{i,j}(t)$ é a duração desse encontro no tempo t e o coeficiente β é um fator de suavização entre 0 e 1. Embora uma janela maior possa ser considerada, aqui apenas dois eventos de duração são considerados sendo que um peso maior é fornecido ao evento mais recente ($DEnc_{i,j}(t)$, medido no encontro que acabou de ser realizado no instante t). Desta forma, há por parte deste método de previsão uma manipulação mínima de eventos, e este conhecimento traz uma visão mais atualizada da duração de encontro entre os nós.

Pode-se, então, construir uma lista de encontros de cada nó i , atualizando a cada encontro com j a proximidade social entre i e j que está associada à probabilidade de i encontrar j no futuro. Embora, a previsão da proximidade social esteja especificada aqui com base em sua frequência e previsão de duração, outras medidas podem ser utilizadas de acordo com a necessidade da aplicação sendo considerada.

5.2.3 UTILIDADE DO NÓ

A utilidade de um nó x como encaminhador de uma mensagem m é calculada de forma diferente dependendo da métrica básica de grau de parentesco ($GPar_m^i$) de cada nó i perante cada mensagem m armazenada em seu *buffer*. Se o nó i é a origem da mensagem m ($Orig_m$), o seu grau de parentesco com m é $GPar_m^i = Orig_m$. Por outro lado, se i recebeu a custódia de m de outro nó na rede, isto é, i é um nó intermediário de m (Int_m), seu grau de parentesco com m é $GPar_m^i = Int_m$. No primeiro caso, a utilidade de x (onde x pode ser o próprio nó i ou um contato j) é calculada a partir de uma informação local e no segunda caso, a utilidade é calculada considerando tanto informação local quanto global.

5.2.4 GRAU DE ESTAGNAÇÃO DA REDE

O grau de estagnação da rede de relacionamentos de um nó i ($GEst_{rede}^i$) é calculado com base em uma lista de graus de estagnação $Lista_{Estag}^i(t)$, conforme:

$$GEst_{rede}^i(t) = \frac{\sum_{j \in Lista_{Estag}^i(t)} GEst_j(t)}{|Lista_{Estag}^i(t)|} \text{ se } GEst_j(t) \text{ é determinado e não nulo.} \quad (5.5)$$

O nó i atualiza a lista de estagnação de sua rede de relacionamentos da seguinte forma: ao encontrar um nó vizinho j no instante t , o nó i obtém o grau de estagnação do nó j ($GEst_j(t)$) e o insere (se $GEst_j(t)$ for determinado e não nulo) juntamente com a identificação do nó j em uma Lista de Graus de Estagnação ($Lista_{Estag}^i(t) = \{(GEst_{j=2}(t), 2), \dots, (GEst_{j=5}(t), 5), \dots\}$). Ao encontrar o nó j novamente, o grau de estagnação desse nó j será atualizado na mesma posição da lista de modo a refletir a dinâmica de estagnação da rede de relacionamentos de i . Ao encontrar um nó não pertencente à lista (um nó j que não teve nenhum contato anterior com i), este e seu grau de estagnação são acrescentados à lista de forma a ampliar a estimativa de avaliação da estagnação da rede perante o nó i .

A métrica básica grau de estagnação de um nó ($GEst$) pode ser especificada por diferentes medidas conforme a necessidade do usuário. Nesta tese, o grau de estagnação de um nó i ($GEst_i(t)$) é dado por:

$$GEst_i(t) = \left(\frac{TMP_i}{VM_i} \right), \quad (5.6)$$

onde VM_i é a velocidade média adotada pelo nó i nos seus percursos realizados no seu dia a dia e TMP_i é o tempo médio de pausa em segundos que o nó i tem nos pontos de parada encontrados. Os valores de VM_i e TMP_i são obtidos considerando o intervalo de tempo entre o início da simulação até o instante onde $GEst$ é calculado. Vale salientar que a atualização de $GEst_i(t)$ somente ocorre quando um novo percurso (movimentação de um ponto a outro com pausa no seu destino) é finalizado pelo nó.

5.2.5 UTILIDADE DE INTERMEDIACÃO DA REDE

Conforme descrito na Seção 2.2.2.1, a medida de centralidade de intermediação tradicional avalia a frequência com que um nó aparece nos caminhos mais curtos ligando quaisquer outros dois nós não adjacentes. Desta forma, um nó com uma centralidade de intermediação alta é um bom candidato para intermediar a comunicação entre quaisquer dois nós (FREEMAN, 1977) (FREEMAN, 1979).

Entretanto, como na presente tese o objetivo é manter diferentes caminhos para cada destino, a centralidade de intermediação dos nós, chamada aqui de utilidade de intermediação ($UInterm$), é calculada de uma maneira diferente. Em particular, para ter uma utilidade de intermediação alta em relação a um destino d , um nó x deve aparecer com muita frequência nos caminhos entre qualquer nó de origem e o destino d . Desta forma, diferente de trabalhos relacionados como o do protocolo SimBet descrito na Seção 2.2.2.1 (DALY; HAAHR, 2007), para se obter a utilidade de intermediação de um nó, a verificação de caminhos mais curtos não se faz necessária e não ocorre uma troca entre os nós de suas listas completas contendo todos os seus contatos encontrados anteriormente.

A utilidade de intermediação de cada nó x para um destino d ($UInterm_{x,d}$) é medida com base no número de vezes que este nó aparece nos caminhos completos para o destino d . Essa medida é usada na inicialização/atualização da utilidade de intermediação da rede de relacionamentos de um nó i para cada destino d ($UInterm_{rede,d}^i(t)$). $UInterm_{rede,d}^i(t)$ é inicializada/atualizada a cada evento gerado no instante t que representa uma informação proveniente de um nó x sobre uma solução global para um destino d (ou seja, o nó i toma conhecimento, a partir de uma FR, de que um caminho até o destino em questão foi completado), conforme:

$$\begin{cases} UInterm_{rede,d}^i(t+1) = \frac{1}{2} \left(UInterm_{rede,d}^i(t) + UInterm_{i,d} \right) \\ UInterm_{rede,d}^i(t+2) = \frac{1}{2} \left(UInterm_{rede,d}^i(t+1) + UInterm_{j,d} \right) \end{cases} \quad \text{se } j \neq d \quad (5.7)$$

onde $UInterm_{rede,d}^i(t=0) = UInterm_{x,d}$. Assim, a utilidade de intermediação da rede na visão do nó i ($UInterm_{rede,d}^i$) é inicializada com a informação $UInterm_{x,d}$, onde x pode assumir dois valores possíveis: (a) $x = i$, se i recebeu do próprio nó d a informação de que o caminho para ele foi completado; (b) $x = j$, sendo j o nó a partir do qual i recebeu a informação de que o caminho para o destino d foi completado. Nas situações onde a utilidade de intermediação média da rede de relacionamentos de i já tenha sido inicializada, esta será atualizada sempre com o valor de $UInterm_{i,d}$ e caso o nó j não seja o destino d , o valor corrente de $UInterm_{j,d}$ também será utilizado na atualização de $UInterm_{rede,d}^i$.

5.3 COMPONENTES DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT

A Figura 15 mostra como as métricas (básicas e compostas) são mapeadas nos componentes do espaço populacional (ACO) e do espaço de crenças (AC) que compõem o protocolo Cultural GrAnt. Esse mapeamento é descrito em detalhes nas próximas seções.

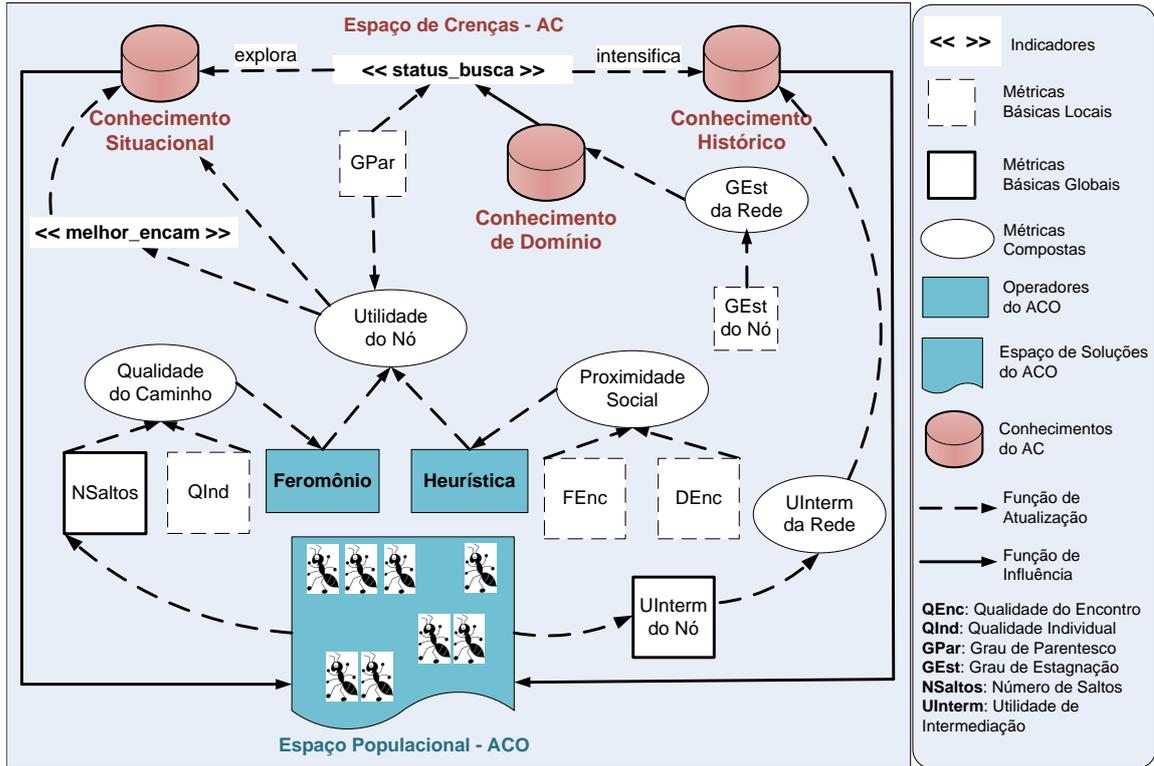


Figura 15: Mapeamento das Métricas no Espaço Populacional e no Espaço de Crenças.

5.3.1 ESPAÇO POPULACIONAL

O espaço populacional do Cultural GrAnt é formado por formigas procurando por conjuntos de caminhos completos, sendo um conjunto para cada par (origem-destino) associado com a mensagem m . Cada conjunto de C_m caminhos completos é gerado sob demanda a partir da necessidade de envio de uma mensagem m originada em o_m com destino d_m . Um caminho completo é, então, representado por: $cam_{o,d}^k = \{o_m, j_1^k, \dots, j_c^k, \dots, d_m\}$, $k = 1, \dots, K_m$, onde K_m define o número de formigas geradas que estão associadas à mensagem m , $m = 1, \dots, M$, sendo M o total de mensagens que precisam ser encaminhadas durante todo o processo de busca por caminhos. Assim, cada caminho completo é representado por uma sequência de encaminhamentos de uma mensagem m , sendo a sequência completa obtida a partir da descoberta de uma formiga k que alcançou o destino d_m . Como nem todas as formigas criadas são capazes de encontrar o destino desejado, em geral, tem-se $C_m < K_m$. Vale salientar que, no protocolo proposto, K_m é definido de forma dinâmica. Isto porque, dado o envio de uma cópia da custódia de cada mensagem, característica do protocolo Cultural GrAnt quando aplicado ao ambiente das DTNs, a cada encontro onde o envio ocorre, uma nova formiga é lançada e assim um novo caminho começa a ser gerado (com percurso anterior idêntico - isto é, da origem até o ponto onde houve o

envio da custódia). A partir deste ponto, a nova formiga tem liberdade para encontrar o destino podendo fornecer, no espaço de soluções, um caminho diferente a partir de seu ponto de geração. Deste modo, como detalhado na sequência, a dinâmica de geração de formigas é auto-adaptativa, assim como o total de caminhos completos gerados e ambos dependentes da própria dinâmica da rede.

Apesar da explicação anterior estar embasada na definição de caminhos completos, do ponto de vista de cada nó i da rede, a informação fornecida pelo espaço populacional do Cultural GrAnt é apenas parcial. Ou seja, é formada por vários conjuntos de pares $\langle \text{próximo_salto}, \text{feromônio} \rangle$, sendo um conjunto para cada nó destino d associado a uma ou mais mensagens m . O *próximo_salto* representa um nó da rede que permite a intermediação de uma comunicação entre i e d e o *feromônio* representa a concentração de feromônio no enlace ligando i ao *próximo_salto* em um caminho de uma mensagem qualquer destinada a d .

Além da definição do espaço populacional, a partir da Figura 15 é possível verificar que as métricas compostas proximidade social ($Prox_Social_{x,d}$) de cada nó x em relação ao destino d e qualidade do caminho ($Qualidade_{cam_{o,d}^k}$) estão associadas ao operador local da função heurística (η) e ao operador global da concentração de feromônio (τ) do ACO, respectivamente, conforme:

$$\eta_{(x),d}(t) = Prox_Social_{x,d}, \quad (5.8)$$

$$\tau_{(i,y),d}^k(t) = Qualidade_{cam_{o,d}^k}, \quad (5.9)$$

onde $\eta_{(x),d}(t)$ representa a função heurística do nó x em relação ao destino d de m e $\tau_{(i,y),d}(t)$ representa a concentração de feromônio existente no enlace entre o nó i e o nó y no tempo t indicando que um ou mais caminhos em direção ao destino d utilizaram esse enlace. A variável y pode representar um nó vizinho j de i ($\tau_{(i,j),d}(t)$) ou o nó d ($\tau_{(i,d),d}(t)$). Essa última concentração representada pelo índice (i,d) indica que uma ou mais comunicações diretas ocorreram ao longo do tempo entre os nós i e d .

Além disso, define-se que esses dois operadores - função heurística e concentração de feromônio - são utilizados (em conjunto ou não) na definição da métrica composta Utilidade de um nó. Assim, a utilidade de um nó x em relação a um nó referência i que mantém a custódia da mensagem m é definida conforme:

$$U_x(t) = \begin{cases} \eta_{(x),d}(t) & \text{se } GPar_m^i = Orig_m \\ \eta_{(x),d}(t) + \tau_{(i,y),d}(t) & \text{se } GPar_m^i = Int_m \end{cases} \quad (5.10)$$

onde x pode ser o próprio nó i ou seu vizinho j considerado como uma possível solução candidata a receber uma cópia de m ; $Orig_m$ e Int_m indicam se o nó i é origem ou intermediário da mensagem m , respectivamente.

As métricas de qualidade do caminho e utilidade de intermediação vão sendo atualizadas nas fases de avanço e retorno das formigas, respectivamente, enquanto que as demais métricas (proximidade social, utilidade do nó e grau de estagnação) são atualizadas a cada encontro entre os nós i e j .

5.3.2 ESPAÇO DE CRENÇAS

Conforme mostra a Figura 15, cada espaço de crenças distribuído ao longo da rede é formado por três tipos de conhecimentos: domínio, situacional e histórico.

Com base na discussão do capítulo de fundamentação teórica, o conhecimento de Domínio foi introduzido nos Algoritmos Culturais (AC) para suportar a análise das dinâmicas locais dos componentes do sistema. Na presente tese, o conhecimento de Domínio é utilizado para auxiliar o protocolo Cultural GrAnt a manter-se atualizado sobre a dinâmica local do grau de estagnação de um nó perante a sua rede de relacionamentos. Com base nesta informação e em uma heurística específica do domínio de aplicação o conhecimento de domínio é capaz de alterar o status da busca pelos caminhos podendo torná-la mais exploratória ou intensificadora.

O conhecimento Situacional foi introduzido no AC para guardar uma memória da(s) melhor(es) solução(ões) e através desta(s) influenciar o processo de busca. No caso da aplicação em DTNs (onde a informação é distribuída, não havendo mecanismos para centralizar e compartilhar as melhores soluções completas), a memória do conhecimento situacional deve ser local e representada pelo melhor encaminhador de cada mensagem obtido até o momento.

Já o conhecimento Histórico foi introduzido no AC como uma forma de adaptação a mudanças ocorridas em um ambiente sendo capaz de refletir dinâmicas globais. Como o próprio nome sugere, esse conhecimento armazena um histórico sobre os eventos ocorridos no passado (neste caso, a informação de que um caminho completo até um destino foi encontrado).

A seguir, cada um desses conhecimentos é detalhado, assim como suas relações com as métricas e com o espaço populacional do protocolo.

5.3.2.1 Conhecimento de Domínio

Partindo da premissa de que as DTNs oportunistas confiam nas características da mobilidade humana para determinar oportunidades de comunicação para a entrega de mensagens (CHAINTEAU et al., 2007) (ZYBA et al., 2011) (GROSSGLAUSER; TSE, 2002), a presente tese propõe analisar a dinâmica local do grau de estagnação de cada nó perante a dinâmica de estagnação da sua rede de relacionamentos para a atuação do conhecimento de domínio do protocolo Cultural GrAnt. Vale lembrar que o grau de estagnação é calculado neste trabalho como sendo diretamente proporcional ao tempo de pausa do nó em cada ponto de parada e inversamente proporcional à velocidade média do nó em seus percursos diários.

O conhecimento de domínio proposto é baseado em uma heurística específica das DTNs e considera que quanto menos estagnado estiver um nó, maior será sua chance de visitar localizações diferentes, encontrar nós distintos e, como consequência, intermediar comunicações entre nós desconectados. Por outro lado, quanto mais estagnado, mais este nó dependerá de seus contatos para que as mensagens armazenadas em seu *buffer* possam chegar aos respectivos destinos.

A comparação do grau de estagnação de cada nó i ($GEst_i$) em relação ao grau de estagnação médio da sua rede de relacionamentos ($GEst_{rede}^i$) permite a caracterização de três tipos de nós na rede:

1. Dom^i = estagnação alta: um nó i é caracterizado como um nó com grau de estagnação alto se o seguinte critério for satisfeito:

$$GEst_i > (GEst_{rede}^i + Ls), \text{ se } GEst_{rede}^i \text{ é determinado e não nulo,} \quad (5.11)$$

onde $GEst_{rede}^i$ e $GEst_i$ estão definidos nas Equações 5.5 e 5.6, respectivamente; Ls é um valor acrescentado ao grau de estagnação médio da rede de modo a detectar os nós que estão com grau de estagnação alto;

2. Dom^i = estagnação baixa: um nó i é caracterizado como um nó com grau de estagnação baixo se o seguinte critério for satisfeito:

$$GEst_i < (GEst_{rede}^i - Li), \text{ se } GEst_{rede}^i \text{ é determinado e não nulo,} \quad (5.12)$$

onde Li é um valor subtraído do grau de estagnação médio da rede de modo a detectar os nós que estão com grau de estagnação baixo;

3. Dom^i = estagnação média: um nó i é caracterizado como um nó com grau de estagnação médio se os critérios definidos nas Equações 5.11 e 5.12 não forem satisfeitos.

O conhecimento de domínio é distribuído em cada nó i da rede Dom^i , $i = 1, \dots, N$ (onde N representa o número de nós disponíveis na rede) e a Figura 16 ilustra a representação geral deste conhecimento em um nó específico.

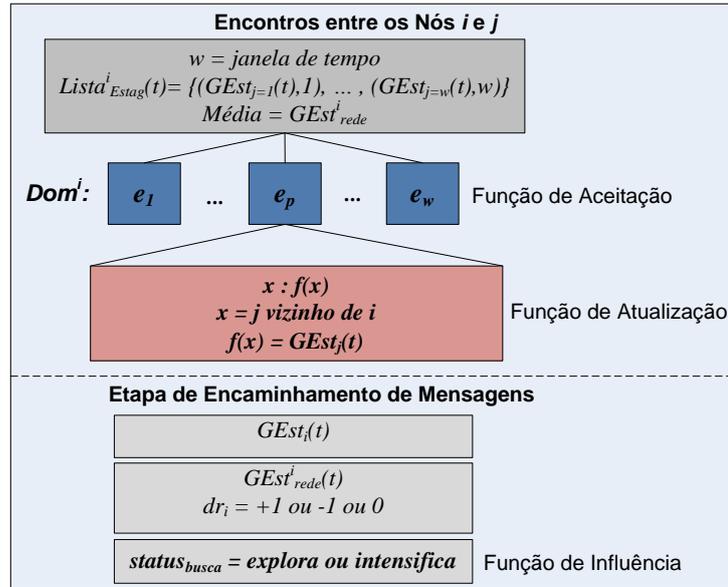


Figura 16: Conhecimento de Domínio do Cultural GrAnt.

De modo a refletir sobre as dinâmicas locais no grau de estagnação dos nós na vizinhança do nó i , a **função de aceitação** do conhecimento de domínio no espaço de crenças de cada nó i aceita a informação sobre a dinâmica local de um nó vizinho j no instante t caso o grau de estagnação deste nó seja determinado e não nulo.

Uma vez aceita uma nova solução, as seguintes ações são tomadas:

- **Função de Atualização:** as seguintes informações são atualizadas no conhecimento de domínio de um nó i ($Dom^i(t)$): w = janela de tempo contendo uma lista $(x, f(x))$ dos eventos locais que geram mudanças no ambiente do domínio do nó i , tais como o encontro do nó i com cada outro nó j onde cada evento e_p é representado por $e_p = (j, GEst_j(t))$, sendo $p = 1, \dots, w$. Vale salientar que a média das informações dos eventos é calculada sobre os valores de $f(x)$ armazenados na lista de eventos;
- **Função de Influência:** durante a etapa de encaminhamento de uma mensagem m em cada nó i , o conhecimento de domínio do protocolo Cultural GrAnt avalia a direção (dr_i) da atualização do grau de estagnação do nó i : $+1$ (grau de estagnação

de i é maior do que o grau de estagnação médio da sua rede de relacionamentos); -1 (grau de estagnação de i é menor do que o grau de estagnação médio da sua rede de relacionamentos); e 0 (grau de estagnação de i é igual ao grau de estagnação médio da sua rede de relacionamentos). Com base nessas direções, o conhecimento de domínio influencia o indicador *status_busca* do nó i que determina se o nó i deve ou não lançar uma nova formiga, e no primeiro caso, se esta formiga deve seguir por um caminho de exploração e/ou intensificação durante sua busca por novos caminhos.

A modelagem dos conhecimentos adotada nesta tese prevê semelhanças entre o conhecimento de domínio e o conhecimento histórico, pois através da janela de eventos é possível armazenar informações de médias como a informação da média de estagnação da rede de relacionamentos do nó i . Com base na caracterização do grau de estagnação de i em relação à sua rede de relacionamentos é possível decidir sobre o encaminhamento de mensagens conforme sua função de influência. Além disso, é importante destacar que o conhecimento de domínio tem um papel importante no funcionamento do protocolo, pois ele ajuda a definir se a busca pode ser influenciada pelo conhecimento situacional e/ou histórico em cada encaminhamento.

5.3.2.2 Conhecimento Histórico

Conforme ilustra a Figura 15, no protocolo Cultural GrAnt o conhecimento histórico auxilia cada nó i a manter-se atualizado sobre os eventos assíncronos que caracterizam uma mudança na dinâmica de formação de caminhos completos. Tais eventos representam as mudanças que vão ocorrendo na rede, capturando a dinâmica desta, em relação às melhores soluções para cada destino d . Para isto, o conhecimento se baseia na métrica de utilidade de intermediação de um nó para um destino, que é medida com base no número de vezes que este nó aparece nos caminhos completos para o destino considerado.

O conhecimento histórico distribuído em cada nó i da rede $Hist^i$, $i = 1, \dots, N$ está dividido em D_i nichos $Hist_d^i$, $d = 1, \dots, D_i$ cada um associado a um destino d da rede:

$$Hist^i(t) = Hist_1^i(t), Hist_2^i(t), \dots, Hist_{D_i}^i(t),$$

onde D_i representa o número de nós de destino para o qual i originou ou intermediou um caminho, sendo que D_i deve ser $\leq N$, onde N representa o número total de nós da rede. A Figura 17 ilustra a representação do conhecimento histórico para um nó e nicho específicos.

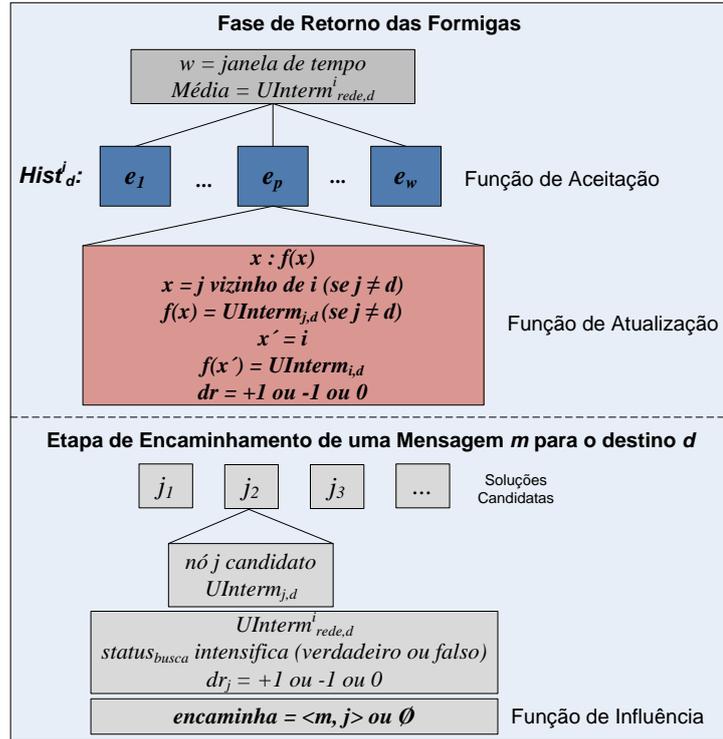


Figura 17: Conhecimento Histórico do Cultural GrAnt.

De modo a refletir sobre as dinâmicas globais do ambiente, a **função de aceitação** em cada nicho d do conhecimento histórico de um nó i (Hist_d^i) considera que o recebimento de uma formiga de retorno (FR) proveniente de um nó j , provoca a aceitação de j para inicializar/atualizar o espaço de crenças de i desde que este nó j não seja o destino d . Isto porque este evento de recebimento da FR deve indicar que o nó j já participou ao menos uma vez de um caminho para o destino d . Da mesma forma, o nó i pode receber uma FR do próprio destino d . Em ambos os casos, o nó i sempre é aceito para inicializar/atualizar o seu espaço de crenças.

Uma vez aceita uma nova solução (j e/ou i), o protocolo proposto executará a **Função de Atualização** da seguinte forma: no nicho de cada nó i em relação a um destino d ($\text{Hist}_d^i(t)$) são armazenadas as seguintes informações: $w = \text{janela de tempo}$ contendo uma lista $(x, f(x))$ dos eventos globais que geram mudanças no ambiente do conhecimento histórico do nó i , tais como o retorno de uma FR indicando que um caminho completo para o destino d foi encontrado. Cada evento e_p é representado por $e_p = (j, U\text{Interm}_{j,d})$, sendo $p = 1, \dots, w$. Assim como no caso do conhecimento de domínio descrito anteriormente, através da janela de eventos é possível armazenar informações de médias como a informação da média de utilidade de intermediação da rede de relacionamentos do nó i . Em situações onde há necessidade de economizar espaço de armaze-

namento, estas listas de eventos podem ser eliminadas e apenas a informação da média e da última direção de mudança vão sendo atualizadas. Este é o caso da implementação adotada para o conhecimento histórico do Cultural GrAnt que considera apenas a média = $UInterm_{rede,d}^i$ onde $UInterm_{rede,d}^i$ é dada pela Equação 5.7.

Durante a etapa de encaminhamento de uma mensagem m em cada nó i , o conhecimento histórico do protocolo Cultural GrAnt executa sua **Função de Influência**: o conhecimento avalia a direção (dr_j) da atualização de cada nó vizinho j candidato a encaminhador da mensagem m com base no valor corrente de $UInterm_{j,d}$ e $UInterm_{rede,d}^i$: +1 (utilidade de intermediação do candidato j ($UInterm_{j,d}$) é maior do que a utilidade de intermediação média da rede de relacionamentos de i ($Hist_d^i$)); -1 (utilidade de intermediação do candidato j é menor do que a a utilidade de intermediação média da rede de relacionamentos de i ($Hist_d^i$)); ou 0 (utilidade de intermediação do candidato j é igual a utilidade de intermediação média da rede de relacionamentos de i ($Hist_d^i$)). Com base nessas direções e ainda no indicador *status_busca*, o conhecimento histórico influencia os possíveis novos encaminhamentos das custódias de cada mensagem m , enviando uma formiga para um caminho já traçado e realçando o aspecto intensificador da busca.

5.3.2.3 Conhecimento Situacional

De acordo com a Figura 15, a métrica de utilidade do nó tem papel central no desempenho do sistema. Vale lembrar que esta pode ser calculada a partir da informação de proximidade social, associada ao operador local da função heurística do ACO, e da medida de qualidade do caminho, associada ao operador global da concentração de feromônio também do ACO. Entretanto, de acordo com a Eq. 5.10, a combinação ou não destes dois operadores do ACO na métrica de utilidade é baseada no grau de parentesco de um nó perante cada mensagem m armazenada no seu *buffer*.

A motivação por diferenciar a utilidade de cada nó x segundo o grau de parentesco do nó referência i em relação a uma mensagem m é que os nós que originam uma mensagem m provavelmente não possuem concentração de feromônio $\tau_{(i,d),d}(t)$ no enlace direto com d (a menos que o nó i tenha intermediado uma comunicação de uma outra mensagem m proveniente de outra origem em direção a d). Partindo-se dessa observação, a métrica $\tau_{(i,y),d}(t)$ (onde $y = j$ ou $y = d$) não é utilizada para comparar a utilidade dos nós i e j na etapa de decisão de encaminhamento de m se o nó i for a origem de m . Desta forma, se o nó i for origem de m ele usará somente a informação local (norteadada pela função heurística) na decisão de encaminhamento e se ele for um nó intermediário usará as informações local e global (função heurística e feromônio) sempre que esta última estiver disponível.

Considerando o problema de roteamento do protocolo Cultural GrAnt (descrito na Seção 4.1), o conhecimento situacional é distribuído em cada nó i da rede $Situac^i$, $i = 1, \dots, N$ (onde N representa o número de nós disponíveis na rede) e em cada nó i este conhecimento está dividido em M_i nichos $Situac_m^i$, $m = 1, \dots, M_i$ (um nicho para cada par (o, d) associado a uma mensagem m que esteja sob a custódia de i). Assim, o conhecimento situacional em cada nó i é representado por:

$$Situac^i(t) = Situac_1^i(t), Situac_2^i(t), \dots, Situac_{M_i}^i(t).$$

A utilidade do melhor encaminhador para a mensagem m encontrado até o momento é armazenada no componente de conhecimento situacional do espaço de crenças do Cultural GrAnt (mais especificamente no nicho associado a m no nó i) de forma a guiar a busca para os melhores encaminhadores possíveis. A Figura 18 ilustra a representação do conhecimento situacional em um nó e nicho específicos.

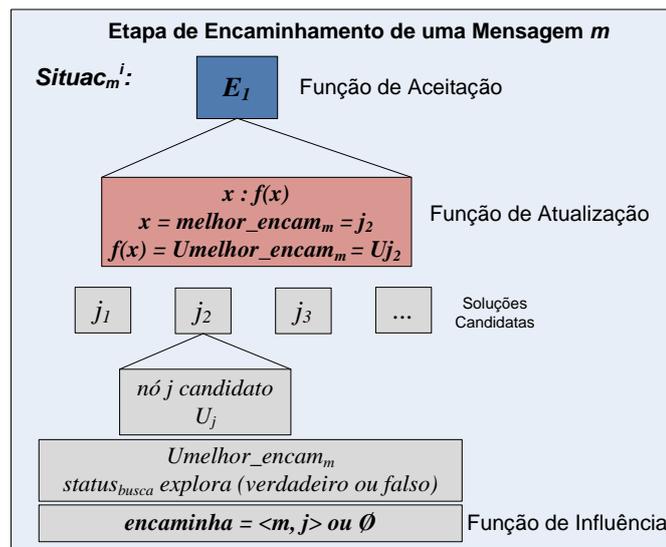


Figura 18: Conhecimento Situacional do Cultural GrAnt.

A **função de aceitação** em cada nicho do conhecimento situacional de um nó i considera que: se um novo nó j for encontrado, este será aceito para atualizar o espaço de crenças de i caso sua utilidade (U_j) seja maior do que a utilidade corrente armazenada no nicho $Situac_m^i(t)$ (ou seja, a utilidade do melhor encaminhador para a mensagem m encontrado até o momento pelo nó i). A condição de aceitação pode ser ampliada para aceitar nós com utilidade igual ao do melhor encaminhador dependendo do status da busca permitir esta ampliação. A Figura 18 é similar à representação adotada na Seção 3.1.4.3. Entretanto, aqui um único exemplar E_1 é aceito (isto é, $e=1$) em cada atualização.

Uma vez aceita uma nova solução, isto é, sempre que um novo nó j com melhor utilidade aparecer, as seguintes ações serão tomadas:

- **Função de Atualização:** atualiza as seguintes informações no nicho $Situac_m^i(t)$ do conhecimento situacional de um nó i : a nova solução encontrada substitui a solução anterior ($x = melhor_encam = j$); e a qualidade da solução também é atualizada com a utilidade do melhor encaminhador ($f(x) = U_{melhor_encam} = U_j$);
- **Função de Influência:** uma nova formiga é criada e encaminhada para o nó $melhor_encam$.

Conforme discutido anteriormente, considera-se que cada par origem (o_m) e destino (d_m) relativo à mensagem m tem associado a si C_m caminhos completos sendo que cada caminho $cam_{o,d}^k = \{o_m, j_1^k, \dots, j_c^k, \dots, d_m\}$, $k = 1, \dots, K_m$, é buscado de forma independente através de uma formiga k . A nova formiga criada pela influência do conhecimento situacional pode construir, a partir do nó $melhor_encam$, um novo caminho (com percurso anterior igual ao da formiga original) para tentar alcançar o destino d_m de forma totalmente independente (esquema de exploração, onde busca-se promover mais instâncias de soluções candidatas desejáveis). Assim, o conhecimento situacional é capaz de influenciar cada encaminhamento futuro no caminho sendo construído por cada formiga k para um determinado par (origem, destino).

O conhecimento situacional é uma contribuição importante do protocolo Cultural GrAnt, pois diferente dos algoritmos de ACO puro propostos na literatura para DTNs (ver Seção 3.2.4.2) é possível, através da definição de um novo melhor encaminhador, controlar de forma dinâmica o número de formigas criadas para buscar novos caminhos e, conseqüentemente, o número de réplicas de cada mensagem em circulação na rede.

5.3.2.4 Discussão sobre os Componentes do Protocolo Cultural GrAnt

Após a descrição de cada conhecimento utilizado, é possível concluir que o conhecimento de domínio busca informações armazenadas na métrica grau de estagnação para alterar, juntamente com a métrica básica de grau de parentesco e uma heurística específica do domínio de aplicação (DTNs), um outro indicador do espaço de crenças: o *status_busca* o qual influenciará os componentes de conhecimento situacional e histórico para um processo de busca de exploração e intensificação, respectivamente.

Já o conhecimento situacional é importante para guiar as soluções armazenadas no espaço populacional (soluções de encaminhamento) para os nós mais promissores através do indicador ($melhor_encam$). Para isso são consideradas informações locais (com base

na função heurística) e globais (com base na concentração de feromônio, se esta estiver disponível) que são fornecidas a partir da métrica de utilidade de um nó (ver Equação 5.10). Assim, a influência do situacional é feita através da análise da utilidade dos nós localizados na vizinhança de cada nó (considerando um possível melhor encaminhador dentre um conjunto de novos encaminhadores que vão surgindo) e a partir de cada novo melhor encaminhador novos caminhos podem ser explorados. Entretanto, como o próprio nome informa, esta exploração é gulosa (daí o termo *Greedy Ant*) no sentido de ir sempre na direção de melhora na utilidade do novo encaminhador.

O conhecimento histórico é usado para guiar a busca considerando-se a dinâmica de funcionamento dos caminhos completos já estabelecidos (aspecto global) uma vez que a utilidade de intermediação de um nó x para um destino d assume uma participação anterior desse nó x em algum encaminhamento para d .

Avalia-se que o conhecimento de domínio exerce um papel central no protocolo Cultural GrAnt, pois ele influencia nas ações dos outros conhecimentos (podendo dar características de exploração ou intensificando à busca que está sendo realizada). Os conhecimentos situacional e histórico também podem ser considerados bem importantes para o Cultural GrAnt tendo em vista que além de influenciarem diretamente no espaço de soluções, o primeiro possui ação mais direta na definição do número de formigas lançadas já que a decisão de encaminhar uma mensagem a um novo contato, com base apenas na utilidade deste, representa a geração de uma nova formiga (exploração) que poderá produzir um novo caminho até o destino procurado. Por outro lado, o conhecimento histórico permite utilizar informação a partir de um caminho já traçado por outras formigas promovendo uma intensificação na busca por privilegiar rotas já estabelecidas (ver Algoritmo 3 para mais detalhes).

No protocolo proposto, todas as funções de aceitação são dinâmicas. No situacional, aumenta-se a qualidade (utilidade) da solução (nó encaminhador) armazenada e, com isso, restringe-se o número de novas soluções aceitas com o tempo. No caso do histórico, o limiar de aceitação vai sendo alterado pela média armazenada na utilidade de intermediação da rede: quanto mais soluções são conhecidas, muda-se a qualidade média aceitável destas e com isso muda-se dinamicamente o critério de aceitação. Já no conhecimento de domínio a aceitação depende da dinâmica da rede já que cada novo contato é aceito para atualizar a lista de eventos que armazena o grau de estagnação deste nó encontrado. Assim, conclui-se que o protocolo Cultural GrAnt é norteado pela combinação de vários conhecimentos e suas inter-relações com as métricas estabelecidas de forma que estes conhecimentos possam influenciar o espaço populacional.

Uma vez caracterizadas e especificadas as métricas utilizadas pelo protocolo Cultural GrAnt assim como o mapeamento destas nos componentes do seu espaço populacional e de seu espaço de crenças, as próximas seções descrevem os três módulos do protocolo Cultural GrAnt responsáveis pela coleta e utilização das métricas e/ou conhecimentos descritos anteriormente de modo a tomar suas decisões: (1) Roteamento ou Encaminhamento de Mensagens: determina por qual(is) rota(s) uma mensagem deve seguir para eventualmente chegar ao seu destino (ver Seção 5.4); (2) Escalonamento de Mensagens: decide a ordem na qual as mensagens são transmitidas (ver Seção 5.5); (3) Gerenciamento de *Buffer*: indica qual(is) mensagem(ns) pode(m) ser descartada(s) do *buffer* quando este atingir seu limite de ocupação (ver Seção 5.6).

5.4 MÓDULO DE ROTEAMENTO

O módulo de roteamento do protocolo Cultural GrAnt se enquadra na categoria dos protocolos baseados em previsão (ver Seção 2.2.2) uma vez que ele avalia, através das métricas compostas descritas na Seção 5.2, os padrões sociais de comportamento dos nós e busca alcançar uma taxa boa de entrega de mensagens e um custo baixo em termos do número de réplicas de mensagens transmitidas.

O módulo de roteamento do Cultural GrAnt é composto por duas fases (Figura 19): (1) Fase de busca por caminhos entre cada par origem-destino de uma mensagem; e (2) Fase de retorno das formigas.

De um modo geral, durante essas duas fases ocorrerão: (a) a avaliação das soluções candidatas ao problema de roteamento; (b) a seleção e aceitação de algumas dessas soluções; (c) a atualização do espaço de crenças a partir das soluções aceitas e das métricas propostas; (d) a influência dos componentes de conhecimento do espaço de crenças.

5.4.1 FASE DE AVANÇO DAS FORMIGAS

A fase de avanço das formigas que caracteriza a busca por caminhos do Cultural GrAnt é iniciada sob demanda quando um caminho entre uma origem e um destino para uma determinada mensagem m for solicitado (ver parte superior esquerda da Figura 19). Como nem sempre o primeiro caminho encontrado até o destino é o melhor, ou podem ocorrer quebra de conexões, durante essa fase de busca, as soluções (caminhos) para o problema de roteamento continuam sendo localizadas em paralelo por um conjunto de Formigas de Avanço (FAs). Isto é, as FAs são criadas, contendo a mensagem de dados

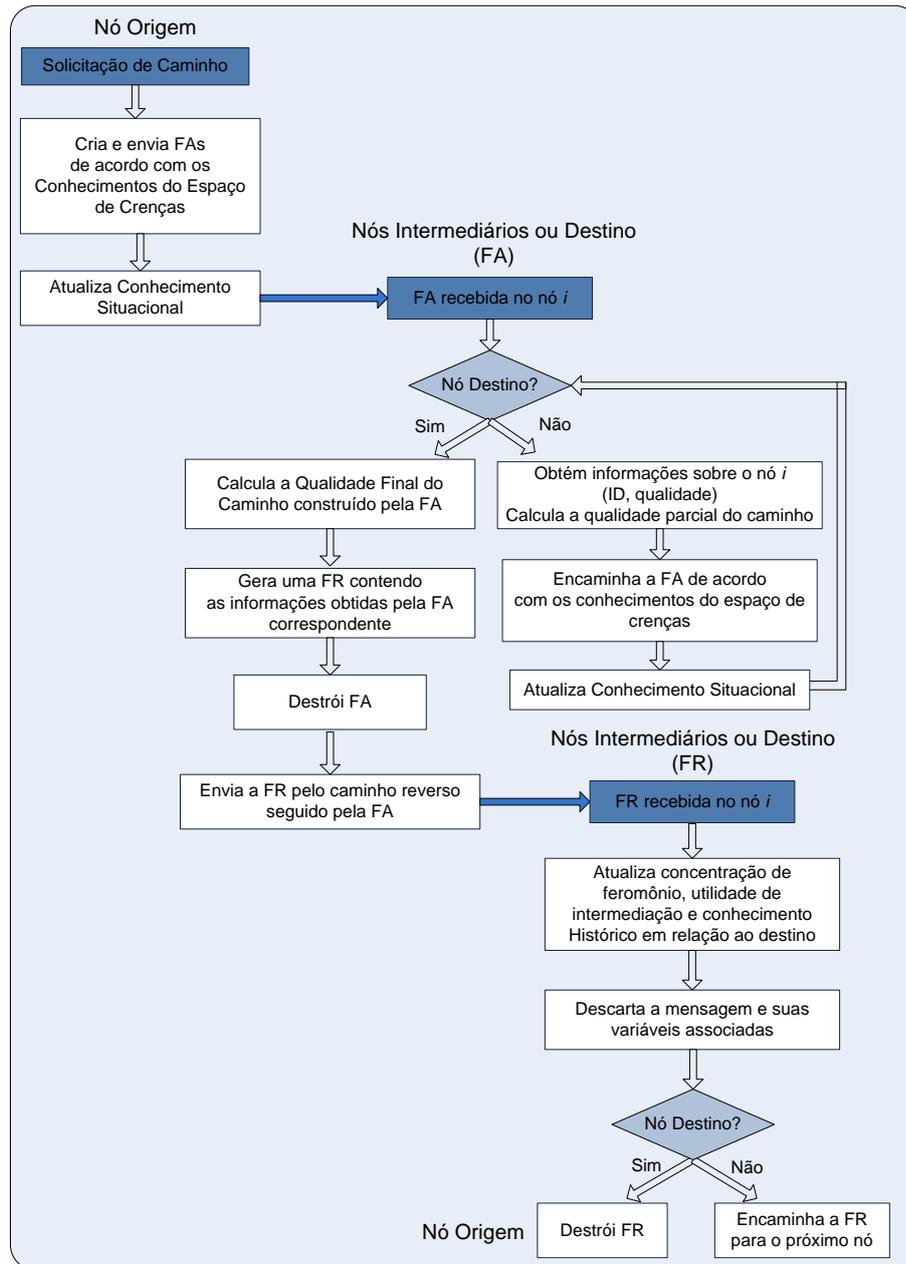


Figura 19: Fluxo de Execução de um Agente de Formiga no Cultural GrAnt.

m , e enviadas via nós intermediários na busca por novos caminhos até o destino desejado d . Essa busca por novos caminhos para cada destino d continua em cada nó i que possui a custódia da mensagem m até que uma das três condições seja satisfeita: (1) o nó i toma conhecimento da entrega bem sucedida de m ao seu destino d ; (2) a mensagem m é descartada por falta de espaço em *buffer*; (3) o tempo de vida (TTL), em minutos, da mensagem m expira.

Conforme detalhado nas próximas seções, durante a fase de busca por caminhos, duas etapas são executadas: (a) Encaminhamento de mensagens: determina para qual(is)

contato(s) cada mensagem deve ser encaminhada (dado o envio de cópias de custódias, réplicas da mensagem são geradas ao longo do encaminhamento); (b) Medida de Qualidade do Caminho: analisa a qualidade parcial de cada caminho que está sendo construído.

5.4.1.1 Avanço da Formiga: Etapa de Encaminhamento de Mensagens

A etapa de encaminhamento de mensagens do protocolo Cultural GrAnt determina por qual(is) rota(s) uma mensagem deve seguir para eventualmente alcançar o seu destino. A decisão de encaminhamento é realizada mediante a adoção de uma regra de transição gulosa do ACO (idem à sub-regra de intensificação do algoritmo ACS descrito na Seção 3.2.3.3) que tira vantagem de qualquer oportunidade boa de contato e provê uma decisão mais eficiente sobre cada próximo encaminhador. O Algoritmo 3 ilustra o funcionamento geral desta etapa de encaminhamento.

De uma forma geral, as fases de avanço e retorno da formiga interferem no processo de encaminhamento das mensagens da seguinte maneira. Na fase de avanço da formiga, quando uma mensagem m atinge um nó i , o melhor encaminhador para esta mensagem é inicializado com \emptyset no nicho correspondente do conhecimento situacional do espaço de crenças do nó i (linha 2 do Algoritmo 3). O processo transcorre com as formigas avançando e quando atingem os destinos, acontece a fase de retorno onde as métricas Utilidade de Intermediação (do nó e da rede), que são métricas associadas ao conhecimento Histórico, e a Qualidade do Caminho (métrica associada ao conhecimento Situacional) são atualizadas (ver mais detalhes na Seção 5.4.2).

Durante a etapa de encaminhamento, um nó i decide se encaminhará ou não uma mensagem m (isto é, ele irá gerar ou não uma formiga associada à mensagem m) para um novo contato j ($\forall j \in N_i$, onde N_i é o conjunto dos vizinhos atuais de i) de acordo com a influência dos conhecimentos armazenados no seu espaço de crenças. Esta decisão de encaminhamento pode ter caráter exploratório (não há necessidade do nó j ter participado previamente de um caminho para o destino d de m , podendo-se assim abrir uma nova frente de busca através da nova formiga gerada) ou intensificador (o nó j precisa ter participado anteriormente de um caminho para o destino d de m , podendo assim reforçar um caminho já existente com a tentativa do envio da nova formiga por este caminho).

Ao receber ou criar uma mensagem m , uma vez que o nó i ainda não tenha encaminhado m para nenhum de seus contatos (ou seja, $melhor_encam_m = \emptyset$), sua identificação e sua utilidade (U_i , calculada na linha 6) inicializarão o nicho do seu conhecimento situacional ($Situac_m^i$) para a mensagem m (ver linhas 8 e 9 do Algoritmo 3).

Algoritmo 3 Etapa de Encaminhamento de Mensagens do Protocolo Cultural GrAnt

```

1: para cada mensagem  $m$  no buffer de um nó  $i$  faça
2:    $melhor\_encam_m \leftarrow \emptyset$ ; {Nenhum melhor encaminhador para  $m$  foi definido}
3: fim para
4: {As métricas Utilidade de Intermediação do nó e da rede (Conhecimento Histórico -  $Hist^i$ ) e Qualidade
   do Caminho são atualizadas na Fase de Retorno das Formigas (ver Seção 5.4.2)}
5: para cada mensagem  $m$  no buffer de um nó  $i$  faça
6:    $U_i \leftarrow U_x$ ; {Cálculo da Utilidade (local ou global) do nó  $i$  com  $x = i$  na Equação 5.10}
7:   se ( $melhor\_encam_m = \emptyset$ ) então
8:      $melhor\_encam_m \leftarrow i$  {Inicializa o Situacional};
9:      $f(melhor\_encam_m) \leftarrow U_i$ ;
10:  fim se
11:   $status\_busca\_explora \leftarrow$  verdadeiro;
12:   $status\_busca\_intensifica \leftarrow$  verdadeiro;
13:  se ( $(GPar_m^i = Int_m)$  e ( $Dom^i =$  médio)) então
14:     $status\_busca\_explora \leftarrow$  falso;
15:  fim se
16:  se ( $(GPar_m^i = Int_m)$  e ( $Dom^i =$  baixo)) então
17:     $status\_busca\_explora \leftarrow$  falso;
18:     $status\_busca\_intensifica \leftarrow$  falso;
19:  fim se
20:  para todo contato  $j$  faça
21:     $U_j \leftarrow U_x$  {Cálculo da Utilidade (local ou global) do nó  $j$  com  $x = j$  Equação 5.10}
22:    se ( $(status\_busca\_explora)$  e ( $melhor\_encam_m = i$ ) e ( $U_i = U_j$ )) então
23:       $explora\_inic \leftarrow$  verdadeiro;
24:    senão
25:       $explora\_inic \leftarrow$  falso;
26:    fim se
27:    {Influência dos conhecimentos no encaminhamento}
28:    se ( $(status\_busca\_intensifica)$  e ( $Influencia()$ )) então
29:      novo par <msg, encam> ( $m, j$ ); {Influência do Histórico}
30:    senão
31:      se ( $(explora\_inic)$  ou ( $Aceita()$ )) então
32:        {Atualização do Situacional}
33:         $melhor\_encam_m \leftarrow j$ ;
34:         $f(melhor\_encam_m) \leftarrow U_j$ ;
35:      fim se
36:    fim se
37:  fim para
38: fim para
39: se ( $melhor\_encam_m \neq i$ ) então
40:   novo par <msg, encam> ( $m, melhor\_encam_m$ ); {Influência do Situacional}
41: fim se
42: Função Influencia {Função de Influência}
43: se ( $U_{Interm_{j,d}} > Hist_d^i$ ) então
44:   retorne verdadeiro { $dr_j = +1$ }
45: senão
46:   retorne falso { $dr_j = -1$  ou  $dr_j = 0$ }
47: fim se
48: Função Aceita {Função de Aceitação}
49: se ( $U_j > Situac_m^i$ ) então
50:   retorne verdadeiro
51: senão
52:   retorne falso
53: fim se

```

Considerando o conhecimento de domínio do nó i (Dom^i , classificado como alto ($dr_i = +1$), médio ($dr_i = 0$) ou baixo ($dr_i = -1$), conforme descrito na Seção 5.3.2) e diante da necessidade de auxiliar o protocolo Cultural GrAnt na decisão de quando encaminhar uma mensagem para um nó vizinho através da replicação de sua custódia (geração de uma nova formiga) ou restringir esse encaminhamento, as seguintes observações quanto ao grau de estagnação dos nós são consideradas:

- Nós de origem e nós intermediários com domínio de estagnação alto (isto é, nós intermediários com baixa mobilidade) têm uma probabilidade baixa de serem bons intermediadores de comunicações e podem precisar encaminhar mais formigas de forma a explorar ou intensificar a busca até que os destinos de suas mensagens sejam alcançados;
- Nós intermediários com domínio de estagnação baixo têm uma probabilidade alta de serem bons intermediadores de comunicações o que resulta em uma necessidade menor de lançar novas formigas e por isso podem encaminhar menos custódias de mensagens. Assim, de acordo com o Algoritmo 3, o indicador *status_busca explora*, que é inicializado com verdadeiro na linha 11 (para os nós que originaram a mensagem ou para os nós intermediários com alta estagnação), é alterado para falso, nos casos em que os nós intermediários têm estagnação baixa ou média (linhas 14 e 17).

No caso da intensificação da busca por caminhos já completados, o indicador *status_busca intensifica* é inicializado com verdadeiro na linha 12 (ou seja para os nós que originaram a mensagem ou para os nós intermediários com estagnação alta) e só é alterado para falso nos nós intermediários com estagnação baixa (linha 18).

Desta forma, de acordo com o indicador *status_busca*, o encaminhamento da custódia da mensagem para novos nós com mesma utilidade só não acontece (isto é, o nó não **explora** o ambiente) quando o nó intermediário que está com a custódia tem grau de estagnação baixo ou médio; e o encaminhamento para caminhos já traçados só não acontece (nó não **intensifica**) quando o nó intermediário que está com a custódia tem grau de estagnação baixo. Visto sob o aspecto da classificação da mobilidade do nó, pode-se dizer que nós com alta mobilidade tendem a não encaminhar custódia de mensagens, nós com mobilidade média tendem a intensificar a busca e nós com mobilidade baixa realizam tanto uma exploração quanto uma intensificação na busca. Assim, pode-se dizer que o conhecimento de domínio utilizado nesta tese introduz uma heurística específica do domínio de aplicação sendo considerado.

Após a definição do status da busca, no sentido de guiar o encaminhamento de uma mensagem por um caminho de exploração ou intensificação, com base no grau de parentesco e do conhecimento de domínio, a sequência do Algoritmo 3 prevê as etapas de aceitação, atualização e influência dos dois conhecimentos restantes do protocolo: situacional e histórico. Nos casos em que a decisão é por não restringir o encaminhamento, o conhecimento histórico atua quando a decisão é por intensificar os caminhos já traçados e o conhecimento situacional atua quando a decisão é por explorar o espaço, conforme detalhado na sequência.

Nos casos em que a busca é direcionada para encaminhar a mensagem para caminhos já completados (*status_busca_intensifica* é verdadeiro), a influência do conhecimento histórico de um nó i no encaminhamento de uma mensagem para um novo contato j se dá quando a mudança na direção de j (dr_j) for positiva, indicando que j apresenta utilidade de intermediação acima da utilidade de intermediação média da rede de relacionamentos de i (linhas 43, 44 e 29).

Nos casos em que a busca é direcionada para encaminhar a mensagem para novos nós, a possibilidade de encaminhamento para um novo nó j só acontece se a utilidade dele (U_j) for superior à utilidade do melhor encaminhador encontrado até o momento (condição de aceitação de um novo indivíduo no conhecimento situacional, ver linha 49). Entretanto, há uma possibilidade de encaminhamento para novos nós quando a utilidade do nó j for igual a do nó i que mantém a custódia ($U_i = U_j$): no início da exploração, onde o conhecimento situacional acabou de ser inicializado com a identificação do próprio nó i (*melhor_encam* = i), conforme testes realizados na linha 22. Neste caso, abre-se uma possibilidade de exploração para novos nós definida pelo status *explora_inic*.

Em cada nó i da rede, após analisar a utilidade dos contatos atuais e inferir o melhor deles, o protocolo Cultural GrAnt criará o par $\langle msg, encam \rangle$ (linha 29 e/ou 40), que representa o par da mensagem m e seu correspondente encaminhador. Esses pares passarão por um processo de classificação e escalonamento (ver Seção 5.5) que determinará a ordem de suas transmissões. Após a transmissão de cada mensagem m , o protocolo Cultural GrAnt atualizará no nó i uma variável local chamada $NEncam_m$ que indicará o número de vezes que uma mensagem m foi encaminhada para outros nós. $NEncam_m$ é indexada pela identificação da mensagem e é incrementada por um em cada encaminhamento. Ambos $NEncam_m$ e os pares $\langle msg, encam \rangle$ são utilizados pelos módulos de escalonamento e gerenciamento de *buffer* (ver Seções 5.5 e 5.6) para tomar suas decisões.

5.4.1.2 Avanço da Formiga: Etapa de Medida de Qualidade de Caminho

A etapa de medida de qualidade de caminho do protocolo Cultural GrAnt é iniciada sob-demanda quando uma mensagem precisa ser entregue ao seu destino. Uma vez que um caminho é solicitado em um nó de origem, FAs são criadas, contendo cada uma sua respectiva mensagem de dados e elas são enviadas em direção a um destino via um ou mais nós intermediários. A busca por novos caminhos continua até que o nó encontre o destino ou tenha conhecimento da entrega bem sucedida da mensagem no seu destino (Figura 19).

Ao longo de sua fase de busca por caminhos, uma FA carrega as seguintes informações: identificação (EID) do nó que originou a mensagem, EID do destino da mensagem, EID dos nós por onde passa e a soma das previsões das qualidades individuais desses nós. Esse conjunto de EIDs dos nós por onde cada FA passa é armazenada em uma lista Tabu (HERTZ et al., 1995) que é utilizada para evitar *loops* (ciclos) em cada caminho encontrado. Dessa forma, uma FA não irá para um nó que ela já tinha visitado anteriormente.

Em particular, a soma da qualidade individual dos nós irá atualizar a qualidade parcial $q_{cam_{o,d}^k}$ do caminho $cam_{o,d}^k$ que está sendo construído pela FA k contendo os nós entre a origem (o) e o destino (d), conforme:

$$q_{cam_{o,d}^k}(t) = \sum_{\forall j \in cam_{o,d}^k} QInd_j(t), \quad (5.13)$$

onde $q_{cam_{o,d}^k}(t)$ é a qualidade parcial do caminho no tempo t . $QInd_j(t)$ é a qualidade individual de um nó j pertencente ao caminho. Conforme descrito anteriormente, nesta tese esta medida será baseada na previsão da centralidade de grau de um nó j ($\widehat{CGrau}_j(t+1)$) pertencente ao caminho $cam_{o,d}^k$.

Durante a etapa em que cada FA mede a qualidade de cada caminho construído, é importante ter em mente que a informação a ser coletada sobre cada caminho deve ser cuidadosamente estudada. Quanto maior o número de informações sobre os nós e o caminho, mais próximo se chegará a uma solução ótima. Porém, o tamanho das FAs aumenta proporcionalmente ao número de informações coletadas, o que ocasiona mais *overhead* na rede. Com o objetivo de diminuir o tamanho das FAs, oito *bytes* da mensagem de controle FA é destinado ao armazenamento do número *double* que representa a qualidade do caminho $q_{cam_{o,d}^k}(t)$ sendo construído pela FA.

Quando a FA k chega no destino final, a qualidade total do caminho construído $Qualidade_{cam_{o,d}^k}(t)$ é calculada considerando a qualidade individual média de seus nós e o inverso do número de saltos ($NSaltos$) que o compõem, conforme apresentado na Equação 5.1.

5.4.2 FASE DE RETORNO DAS FORMIGAS

A fase de retorno das formigas do protocolo Cultural GrAnt é responsável por registrar em cada nó (isto é, nas suas métricas e no seu espaço de crenças) pertencente a cada caminho construído, as informações obtidas durante a fase de busca (ver parte inferior direita da Figura 19).

Alguns algoritmos de roteamento que empregam o ACO propõem esperar no destino até que um certo número de FAs seja recebido de modo a atribuir uma nota para cada uma delas em relação as demais (como o protocolo AMR descrito na Seção 3.2.4.1), outros propõem adotar apenas a melhor FA recebida (elitismo) no destino para atualizar as concentrações de feromônio (como faz o protocolo ACS da Seção 3.2.3.3). Para evitar atraso na espera das FAs e aumentar a diversidade de caminhos entre uma origem e um destino, o protocolo Cultural GrAnt considera todas as FAs que chegam ao destino para a atualização da concentração de feromônio.

Após calcular a qualidade do novo caminho, a mensagem de dados contida no campo de carga útil da FA é encaminhada para as camadas superiores do nó e uma Formiga de Retorno (FR) é criada contendo as informações obtidas pela FA: EID do nó destino do retorno (ou seja, o EID do nó que originou a FA correspondente); o EID do nó origem do retorno (ou seja, o EID do nó destino da mensagem de dados m , onde a FR foi criada); saltos por onde a FR deve passar em direção ao seu alvo final; e qualidade do caminho construído pela FA. Usando o EID contido no topo do vetor, o nó que criou a FR é capaz de encaminhá-la para o próximo salto correto. Após copiar os dados da FA para a FR, a FA é excluída.

A FR é enviada de volta em direção ao nó que originou a mensagem de dados através do caminho *unicast* inverso selecionado pela FA correspondente. Em redes com conexões intermitentes, encontrar esse caminho inverso pode ser difícil ou demandar grande tempo. Porém, aqui vale destacar o fato de que os nós em DTNs oportunistas possuem comportamentos sociais que fazem com que a mobilidade deles e seus contatos sigam padrões repetitivos (HUI; CROWCROFT, 2008), (HOSSMANN et al., 2011), (ZYBA et al., 2011), isto é, pessoas seguem rotinas (em casa, trabalho e até no lazer) que fazem com

que os lugares visitados por elas e, conseqüentemente, seus encontros se repitam a cada intervalo de tempo (por exemplo, por dia ou por semana). Esses princípios de padrões repetitivos de interação entre os nós ao longo do tempo são a base de funcionamento do protocolo Cultural GrAnt: se, por exemplo, um nó A quase sempre encontra um nó B às 17 horas em uma localização X e este nó A , durante esse encontro, encaminha uma mensagem (FA mais dados) para o nó B , as chances de o nó B encontrar o nó A novamente quando ele tiver uma mensagem FR para o nó A são grandes. Além disso, considerando o fato de que uma FR pode demandar um grande tempo para encontrar seus alvos (nós que pertencem ao caminho reverso construído pela FA correspondente), no protocolo Cultural GrAnt são atribuídas prioridades altas às mensagens FR o que indica que as mesmas serão encaminhadas sempre em primeiro lugar, assegurando a propagação mais rápida destas na rede de modo a atualizar as informações em cada nó por onde passa, e descartadas por último (isto é, uma FR será descartada apenas quando houver somente FRs armazenadas no *buffer* do nó onde ela se encontra e uma nova mensagem precisar ser armazenada). De acordo com o módulo de gerenciamento de *buffer*, descrito na Seção 5.6, as FRs que não encontrarem seus alvos finais (nós de origem das FAs) serão descartadas quando seu valor de TTL expirar.

Considere o termo $\tau_{(i,y),d}(t)$ referente à concentração de feromônio no enlace (i,y) num instante t , conforme definido na Equação 5.9. Lembrando que y é o nó de quem o nó i recebeu a FR (onde y pode representar um nó intermediário j ou o próprio nó destino d) e que foi considerado como um próximo salto candidato do nó i para o destino d (onde i e $y \in cam_{o,d}^k$) na etapa de encaminhamento da mensagem. Assim, na fase de retorno, a recepção de uma FR k enviada por um nó j ou pelo próprio nó d para cada vizinho i produzirá três efeitos:

1. Atualizará a concentração de feromônio no enlace (i,y) em direção a d de acordo com:

$$\tau_{(i,y),d}(t+1) = (1 - \rho) \times \tau_{(i,y),d}(t-1) + \tau_{(i,y),d}(t), \quad (5.14)$$

onde $\tau_{(i,y),d}(t-1)$ é o valor da concentração de feromônio no enlace (i,y) no tempo $(t-1)$ a qual sofrerá um processo de evaporação proporcional a $(1 - \rho)$. A evaporação é necessária para as formigas “esquecerem” valores de feromônio (soluções) anteriores depositados para um destino em um enlace, reduzindo assim a influência do histórico de busca.

2. Aumentará em uma unidade a utilidade de intermediação do nó i (descrito na Seção 5.2.5) para o destino d da mensagem ($UInterm_{i,d}$);

3. Atualizará a utilidade de intermediação da rede de relacionamentos do nó i em relação a d ($UInterm_{rede,d}^i$), conforme Equação 5.7 apresentada na Seção 5.2.5, e, conseqüentemente, atualizará o componente de conhecimento histórico de i (conforme descrito na Seção 5.3.2).

Devido ao problema de roteamento em DTNs ser dinâmico, a escolha do melhor caminho não é o objetivo principal do protocolo Cultural GrAnt. Além disso, assumindo a importância de se considerar mais de um caminho até um determinado destino, o processo de evaporação de feromônio em cada enlace em que o nó i faz parte precisa ser cuidadosamente estudado. Sendo assim, a evaporação de feromônio no protocolo Cultural GrAnt somente é realizada quando uma nova concentração de feromônio para o mesmo destino for depositada entre i e y . No momento da atualização da concentração de feromônio, todas as concentrações de feromônio nos enlaces (entre i e cada outro nó c da rede) que fizeram parte de um caminho para o mesmo destino d da mensagem serão evaporadas ($(1 - \rho) \times \tau_{(i,c),d}(t - 1)$). Este processo de evaporação guiado a eventos, se justifica no caso das DTNs como uma maneira de se buscar a diversidade de caminhos via evaporação, mas ao mesmo tempo tenta manter os caminhos já encontrados.

Adicionalmente, a FR serve como uma confirmação da mensagem recebida pelo destino comunicando aos nós que ainda mantêm a mensagem para descartá-la e liberar espaço no *buffer* para abrigar novas mensagens. Com isso evita-se a necessidade de se criar um pacote de controle adicional destinado somente ao fim do envio de confirmações e aumenta-se a eficiência total da rede. Além disso, como uma otimização do processo de descarte de mensagens (ver Seção 5.6), um nó que entrar em contato com outro nó que já tenha recebido uma FR para uma determinada mensagem m , descartará a mensagem correspondente e suas variáveis/conhecimentos associados ($Situac_m^i$, $melhor_encam_m$, $NEncam_m$). Este processo é possível uma vez que cada nó mantém um registro das mensagens confirmadas (variável *Msg_Confirmadas*),

Ao chegar no seu alvo final (origem da FA), a FR será destruída. Assim, caminhos completos são construídos para cada destino utilizando as informações obtidas pelas FAs durante sua fase de avanço. Nas próximas iterações, tais informações, armazenadas e/ou manipuladas através de métricas, são utilizadas no espaço de crenças de cada nó, o qual influenciará as novas FAs durante sua busca por outros caminhos para cada destino.

Em resumo, as estratégias adotadas pelo protocolo Cultural GrAnt permitem a construção de um conjunto de caminhos para cada destino (formando diferentes nichos). No início, apenas contatos de qualidade mais baixa podem estar disponíveis, mas graças

a própria dinâmica das DTNs, após algum tempo, um percentual maior de FAs permitirá uma descoberta mais rápida de novos caminhos e/ou a intensificação de bons caminhos já descobertos. Os componentes de conhecimento do espaço de crenças dos nós ajudará a reduzir o espaço de busca para nós mais promissores o que aumentará a probabilidade de entrega das mensagens e minimizará o número de mensagens replicadas e descartadas.

5.5 MÓDULO DE ESCALONAMENTO

Eventualmente, as mensagens dirigidas a diferentes destinos estarão esperando em cada nó i da rede para serem transmitidas a um ou mais contatos disponíveis até que elas alcancem seus destinos finais. Como o tempo em que dois nós permanecem em contato pode ser curto e, muitas vezes, insuficiente para trocarem todas as mensagens armazenadas em seus *buffers*, é necessário atribuir prioridades de encaminhamento às mensagens, de acordo com sua importância, e definir um módulo de escalonamento.

De acordo com o Algoritmo 3, após atribuir um encaminhador para cada mensagem, pares $\langle msg, encam \rangle$ são criados na etapa de encaminhamento de mensagens e estes passarão por um processo de classificação para determinar a ordem da sua transmissão. O processo de classificação de mensagens do protocolo Cultural GrAnt atribuirá um valor de importância para cada mensagem de acordo com o seu estado:

1. Classe de Prioridade: os pares $\langle msg, encam \rangle$ são transmitidos na ordem de sua classe de prioridade. Apenas duas classes de prioridade são consideradas (a) classe de prioridade alta ou *expedited*; e (b) classe de prioridade normal. As mensagens de controle FAs que transportam a mensagem de dados pertencem à classe de prioridade normal. As mensagens de controle FRs pertencem à classe de prioridade alta;
2. Número de Encaminhamentos: uma variável do tipo contador, chamada $NEncam_m$, registra o número de cópias de cada mensagem, armazenada no *buffer* de um nó i , encaminhada para outros nós da rede. Esse contador é um inteiro inicializado com zero e incrementado em uma unidade cada vez que uma cópia da mensagem for encaminhada para um contato estabelecido;
3. Proximidade Social do seu Encaminhador com o seu destino d : a importância de uma mensagem também deve considerar o valor da métrica proximidade social do nó vizinho escolhido como melhor encaminhador (*encam*) com o destino d da mensagem ($Prox_Social_{encam,d}$).

Inicialmente, os pares $\langle msg, encam \rangle$ são enviados de acordo com suas prioridades. Primeiramente, as mensagens de prioridade alta (*expedited*) são atendidas. Se não houver mais mensagens de prioridade alta, as mensagens de prioridade normal são transmitidas. Se todas as mensagens pertencerem à mesma classe de prioridade, o módulo de escalonamento irá considerar o número de vezes que uma mensagem m foi enviada para outros nós ($NEncam_m$). O par cuja mensagem possua o menor valor $NEncam_m$ é transmitido primeiro. Se os pares tiverem o mesmo valor de $NEncam_m$, a mensagem cujo destino é mais provável de ser encontrado pelo contato encaminhador ($encam$) do par ($Prox_Social_{encam,d}$ com valor mais alto) é transmitida primeiro. Finalmente, se os pares possuírem a mesma prioridade e tiverem os mesmos valores de ($NEncam_m$) e ($Prox_Social_{encam,d}$), o par que possuir a mensagem mais antiga (FIFO) é transmitido primeiro.

A política de escalonamento proposta em cada nó também considera o fato de o nó destino de uma ou mais de suas mensagens armazenadas surgir na sua linha de visão, isto é, ocorrer um contato direto com o destino desejado. Nesse caso, é dada prioridade ao envio das mensagens destinadas a este nó. Se mais de um destino final surgir, a mensagem mais antiga é transmitida primeiro.

5.6 MÓDULO DE GERENCIAMENTO DE *BUFFER*

De acordo com a etapa de encaminhamento de mensagens, cada nó i pode selecionar um ou mais contatos de boa utilidade para enviar a custódia, isto é, uma cópia de uma mensagem armazenada em seu *buffer*. Quando custódias de uma mesma mensagem estão em circulação na rede se faz necessário algum método que permita que cópias não mais necessárias sejam descartadas reduzindo assim a taxa de ocupação do *buffer* dos nós.

Diante desses cenários, o protocolo Cultural GrAnt propõe um módulo de gerenciamento de *buffer* que permite indicar as mensagens que precisam ser descartadas.

As seguintes ações são tomadas pelo módulo de gerenciamento de *buffer* disponível em cada nó i da rede:

- Descarta as mensagens que foram recebidas com sucesso pelo nó destino. Conforme descrito na Seção 5.4.2, as FRs utilizadas para registrar o conhecimento obtido sobre os caminhos disponíveis na rede servem para confirmar o recebimento de certas mensagens no seu destino. Ao receber a visita de uma FR, cada nó é capaz de saber que a mensagem foi recebida no seu destino e pode, então, excluí-la do seu *buffer*. Além disso, um nó que encontre um contato que já tenha recebido uma

FR, confirmando o recebimento de uma determinada mensagem no destino final, também descartará a respectiva mensagem de dados do seu *buffer*;

- Regularmente o módulo de gerenciamento de *buffer* verifica o valor do TTL, em minutos, das mensagens e descarta aquelas cujos TTLs tenham expirado;
- Quando o *buffer* estiver com sua capacidade máxima de ocupação e uma nova mensagem precisar ser armazenada, o módulo determinará quais mensagens serão descartadas. Para isso, cada nó i mantém pares do tipo $\langle msg, encam \rangle$, onde msg representa cada mensagem armazenada no seu *buffer* e $encam$ representa o próprio nó corrente i cujo *buffer* tenha atingido sua capacidade máxima. Esses pares passam por um processo de classificação para determinar a sua importância, conforme descrito na Seção 5.5. Porém, diferente do processo de escalonamento descrito na seção anterior, aqui a variável $encam$ representa o nó i (e não um contato escolhido como encaminhador da mensagem) e os pares de menor importância no processo de escalonamento são os primeiros a serem descartados pelo processo de gerenciamento de *buffer*:
 - O par com a mensagem de prioridade normal é descartado primeiro seguido do par com a mensagem de prioridade alta;
 - Se as mensagens dos pares pertencerem à mesma classe de prioridade, a mensagem do par com o maior valor $NEncam_m$ é descartada, pois se assume que a probabilidade de ela ter sido entregue ao seu destino final é maior;
 - Se as mensagens tiverem a mesma prioridade e o mesmo valor de $NEncam_m$, a mensagem cujo destino d for menos provável de ser encontrado pelo seu nó corrente i ($Prox_Social_{i,d}$) é descartada;
 - Finalmente, se as mensagens pertencerem à mesma classe de prioridade e tiverem os mesmos valores $NEncam_m$ e $Prox_Social_{i,d}$, a mensagem mais antiga é descartada.

6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O presente capítulo analisa a influência de cada um dos componentes incorporados ao Protocolo Cultural GrAnt e o desempenho do protocolo proposto ao compará-lo com outros protocolos existentes para DTNs.

Conforme visto na Seção 2.2, os protocolos de roteamento desenvolvidos para operar em DTNs podem ser classificados em três categorias: replicadores; baseados em previsões; e escalonadores. A categoria de protocolos escalonadores somente pode ser empregada em ambientes específicos onde os nós sofrerão controle sobre seus movimentos. Assim, para fins de comparação, são utilizadas as duas primeiras categorias de protocolos para DTNs que podem operar em vários ambientes com diferentes modelos de mobilidade de nós. Mais especificamente, o protocolo Epidêmico baseado em replicação de mensagens (ver Seção 2.2.1) e o protocolo PROPHET baseado em previsões (ver Seção 2.2.2) são comparados com o protocolo Cultural GrAnt. As implementações desses dois protocolos, bastante difundidos na literatura, estão disponíveis no Simulador para Ambientes de Redes Oportunísticas (*The ONE - The Opportunistic Network Environment*) (KERÄNEN et al., 2009) (KERÄNEN et al., 2010).

O The ONE é um simulador desenvolvido especialmente para ambientes oportunistas como os das DTNs, permitindo diferentes padrões de mobilidade para seus nós. Sendo assim e por ser bastante utilizado pela comunidade acadêmica, o The ONE é utilizado na presente tese para fins de avaliação de desempenho do protocolo proposto.

Para avaliar a confiabilidade e custo dos protocolos, as seguintes métricas de desempenho são consideradas:

1. Relação de entrega de mensagens: determina o percentual das mensagens criadas que o protocolo é capaz de entregar ao seu destino;
2. Relação de mensagens descartadas: define o percentual de mensagens descartadas, devido à falta de espaço no *buffer* dos nós, em relação ao número total de mensagens criadas e replicadas. Aqui vale ressaltar que as mensagens são descartadas do *buffer*

de um nó quando, na recepção de uma nova mensagem, o *buffer* deste nó estiver cheio;

3. Relação de mensagens replicadas: reflete a quantidade (em bytes) de mensagens replicadas para os nós ($B_{replicados}$) em relação à quantidade (em bytes) de mensagens entregues ao destino ($B_{entregues}$). Essa relação é expressa como:

$$B_{repl} = \frac{B_{replicados} - B_{entregues}}{B_{entregues}}. \quad (6.1)$$

Para esse cálculo de relação de replicação, assume-se que todas as mensagens de dados em circulação na rede possuem o mesmo tamanho em bytes. Porém, aqui são considerados os bytes incluídos no cabeçalho das mensagens e utilizados pelo protocolo Cultural GrAnt para as mensagens de controle das formigas (FA e FR) de modo a considerar o custo despendido com essas transmissões;

4. Atraso médio de entrega de mensagens: define o tempo médio despendido entre a criação de uma mensagem no nó de origem e a sua entrega no nó destino (incluindo atrasos em *buffer*).

As seções a seguir descrevem os cenários de mobilidade considerados, as análises realizadas para caracterizar a utilidade dos nós e a importância das mensagens no Cultural GrAnt, a análise dos componentes incorporados no Cultural GrAnt e os resultados de desempenho obtidos pelos protocolos Cultural GrAnt, PROPHET e Epidêmico.

6.1 CENÁRIOS DE MOBILIDADE E SEUS PARÂMETROS

Uma vez que a mobilidade dos nós é um fator importante na caracterização das oportunidades de comunicação em DTNs, é fundamental que os modelos de movimento utilizados nas avaliações sejam próximos da realidade. Nesses cenários, os usuários não se movem de modo completamente aleatório como no modelo *Random Waypoint* (RWP) (CAMP et al., 2002). Ao contrário, os nós se movimentam de forma possivelmente previsível com base em padrões de comportamento repetitivos de tal forma que se um nó visitou um local várias vezes no passado, é provável que ele visitará esse local novamente no futuro. Assim, nesta tese, o desempenho do protocolo Cultural GrAnt é avaliado em dois cenários diferentes para melhor refletir o seu comportamento: um modelo de movimento baseado em comunidades de nós (ver Seção 6.1.1) e um modelo de movimento baseado nas atividades dos nós no dia-a-dia (ver Seção 6.1.2). Esses dois cenários foram escolhidos por estarem disponíveis no simulador The ONE e por apresentarem características bem

diferentes um do outro: o primeiro modelo gera a mobilidade e encontro de seus nós com base na informação das comunidades as quais cada usuário pertence, o seu padrão de mobilidade é mais aleatório e os seus usuários se movem com uma frequência bem superior se comparado ao padrão de mobilidade do segundo modelo. Já no segundo modelo a mobilidade e encontro dos nós consideram as atividades ou contextos (casa, trabalho, lazer) destes nós durante todo o seu dia. Grande parte dos nós nesse modelo permanece mais tempo parado ou estagnado realizando suas atividades e seus padrões de mobilidade se repetem com mais frequência se comparado ao modelo baseado em comunidades.

6.1.1 MODELO DE MOVIMENTO BASEADO EM COMUNIDADES

O modelo de movimento baseado em comunidades consiste em uma área de $8800 \times 7800 \text{ m}^2$ dividida em cinco comunidades ou Pontos de Interesse (PoIs - *Points of Interest*). O modelo simula um grupo de pessoas em suas comunidades, que entrarão, eventualmente, em contato com outra pessoa, que pode ser ou não de sua comunidade, e trocarão dados.

Esse cenário utiliza o modelo de movimento *ShortestPathMapBasedMovement* (KERÄNEN et al., 2010) que emprega o algoritmo de *Dijkstra* para encontrar o caminho mais curto entre dois PoIs.

Existem oito grupos de nós (A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2): os grupos A1, B1, C1 e D1 possuem trinta nós cada um e os outros quatro grupos (A2, B2, C2 e D2) possuem cinco nós cada um. Os 140 nós são inicialmente inseridos de forma aleatória em um PoI. Assume-se que todos os nós são pedestres. Cada nó tem um PoI domiciliar que é mais provável de ele visitar. Os nós selecionam um destino e uma velocidade entre 0,5 e 1,5 m/s, se movem até lá, esperam por um período de tempo de 100 a 200 segundos (grupos A1 a D1) ou 4000 a 5000 segundos (grupos A2 a D2) e, em seguida, selecionam o próximo destino. O grupo de nós de A2 a D2 foi criado para testar o comportamento do Cultural GrAnt com o uso de nós com grau de estagnação alto (ver Seção 5.3.2).

A estratégia de seleção de destinos é tal que sempre há uma probabilidade alta de um nó escolher um destino no seu PoI domiciliar, uma probabilidade média de visitar PoIs em comum e uma probabilidade baixa ou nula de visitar outros PoIs. A Tabela 2 sumariza as probabilidades de seleção de destino para cada grupo de nós onde o PoI E representa o ponto de interesse comum a todos os grupos. Conforme proposto em Lindgren et al. (2004), este cenário pode ser adaptado, por exemplo, para redes de sensores, onde as pessoas seriam animais, cada PoI seria um *habitat* de um grupo de animais e cada PoI em comum seria o lugar onde os animais se alimentam.

Tabela 2: Probabilidades de Seleção de Destino

Grupo de Nós	Destino PoIA	Destino PoIB	Destino PoIC	Destino PoID	Destino PoIE
A1	0,6	0,05	0,05	0	0,3
B1	0,05	0,6	0	0,05	0,3
C1	0	0,05	0,6	0,05	0,3
D1	0,05	0	0,05	0,6	0,3
A2	0,7	0,05	0,05	0	0,2
B2	0,05	0,7	0	0,05	0,2
C2	0	0,05	0,7	0,05	0,2
D2	0,05	0	0,05	0,7	0,2

O tráfego de mensagens é tal que a cada 50-90 segundos um nó é selecionado aleatoriamente de um grupo de 50 nós de origem e cada nó de origem possui um grupo de 10 nós, considerados seus amigos, escolhidos aleatoriamente, para enviar mensagens.

Para criar o cenário PoI é utilizado o mapa da cidade *Helsinki* disponível no simulador The ONE. O mapa é dividido em cinco comunidades classificadas em: “*homes*” para representar os PoIs de A a D; e “*shops*” para representar o ponto de interesse em comum, isto é, o PoI E.

6.1.2 MODELO DE MOVIMENTO BASEADO EM ATIVIDADES

O modelo de movimento *Working Day* (WD) (EKMAN et al., 2008) (KERÄNEN et al., 2010) representa um cenário baseado em atividades que simula o cotidiano das pessoas que saem de suas casas pela manhã para trabalhar, passam o dia no trabalho, no fim do dia podem ir para um lugar público para atividades de lazer com amigos e à noite voltam para suas casas. Esse modelo representa, então, um elemento importante da mobilidade humana que Hossmann et al. (2011) definem como contextos. Segundo Hossmann et al. (2011), essas informações simples de contextos (casas, escritórios, pontos de encontro para lazer) são úteis para caracterizar melhor a estrutura social dos nós.

O cenário é dividido em pontos de encontro, ônibus, casas, escritórios e ruas. As relações sociais são formadas quando um grupo de pessoas está realizando uma mesma atividade no mesmo local (por exemplo, nós no mesmo escritório são colegas de trabalho). Os nós usam diferentes meios (ônibus, carro ou à pé) para ir trabalhar. Nós têm diferentes locais onde eles realizam suas atividades de lazer. Assim, neste cenário, diferentemente das probabilidades de seleção de destinos do cenário PoI, cada nó tem sua própria rotina, sempre seguindo a mesma sequência de atividades. O cenário pressupõe que os nós podem ser pedestres ou ônibus.

Oito grupos de nós foram criados de A a H. Três deles (E, F e G) foram criados para simular o movimento entre o grupo A e os outros grupos (B, C e D), e o grupo H foi criado para simular o movimento entre todos os grupos. Este último representa um grupo de nós que Zyba et al. (2011) definem como nós “*andarilhos*”, isto é, uma categoria de nós que não possui uma casa permanente e que se move de um lugar a outro sem qualquer padrão de frequência ou periodicidade; os autores destacam que essa categoria de nós não deve ser ignorada, pois estes nós representam uma função importante na disseminação de informações em uma rede. Dessa forma, o cenário WD provê duas categorias de nós: os “*andarilhos*” e os “*sociáveis*”, estes últimos (grupos de nós de A a G) representam os nós que aparecem com regularidade e, portanto, com previsibilidade em uma dada área. A atribuição dos nós para os diferentes grupos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Alocação de Nós no Cenário WD

Grupo de Nós	Quantidade de Nós
A	50
B	15
C	30
D	30
E (A e B)	30
F (A e C)	50
G (A e D)	50
H (mapa inteiro)	70

Os parâmetros utilizados no cenário WD são: número total de nós (incluindo os 14 ônibus): 340; velocidade dos nós pedestres: 0,8 a 1,4 m/s; velocidade dos carros e ônibus: 7 a 10 m/s; tempo de parada/pausa dos ônibus nos pontos: 10 a 30 s; probabilidade de cada nó possuir um carro: 0,5; probabilidade de um nó fazer atividade de lazer após o trabalho: 1; tamanho do grupo de atividades de lazer: 1 a 10; tempo de trabalho diário: 28.800 segundos; tempo de pausa nos escritórios: valor mínimo de 10 e máximo de 100.000 segundos; tamanho do escritório: 100 m x 100 m. O tráfego de dados é tal que a cada 100-150 segundos um nó é selecionado aleatoriamente a partir de um grupo de 80 nós de origem e cada nó de origem tem um grupo escolhido aleatoriamente de 10 amigos para enviar mensagens. A exceção fica por conta do grupo de nós H que utiliza o modelo de movimento *ShortestPathMapBasedMovement* para alcançar cada destino, tem um tempo de pausa distribuído entre 300 e 500 segundos e uma velocidade entre 7 e 10 m/s.

Para criar o cenário WD também é utilizado o mapa da cidade *Helsinki*. O mapa é dividido para cada um dos grupos de A a G em: três pontos de encontro (“*meetingspots*”); dois ônibus (“*bus*”); casas (“*homes*”); e dez escritórios (“*offices*”).

6.1.3 PARÂMETROS GERAIS DE SIMULAÇÃO

Para ambos os cenários de mobilidade descritos anteriormente, o tamanho das mensagens é de 500 kB. No protocolo Cultural GrAnt, oito bytes são acrescidos ao tamanho de cada mensagem para contabilizar o armazenamento da informação (isto é, um número *double*) sobre a qualidade do caminho construído pela FA (ver Seção 5.4.1.2). O tamanho de uma FR é de 100 bytes (incluindo o cabeçalho da DTN, a qualidade do caminho e a identificação dos nós que compõem o caminho). A simulação tem duração de 800.000 segundos. Os primeiros 5.000 segundos de cada simulação representam o seu período transiente. Os nós atualizam sua qualidade individual prevista (centralidade de grau descrita na Equação 5.2) a cada 5.000 segundos de simulação. Os coeficientes α e β que representam o fator de suavização para a previsão da centralidade de grau dos nós e da duração dos contatos, respectivamente, assumem ambos o valor 0,3. Os limites L_s e L_i utilizados para determinar o grau de estagnação de um nó perante o grau de estagnação médio da sua rede de relacionamentos ($GEst_{rede}$) são definidos da seguinte forma: $L_s = 8 \times GEst_{rede}$ e $L_i = 0,9 \times GEst_{rede}$.

Em especial, diferente dos trabalhos apresentados por Mei e Stefa (2012) e Li et al. (2010), as simulações apresentados nesta tese assumem que os nós não são *egoístas*, isto é, eles não recusarão o recebimento de custódia de mensagens. Quando uma conexão nova for estabelecida, os protocolos cujos desempenhos estão sendo comparados tentam enviar suas mensagens de acordo com sua política de roteamento.

A Tabela 4 resume os principais parâmetros de simulação utilizados nos cenários PoI e WD, sendo que os conjuntos de parâmetros a serem testados são representados entre chaves e o valor padrão de cada conjunto está em negrito. Os parâmetros do PROPHEET foram obtidos de Lindgren et al. (2004).

6.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT

Esta seção apresenta o resultado de algumas análises realizadas na caracterização: (1) dos parâmetros do ACO, (2) das métricas utilizadas na utilidade dos nós DTNs candidatos a encaminhadores de mensagens; (3) da importância das mensagens perante os módulos de encaminhamento e gerenciamento de *buffer*.

Em todos os experimentos conduzidos nessa seção, considera-se o cenário PoI com um *buffer* de 4 MB, TTL das mensagens de 600 minutos e interface de rede operando com uma faixa de comunicação de 10 m e uma velocidade de transmissão de 2 Mbps.

Tabela 4: Parâmetros Utilizados nas Simulações

Protocolo	Parâmetros	PoI	WD
Todos	Número de Nós	140	339
	Área (m^2)	8.800 x 7.800	10.000 x 8.000
	Velocidade dos Nós (metros/segundo)	0,5-1,5	0,8-1,4 (pedestres), 7-10 (carros e ônibus)
	Tempo de Pausa nos destinos (segundos)	100-200 (grupos A1 a D2) 4000-5000 (A2 a D2)	300-500 (grupo H), 10-30 (Ônibus)
	Taxa de Geração das Mensagens (segundos)	50-90	100-150
	TTL das mensagens (minutos)	{300, 600 , 900, 1200, 1500, 1800, 2100}	{300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 , 2100}
	Tamanho dos Buffers (MB)	{4, 6, 8, 10, 12, 14, 16}	{4, 6, 8, 10 , 12, 14, 16}
	Duração da Simulação (segundos)		800.000
Período Transiente (segundos)		5.000	
Número de Simulações		30	
Cultural GrAnt	α e β (fator de suavização)		0,3
	Atualização da Qualidade dos Nós (segundos)		5.000
	Taxa de Evaporação de Feromônio		{ 0,1 , 0,3, 0,5, 0,7, 0,9}
	Função Heurística		{ Prox_Social , CGrau, UInterm, Buffer_Livre}
	Concentração de Feromônio		{NSaltos, CGrau, UInterm, CGrau+NSaltos }
	Utilidade dos Nós		{Heurística, Feromônio, Heurística+Feromônio, Heurística+Feromônio+GPar }
Importância das Mensagens		{Prox_Social, NEncam , FIFO}	
Epidêmico	Campo número de saltos		11
PROPHET	Campo número de saltos		11
	P_{mic}		0,75
	γ		0,98
	Uma unidade de tempo <i>Unit</i> (segundos)		30
	φ		0,25

Os resultados apresentados mostram valores médios de trinta execuções e intervalos de confiança em um nível de 95%. Para avaliar se as diferenças de desempenho entre as diferentes abordagens testadas (grupos em um contexto estatístico) são estatisticamente significativas considerando a métrica de percentual de entrega de mensagens (fator em um contexto estatístico), é aplicado o teste estatístico paramétrico ANOVA (*ANalysis Of VAriance*) (devido a característica de normalidade dos dados) com a sua análise *post hoc follow-up* sobre os grupos considerados. O teste ANOVA retorna um $p\text{-value} > 0,05$, indicando (com 95% de confiança) que não há diferença significativa entre os grupos, e um $p\text{-value} < 0,05$, se houver, pelo menos, um par de grupos com diferença estatisticamente significativa. No segundo caso, a verificação de quais grupos diferem uns dos outros é importante. Tais análises são realizadas usando as funções *anova1* e *multcompare* do *software MATLAB*. Os intervalos mostrados nos gráficos de análise *post hoc* são calculados de tal forma que, para uma aproximação, dois grupos são significativamente diferentes se não há interseção entre seus intervalos e não são significativamente diferentes se seus intervalos se sobrepõem. Nos testes conduzidos nessa seção, o intervalo do percentual de entrega de mensagens associado a cada grupo é representado por uma linha horizontal

(com um círculo representando o seu valor médio). Para cada gráfico, escolhe-se um grupo a ser enfatizado (linha horizontal preta e delimitado por duas linhas verticais tracejadas). Os intervalos dos grupos restantes são classificados como aqueles que se sobrepõem ao grupo enfatizado (linhas tracejadas horizontais cinza claro) e aqueles que não sobrepõem (linhas horizontais cinza escuro).

6.2.1 ANÁLISE DOS OPERADORES DO ACO

Para caracterizar a utilidade de cada nó DTN como encaminhador de cada mensagem (conforme visto na Seção 5.2.3), as seguintes análises são realizadas nos operadores do espaço populacional do protocolo Cultural GrAnt conforme detalhadas a seguir: taxa de evaporação da concentração de feromônio; métrica associada ao operador local função heurística; métrica associada ao operador global concentração de feromônio.

6.2.1.1 Análise da Taxa de Evaporação de Feromônio

Primeiramente, são analisados os resultados obtidos por diferentes taxas de evaporação de feromônio $\rho = [0,1;0,3;0,5;0,7;0,9]$. Os seguintes resultados foram obtidos em termos do percentual de entrega de mensagens: $58,93 \pm 0,19\%$ para $\rho = 0,1$; $58,86 \pm 0,20\%$ para $\rho = 0,3$; $58,85 \pm 0,20\%$ para $\rho = 0,5$; $58,88 \pm 0,23\%$ para $\rho = 0,7$; $58,76 \pm 0,20\%$ para $\rho = 0,9$. Como pode ser visto, a taxa de evaporação $\rho = 0,1$ obtém o melhor desempenho em relação ao percentual de entrega de mensagens. O teste ANOVA é aplicado para verificar se há diferença estatística nos resultados obtidos e escolhe-se a taxa de evaporação $\rho = 0,1$ para ser enfatizada. Conforme pode ser visto na Figura 20, o intervalo do percentual de entrega de mensagens associado à taxa de evaporação $\rho = 0,1$ não é significativamente diferente das demais taxas. Embora os resultados sejam semelhantes, decide-se utilizar como padrão a taxa de evaporação $\rho = 0,1$. Entretanto, a análise mostra que a evaporação do feromônio tem pouca influência nos resultados o que faz sentido dada a pouca conectividade do ambiente considerado. Acredita-se que ao se considerar um ambiente altamente conectado, os resultados desta análise podem mudar, resultando em diferença significativa entre as taxas testadas.

6.2.1.2 Análise da Métrica Associada à Função Heurística

Na sequência, analisa-se qual informação exerce maior influência na aceitação de uma solução local dentre um conjunto de nós vizinhos (próximos saltos) candidatos ao encaminhamento de uma mensagem para seu destino. O desempenho do protocolo Cultural GrAnt é avaliado ao associar cada uma das seguintes métricas ao operador local

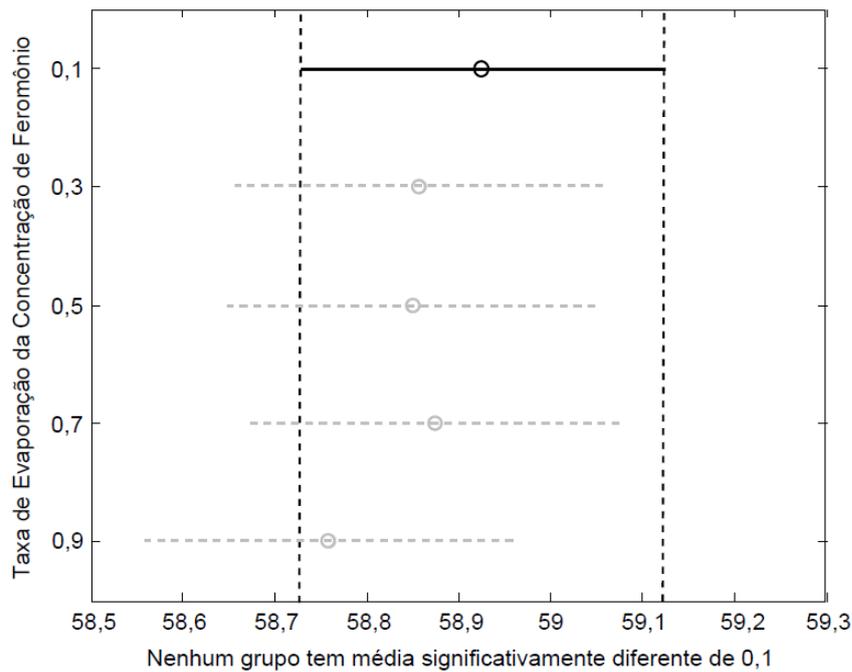


Figura 20: Teste ANOVA para Análise da Taxa de Evaporação de Feromônio.

função heurística ($\eta_{(x),d}(t)$): (1) *proximidade social* de cada nó x em relação ao destino d ($Prox_Social_{x,d}$, calculada segundo a Equação 5.3); (2) *centralidade de grau* prevista de um nó x (\widehat{CGrau}_x , conforme Equação 5.2); (3) *utilidade de intermediação* de um nó x em relação a d ($UInterm_{x,d}$, conforme visto na Seção 5.4.2); (4) previsão do percentual de *buffer livre* de um nó x ($\widehat{Buffer_Livre}_x(t+1) = \alpha \times Buffer_Livre_x(t-1) + (1 - \alpha) \times Buffer_Livre_x(t)$).

Os resultados mostram que quando utilizada a métrica *proximidade social*, o protocolo Cultural GrAnt entrega mais mensagens ($58,93 \pm 0,19\%$) se comparado com as métricas *centralidade de grau* ($47,21 \pm 0,17\%$), *utilidade de intermediação* ($53,92 \pm 0,17\%$) e percentual de *buffer livre* ($49,72 \pm 0,28\%$). A Figura 21 mostra a análise *post hoc* do ANOVA, enfatizando a métrica *proximidade social*. Como não há sobreposição entre os intervalos, conclui-se que a métrica *proximidade social* provê um desempenho melhor que as outras duas métricas.

As principais justificativas para esses resultados são: (1) a métrica *proximidade social* indica o quão “próximo” cada nó vizinho está do destino d de cada mensagem. Além disso, a *proximidade social* dos nós é uma informação que está disponível durante toda a fase de busca por soluções. Uma escolha mais precisa, portanto, pode ser feita entre os candidatos a encaminhadores de mensagens considerando a probabilidade de encontro futuro entre tais candidatos e d ; (2) a métrica *centralidade de grau* está relacionada a

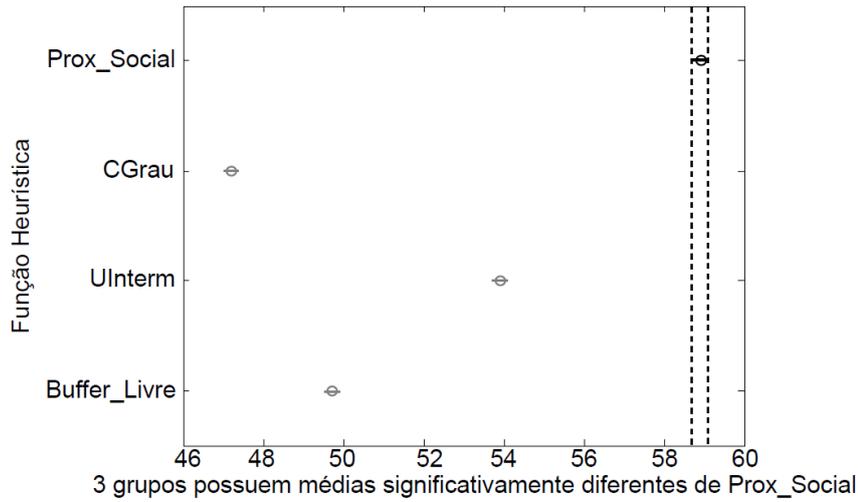


Figura 21: Teste ANOVA para Análise da Função Heurística.

popularidade de um nó vizinho em relação a todos os outros nós da rede. Isto é, ela não provê uma informação sobre a possibilidade de encontro futuro entre um nó vizinho candidato e d , como faz a métrica *proximidade social*; (3) apesar de a métrica utilidade de intermediação fornecer uma informação importante sobre os nós que intermediaram com sucesso uma comunicação para d , ela somente estará disponível para um determinado nó x após um caminho completo entre um par origem(o)-destino(d) (que inclui o nó x) ser construído e este nó x receber a visita da respectiva FR (conforme visto na Seção 5.4.2); (4) Em cenários altamente conectados, onde um mesmo conjunto de soluções globais candidatas pode estar sempre disponível e onde uma mesma solução pode ser selecionada com frequência, o percentual de recurso (por exemplo, *buffer*) livre pode ser uma métrica importante a ser considerada. Porém, em ambiente onde os contatos são esparsos, como nas DTNs, a informação sobre a proximidade social entre dois nós é mais importante.

6.2.1.3 Análise da Métrica Associada à Concentração de Feromônio

Também é analisada qual informação exerce melhor influência na seleção de uma solução global, isto é, na escolha de cada nó intermediário pertencente a um caminho completo para um determinado destino d . O desempenho do protocolo Cultural GrAnt é avaliado ao utilizar as seguintes métricas para prever a qualidade de um caminho construído por uma formiga k entre uma origem o e destino d ($Qualidade_{cam^k_{o,d}}$) e mapeá-la diretamente no operador global concentração de feromônio ($\tau_{(i,y),d}^k(t)$, conforme Equação 5.9): (1) Inverso do número de saltos existente no caminho construído ($Qualidade_{cam^k_{o,d}} = \frac{1}{NSaltos_{cam^k_{o,d}}}$) de modo que quanto menor for o caminho construído, maior será a qualidade dessa solução global; (2) Média da Previsão da *centralidade de grau* dos nós j que pertencem

ao caminho ($Qualidade_{cam^k_{o,d}} = \frac{\sum_{j \in cam^k_{o,d}} \widehat{CGrau}_j(t+1)}{NSaltos_{cam^k_{o,d}}}$), sendo $\widehat{CGrau}_j(t+1)$ calculado conforme Equação 5.2); (3) Média da *Utilidade de Intermediação* dos nós j em relação a d ($Qualidade_{cam^k_{o,d}} = \frac{\sum_{j \in cam^k_{o,d}} UInterm_{j,d}}{NSaltos_{cam^k_{o,d}}}$), sendo $UInterm_{j,d}$ calculado conforme descrito na Seção 5.4.2; (4) Média da Previsão da *centralidade de grau* dos nós j que pertencem ao caminho juntamente com o inverso do *número de saltos*, conforme proposto na Equação 5.1.

Os resultados da simulação mostram que quando utilizada uma métrica composta pela *centralidade de grau* dos nós ($CGrau$) e o *número de saltos* ($NSaltos$) para calcular a qualidade de um caminho, o protocolo Cultural GrAnt entrega mais mensagens ($58,93 \pm 0,19\%$) se comparado com a utilização das métricas básicas $CGrau$ ($51,10 \pm 0,21\%$), $NSaltos$ ($51,11 \pm 0,22\%$) e $UInterm$ ($49,89 \pm 0,22\%$). A Figura 22 mostra a análise *post hoc* do ANOVA, enfatizando a métrica composta. Como não há sobreposição entre os intervalos, conclui-se que a métrica composta (*centralidade de grau* e *número de saltos*), provê um desempenho melhor que as métricas básicas. Esse resultado indica que a popularidade dos nós é um bom indicador da habilidade dos nós servirem como encaminhadores de mensagens, pois quanto maior for essa popularidade maior será a chance de estes encontrarem outros melhores encaminhadores. Isso é particularmente verdadeiro em cenários com conexões intermitentes como nas DTNs. Além disso, a importância da métrica $NSaltos$ se deve ao fato de que quanto menor for o número de saltos em um determinado caminho, menos recursos da rede serão consumidos e menos interferência de comunicação ocorrerá.

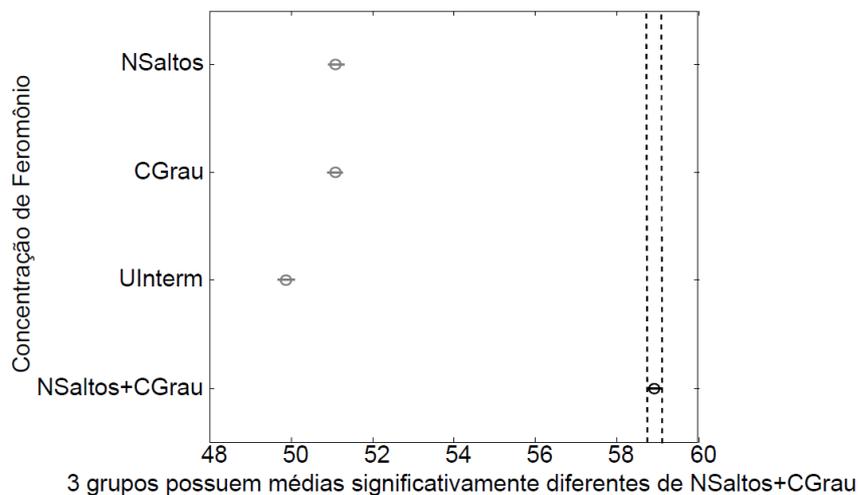


Figura 22: Teste ANOVA para Análise da Concentração de Feromônio.

6.2.2 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DA UTILIDADE DOS NÓS

Finalmente, após analisar e escolher as métricas associadas aos operadores do espaço populacional que exercem maior influência na taxa de entrega de mensagens do Cultural GrAnt, são analisadas algumas formas de compor a utilidade de cada nó x (U_x) em relação a um nó referência i que mantém a custódia da mensagem m : (1) uso apenas de informações locais mapeadas na *função heurística* ($U_x = \eta_{(x),d}(t)$); (2) uso apenas de informações globais mapeadas na *concentração de feromônio* ($U_x = \tau_{(i,y),d}(t)$); (3) uso de ambas *informações locais e globais* ($U_x = \eta_{(x),d}(t) + \tau_{(i,y),d}(t)$); (4) uso de *informações locais e globais* juntamente com métrica básica *GPar* (conforme Equação 5.10).

Os resultados mostram que quando considerados os dois operadores do ACO (função heurística e concentração de feromônio) e a métrica *GPar*, o protocolo Cultural GrAnt entrega mais mensagens ($58,93 \pm 0,19\%$) se comparado com o uso apenas da função heurística ($55,95 \pm 0,23\%$), apenas da concentração de feromônio ($49,29 \pm 0,18\%$), uso da função heurística e feromônio sem considerar a métrica *GPar* ($58,02 \pm 0,20\%$). Esse resultado demonstra que o protocolo Cultural GrAnt é capaz de utilizar informações globais (isto é, concentração de feromônio) sobre a rede em que opera sempre que esta informação estiver disponível. Entretanto, como a concentração de feromônio nem sempre estará disponível, informações locais capturadas dos nós DTN também provêm suporte à decisão de roteamento. A Figura 23 mostra a análise *post hoc* do ANOVA, enfatizando a composição (4). Como não há sobreposição entre os intervalos, conclui-se que a composição enfatizada (informação local, global e *GPar*), resulta num desempenho superior.

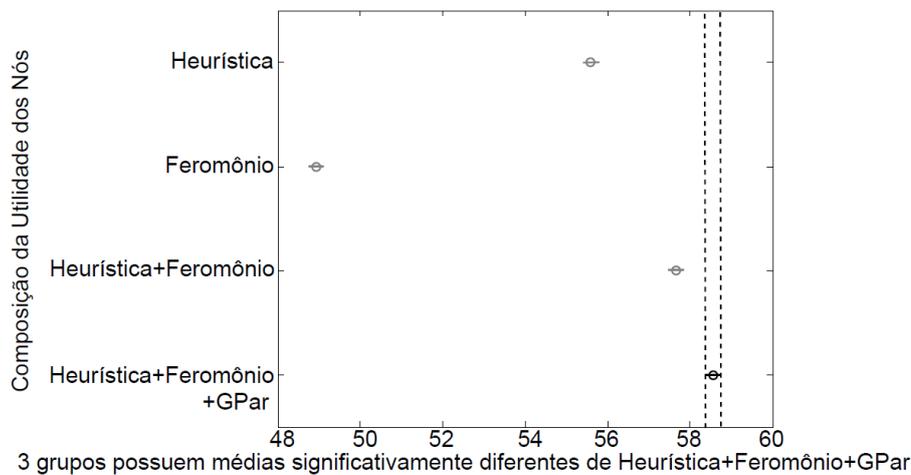


Figura 23: Teste ANOVA para Análise da Utilidade dos Nós.

6.2.3 ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DAS MENSAGENS

Na sequência, alguns testes são realizados para classificar a importância de cada mensagem, pertencente a mesma classe de prioridade, perante os módulos de escalonamento e gerenciamento de *buffer* (conforme visto nas Seções 5.5 e 5.6, respectivamente): (1) a mensagem m mais importante para ambos os módulos é aquela cujo destino d é mais provável de ser encontrado pelo nó i que a mantém ($Prox_Social_{i,d}$, módulo de gerenciamento de *buffer*) ou pelo j que receberá sua cópia ($Prox_Social_{j,d}$, módulo de escalonamento); (2) a mensagem m mais importante para ambos os módulos é aquela que foi menos replicada para outros nós da rede ($NEncam_m$) e que, conseqüentemente, tem um chance menor de ter sido entregue ao seu destino final, conforme proposto nas Seções 5.5 e 5.6; (3) a mensagem m mais importante para o módulo de escalonamento é a mensagem mais antiga (*FIFO*) e para o módulo de gerenciamento de *buffer* a mensagem m mais importante é a mais nova. Na classificação 1, se as mensagens possuírem o mesmo valor para $Prox_Social_{x,d}$, sendo $x = i$ ou $x = j$, sua importância irá considerar o valor de $NEncam_m$ e, finalmente, sua ordem de chegada. Na classificação 2, se as mensagens possuírem o mesmo valor para $NEncam_m$, sua importância irá considerar o valor de $Prox_Social_{x,d}$ e, finalmente, sua ordem de chegada. De acordo com essas classificações, as mensagens mais importantes serão encaminhadas primeiro pelo módulo de escalonamento e descartadas por último pelo módulo de gerenciamento de *buffer*.

Conforme visto no Capítulo 2, os protocolos de roteamento desenvolvidos para DTNs confiam na replicação das mensagens para eventualmente entregá-las aos seus destinos finais. Diante desse cenário, como era de se esperar, os resultados mostraram que a melhor forma de caracterizar a importância de uma mensagem é determinar a probabilidade de esta mensagem ter sido entregue ao seu destino através da contabilização do número de vezes que ela foi replicada para outros nós da rede. Ao considerar o valor de $NEncam$ como o primeiro critério para caracterizar a importância das mensagens, o protocolo Cultural GrAnt entrega $58,93 \pm 0,19\%$ das mensagens se comparado ao uso do valor de $Prox_Social_{x,d}$ que entregou apenas $48,85 \pm 0,18\%$ das mensagens ou ao uso apenas da classificação FIFO ($53,6 \pm 0,17\%$).

A Figura 24 mostra a análise *post hoc* do ANOVA, enfatizando a composição (2). Como não há sobreposição entre os intervalos, conclui-se que a composição enfatizada ($NEncam$) provê um desempenho melhor que as demais.

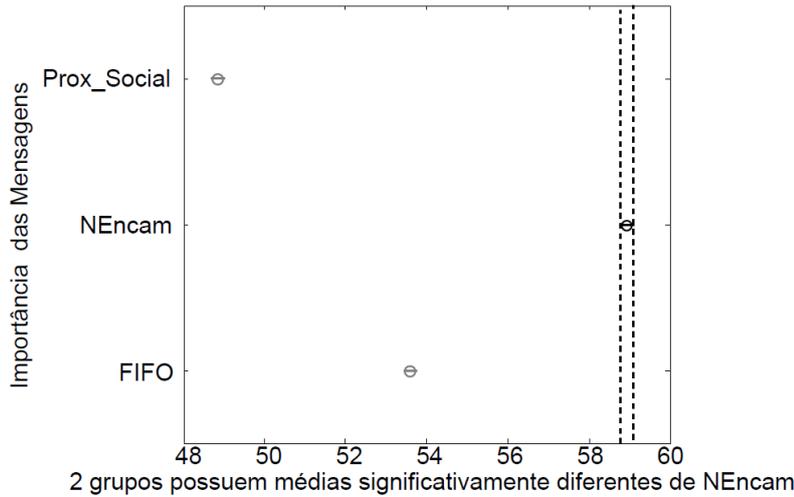


Figura 24: Teste ANOVA para Análise da Importância das Mensagens.

6.3 ANÁLISE DOS COMPONENTES DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT

A presente seção investiga como os componentes incorporados ao protocolo Cultural GrAnt afetam seu desempenho em termos do percentual de entrega de mensagens e relação de mensagens replicadas. Para essa análise, duas metodologias são adotadas: (1) Aditiva: onde os componentes são adicionados um a um até que se alcance a versão final do protocolo; (2) Eliminatória: onde a partir da versão final do protocolo, cada conhecimento do espaço de crenças e cada módulo do Cultural GrAnt é eliminado somente um por vez. O objetivo da avaliação aditiva é investigar se a incorporação dos componentes agrega ganho de desempenho ao protocolo proposto. Já no caso da eliminação, busca-se analisar qual componente tem maior influência no desempenho do protocolo.

Na sequência, é analisado o uso da concentração de feromônio de modo a detectar o comportamento das formigas de retorno (FRs) em comparação com as suas respectivas formigas de avanço (FAs).

Para as análises desta seção são utilizados dois cenários de mobilidade: (a) PoI cujos nós possuem um *buffer* de 4MB e o TTL das mensagens é de 600 minutos; (b) WD cujos nós possuem um *buffer* de 10 MB e o TTL das mensagens é de 1800 minutos. Em ambos os cenários, os nós possuem uma interface de rede com um alcance de comunicação de 10 metros e uma velocidade de transmissão de 2 Mbps. A taxa de evaporação de feromônio durante as análises dos conhecimentos é de 0,1. Os resultados das análises apresentadas nessa seção mostram valores médios de trinta execuções e intervalos de confiança em um nível de 95%.

6.3.1 ANÁLISE ADITIVA E ELIMINATÓRIA DOS COMPONENTES DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT

A Tabela 5 apresenta a análise aditiva (para ambos os cenários PoI e WD) dos seguintes componentes incorporados ao Cultural GrAnt para decisão de encaminhamento de cada mensagem m de posse de um nó i em contato com um ou mais nós vizinhos j (ver Seção 5.4.1.1):

1. **Função Heurística:** uso apenas da função heurística, como operador local do espaço populacional do protocolo Cultural GrAnt, conforme Equações 5.3 e 5.8, para calcular a utilidade dos nós. Nesse caso, ocorrerá o encaminhamento da mensagem m para um nó j se a seguinte relação for verdadeira: $U_j \geq U_i$. Uso de um módulo de descarte de mensagens FIFO e escalonamento de mensagens FIFO. Essa análise investiga a influência de uma busca local pura;
2. **Módulo de Descarte de Mensagens Otimizado:** uso do componente 1 porém, com o módulo de descarte de mensagens otimizado, conforme apresentado na Seção 5.6;
3. **Módulo de Escalonamento Otimizado:** uso dos componentes 1 e 2 porém, com o módulo de escalonamento de mensagens otimizado conforme apresentado na Seção 5.5;
4. **Concentração de Feromônio:** uso dos componentes anteriores acrescentando o valor da concentração de feromônio (ver Equação 5.10 para $GPar_m^i = Int_m$), operador global do espaço populacional do protocolo Cultural GrAnt, no cálculo da utilidade dos nós. Essa análise investiga a influência ao acrescentar uma busca global via a meta-heurística ACO;
5. **Métrica Grau de Parentesco:** uso dos componentes anteriores mais a informação sobre o parentesco de cada mensagem m em um nó i ($GPar_m^i$), conforme visto nas Seções 5.2.3 e 5.3.2, de modo a determinar quando o feromônio deve influenciar no encaminhamento das mensagens. Essa análise investiga a influência do feromônio apenas nos nós intermediários (Int_m) da rede, isto é, o feromônio não é considerado na utilidade dos nós i e j se o nó i originou ($Orig_m$) m ;
6. **Conhecimento de Domínio 1a** ($status_busca = explora$): uso dos componentes anteriores mais o conhecimento sobre o grau de estagnação tanto do nó i ($GEst_i$) quanto de sua rede de relacionamentos ($GEst_{rede}^i$), conforme descrito na Seção 5.2.4.

Esse conhecimento determina quando o nó i deve ou não explorar o ambiente, encaminhando uma FA com a mensagem m , ao se deparar com uma situação onde as utilidades dos nós i e j são iguais. Nesse caso, a exploração ocorre no nó i se este originou a mensagem m ($Orig_m$) ou se ele for um nó intermediário (Int_m) com grau de estagnação alto ($Dom^i = alto$, ver Seção 5.3.2);

7. **Conhecimento Situacional:** uso dos componentes anteriores mais o conhecimento situacional (ver Seção 5.3.2) para restringir o encaminhamento das mensagens apenas aos nós mais promissores;
8. **Conhecimento Histórico:** uso dos componentes anteriores mais o conhecimento histórico (ver Seção 5.3.2) para intensificar as boas soluções previamente conhecidas;
9. **Conhecimento de Domínio 1b** ($status_busca = intensifica$): uso dos componentes anteriores mais o conhecimento sobre o grau de estagnação do nó i e da sua rede de relacionamentos para determinar se o conhecimento histórico deve ou não exercer influência na intensificação das boas soluções conhecidas. Nesse caso, o conhecimento histórico apenas não é utilizado no nó i se ele for um nó intermediário (Int_m) com grau de estagnação baixo ($Dom^i = baixo$, ver Seção 5.3.2).

Tabela 5: Análise Aditiva dos Componentes do Protocolo Cultural GrAnt

Componentes	Entrega de Mensagens %	Replicação de Mensagens
1. Função Heurística	PoI: 29,55 ± 0,15 || WD: 12,39 ± 0,19	PoI: 35,29 ± 0,20 || WD: 390,05 ± 5,52
2. + Módulo Descarte Otimizado	PoI: 43,98 ± 0,17 || WD: 28,33 ± 0,56	PoI: 20,61 ± 0,10 || WD: 166,41 ± 3,25
3. + Módulo de Escalonamento Otimizado	PoI: 46,26 ± 0,18 || WD: 53,38 ± 0,60	PoI: 18,86 ± 0,08 || WD: 85,87 ± 0,94
4. + Concentração de Feromônio	PoI: 45,86 ± 0,22 || WD: 54,73 ± 0,65	PoI: 16,69 ± 0,09 || WD: 68,95 ± 1,06
5. + Métrica Grau de Parentesco	PoI: 48,61 ± 0,20 || WD: 54,97 ± 0,61	PoI: 15,97 ± 0,08 || WD: 68,62 ± 0,96
6. + Conhecimento de Domínio 1a	PoI: 49,40 ± 0,21 || WD: 64,26 ± 0,63	PoI: 15,11 ± 0,09 || WD: 43,18 ± 0,41
7. + Conhecimento Situacional	PoI: 56,70 ± 0,27 || WD: 61,04 ± 0,68	PoI: 6,86 ± 0,04 || WD: 10,87 ± 0,11
8. + Conhecimento Histórico	PoI: 58,93 ± 0,19 || WD: 63,70 ± 0,69	PoI: 10,37 ± 0,05 || WD: 19,04 ± 0,16
9. + Conhecimento de Domínio 1b	PoI: 58,93 ± 0,19 || WD: 63,19 ± 0,72	PoI: 10,37 ± 0,05 || WD: 12,43 ± 0,12

A primeira parte da Tabela 5, dos componentes de 1 a 4, representa o protocolo proposto considerando apenas a meta-heurística ACO. É possível verificar que a cada componente adicionado as duas métricas são melhoradas para ambos os cenários: aumenta-se o percentual de entrega de mensagens e reduz-se a relação de mensagens replicadas. A única exceção fica por conta do operador de concentração de feromônio que obteve uma pequena queda de 0,86% no percentual de entrega de mensagens no cenário PoI, porém com uma redução de 11,51% na relação de mensagens replicadas. Essa queda de desempenho no percentual de entrega é solucionada ao considerar a influência da concentração de feromônio apenas nos nós intermediários (através do uso da métrica básica grau de

parentesco, ver componente 5 da Tabela 5). Com esse conhecimento a informação sobre o feromônio obteve um aumento no percentual de entrega das mensagens de 5,08% (PoI) e 2,98% (WD) com uma redução de 15,32% (PoI) e 25,14% (WD) na relação de mensagens replicadas.

A partir da segunda parte da Tabela 5 é possível verificar a influência completa dos novos componentes aplicados ao protocolo Cultural GrAnt (grau de parentesco e espaço de crenças do AC). Ao comparar o resultado obtido pela meta-heurística ACO pura (componente 4) com o resultado final do desempenho do protocolo com os conhecimentos do AC (componente 9) é possível verificar um aumento de 28,50% (PoI) e 15,45% (WD) no percentual de entrega de mensagens com uma redução de 37,87% (PoI) e 81,97% (WD) na relação de mensagens replicadas.

A Tabela 6 apresenta a análise eliminatória (para ambos os cenários PoI e WD) dos conhecimentos do espaço de crenças do AC e dos módulos de escalonamento e gerenciamento de *buffer* incorporados ao protocolo Cultural GrAnt. Através desta tabela pode-se inferir as seguintes observações a respeito da influência dos componentes:

- **Conhecimento de Domínio:** o conhecimento de domínio tem como objetivo aumentar o percentual de entrega de mensagens e reduzir a relação de replicação e descarte destas. Isso é particularmente verdadeiro no cenário WD onde são encontrados os nós com grau de estagnação abaixo da média da rede e, conseqüentemente, onde o conhecimento de domínio exerce maior influência. É possível observar que para o cenário WD sem esse conhecimento reduziu-se o percentual de entrega das mensagens em 1,40% e aumenta-se em 92,28% a relação de mensagens replicadas;
- **Conhecimento Situacional:** como o objetivo do conhecimento situacional é restringir de forma dinâmica o encaminhamento de FAs (juntamente com as mensagens de dados) aos bons encaminhadores, sua influência maior é na relação de mensagens replicadas e no percentual de mensagens descartadas. Sem a influência desse conhecimento, é possível verificar um aumento de 51,78% (PoI) e 248,51% (WD) na relação de mensagens replicadas. Além do aumento na relação de mensagens replicadas, no cenário PoI, sem a influência do conhecimento situacional, há uma redução no percentual de entrega de mensagens de 9,15% e no cenário WD há um aumento no percentual de entrega de apenas 1,65%;
- **Conhecimento Histórico:** como o objetivo do conhecimento histórico é intensificar boas soluções já conhecidas, sua influência é maior no percentual de entrega de mensagens. No cenário WD, por exemplo, sem a influência do conhecimento

histórico, há uma redução de 3,78% no percentual de entrega de mensagens com um custo maior na relação de replicação de mensagens (12,55%);

- **Módulo de Escalonamento:** ao utilizar um módulo de escalonamento apenas FIFO, onde as mensagens são enviadas conforme sua ordem de chegada, no cenário WD, por exemplo, há uma redução de 8,47% na taxa de entrega de mensagens e um aumento de 8,45% na relação de mensagens replicadas na rede;
- **Módulo de Gerenciamento de *Buffer*:** ao utilizar um módulo de gerenciamento de *buffer* do tipo FIFO, no cenário PoI, por exemplo, há uma redução de 2,98% na taxa de mensagens entregues e um aumento de 14,75% na relação de mensagens replicadas;
- **Módulos de Escalonamento e Gerenciamento de *Buffer*:** aqui avalia-se a perda de desempenho ao utilizar ambos os módulos de escalonamento e gerenciamento de *buffer* do tipo FIFO. Há uma redução de 10,40% (cenário PoI) e 10,21% (cenário WD) na taxa de entrega de mensagens e um aumento de 23,43% (cenário PoI) e 12,07% (cenário WD) na relação de mensagens replicadas.

Tabela 6: Análise Eliminatória dos Componentes do Protocolo Cultural GrAnt

Cultural GrAnt Completo	Entrega de Mensagens %	Replicação de Mensagens
Todos os Componentes	PoI: 58,93 ± 0,19 || WD: 63,19 ± 0,72	PoI: 10,37 ± 0,05 || WD: 12,43 ± 0,12
Sem Conhecimento de Domínio	PoI: 57,90 ± 0,22 || WD: 62,30 ± 0,67	PoI: 10,45 ± 0,04 || WD: 23,90 ± 0,28
Sem Conhecimento Situacional	PoI: 53,54 ± 0,22 || WD: 64,23 ± 0,64	PoI: 15,74 ± 0,07 || WD: 43,32 ± 0,43
Sem Conhecimento Histórico	PoI: 56,70 ± 0,27 || WD: 61,04 ± 0,68	PoI: 6,86 ± 0,04 || WD: 10,87 ± 0,11
Sem Módulo de Escalonamento Otimizado	PoI: 57,05 ± 0,20 || WD: 57,84 ± 0,63	PoI: 10,75 ± 0,05 || WD: 13,48 ± 0,12
Sem Módulo de Descarte Otimizado	PoI: 57,17 ± 0,19 || WD: 62,40 ± 0,69	PoI: 11,90 ± 0,05 || WD: 12,87 ± 0,14
Sem Módulo de Escalonamento e Descarte Otimizados	PoI: 52,80 ± 0,18 || WD: 56,74 ± 0,66	PoI: 12,80 ± 0,05 || WD: 13,93 ± 0,14

6.3.2 ANÁLISE DAS MENSAGENS DE FORMIGAS DE RETORNO

Uma vez que o comportamento das formigas de retorno influencia diretamente a concentração de feromônio, a presente seção investiga como o encaminhamento das mensagens FRs é realizado quando comparado com o encaminhamento de suas respectivas FAs. Para isso, é avaliado o número de saltos que cada mensagem visita quando é enviada para o seu destino (mensagens FAs) e do destino (mensagens FRs). Como descrito na Seção 5.4.2, encontrar o caminho reverso completo obtido pela FA pode ser difícil ou demandar um longo período de tempo. Entretanto, os resultados mostram que em média

as FRs encontram $55,48 \pm 0,17\%$ (PoI) e $58,40 \pm 0,30\%$ (WD) dos nós que participaram do encaminhamento das FAs. Apesar das características móveis dos cenários, esses resultados sugerem a presença de encontros repetitivos entre os nós, resultado da topografia dos nós e das rotinas das interações sociais.

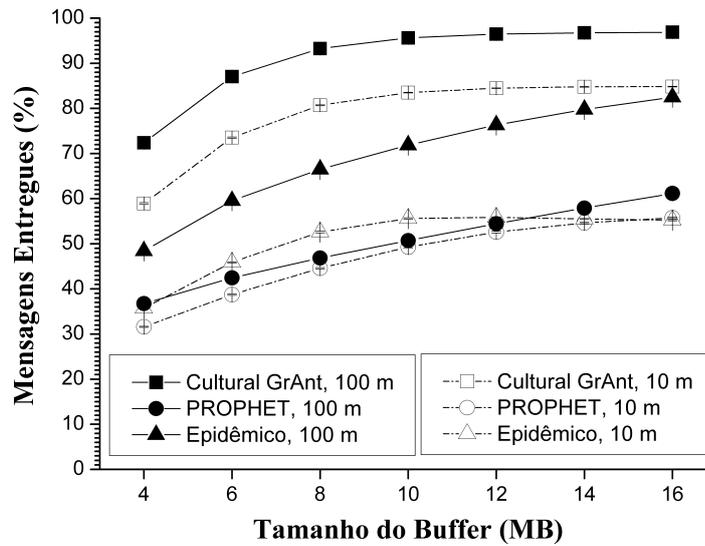
6.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO CULTURAL GRANT

A presente seção analisa o desempenho dos protocolos Cultural GrAnt, Epidêmico e PROPHET (estes dois últimos com um campo contador de saltos inserido nas mensagens de dados) nos cenários PoI e WD. Nestes experimentos, são considerados tamanhos diferentes de *buffer*, valores diferentes para o TTL das mensagens e tempos variados de simulação. Não é considerado um contador de saltos nas mensagens no protocolo Cultural GrAnt porque o componente de conhecimento situacional (uma das contribuições do protocolo) é capaz de limitar dinamicamente o número de mensagens encaminhadas (ver Seção 5.3.2). Ao contrário do Cultural GrAnt, os protocolos Epidêmico e PROPHET não fazem uso de tal conhecimento. Então, de modo a permitir comparações mais justas dos protocolos é estabelecido um campo contador de saltos de valor 11 (conforme utilizado no trabalho de Lindgren et al. (2004)) para ambos Epidêmico e PROPHET, uma vez que estes provêm um desempenho inferior sem um limitador no número de saltos.

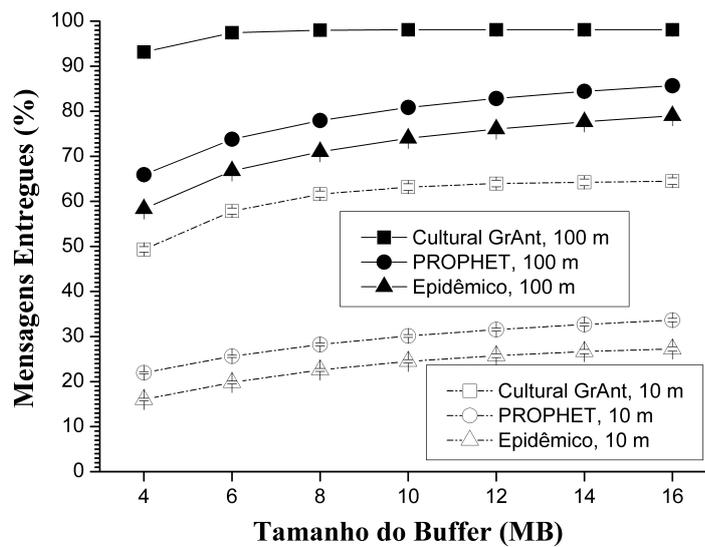
Ao longo desta seção, cada gráfico de comparação de desempenho contém seis curvas no total: duas para cada um dos protocolos testados (Cultural GrAnt, Epidêmico e PROPHET). As curvas com pontos vazios mostram os resultados onde os nós possuem uma interface com um alcance de comunicação de 10 metros e uma velocidade de transmissão de 2 Mbps. As curvas com pontos sólidos mostram os resultados onde os nós possuem uma interface com uma faixa de comunicação de 100 metros e uma velocidade de transmissão de 10 Mbps. Os resultados obtidos representam valores médios de trinta execuções e intervalos de confiança de 95%.

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

As Figuras 25(a), 25(b), 26(a), e 26(b) apresentam os resultados obtidos ao variar o tamanho do *buffer* dos nós. Como pode ser visto, quanto maior o tamanho do *buffer* dos nós, mais mensagens são entregues aos seus destinos e menor é a relação de mensagens replicadas para os três protocolos.



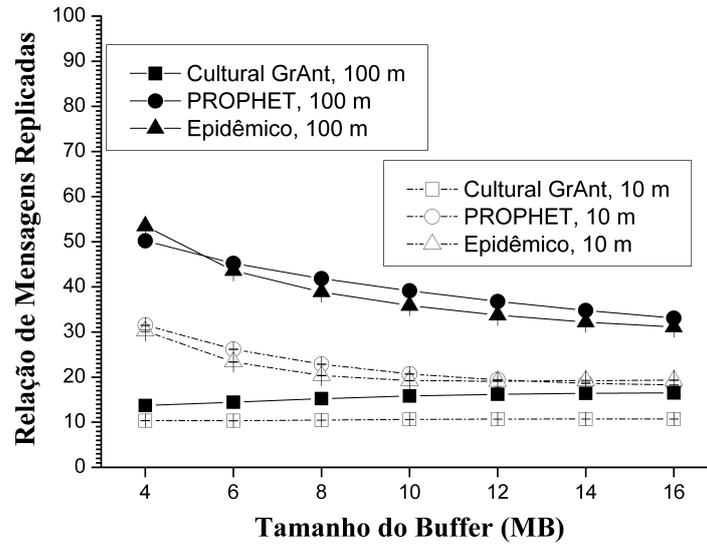
(a) Cenário PoI



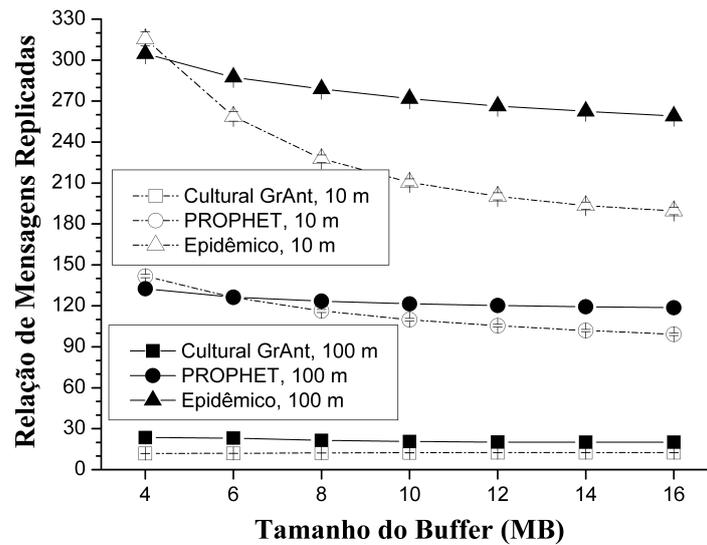
(b) Cenário WD

Figura 25: Percentual de Mensagens Entregues em relação ao Tamanho do *Buffer*

Conforme mostrado na Figura 26(a), a única exceção é no protocolo Cultural GrAnt no cenário PoI. Neste caso, há um aumento na relação de mensagens replicadas à medida que o tamanho do *buffer* aumenta. Considerando a diferença na relação de replicação entre os tamanhos de *buffer* de 4 MB e 16 MB, o aumento é de apenas 0,37 de replicação na faixa de comunicação de 10 m e 2,76 de replicação na faixa de 100 m. Porém, este aumento apresenta tendência de queda conforme o tamanho do *buffer* aumenta (por exemplo, na variação de um *buffer* de 14 MB para 16 MB o aumento é de apenas 0,01 na



(a) Cenário PoI



(b) Cenário WD

Figura 26: Relação de Mensagens Replicadas em relação ao Tamanho do *Buffer*

faixa de 10 m e 0,07 na faixa de 100 m). Esse desempenho no cenário PoI ocorre devido ao fato de que, neste ambiente, o contato entre os nós ocorre de forma mais aleatória se comparado ao comportamento dos nós no cenário WD. Isto faz com que os nós com mais mensagens armazenadas em seus *buffers* tenham que encaminhar mais cópias de custódias das mensagens de modo que estas eventualmente alcancem seus destinos.

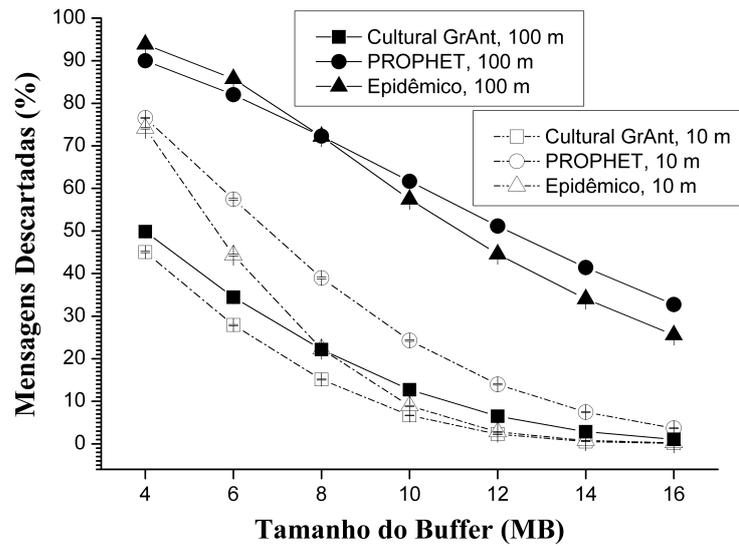
A partir das Figuras 25 e 26 observa-se ainda que, para todos os tamanhos de *buffer*, nos dois cenários de simulação, e para ambas as faixas de comunicação (10 m e

100 m), o Cultural GrAnt obtém os melhores resultados em termos do percentual de entrega de mensagens e relação de mensagens replicadas. No cenário PoI, para um *buffer* de 8 MB e uma faixa de comunicação de 10 m, o Cultural GrAnt entrega com sucesso $80,70 \pm 0,17\%$ das mensagens (contra apenas $52,61 \pm 0,17\%$ de mensagens entregues pelo Epidêmico e $44,60 \pm 0,14\%$ entregues pelo PROPHET) com uma replicação de mensagens de $10,49 \pm 0,03$ ($20,35 \pm 0,07$ no Epidêmico e $22,88 \pm 0,09$ no PROPHET). Já com uma faixa de comunicação de 100 m, onde um número maior de contatos é estabelecido, o Cultural GrAnt é capaz de entregar $93,27 \pm 0,10\%$ das mensagens (contra $66,52 \pm 0,16\%$ do Epidêmico e $46,84 \pm 0,15\%$ do PROPHET) com uma replicação de mensagens de apenas $15,23 \pm 0,06$ ($38,90 \pm 0,13$ no Epidêmico e $41,85 \pm 0,19$ no PROPHET). No cenário WD, o Cultural GrAnt entrega $61,60 \pm 0,70\%$ das mensagens com uma replicação de apenas $12,24 \pm 0,11$ (na faixa de comunicação de 10 m) e $98 \pm 0,09\%$ de entrega com $21,57 \pm 0,57$ de replicação de mensagens (na faixa de comunicação de 100 m). O PROPHET entrega $28,25 \pm 0,32\%$ das mensagens com $116,33 \pm 1,10$ de replicação (10 m) e $77,96 \pm 0,32\%$ das mensagens com $123,48 \pm 0,78$ de replicação (100 m). O Epidêmico entrega $22,60 \pm 0,33\%$ das mensagens com replicação de $227,85 \pm 2,79$ (faixa de 10 m) e $71,02 \pm 0,30\%$ com replicação de $278,88 \pm 1,73$ (faixa de 100 m).

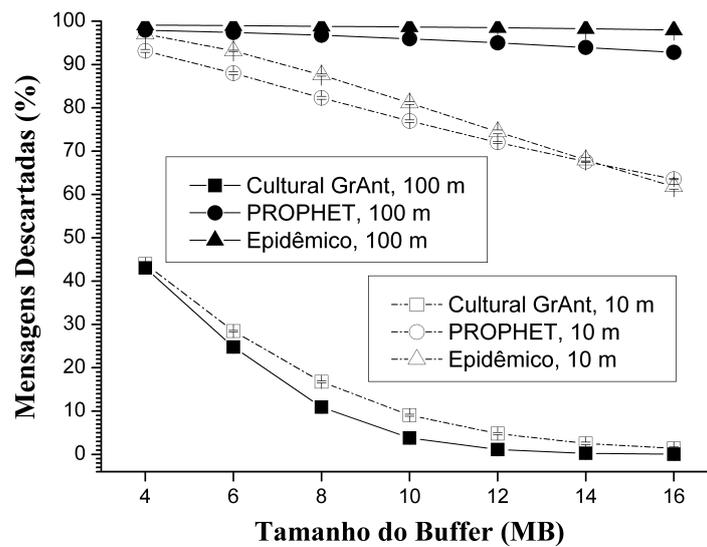
Os protocolos PROPHET e Epidêmico apresentam desempenho inferior em termos do percentual de mensagens entregues e da relação de mensagens replicadas, em ambos os cenários, se comparados ao protocolo Cultural GrAnt, porque nenhum deles possui um processo para limitar dinamicamente o número de encaminhamento de réplicas de mensagens e auxiliar na escolha do melhor encaminhador de mensagens dentre os candidatos como faz o Cultural GrAnt com o uso do componente de conhecimento situacional do seu espaço de crenças. Esses resultados mostram que um nó com um protocolo eficiente de roteamento precisa dedicar somente um pequeno espaço do seu *buffer* para as custódias das mensagens.

As Figuras 27(a) e 27(b) mostram que, em relação ao percentual de mensagens descartadas pelos três protocolos, quando o tamanho do *buffer* aumenta, menos mensagens precisam ser descartadas pelos nós quando há a necessidade de abrigar novas mensagens.

Para todos os tamanhos de *buffer* e para ambos os cenários PoI e WD, o desempenho do protocolo Cultural GrAnt é superior ao dos protocolos PROPHET e Epidêmico. Por exemplo, no cenário PoI, para um *buffer* de 8 MB, o Cultural GrAnt descarta apenas $15,31 \pm 0,12\%$ (faixa de 10 m) e $22,17 \pm 0,23\%$ das mensagens (faixa de 100 m), enquanto o PROPHET descarta $39 \pm 0,21\%$ (10 m) e $72 \pm 0,15\%$ (100 m), e o Epidêmico descarta $22 \pm 0,21\%$ (10 m) e $72 \pm 0,19\%$ (100 m). No cenário WD, o número de mensa-



(a) Cenário PoI



(b) Cenário WD

Figura 27: Percentual de Mensagens Descartadas em relação ao Tamanho do *Buffer*

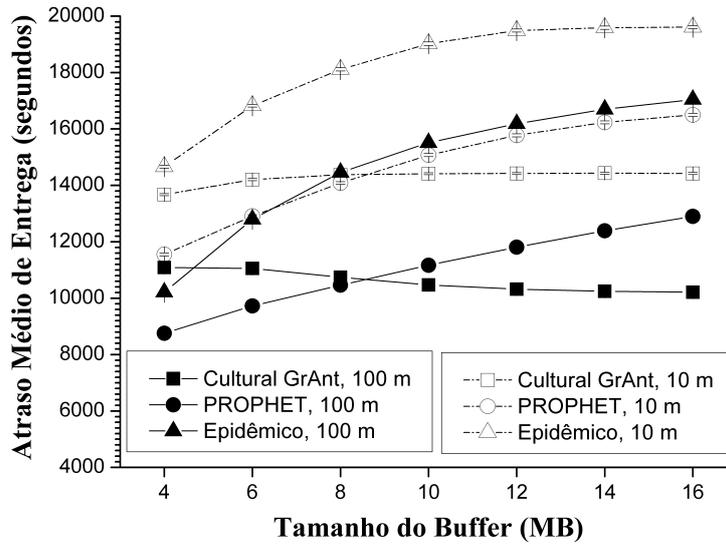
gens descartadas pelos protocolos PROPHET e Epidêmico é ainda maior: o PROPHET descarta $82 \pm 0,20\%$ (10 m) e $97 \pm 0,06\%$ das mensagens (100 m), e o Epidêmico descarta $88 \pm 0,24\%$ (10 m) e $99 \pm 0,01\%$ das mensagens (100m) enquanto o Cultural GrAnt descarta apenas $17 \pm 0,34\%$ (10 m) e $11 \pm 0,69\%$ das mensagens (100 m). Aqui vale destacar que o Cultural GrAnt, diferente do comportamento analisado no Epidêmico e PROPHET, reage bem, mesmo em cenários onde os nós estão mais conectados como ocorre nas simulações realizadas com uma faixa de comunicação de 100 metros. No cenário PoI, há um

aumento de apenas 7 pontos percentuais na taxa de descarte de mensagens enquanto que no cenário WD há um decréscimo de 6 pontos percentuais. Com isso é possível verificar que a habilidade do protocolo Cultural GrAnt em extrair informações *online* das condições dinâmicas da rede faz com que este possa ser explorado em diferentes cenários de conectividade. Além disso, o Cultural GrAnt supera os protocolos Epidêmico e PROPHET na relação de mensagens descartadas, uma vez que limita o número de encaminhamento de réplicas de mensagens na rede na tentativa de reduzir o consumo do espaço de armazenamento no *buffer* dos nós (evitando o *overflow* dos *buffers*) e, conseqüentemente, evitar a necessidade de descartar mensagens para abrigar novas.

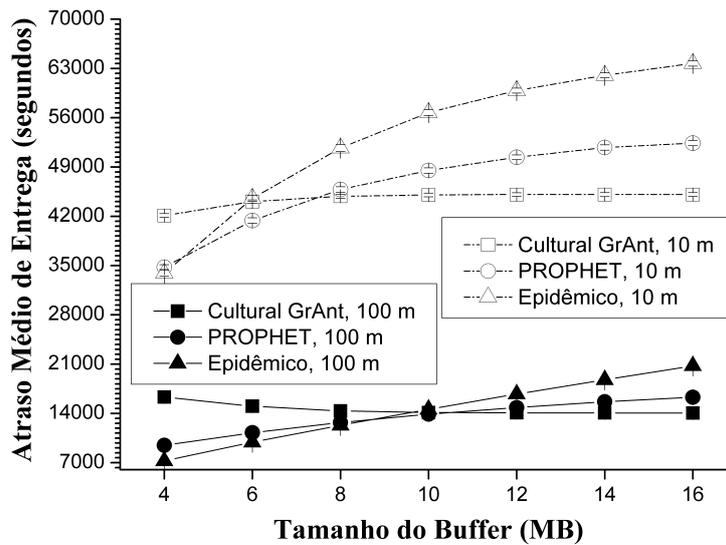
A partir dos resultados anteriores, conclui-se ainda que o protocolo PROPHET tem melhor desempenho (em termos do percentual de mensagens entregues, relação de replicação e percentual de mensagens descartadas) que o protocolo Epidêmico no cenário WD. Isso ocorre porque o PROPHET possui uma técnica de escalonamento de mensagens mais inteligente e seu roteamento confia no padrão repetitivo dos contatos, característica do cenário WD. Já no cenário PoI, justamente por ser um ambiente mais aleatório, o desempenho do Epidêmico é melhor que o do PROPHET. A relação de mensagens replicadas no cenário PoI é maior no protocolo PROPHET pelo fato de que essa métrica é função do número de mensagens entregues com sucesso no destino. Dessa forma, apesar do número de mensagens replicadas pelo PROPHET ter sido um pouco menor se comparado ao Epidêmico, o PROPHET entrega menos mensagens aos seus destinos o que justifica sua maior relação de mensagens replicadas.

No que diz respeito ao atraso médio das mensagens entregues, nos cenários PoI (Figura 28(a)) e WD (Figura 28(b)), os protocolos PROPHET e Epidêmico obtêm um atraso maior conforme o tamanho do *buffer* aumenta. Isto é consequência do número maior de mensagens replicadas por estes. Além disso, é normal esperar que o aumento do *buffer* acarrete em um maior número de mensagens esperando para serem escalonadas (isto é, encaminhadas para outros nós) e, conseqüentemente, aumente o atraso na entrega destas mensagens.

Ao contrário, o protocolo Cultural GrAnt se comporta da seguinte forma: nos dois cenários, conforme o tamanho do *buffer* aumenta, há um pequeno aumento no atraso para a faixa de comunicação de 10 m (com o valor do atraso permanecendo muito próximo a partir de um tamanho de *buffer* de 8 MB) e uma redução na média dos atrasos para a faixa de 100 m. No primeiro caso, como os nós possuem uma interface com um menor alcance de comunicação, há um número menor de contatos por nó e com isso o número de mensagens encaminhadas também é reduzido. Assim, nos cenários considerados e para o protocolo



(a) Cenário PoI



(b) Cenário WD

Figura 28: Atraso Médio na Entrega das Mensagens em relação ao Tamanho do *Buffer*

Cultural GrAnt, um *buffer* de 8 MB já é suficiente para cada nó abrigar suas mensagens e as custódias provenientes de outros nós, justificando a pouca variação no atraso a partir desse tamanho de *buffer*. No segundo caso, com um alcance de comunicação maior, mais contatos são estabelecidos por cada nó, melhorando desta forma o processo de escolha dos encaminhadores de mensagens. Assim, mais rapidamente as mensagens são entregues aos seus destinos. Isso não é possível acontecer com os protocolos Epidêmico e PROPHEP porque estes não possuem um mecanismo que, com base na utilidade dos encaminhadores

já estabelecidos para cada mensagem, restrinja o encaminhamento de mensagens apenas aos bons encaminhadores e assim mais mensagens são replicadas por estes, fazendo com que o atraso médio de entrega destas aumente.

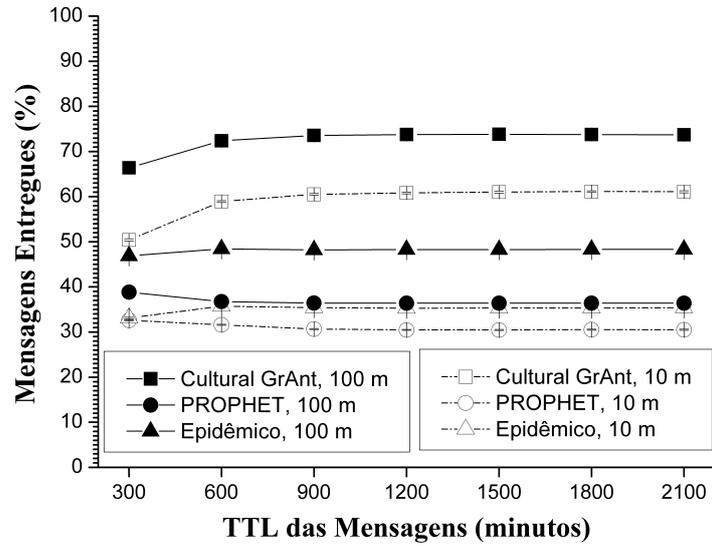
Nos cenários PoI e WD com uma faixa de comunicação de 10 m, o protocolo Cultural GrAnt obtém os menores atrasos para os tamanhos de *buffer* de 8 MB (cenário WD) ou 10 MB (cenário PoI) até o tamanho de 16 MB (cenários PoI e WD). O protocolo Epidêmico obtém os melhores tempos de atraso apenas no cenário WD e para o tamanho de *buffer* de 4 MB. Já o PROPHEt entrega as mensagens com menores atrasos com o *buffer* de 4 MB (cenário PoI), 6 MB (cenários PoI e WD) e 8 MB (cenário PoI). No cenário PoI com alcance de 100 m e para os tamanhos de *buffer* de 4 MB a 8 MB o protocolo PROPHEt obtém o menor atraso e o protocolo Cultural GrAnt é melhor para os tamanhos maiores de *buffer* (de 10 MB até 16 MB). No cenário WD com faixa de comunicação de 100 m, o protocolo Epidêmico obtém o menor atraso médio para os tamanhos de *buffer* de 4 MB a 8 MB, o PROPHEt apresenta o menor atraso para o *buffer* de 10 MB e o Cultural GrAnt apresenta os melhores resultados para os tamanho de *buffer* de 12 MB a 16 MB.

O atraso médio das mensagens é a única métrica na qual o protocolo Cultural GrAnt não é capaz de fornecer os melhores valores para todos os tamanhos de *buffer* e cenários de simulação. Isso é justificado pelo fato de que o protocolo Cultural GrAnt ao invés de propagar uma mensagem m para todos ou quase todos os nós encontrados, ele analisa com uma base maior de informações a utilidade dos nós candidatos e encaminha uma mensagem para um novo nó somente se este for mais promissor do que o último nó já encontrado e que tenha recebido uma réplica da mensagem m .

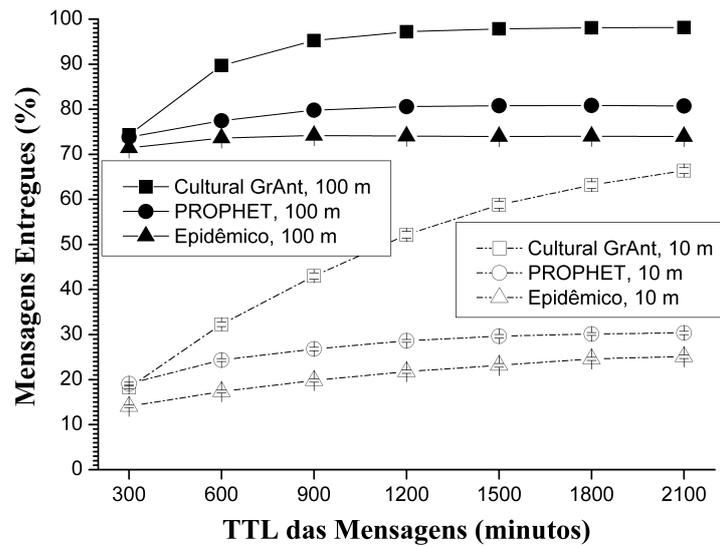
6.4.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO PARA VARIAÇÃO NO TTL DAS MENSAGENS

As Figuras 29 até 32 mostram o desempenho dos três protocolos em relação à variação do TTL das mensagens.

Em relação ao percentual de mensagens entregues com sucesso aos seus destinos, no cenário PoI (Figura 29(a)) os protocolos Epidêmico e PROPHEt não são muito sensíveis à variação do valor de TTL das mensagens. Os protocolos Epidêmico e PROPHEt obtém o melhor percentual de mensagens entregues com um valor de TTL de 600 e 300 minutos, respectivamente. Ao contrário, o protocolo Cultural GrAnt entrega mais mensagens com sucesso conforme o valor do TTL aumenta. Isso se deve a dois fatores: (1) os nós dispõem de mais tempo para obter informações mais atualizadas sobre a dinâmica



(a) Cenário PoI



(b) Cenário WD

Figura 29: Percentual de Mensagens Entregues em relação ao TTL das Mensagens

dos outros nós e, então, escolhem melhor os encaminhadores de mensagens mais promissores dentre os possíveis candidatos; (2) os nós que possuem custódias de mensagens têm mais tempo para tentar encontrar diretamente o destino de cada uma delas. No cenário WD, os três protocolos entregam mais mensagens conforme o valor do TTL aumenta (Figura 29(b)), apesar de este aumento ser bem mais significativo no protocolo Cultural GrAnt. Isso ocorre devido à mobilidade da maior parte dos nós no cenário WD ser menor se comparada à mobilidade dos nós no cenário PoI. Com um maior grau de estagnação dos

nós e, conseqüentemente, uma probabilidade menor dos nós se encontrarem, mais tempo cada mensagem precisa estar disponível na rede até que eventualmente possa encontrar seu destino (diretamente ou indiretamente via contatos intermediários).

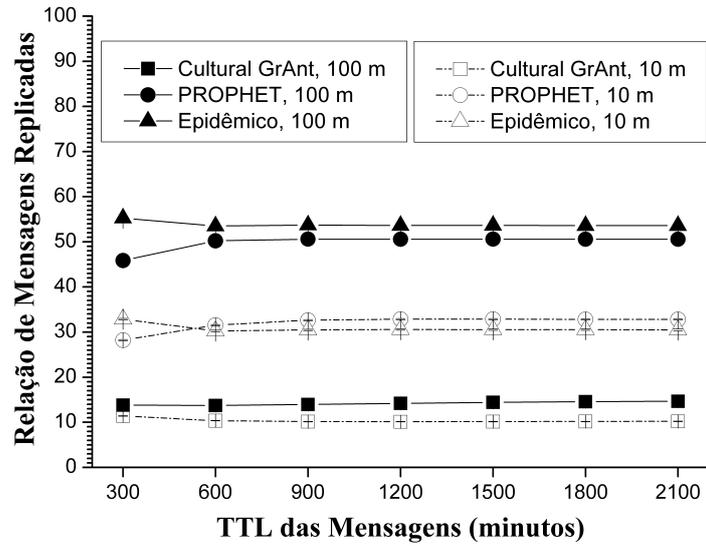
Conforme ilustra a Figura 30(a), a análise de replicação de mensagens mostra que no cenário WD menos mensagens são replicadas conforme o TTL aumenta. De acordo com a Figura 30(a), no cenário PoI, onde o padrão de mobilidade dos nós é mais aleatório do que no cenário WD, há pequenas oscilações nessa relação de replicação com a variação do TTL.

Em relação ao percentual de descarte de mensagens (Figura 31), verifica-se que os três protocolos descartam mais mensagens conforme o TTL aumenta justamente pelo fato de que as mensagens têm mais tempo para permanecer na rede podendo ser encaminhadas para mais nós.

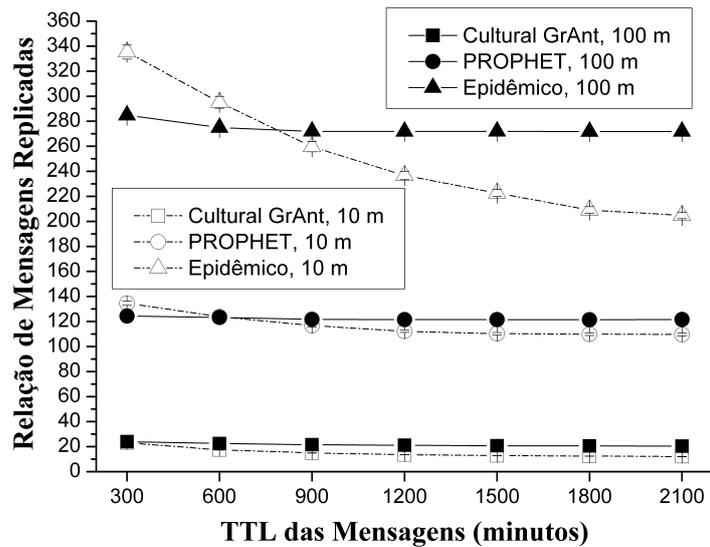
Quanto ao atraso médio na entrega das mensagens (Figura 32), em ambos os cenários e para os três protocolos, verifica-se um aumento no atraso conforme o TTL aumenta. No cenário PoI (Figura 32(a)), em ambas as faixas de comunicação, os menores valores de atraso são obtidos pelo protocolo PROPHET. No cenário WD (Figura 32(b)) com alcance de 10 m o protocolo Cultural GrAnt é o que entrega as mensagens em menos tempo e no alcance de 100 m o PROPHET obtém os menores valores.

Em resumo, para ambos os cenários PoI e WD, com uma faixa de comunicação de 10 m ou 100 m e em todas as variações do valor de TTL das mensagens (conforme pode ser visto nas Figuras 29 até 31), o protocolo Cultural GrAnt entrega mais mensagens, replica e descarta menos mensagens que os protocolos Epidêmico e PROPHET.

No cenário PoI com uma faixa de comunicação de 10 m e TTL de 2100 minutos, por exemplo, o protocolo Cultural GrAnt entrega $61,09 \pm 0,23\%$ das mensagens (contra $30,50 \pm 0,14\%$ do PROPHET e $35,39 \pm 0,17\%$ do Epidêmico), com apenas $10,21 \pm 0,05$ de relação de replicação de mensagens ($32,82 \pm 0,17$ do PROPHET e $30,47 \pm 0,18$ do Epidêmico) e $55,81 \pm 0,20\%$ de mensagens descartadas ($93,73 \pm 0,03\%$ do PROPHET e $93,36 \pm 0,03\%$ do Epidêmico). A única desvantagem do protocolo Cultural GrAnt é o seu aumento no atraso da entrega das mensagens (20.658 ± 121 segundos) em relação ao Epidêmico (16.626 ± 217 segundos) e PROPHET (12.182 ± 77 segundos). Porém, esse aumento é justificado pelo fato de o protocolo Cultural GrAnt entregar mais mensagens e devido a análise de desempenho do protocolo contabilizar o atraso das mensagens que normalmente nem seriam entregues pelos protocolos PROPHET e Epidêmico. Além disso, esse atraso maior já era esperado, pois conforme explicado na Seção 4.1, o protocolo Cultural



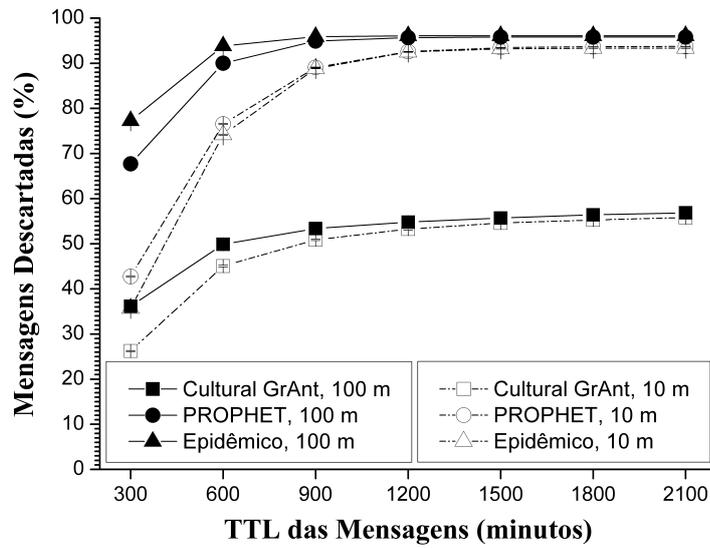
(a) Cenário PoI



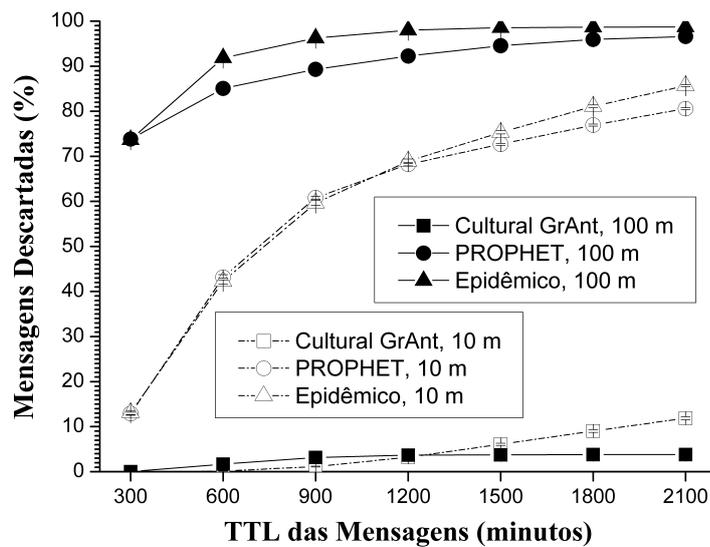
(b) Cenário WD

Figura 30: Relação de Mensagens Replicadas em relação ao TTL das Mensagens

GrAnt tem como objetivos maximizar a taxa de entrega de mensagens na rede, minimizar a taxa de perda de mensagens na rede e minimizar a taxa de mensagens replicadas na rede. Justamente com esses objetivos em mente é que o protocolo requer mais tempo para analisar e escolher os encaminhadores mais promissores para cada mensagem. No cenário WD, nas mesmas condições (faixa de comunicação de 10 m e TTL de 2100 minutos), o protocolo Cultural GrAnt entrega $66,39 \pm 0,65\%$ das mensagens (contra $30,37 \pm 0,36\%$ do PROPHEt e $25,11 \pm 0,40\%$ do Epidêmico), gera apenas $12,10 \pm 0,11$ de replicação



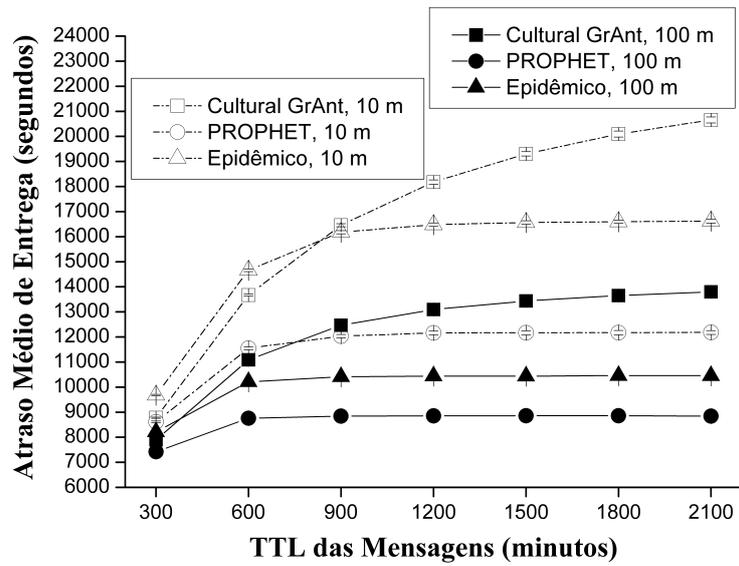
(a) Cenário PoI



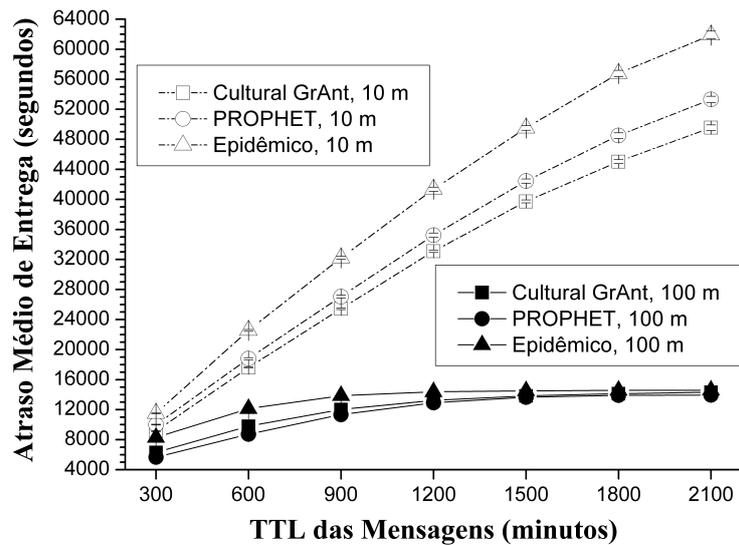
(b) Cenário WD

Figura 31: Percentual de Mensagens Descartadas em relação ao TTL das Mensagens

de mensagens (contra os $109,66 \pm 1,04$ do PROPHEt e $204,83 \pm 2,56$ do Epidêmico), descarta apenas $11,88 \pm 0,32\%$ das mensagens (contra $80,59 \pm 0,20\%$ de descarte provido pelo PROPHEt e $85,70 \pm 0,22\%$ pelo Epidêmico) e entrega as mensagens com o menor atraso médio, de 49.562 ± 397 segundos (contra 53.316 ± 433 segundos do PROPHEt e 61.897 ± 518 segundos do Epidêmico).



(a) Cenário PoI



(b) Cenário WD

Figura 32: Atraso Médio na Entrega das Mensagens em relação ao TTL das Mensagens

6.4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO PARA VALORES LIMITES DE *BUFFER* E TTL DAS MENSAGENS

De acordo com a análise da variação do tamanho do *buffer*, o melhor desempenho no percentual de entrega de mensagens fornecido pelo protocolo Cultural GrAnt se deve em parte ao número menor de mensagens replicadas na rede o que ajuda a evitar o *overflow* do *buffer* dos nós e, conseqüentemente, o número de mensagens descartadas. Quanto menos mensagens de dados de outros nós um nó tiver em seu *buffer*, mais espaço

de armazenamento ele terá para armazenar as suas próprias mensagens. Mantendo esse objetivo em mente, o protocolo Cultural GrAnt visa restringir dinamicamente o número de mensagens replicadas na rede, mantendo uma qualidade boa na entrega de mensagens. Por outro lado, os protocolos Epidêmico e PROPHET não fornecem tal mecanismo. Ao invés disso, eles confiam na replicação de mensagens na tentativa de entregá-las com sucesso aos seus destinos. Embora se pretenda mostrar que um nó com um protocolo de roteamento eficiente pode dedicar apenas um pequeno espaço de seu *buffer* para abrigar as custódias de mensagens, outros experimentos foram realizados com um tamanho de *buffer* de 260 MB, onde não é necessário o descarte de mensagens ao considerar uma faixa de comunicação de 10 m e os seguintes TTL de mensagens para cada cenário: 600 minutos para o cenário PoI e 1800 minutos para o cenário WD. Também foram realizados experimentos considerando um TTL infinito em ambos os cenários de modo a demonstrar que o desempenho do Cultural GrAnt é bastante susceptível às mudanças nos valores de TTL uma vez que ele depende do tempo para analisar a dinâmica da rede e escolher melhor os encaminhadores das mensagens.

Como mostra a Tabela 7, para um tamanho de *buffer* de 260 MB e valores de TTL finitos, o protocolo Epidêmico fornece os melhores resultados no percentual de entrega de mensagens, seguido pelo protocolo PROPHET.

Tabela 7: Ganho de Desempenho dos Protocolos em um tamanho de *buffer* de 260MB.

Protocolo	TTL de Mensagens	Entrega de Mensagens	Replicação de Mensagens	Descarte de Mensagens	Atraso Entrega (seg.)
Cultural GrAnt	600 PoI	92,75 ± 0,16%	20,97 ± 0,12	0%	12.247 ± 131
	1800 WD	65,13 ± 1,81%	11,03 ± 0,16	0%	45.530 ± 1019
	Infinito PoI	98,14 ± 0,23%	28,12 ± 0,34	0%	14.879 ± 42
	Infinito WD	81,26 ± 1,14%	9,48 ± 0,25	0%	94.117 ± 4167
PROPHET	600 PoI	92,77 ± 0,23%	77,84 ± 0,65	0%	14.217 ± 95
	1800 WD	75,68 ± 1,73%	121,32 ± 4,79	0%	51.585 ± 762
	Infinito PoI	85,17 ± 0,27%	109,81 ± 1,34	91.56 ± 0,08%	26.626 ± 659
	Infinito WD	82,45 ± 0,47%	198,13 ± 7,10	82.31 ± 0,69%	95.119 ± 3041
Epidêmico	600 PoI	96,48 ± 0,22%	94,65 ± 0,59	0%	15.724 ± 154
	1800 WD	78,13 ± 0,43%	161,97 ± 4,07	0%	56.607 ± 311
	Infinito PoI	88,12 ± 0,59%	111,87 ± 0,37	91.93 ± 0,07%	40.606 ± 954
	Infinito WD	83,91 ± 0,99%	266,82 ± 5,64	87.04 ± 0,42%	98.801 ± 3227

Isso ocorre porque ambos os protocolos Epidêmico e PROPHET encaminham mais réplicas de mensagens do que o protocolo Cultural GrAnt e, desde que os recursos (isto é, espaço de armazenamento) sejam suficientes para armazenar as custódias das mensagens, tem-se um aumento na taxa de entrega de mensagens. Entretanto, ao considerar um valor TTL infinito, o protocolo Cultural GrAnt tem um desempenho próximo ao dos protocolos Epidêmico e PROPHET no cenário WD e obtém a maior taxa de entrega de

mensagens no cenário PoI uma vez que ele tem mais tempo para analisar e inferir os melhores encaminhadores para cada mensagem de dados. Apesar desses resultados em relação à taxa de entrega de mensagens, é importante destacar que os protocolos de roteamento para DTNs devem garantir um bom compromisso entre as taxas de entrega e replicação de mensagens e, conseqüentemente, o percentual de mensagens descartadas. Em todos os cenários para os três valores de TTL, o desempenho do protocolo Cultural GrAnt é superior ao dos protocolos Epidêmico e PROPHET: o Cultural GrAnt reduz significativamente a relação de mensagens replicadas e o percentual de mensagens descartadas na rede, além de reduzir o atraso na entrega das mensagens.

Ao considerar um valor de TTL infinito e o cenário PoI, o protocolo Cultural GrAnt entrega 11,37% a mais de mensagens que o Epidêmico e 15,23% a mais que o PROPHET com uma redução nas seguintes métricas: atraso de entrega (63,36% a menos se comparado com o Epidêmico e 44,12% se comparado com o PROPHET), relação de replicação de bytes de mensagens (74,86% a menos que o Epidêmico e 74,39% a menos que o PROPHET) e percentual de mensagens descartadas (91,93% a menos que o Epidêmico e 91,56% a menos que o PROPHET). Já no cenário WD, o Cultural GrAnt entrega apenas 3,16% a menos de mensagens que o Epidêmico e 1,45% a menos que o PROPHET porém com uma redução nas seguintes métricas: atraso de entrega (4,74% a menos se comparado com o Epidêmico e 1,05% se comparado com o PROPHET), relação de replicação de bytes de mensagens (96,44% a menos que o Epidêmico e 95,21% a menos que o PROPHET) e percentual de mensagens descartadas (87,04% a menos que o Epidêmico e 82,31% a menos que o PROPHET). Com esses resultados, conclui-se que o protocolo Cultural GrAnt é mais adaptável às exigências dos protocolos de roteamento para DTNs.

6.4.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO PARA VARIAÇÃO NO TEMPO DE SIMULAÇÃO

A Tabela 8 mostra a média e o intervalo de confiança de 95% do percentual de entrega de mensagens obtido pelos três protocolos ao longo do tempo de simulação nos cenários PoI e WD com uma faixa de comunicação de 10 m.

O objetivo destes experimentos é mostrar que conforme o tempo de simulação aumenta, melhores percentuais de entrega de mensagens são obtidos pelos três protocolos em ambos os cenários. As exceções ficam por conta dos protocolos PROPHET e Epidêmico que apresentam uma pequena queda no percentual de entrega com a mudança no tempo de simulação de 1600.000 para 2000.000 segundos em ambos os cenários PoI e WD (sendo que o PROPHET obteve o melhor resultado no cenário PoI com o tempo de simulação

de 1600.000 segundos), e o protocolo Cultural GrAnt apresenta uma queda apenas no cenário WD.

Embora tenha ocorrido um aumento no percentual de entrega de mensagens para os três protocolos se comparado o tempo de 400.000 com o tempo de 2800.000 segundos, o desempenho do protocolo Cultural GrAnt é bem superior (ganho de 4,19 pontos percentuais no cenário PoI e 10,26 no cenário WD) se comparado ao desempenho dos protocolos PROPHET (apenas 0,6 pontos percentuais de ganho no cenário PoI e 2,65 no cenário WD) e Epidêmico (ganho de 1,11 no cenário PoI e 2,49 no cenário WD). Esse ganho é justificado pelo fato de que quanto mais informação é obtida pelo protocolo Cultural GrAnt ao longo do tempo, melhor é a escolha entre os encaminhadores de mensagens candidatos, já que o protocolo é baseado em histórico e médias colhidas ao longo do funcionamento da rede.

Tabela 8: Percentual de Entrega de Mensagens em Diferentes Tempos de Simulação

Tempo de Simulação (segundos)	Cultural GrAnt Entrega de Mensagens Cenário PoI / WD	PROPHET Entrega de Mensagens Cenário PoI / WD	Epidêmico Entrega de Mensagens Cenários PoI / WD
400.000	56,83 ± 0,26% / 58,78 ± 0,88%	31,26 ± 0,16% / 29,23 ± 0,40%	35,03 ± 0,18% / 23,77 ± 0,43%
800.000	58,93 ± 0,19% / 63,19 ± 0,73%	31,60 ± 0,11% / 30,14 ± 0,31%	35,74 ± 0,15% / 24,49 ± 0,35%
1200.000	59,80 ± 0,15% / 65,65 ± 0,67%	31,70 ± 0,10% / 31,02 ± 0,29%	35,91 ± 0,13% / 25,51 ± 0,32%
1600.000	60,49 ± 0,13% / 67,81 ± 0,67%	31,90 ± 0,08% / 31,61 ± 0,29%	36,11 ± 0,11% / 26,14 ± 0,33%
2000.000	60,70 ± 0,12% / 67,57 ± 0,64%	31,84 ± 0,07% / 31,41 ± 0,28%	36,10 ± 0,09% / 25,90 ± 0,30%
2400.000	60,84 ± 0,11% / 68,08 ± 0,64%	31,82 ± 0,06% / 31,63 ± 0,34%	36,11 ± 0,09% / 25,94 ± 0,32%
2800.000	61,02 ± 0,11% / 69,04 ± 0,61%	31,86 ± 0,06% / 31,88 ± 0,34%	36,14 ± 0,09% / 26,26 ± 0,32%

6.4.5 ANÁLISE DO CUSTO DE OPERAÇÃO

Outro aspecto importante a ser considerado no desempenho dos protocolos de comunicação avaliados na presente tese se refere ao custo de inicialização/atualização e armazenamento do estado atual da rede e/ou dos nós. Esse custo abrange dois aspectos: (1) quantidade de informações armazenadas localmente em cada nó da rede; (2) quantidade de informações trocadas localmente entre cada dois nós em uma oportunidade de contato.

Como o protocolo Epidêmico confia unicamente na replicação de mensagens a fim de possibilitar a entrega das mensagens, nenhuma informação referente ao estado da rede é armazenada nos nós. Porém, a cada encontro entre dois nós, um custo de comunicação é gerado referente à troca das listas contendo o resumo de todas as mensagens contidas no *buffer* de cada nó. Com essa lista, um nó é capaz de solicitar as mensagens que ainda não

possui para o seu nó vizinho corrente. O número de registros (mensagens) contidos em cada lista é altamente dependente da capacidade total do *buffer* de cada nó. Dessa forma, quanto maior for o tráfego na rede, o número de contatos estabelecidos e a capacidade total do *buffer* de um nó, maior será o tamanho da lista contendo o resumo de mensagens.

No protocolo PROPHET, cada nó armazena uma lista de previsões de entrega para cada outro nó j conhecido da rede com base em seus encontros com j e nos encontros de seus vizinhos com j (propriedade de transitividade vista na Seção 2.2.2). Para manter atualizadas as listas de previsões dos nós da rede, a cada encontro entre dois nós, suas listas completas são trocadas. O tamanho dessa lista é altamente dependente do número de contatos estabelecidos por cada nó. Devido a propriedade de transitividade do PROPHET, o número de registros na lista de previsões de entrega de um nó pode atingir rapidamente o número $N - 1$, sendo N o número de nós existentes na rede.

Para restringir o encaminhamento de mensagens aos nós mais promissores da rede de modo a aumentar a probabilidade de entrega das mensagens enquanto reduz o número de mensagens replicadas e descartadas, o protocolo Cultural GrAnt confia em um conjunto de métricas conforme visto na Seção 5.2. Assim, em cada nó i da rede, as seguintes informações referentes ao estado da rede e do nós são armazenadas:

1. Lista contendo o número de encontros de i com cada outro nó j conhecido da rede (utilizada na métrica básica $FEnc$);
2. Lista contendo a duração anterior e atual dos encontros entre i com cada outro nó j conhecido da rede (utilizada na métrica básica $DEnc$). As métricas básicas $DEnc$ e $FEnc$ compõem a métrica composta Proximidade Social que está associada à Função Heurística do espaço populacional do Cultural GrAnt;
3. Centralidade de grau de i anterior ($CGrau_i(t - 1)$) e atual ($CGrau_i(t)$), referente à métrica básica $QInd$. Essas centralidades são utilizadas para calcular a centralidade de grau prevista de i ($CGrau_i(t + 1)$). A métrica $CGrau_i(t + 1)$ juntamente com a métrica correspondente ao número de saltos $NSaltos$ de cada caminho construído são armazenadas em uma FA. Essa duas métricas representam a qualidade do caminho construído que é calculada no nó destino da FA e armazenada na FR correspondente;
4. Tempo de Pausa em cada destino e Velocidade de Movimento do nó i . Essas informações compõem a métrica $GEst_i$ que representa o grau de estagnação de i ;
5. Lista contendo o grau de estagnação de cada nó j ($GEst_j$) encontrado por i . Com esse histórico obtém-se o grau de estagnação médio da rede de relacionamentos de

- i (métrica composta $GEst_{rede}^i$). Essa métrica está associada ao conhecimento de Domínio do espaço de crenças de i ;
6. Lista contendo a Utilidade do Melhor Encaminhador para cada mensagem de dados m armazenada em i ($U_{melhor_encam_m}$). Essa métrica está associada ao nicho m do conhecimento Situacional do espaço de crenças de i ;
 7. Lista contendo o número de vezes que uma mensagem m foi encaminhada por i para outros nós (N_{Encam_m});
 8. Lista que mapeia para cada destino d cujo caminho completo foi conhecido, o próximo salto em direção a esse destino e a quantidade de feromônio depositada nesse enlace. Essa lista reflete a tabela de concentração de feromônio do espaço populacional do Cultural GrAnt;
 9. Utilidade de Intermediação de i com cada destino d cujo caminho completo foi conhecido (métrica básica $U_{Interm_{i,d}}$);
 10. Utilidade de Intermediação da rede de relacionamentos de i para cada destino d cujo caminho completo foi conhecido (métrica composta $U_{Interm_{rede,d}^i}$). Essa métrica está associada ao nicho d do conhecimento Histórico do espaço de crenças de i ;
 11. Lista contendo a identificação das mensagens de dados m cuja recepção no destino d foi confirmada por uma FR ($Msg_Confirmadas$).

Os itens de 1 a 6 são inicializados ou atualizados durante os encontros com outros nós da rede, onde ocorre a fase de encaminhamento de mensagens. O item 7 somente é inicializado ou atualizado quando uma mensagem m é enviada para um nó j . Os itens de 8 a 11 somente são inicializados ou atualizados quando um nó i toma conhecimento de que um caminho completo para um destino d foi construído.

Para inicializar ou atualizar as informações referentes ao estado da rede e dos nós, a cada encontro entre dois nós i e j , são trocados os valores referentes ao grau de Estagnação de i e j . Durante a fase de encaminhamento de uma mensagem m , isto é, quando um nó i possui uma mensagem m a ser enviada e este encontra um nó j , as seguintes métricas/informações são enviadas de j para i mediante pedido de i : centralidade de grau do nó j ; proximidade social do nó j com o destino d de m ; Utilidade de Intermediação de j em relação ao destino d de m ; Confirmação (verdadeiro ou falso) de que j tenha conhecimento da recepção da mensagem m no seu destino d .

Para analisar o custo em bytes armazenados em cada nó i da rede e trocados em encontros com cada nó j para manter atualizado o estado atual da rede e/ou dos nós, é utilizado o cenário PoI para um *buffer* de 4 MB, mensagens de 500 kB e faixa de comunicação de 10 m.

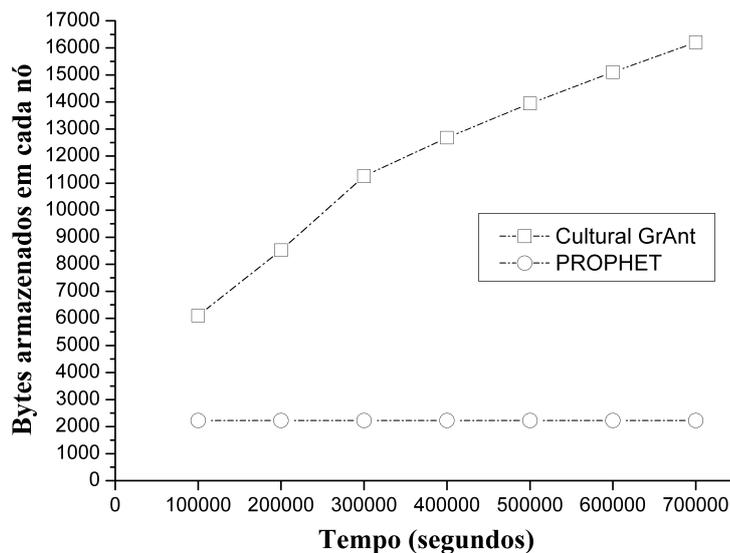
Em relação ao custo em bytes trocados por i e j em cada encontro, o maior custo ocorre com o protocolo PROPHET devido a troca das listas de previsões de entrega. Devido à propriedade de transitividade do PROPHET, o número de registros na lista de previsões de entrega de um nó atinge rapidamente o número total de nós da rede: 139. Então, o número de bytes trocados em cada direção do contato é de 2.224 bytes. Como ao utilizar o protocolo Epidêmico, um nó possui em média 7,28 mensagens armazenadas em seu *buffer*, são trocados em cada direção de contato aproximadamente 58,26 bytes. Já com o protocolo Cultural GrAnt, são enviados 16 bytes de i para j identificando uma mensagem m a ser enviada e o grau de estagnação de i e 29 bytes de j para i representando as suas informações.

Em relação ao custo em bytes armazenados em cada nó i , o custo do protocolo Epidêmico é nulo. O custo de armazenamento dos protocolos Cultural GrAnt e PROPHET é mostrado na Tabela 9 e Figura 33. Estes custos são apresentados na forma de total de bytes armazenados, o qual é calculado em função do número de registros de cada informação. Conforme mostra a Tabela 9, o custo dos dois protocolos cresce com o tempo, pois quanto maior o tempo, maior será o número de contatos estabelecidos e caminhos construídos (este último apenas no protocolo Cultural GrAnt) e maior será o número de registros existentes na(s) lista(s). Porém, o protocolo PROPHET atinge o tamanho máximo de sua lista de previsões (139 registros representando a previsão de contato de i com todos os outros nós existentes na rede) já no tempo de 100.000 segundos devido a sua propriedade de transitividade e, de acordo com a Figura 33, este crescimento é imperceptível quando comparado ao do Cultural GrAnt.

Apesar de o Cultural GrAnt gerar um custo maior em relação aos outros dois protocolos, no pior caso verificado esse custo é de 15,83 kB, o que equivale a apenas 0,39% de ocupação da capacidade total do *buffer* de um nó (nesse caso, um *buffer* de 4 MB). Devido ao conhecimento situacional restringir o encaminhamento das mensagens de dados apenas aos nós mais promissores, o número de mensagens replicadas na rede é reduzido e no pior caso verificado cada nó i possui apenas 5,89 mensagens FA (juntamente com a mensagem de dados) e 5,24 mensagens FR armazenadas em seu *buffer*. Isso equivale a 2946 kB de mensagens ou 71,92% da capacidade total do seu *buffer*.

Tabela 9: Custo de Armazenamento de Registros e Bytes em Diferentes Tempos de Simulação

Protocolos	Registros/ Bytes (100k seg.)	Registros/ Bytes (200k seg.)	Registros/ Bytes (300k seg.)	Registros/ Bytes (400k seg.)	Registros/ Bytes (500k seg.)	Registros/ Bytes (600k seg.)	Registros/ Bytes (700k seg.)
Cultural GrAnt							
<i>FEnc</i>	93,97/1127,65	116,01/1392,17	126,73/1520,74	131,67/1580,06	134,79/1617,43	136,51/1638,17	137,54/1650,51
<i>DEnc</i>	93,97/2255,31	116,01/2784	126,73/3041,49	131,67/3160,11	134,79/3234,86	136,51/3276,34	137,54/3301,03
<i>CGrau</i>	2/16	2/16	2/16	2/16	2/16	2/16	2/16
Tempo Pausa e Velocidade	2/16	2/16	2/16	2/16	2/16	2/16	2/16
<i>GEst_j</i>	90,82/1453,14	116,01/1856,23	126,73/2027,66	131,67/2106,74	134,79/2156,57	136,51/2184,23	137,54/2200,69
<i>Umelhor_encam_m</i>	22,55/360,8	43,64/698,29	62,99/1007,89	81,72/1307,54	98,99/1583,77	115,63/1850,06	131,94/2111,09
<i>NEncam_m</i>	22,93/275,14	48,79/585,43	77,04/924,43	107,11/1285,37	138,4/1660,8	171,28/2055,34	204,06/2448,77
Tabela Feromônio	9,56/229,54	17,76/426,34	23,94/574,63	28,76/690,17	32,56/781,54	35,96/862,97	38,74/929,66
<i>UInterm_{i,d}</i>	8,58/102,94	16,1/193,2	22,04/264,43	26,76/321,09	30,54/366,51	33,88/406,54	36,74/440,91
<i>UInterm_{rede,d}</i>	9,56/153,03	17,76/284,23	23,94/383,09	28,76/460,11	32,56/521,03	35,96/575,31	38,74/619,77
<i>Msg_Confirmadas</i>	14,14/113,09	35,56/284,51	60,91/487,26	87,86/702,86	116,25/930	143,82/1150,57	173,89/1391,14
PROPHET							
Lista de Previsões	139/2224	139/2224	139/2224	139/2224	139/2224	139/2224	139/2224

**Figura 33:** Custo de Armazenamento de Bytes em Diferentes Tempos de Simulação.

Ainda vale destacar que esse custo pode ser limitado através de uma análise detalhada da necessidade de cada informação com o passar do tempo. Com isso, é possível verificar com maior precisão, a partir de qual momento cada lista de conhecimentos pode sofrer um processo progressivo de “esquecimento”, através de uma janela de memória. Nesse caso, cada novo conhecimento adicionado fará com que o conhecimento mais antigo seja removido.

Por fim, é investigado o *overhead* causado pelo protocolo Cultural GrAnt com as mensagens de controle das formigas (FAs e FRs) em ambos os cenários PoI (*buffer* de 4

MB e TTL de mensagens de 600 minutos) e WD (*buffer* 10 MB e TTL de mensagens de 1800 minutos). Cada mensagem de dados encapsula um FA com 8 bytes para representar a qualidade parcial de seu caminho. Cada FA capaz de chegar ao seu destino gera uma mensagem de controle FR de 100 bytes (incluindo o cabeçalho, a qualidade do caminho, e o EID dos nós no caminho). No cenário PoI, os bytes de controle correspondentes às FAs e FRs representam apenas $0,0131 \pm 0,0009\%$ (faixa de comunicação de 10 m) e $0,0186 \pm 0,0002\%$ (faixa de 100 m) do total de bytes gerados (contabilizando os bytes referentes às mensagens de dados e às FAs e FRs) pelo Cultural GrAnt. No cenário WD, os bytes correspondentes às FAs e FRs representam, respectivamente, $0,0194 \pm 0,0003\%$ (10 m) e $0,079 \pm 0,0022\%$ (100 m) do total de bytes gerados. Porém, mesmo contabilizando o custo extra com esses bytes de controle (referentes às FAs e FRs) na quantidade total (em bytes) de mensagens replicadas na rede, o protocolo Cultural GrAnt ainda assim propaga menos bytes na rede se comparado aos protocolos Epidêmico e PROPHET devido ao número elevado de mensagens de dados replicadas por estes últimos. Ao ser comparado com o Epidêmico, o Cultural GrAnt proporciona uma redução de $39,99 \pm 0,16\%$ (no cenário PoI com uma faixa de 10 m), $59,60 \pm 0,11\%$ (PoI com faixa de 100 m), $83,60 \pm 0,19\%$ (no cenário WD com uma faixa de 10 m) e $89,49 \pm 0,26\%$ (WD com uma faixa de 100 m) no número total bytes gerados na rede. Do mesmo modo, quando comparado com o PROPHET, há reduções de $34,86 \pm 0,18\%$ (cenário PoI com faixa de 10 m), $43,37 \pm 0,15\%$ (PoI com faixa de 100 m), $74,59 \pm 0,34\%$ (WD com faixa de 10 m) e $78,57 \pm 0,56\%$ (WD com faixa de 100 m) no total de bytes gerados na rede. Portanto, através dessa análise, é possível concluir que com um pequeno *overhead* gerado, o protocolo Cultural GrAnt é capaz de escolher os melhores encaminhadores de mensagens e reduzir o número total de bytes de dados replicados na rede.

7 CONCLUSÕES

Na presente tese foi apresentado um novo protocolo de roteamento para DTNs oportunistas no qual as previsões de conectividade dos nós são utilizadas para determinar os melhores encaminhadores de mensagens. O protocolo proposto é chamado Cultural GrAnt (*Greedy Ant*) uma vez que faz uso de um sistema híbrido que agrega as vantagens de um algoritmo cultural (AC) e de uma versão gulosa da meta-heurística ACO para realizar buscas locais e globais em um ambiente dinâmico e complexo por meio da análise e coleta de informações sobre a qualidade de cada nó como encaminhador de mensagens. Com tais informações é possível encaminhar as mensagens para os nós mais promissores com os objetivos de melhorar o percentual de entrega de mensagens e limitar o número de réplicas e descartes destas.

A principal motivação para o uso de ACO foi tirar proveito de algumas características típicas de um paradigma auto-adaptativo e baseado em população de soluções tais como: a capacidade de executar uma busca tanto global quanto local em um espaço amplo e dinâmico enquanto provê uma diversidade de soluções, natureza auto-organizável, adaptação da sua estrutura de aprendizagem, boa escalabilidade e necessidade de pouca informação global da rede. Considerando o fato do ambiente nas DTNs oportunistas exibir similaridades exploráveis com referência a históricos, isto é, há padrões no comportamento dos seus usuários, a motivação para o uso do AC é memorizar o conhecimento e comportamentos de indivíduos ao longo do processo de busca como uma fonte importante de informações para fazer inferência e solucionar problemas complexos no futuro. Com isso, o aprendizado social e cultural se torna mais rápido podendo realizar uma busca mais efetiva sem a necessidade de uma exploração custosa do ambiente por parte de um único indivíduo. No caso dos Algoritmos Culturais, por serem um paradigma novo no contexto da aplicação considerada nessa tese, o aspecto de inovação fica ainda mais destacado.

O protocolo Cultural GrAnt foi concebido com base em três módulos: (1) Roteamento ou Encaminhamento de Mensagens que determina por qual(is) rota(s) uma mensagem deve seguir para eventualmente chegar ao seu destino; (2) Escalonamento de

Mensagens: decide a ordem na qual as mensagens são transmitidas; (3) Gerenciamento de *Buffer*: indica qual(is) mensagem(ns) pode(m) ser descartada(s) do *buffer* de um nó quando este atingir seu limite de ocupação. Esses módulos têm o objetivo de maximizar o número de mensagens entregues com êxito no destino e minimizar o uso de recursos ao longo de cada caminho selecionado.

O protocolo Cultural GrAnt é capaz de analisar as propriedades dinâmicas das DTNs e caracterizar a utilidade de cada nó como encaminhador de mensagens considerando um conjunto de métricas propostas nesta tese. Estas métricas possibilitam a comunicação entre dois espaços distintos do Cultural GrAnt: o espaço de crenças formado pelos conhecimentos Situacional, Histórico e de Domínio e o espaço populacional do Cultural GrAnt construído pelo ACO. Devido à importância dessas métricas no funcionamento do protocolo proposto, análises foram realizadas para auxiliar na caracterização dos parâmetros do ACO (função heurística e concentração de feromônio), das métricas utilizadas na utilidade dos nós DTNs candidatos a encaminhadores de mensagens e na importância das mensagens perante os módulos de encaminhamento e gerenciamento de *buffer*. Uma vez realizada essa análise, um conjunto de métricas foi selecionado e este foi utilizado para avaliar o desempenho do protocolo Cultural GrAnt ao compará-lo com duas categorias de protocolos para DTNs que podem operar em ambientes com diferentes modelos de mobilidade de nós: os protocolos Epidêmico e PROPHET.

As simulações realizadas mostraram que apesar do Cultural GrAnt gerar um custo maior que os protocolos PROPHET e Epidêmico em relação à quantidade de informações armazenadas localmente em cada nó para manter o estado atual da rede, o protocolo proposto supera o PROPHET e o Epidêmico em termos do percentual de entrega de mensagens, relação de mensagens replicadas e descartadas em dois cenários de simulação distintos: um modelo de movimento com base nas atividades dos nós (chamado WD - *Working Day*) e um modelo de movimento baseado em comunidades de nós (chamado PoIs - *Points of Interest*). No modelo PoI com faixa de comunicação de 10 m, *buffer* de 4 MB e TTL de 600 minutos, por exemplo, o protocolo Cultural GrAnt é capaz de atingir um maior percentual de entrega de mensagens (ganho de 69% quando comparado ao protocolo PROPHET e 50% quando comparado com o Epidêmico), replicar menos bytes (49% menos que o PROPHET e 45% menos que o Epidêmico) e descartar menos mensagens (72% que o PROPHET e 24% menos que o Epidêmico). Já no modelo WD com faixa de comunicação de 10 m, *buffer* de 10 MB e TTL de 1800 minutos, o desempenho do protocolo Cultural GrAnt é bem superior ao dos protocolos PROPHET e Epidêmico: entrega mais mensagens (ganho de 110% quando comparado ao protocolo PROPHET

e 158% quando comparado com o Epidêmico), replica menos bytes (88% menos que o PROPHET e 89% menos que o Epidêmico) e descarta menos mensagens por falta de espaço de armazenamento nos nós (89% que o PROPHET e 94% menos que o Epidêmico). Esse ganho de desempenho nas três métricas e nos dois ambientes de simulação é devido à capacidade do protocolo Cultural GrAnt restringir dinamicamente o encaminhamento de mensagens aos nós mais promissores. Ao fazer uso de métricas sociais úteis sobre os encaminhadores de mensagens candidatos, como sua centralidade de grau, utilidade de intermediação e sua proximidade social com os outros nós, o protocolo Cultural GrAnt é capaz de direcionar melhor o encaminhamento de mensagens na rede.

7.1 PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Como principais resultados obtidos com a finalização desta tese tem-se:

- Um novo protocolo de roteamento para DTNs oportunistas que, através do uso de um sistema híbrido, usufrui das vantagens de um AC e de um ACO guloso onde a melhor opção é sempre escolhida. Com esse protocolo, chamado Cultural GrAnt, as mensagens de dados da rede são direcionadas aos nós mais promissores com os objetivos de melhorar a taxa de entrega de mensagens enquanto limita o número de réplicas e descartes destas;
- Um protocolo capaz de memorizar, manter atualizadas e distribuir as informações/experiências obtidas sobre a dinâmica da rede através de uma busca completa guiada por conhecimentos tanto globais quanto locais. Com essas informações, o protocolo é capaz de influenciar as buscas por soluções futuras para o problema de roteamento em DTNs e acelerar o processo de aprendizado;
- Um módulo de escalonamento que determina a ordem na qual as mensagens devem ser encaminhadas;
- Um módulo de gerenciamento de *buffer* que determina qual mensagem deve ser descartada quando não houver espaço de armazenamento suficiente para armazenar uma nova mensagem;
- O estudo sobre aspectos até então inexplorados dos ACs tais como: o uso destes para fins de roteamento em redes de comunicação móveis; o uso de espaços de crenças distribuídos entre os vários nós participantes da rede; e a comunicação entre o espaço de crenças e o espaço populacional sendo mediada por métricas específicas do protocolo;

- O estudo sobre as mudanças necessárias na meta-heurística de ACO de modo que esta se adapte melhor à redes com desconexões frequentes e altamente dinâmicas como as DTNs;
- O estudo sobre os aspectos sociais dos nós identificando similaridades exploráveis com referência a padrões no comportamento destes;
- A análise das métricas mais relevantes para capturar o estado dinâmico da rede e dos nós;
- A disseminação dos resultados obtidos através da publicação de (i) artigo científico em revista especializada na área de redes de computadores (Computer Networks); (ii) artigo científico em congresso internacional na área de computação evolucionária (GECCO 2012); (iii) artigo científico em congresso internacional na área de redes de computadores (GLOBECOM 2011); (iv) artigo científico em congresso nacional na área de redes de computadores (SBrT 2011).

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Como o protocolo Cultural GrAnt usufrui de um conjunto de métricas básicas e compostas para o seu funcionamento, faz-se necessária a continuidade do estudo sobre o comportamento do protocolo variando o conjunto de parâmetros que podem ser combinados e aplicados de diversas formas às métricas propostas. Entretanto, devido à quantidade de combinações e diversidade de cenários de aplicação possíveis, como trabalhos futuros, pretende-se investigar a auto-adaptação de parâmetros no protocolo Cultural GrAnt. Como exemplos, tem-se: mudar a métrica de qualidade do caminho para considerar o espaço livre no *buffer* dos nós caso se esteja operando em um ambiente com muita restrição de espaço de armazenamento e muitas mensagens estejam sendo descartadas por falta de espaço; investigar a auto-adaptação da taxa de evaporação de feromônio com base em informações sobre a diversidade das soluções fornecidas pela população do ACO; ou ainda, ajustar a taxa de evaporação para tornar a busca mais exploratória, quando um nó perceber que está operando em um ambiente altamente conectado.

Outro exemplo de estudo interessante a ser feito sobre as métricas refere-se à análise da confiabilidade de uma informação, como por exemplo, aquela proveniente da concentração de feromônio em um enlace. Por exemplo, caminhos curtos (como aqueles obtidos com base em medidas de qualidade que consideram o número de saltos) podem ser menos confiáveis do que aqueles mais longos, quando o cenário considerado é extrema-

mente esparso mas baseado em rotina (localizações visitadas com alta frequência). Isto porque nestes casos, o simples fato de uma formiga de retorno (FR) ter alcançado um destino (origem da mensagem) situado a muitos saltos da sua origem (destino da mensagem) pode trazer mais confiabilidade ao caminho. Entretanto, esta vertente da pesquisa requer uma análise da relação de compromisso existente entre a possível escolha de um caminho longo baseado em sua maior confiabilidade, o atraso maior na entrega das mensagens e os recursos consumidos pelas mensagens que seguem este caminho selecionado. Aqui, pretende-se analisar esse compromisso, variando principalmente o TTL das mensagens de dados e da FR.

Pretende-se ainda melhorar o processo de predição das métricas centralidade grau e duração de contato. Para isso, será necessário um estudo detalhado do comportamento dessas métricas no tempo, através de medidas de dispersão e função de densidade de probabilidade.

Finalmente, o desempenho do protocolo Cultural GrAnt será estudado e avaliado em novos cenários de simulação que representem diferentes aspectos de mobilidade dos nós. Com estes estudos, espera-se concluir com maior precisão qual a sua habilidade de extrair informações *online* de um ambiente que varia desde situações nas quais o mesmo é praticamente estático, a situações considerando ambientes completamente móveis e desconectados.

REFERÊNCIAS

- APPLEGATE, D. L. et al. **The Traveling Salesman Problem: A Computational Study**. New Jersey, USA: Princeton University Press, 2006.
- BALLARD, D. H. **An Introduction to Natural Computation (Complex Adaptive Systems)**. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1999.
- BARAS, J. S.; MEHTA, H. A probabilistic emergent routing algorithm for mobile ad hoc networks. In: **Proceedings of the Workshop on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt'03)**. Sophia-Antipolis, France: IEEE, 2003. p. 20–24.
- BAVELAS, A. A mathematical model for group structure. **Applied Anthropology**, v. 7, n. 3, p. 16–30, 1948.
- BENI, G. The concept of cellular robotic systems. In: **Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control**. Arlington, Virginia, USA: IEEE, 1988. p. 57–62.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. **ACM Computer Surveys**, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZC, G. **Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems**. New York, USA: Oxford University Press, 1999.
- BRANKE, J.; SCHMECK, H. Designing evolutionary algorithms for dynamic optimization problems. **Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications**, New York, USA: Springer Verlag, p. 239–262, 2003.
- BULUT, E.; SZYMANSKI, B. K. Friendship based routing in delay tolerant mobile social networks. In: **Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)**. Miami, Florida, USA: IEEE, 2010. p. 1–5.
- BURGESS, J. et al. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In: **Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications**. Barcelona, Spain: IEEE, 2006. p. 1–11.
- BURNS, B.; BROCK, O.; LEVINE, B. N. MV routing and capacity building in disruption tolerant networks. In: **Proceedings of the 24th Annual Joint Conference on the IEEE Computer and Communications Societies**. Miami, Florida, USA: IEEE, 2005. p. 398–408.
- CAMP, T.; BOLENG, J.; DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. **Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications**, v. 2, n. 5, p. 483–502, 2002.

CAO, Y.; SUN, Z. Routing in delay/disruption tolerant networks: A taxonomy, survey and challenges. **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, PP, n. 99, p. 1–24, 2012.

CAO, Y.; SUN, Z.; WANG, N. Replication routing for delay tolerant networking: A hybrid between utility and geographic approach. In: **Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. Paris, France: IEEE, 2012. p. 2751–2756.

CARO, G. di; DORIGO, M. **AntNet: A Mobile Agents Approach to Adaptive Routing**. 1997. Technical Report IRIDIA/97-12, Universite Libre de Bruxelles. Disponível em: <<ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/tec.reps/TR.07.AntNet-TecRep-97-12.pdf>>. Acesso em: 2 de março de 2011.

CARO, G. di; DORIGO, M. Antnet: Distributed stigmergetic control for communications networks. **Journal of Artificial Intelligence Research**, v. 9, p. 317–365, 1998.

CASTRO, L. N. **Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms and Applications**. Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall/CRC, 2006.

CERF, V. et al. **Delay-Tolerant Network Architecture**. 2007. IETF RFC-4839, DTN Research Group. Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc4838.txt>>. Acesso em: 10 de junho de 2010.

CHARENTREAU, A. et al. Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 6, n. 6, p. 606–620, 2007.

CHATURVEDI, S.; KALAKOTA, P.; HUANG, C.-T. Poster: Improving delay-tolerant network performance using forward routing information. In: **Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Network Protocols**. California, USA: IEEE, 2006. p. 19–20.

CHEN, X.; SHEN, J.; WU, J. A novel information model for efficient routing protocols in delay tolerant networks. In: **Proceedings of the IEEE International Symposium on Parallel And Distributed Processing**. Rome, Italy: IEEE, 2009. p. 1–8.

CHUAH, M. C.; MA, W.-B. Integrated buffer and route management in a DTN with message ferry. **Journal of Information Science and Engineering**, v. 23, p. 1123–1139, 2007.

CHUAH, M. C.; YANG, P. A message ferrying scheme with differentiated services. In: **Proceedings of the IEEE Military Communications Conference**. Atlantic City, New Jersey, USA: IEEE, 2005. v. 3, p. 1521–1527.

CHUAH, M. C.; YANG, P. Performance evaluations of various message ferry scheduling schemes with two traffic classes. In: **Proceedings of the 4th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)**. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE, 2007. p. 227–233.

CHUNG, C.-J. **Knowledge-based approaches to self-adaptation in cultural algorithms**. Tese de Doutorado — Wayne State University, Detroit, Michigan, USA, 1997.

- CHUNG, C.-J.; REYNOLDS, R. G. The use of cultural algorithm support self-adaptation in EP. In: **Proceedings of the Adaptive Distributed Parallel Computing Symposium**. Dayton, Ohio, USA: IEEE, 1996. p. 260–271.
- DALY, E. M.; HAAHR, M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs. In: **Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing**. Quebec, Canada: ACM, 2007. p. 32–40.
- DALY, E. M.; HAAHR, M. The challenges of disconnected delay-tolerant MANETs. **Ad Hoc Networks**, v. 8, n. 2, p. 241–250, 2010.
- DAVIS, J. A.; FAGG, A. H.; LEVINE, B. N. Wearable computers as packet transport mechanisms in highly-partitioned ad-hoc networks. In: **Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers**. Zurich, Switzerland: IEEE, 2001. p. 141–148.
- DENEUBOURG, J.-L. et al. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. **Journal of Insect Behavior**, v. 3, n. 2, p. 159–168, 1990.
- DING, L. et al. Articulation node based routing in delay tolerant networks. In: **Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications**. Galveston, Texas, USA: IEEE, 2009. p. 1–6.
- DORIGO, M. **Optimization, Learning and Natural Algorithms**. Tese de Doutorado — Politecnico di Milano, Milan, Italy, 1992.
- DORIGO, M. Learning by probabilistic boolean networks. In: **Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks**. Orlando, Florida, USA: IEEE, 1994. p. 887–891.
- DORIGO, M.; BONABEAU, E.; THERAULAZC, G. Ant algorithms and stigmergy. **Future Generation Computer Systems**, v. 16, n. 9, p. 851–871, 2000.
- DORIGO, M.; CARO, G. di. **Ant Colony Optimization Meta-Heuristic, New Ideas in Optimization**. Maidenhead, England: McGraw-Hill, 1999. 11–32 p.
- DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 1, n. 1, p. 53–66, 1997.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics**, v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996.
- DORIGO, M.; STÜTZLE, T. An experimental study of the simple ant colony optimization algorithm. In: **Proceedings of the WSES International Conference on Evolutionary Computation**. Tenerife, Spain: WSES-Press International, 2001. p. 253–258.
- DUCATELLE, F.; CARO, G. di; GAMBARDELLA, L. M. Using ant agent to combine reactive and proactive strategies for routing in mobile ad hoc networks. **International Journal of Computational Intelligence and Applications (IJCIA), Special Issue on Nature-Inspired Approaches to Networks and Telecommunications**, v. 5, n. 2, p. 169–184, 2005.

DURHAM, W. **Co-Evolution: Genes, Culture, and Human Diversity**. Stanford, CA: Stanford University Press, 1994.

EKMAN, F. et al. Working day movement model. In: **Proceedings of 1st ACM/SIGMOBILE Workshop on Mobility Models for Networking Research**. Hong Kong, Japan: ACM, 2008. p. 33–40.

ENGELBRECHT, A. P. **Computational Intelligence: An Introduction**. West Sussex, England: Wiley, 2007.

FALL, K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In: **Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications**. Karlsruhe, Germany: ACM, 2003. p. 27–34.

FALL, K.; FARREL, S. DTN: An architectural retrospective. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 26, n. 5, p. 828–836, 2008.

FOGEL, D. B. **Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence**. 2. ed. New York: IEEE Press, 1995.

FOGEL, L. J. Autonomous automata. **Industrial Research**, v. 4, p. 14–19, 1962.

FRANÇA, F. O. de. **Algoritmos Bio-Inspirados aplicados à Otimização Dinâmica**. Dissertação de Mestrado — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2005.

FREEMAN, L. C. A set of measures of centrality based on betweenness. **Sociometry**, v. 40, n. 1, p. 35–41, 1977.

FREEMAN, L. C. Centrality in social networks: Conceptual clarification. **Social Networks**, v. 1, n. 3, p. 215–239, 1979.

GAMBARDELLA, L. M.; DORIGO, M. Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies. In: **Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation**. Nagoya, Japan: IEEE, 1996. p. 622–627.

GARCIA-RETAMERO, R.; TAKEZAWA, M.; GALESIC, M. Simple mechanisms for gathering social information. **New Ideas in Psychology**, v. 28, p. 49–63, 2010.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computer and Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2005.

GONZÁLEZ, M. C.; HIDALGO, C. A.; BARABÁSI, A.-L. Understanding individual human mobility patterns. **Nature**, v. 453, n. 7196, p. 779–782, 2008.

GOSS, S. et al. Self-organized shortcuts in the argentine ant. **Naturwissenschaften**, v. 76, p. 579–581, 1989.

GRANOVETTER, M. The strength of weak ties. **American Journal of Sociology**, v. 78, n. 6, p. 1360–1380, 1976.

GRASSÉ, P.-P. La reconstruction du nid et les coordinations individuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. **Insects Sociaux**, v. 6, p. 41–80, 1959.

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

GUEDES, R. M.; SILVA, M. W. R.; REZENDE, J. F. Escassez de recursos em redes tolerantes a atrasos e interrupções. In: **26o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Rio de Janeiro, Brasil: SBC, 2008.

HANNEMAN, R. A.; RIDDLE, M. **Introduction to social network methods**. 2005. University of California, Riverside. Disponível em: <<http://faculty.ucr.edu/hanneman/nettext/>>. Acesso em: 26 de julho de 2010.

HAY, D.; GIACCONE, P. Optimal routing and scheduling for deterministic delay tolerant networks. In: **Proceedings of the 6th International Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)**. Snowbird, Utah, USA: IEEE, 2009. p. 27–34.

HERTZ, A.; TAILLARD, E.; WERRA, D. de. A tutorial on tabu search. In: **Proceedings of Giornate di Lavoro AIRO'95 (Enterprise Systems: Management of Technical and Organizational Changes)**. Italy: [s.n.], 1995. p. 13–24.

HOFFMEYER, J. The swarming body. In: **Proceedings of the 5th Congress of the International Association for Semiotic Studies**. Berkeley, USA: Springer-Verlag, 1994. p. 937–940.

HOLLAND, J. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan Press, 1975.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence**. 2. ed. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1992.

HOSSMANN, T.; SPYROPOULOS, T.; LEGENDRE, F. Putting contacts into context: Mobility modeling beyond inter-contact times. In: **Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing**. Paris, France: ACM, 2011. p. 185–196.

HUA, D. et al. A DTN routing protocol based on hierarchy forwarding and cluster control. In: **Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Security**. Beijing, China: IEEE, 2009. p. 397–401.

HUI, P. et al. Pocket switched networks and human mobility in conference environments. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networks**. Philadelphia, Pennsylvania, USA: ACM, 2005. p. 244–251.

HUI, P.; CROWCROFT, J. Predictability of human mobility and its impact on forwarding. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Communications and Networking**. China: IEEE, 2008. p. 543–547.

HUSSEIN, O. H.; SAADAWI, T. N.; MYUNG, J. L. Probability routing algorithm for mobile ad hoc networks' resources management. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 23, n. 12, p. 2248–2259, 2005.

IACOBAN, R.; REYNOLDS, R.; BREWSTER, J. Cultural swarms: Modeling the impact of culture on social interaction and problem solving. In: **Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium**. Indianapolis, USA: IEEE, 2003. p. 205–211.

IPNSIG. **Interplanetary Internet Special Interest Group**. 2009. Disponível em: <<http://www.ipnsig.org>>. Acesso em: 4 de maio de 2010.

JAIN, S.; FALL, K.; PATRA, R. Routing in a delay-tolerant network. In: **Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications**. Oregon, USA: ACM, 2004. p. 145–158.

JIANG, Y.; HUANG, W.; CHEN, L. Cultural-based particle swarm optimization for dynamical environment. In: **Proceedings of the International Symposium on Intelligent Ubiquitous Computing and Education**. Chengdu, China: IEEE, 2009. p. 449–452.

JIN, X.; REYNOLDS, R. G. Using knowledge-based evolutionary computation to solve nonlinear constraint optimization problems: a cultural algorithm approach. In: **Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation**. Washington DC, USA: IEEE, 1999. v. 3, p. 1672–1678.

JOHNSON, S. B. **Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities and Software**. London, England: Penguin Books, 2002.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. In: **Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks**. Perth, Australia: IEEE, 1995. p. 1942–1948.

KERÄNEN, A.; KÄRKKÄINEN, T.; OTT, J. Simulating mobility and DTNs with the ONE. **Journal of Communications**, v. 5, n. 2, p. 92–105, 2010.

KERÄNEN, A.; OTT, J.; KÄRKKÄINEN, T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation. In: **SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques**. Rome, Italy: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2009. p. 1–10.

KHABBAZ, M. J.; ASSI, C. M.; FAWAZ, W. F. Disruption-tolerant networking: A comprehensive survey on recent developments and persisting challenges. **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, v. 14, n. 2, p. 607–640, 2012.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.

KUK, J. N. **Um Sistema Imune Fuzzy Cultural Aplicado ao Problema do Despacho Econômico de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado — Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil, 2009.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet**. 5. ed. Boston, Massachusetts, USA: Pearson Addison Wesley, 2010.

LA, R. J.; RANJAN, P. Ant-based adaptive message forwarding scheme for challenged networks with sparse connectivity. In: **Proceedings of the 28th IEEE Conference on Military Communications**. Boston, Massachusetts, USA: IEEE, 2009. p. 1–7.

LI, Q.; ZHU, S.; CAO, G. Routing in socially selfish delay tolerant networks. In: **Proceedings of the IEEE 29th International Conference on Computer Communications**. San Diego, California, USA: IEEE, 2010. p. 857–865.

LIBEN-NOWELL, D.; KLEINBERG, J. The link prediction problem for social networks. In: **Proceedings of the 12th Annual ACM International Conference on Information and Knowledge Management**. New York, USA: John Wiley & Sons, 2003. p. 556–559.

LIN, C.-J.; CHEN, C.-H.; LIN, C.-T. A hybrid of cooperative particle swarm optimization and cultural algorithm for neural fuzzy networks and its prediction applications. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews**, v. 39, n. 1, p. 55–68, 2009.

LINDGREN, A.; DORIA, A.; SCHELÉN, O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. **Lectures Notes in Computer Science**, v. 3126, p. 239–254, 2004.

LING, S.; WEI, W. Feedback adaptive routing algorithm for DTNs. In: **Proceedings of the International Conference on Communications and Mobile Computing**. Yunnan, China: IEEE, 2009. p. 267–271.

LIU, L.; FENG, G. Swarm intelligence based node-disjoint multi-path routing protocol for mobile ad hoc networks. In: **Proceedings of the International Conference on Information, Communications and Signal Processing**. Bangkok, Thailand: IEEE, 2005. p. 598–602.

LU, H. mei et al. A novel time interval routing protocol in delay tolerant networks. In: **Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Trusted Computing**. Washington DC, USA: IEEE, 2009. v. 1, p. 430–433.

LUENBERGER, D. G. **Linear and Nonlinear Programming**. 2. ed. New York, USA: Springer-Verlag, 2003.

LV, Y.; SU, F. Dynamic routing algorithm for data networks based on mobile agents. In: **Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation**. Chongqing, China: [s.n.], 2008. p. 6259–6262.

MA, J. et al. Research on cultural algorithm for solving routing problem of mobile agents. **Journal of Chine Universities of Posts and Telecommunications**, v. 15, n. 4, p. 121–125, 2008.

MARSDEN, P. V. Egocentric and sociocentric measures of network centrality. **Social Networks**, v. 24, n. 16, p. 407–422, 2002.

- MEI, A.; STEFA, J. Give2get: Forwarding in social mobile wireless networks of selfish individuals. **IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing**, v. 9, n. 4, p. 569–582, 2012.
- MIKLAS, A. G. et al. Exploiting social interactions in mobile system. In: **Proceedings of the Ubiquitous Computing**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. p. 409–428.
- MILGRAM, S. The small world problem. **Psychology Today**, v. 1, p. 60–67, 1967.
- MILLONAS, M. M. **Swarms, Phase Transitions, and Collective Intelligence**. In C. G. Langton (ed.), **Artificial Life III**. New York, USA: Addison Wesley, 1994.
- MILSS, P. et al. **A Survey of AI-based meta-heuristics for Dealing with Local Optima in Local Search**. 2004. Technical Report Series, n. CSM-416. Disponível em: <<http://www.essex.ac.uk/csee/research/publications/technicalreports/2004/csm416.pdf>>. Acesso em: 8 de agosto de 2011.
- NEWMAN, M. E. J. **Clustering and Preferential Attachments in Growing Networks**. 2001. Physical Review Letters E, 64(025102). Disponível em: <<http://www.santafe.edu/media/workingpapers/01-03-021.pdf>>. Acesso em: 26 de julho de 2011.
- NEWMAN, M. E. J. The structure of scientific collaboration networks. In: **Proceedings of the National Academy of Sciences of USA (PNAS)**. Santa Fe, NM, USA: National Academy of Sciences, 2001. v. 98, p. 404–409.
- OSMAN, I. H.; LAPORTE, G. Metaheuristics: A bibliography. In: **Annals of Operations Research**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 63, n. 5, p. 511–623.
- PASTEELS, J. M.; DENEUBOURG, J. I.; GOSS, S. Self-organization mechanisms in ant societies (i): Trail recruitment to newly discovered food sources. **Experientia Suppl.**, v. 76, p. 579–581, 1989.
- PENG, B.; REYNOLDS, R. G.; BREWSTER, J. Cultural swarms. In: **Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC'03)**. Canberra, Australia: IEEE, 2003. v. 3, p. 1965–1971.
- PERKINS, C. E. **Mobile IP: Design Principles and Practices**. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1997.
- POOL, I. de S.; KOCHEN, M. Contacts and influence. **Social Networks**, v. 1, n. 1, p. 5–51, 1978.
- PUJOL, J. M.; TOLEDO, A. L.; RODRIGUEZ, P. Fair routing in delay tolerant networks. In: **Proceedings of the 28th Conference on Computer Communications Society**. Rio de Janeiro, Brasil: IEEE, 2009. p. 837–845.
- RANGO, F. de; TROPEA, M. Energy saving and load balancing in wireless ad hoc networks through ant-based routing. In: **Proceedings of the International Symposium on Performance Evaluation of Computer & Telecommunication System**. Ottawa, Canada: IEEE, 2009. v. 41, p. 117–124.

RAYWARD-SMITH, V. J. et al. **Modern Heuristic Search Methods**. West Sussex, England: Wiley, 1996.

RENFREW, A. C. Dynamic modeling in archaeology: What, when, and where? **Dynamic Modeling and the Study of Change in Archaeology**, S. E. van der Leeuw (ed.), Edinburgh University Press, 1994.

REYNOLDS, R. G. An introduction to cultural algorithm. In: **Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming**. River Edge, New Jersey, USA: World Scientific Publishing, 1994. v. 41, p. 131–139.

REYNOLDS, R. G.; ALI, M. Embedding a social fabric component into cultural algorithms toolkit for an enhanced knowledge-driven engineering optimization. **International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics**, v. 1, n. 4, p. 563–597, 2008.

REYNOLDS, R. G.; CHUNG, C. Knowledge-based self-adaptation in evolutionary programming using cultural algorithms. In: **Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation**. Indianapolis, USA: IEEE, 1997. p. 71–76.

REYNOLDS, R. G.; PENG, B. Cultural algorithms: Modeling of how cultures learn to solve problems. In: **Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence**. Boca Raton, Florida, USA: IEEE, 2004. p. 166–172.

REYNOLDS, R. G.; ZANONI, E. Why cultural evolution can proceed faster than biological evolution. In: **Proceedings of the International Symposium on Simulating Societies**. Surrey, England: [s.n.], 1992. p. 81–93.

REYNOLDS, R. G.; ZHU, S. Knowledge-based function optimization using fuzzy cultural algorithms with evolutionary programming. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics**, v. 31, n. 1, p. 1–18, 2001.

RODRIGUES, N. M. **Um Algoritmo Cultural para Problemas de Despacho de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado — Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil, 2007.

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

SABIDUSSI, G. The centrality index of a graph. **Psychometrika**, v. 31, n. 4, p. 581–603, 1966.

SALEEM, S. M. **Knowledge-based Solution to Dynamic Optimization Problems using Cultural Algorithms**. Tese de Doutorado — Wayne State University, Detroit, Michigan, USA, 2001.

SALEEM, S. M.; REYNOLDS, R. G. Cultural algorithms in dynamic environments. In: **Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation**. La Jolla, California, USA: IEEE, 2000. v. 2, p. 1513–1520.

SATULURI, V.; PARTHASARATHY, S.; RUAN, Y. Local graph sparsification for scalable clustering. In: **Proceedings of the International Conference on Management of Data**. New York, NY, USA: ACM, 2011. p. 721–732.

SCOTT, K. L.; BURLEIGH, S. C. **Bundle Protocol Specification**. 2007. RFC 5050, DTN Research Group. Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc5050.txt>>. Acesso em: 4 de maio de 2010.

SHAH, R. et al. Data MULEs: Modeling three-tier architecture for sparse sensor networks. In: **Proceedings of the IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications**. Alaska, USA: IEEE, 2003. p. 30–41.

SIM, K. M.; SUN, W. H. Ant colony optimization for routing and load-balancing: Survey and new directions. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans**, v. 33, n. 5, p. 560–572, 2003.

SMALL, T.; HAAS, Z. J. Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking**. Philadelphia, Pennsylvania, USA: ACM, 2005. p. 260–267.

SOUZA, D. C. **Apicultura - Manual do Agente de Desenvolvimento Rural**. 2. ed. Brasília, Brasil: SEBRAE, 2007.

SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K.; RAGHAVENDRA, C. S. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: **Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking**. Philadelphia, Pennsylvania, USA: ACM, 2005. p. 252–259.

TAN, F.; BORGHOL, Y.; ARDON, S. Emo: A statistical encounter-based mobility model for simulating delay tolerant networks. In: **Proceedings of the International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks**. Newport Beach, California, USA: IEEE, 2008. p. 1–8.

TASSIULAS, L.; EPHREMIDES, A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 37, n. 12, p. 1936–1949, 1992.

TYLOR, E. B. **Primitive Culture**. 7th (orig. 1871). ed. New York: Brentano, 1924.

VAHDAT, A.; BECKER, D. **Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks**. 2000. Duke University. Technical Report-CS-2000-06. Disponível em: <<http://www.cs.duke.edu/vahdat/ps/epidemic.pdf>>. Acesso em: 16 de junho de 2010.

WARTHMAN, F. **Delay-Tolerant Networks (DTNs) - A Tutorial**. 2003. Warthman Associates. v. 1.1. Disponível em: <http://www.ipnsig.org/reports/DTN_Tutorial11.pdf>. Acesso em: 6 de maio de 2010.

WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social Network Analysis: Methods and Applications**. Cambridge, Massachusetts, USA: Cambridge University Press, 1994.

WILKINSON, D. Civilizations as networks: Trade, war, diplomacy, and command-control. **Journal of Complexity**, v. 8, p. 82–85, 2003.

WILSON, E. O. **Naturalista**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

- WITTIE, M. P. et al. On the implications of routing metric staleness in delay tolerant networks. **Computer Communications**, v. 32, n. 16, p. 1699–1709, 2009.
- WOOD, L. **Delay Tolerant Networking Research Group**. 2009. Disponível em: <<http://www.dtnrg.org>>. Acesso em: 14 de junho de 2010.
- WYNNE, C. D. L. **Animal Cognition - The Mental Lives of Animals**. Great Britain: Palgrave Macmillian, 2001.
- YONEKI, E.; GREENFIELD, D.; CROWCROFT, J. Dynamics of inter-meeting time in human contact networks. In: **Proceedings of the International Conference on Advances in Social Network Analysis and Mining**. Athens, Greece: IEEE, 2009. p. 356–361.
- ZHANG, M.-W.; SUN, X.-M.; LV, X.-Y. A QoS routing algorithm based on culture-ant colony algorithm. In: **Proceedings of the International Conference on Computer Application and System Modeling**. Taiyuan, China: IEEE, 2010. p. V12–198–V12–201.
- ZHANG, P. et al. ACRP: Ant-colony-based routing protocol for DTMNs. In: **Proceedings of the International Conference on Educational and Information Technology**. Chongqing, China: IEEE, 2010. v. 2, p. 272–276.
- ZHANG, Z. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: Overview and challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 8, n. 1, p. 24–37, 2006.
- ZHAO, W.; AMMAR, M.; ZEGURA, E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network. In: **Proceedings of the 24th Annual Joint Conference on the IEEE Computer and Communications Societies**. Miami, USA: IEEE, 2005. v. 2, p. 1407–1418.
- ZHOU, T.; CHOUDHURY, R. R.; CHAKRABARTY, K. Diverse routing: Exploiting social behavior for routing in delay-tolerant networks. In: **Proceedings of the International Conference on Computational Science and Engineering**. Vancouver, Canada: IEEE, 2009. v. 4, p. 1115–1122.
- ZHU, Y. et al. A survey of social-based routing in delay tolerant networks: Positive and negative social effects. **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, PP, n. 99, p. 1–15, 2012.
- ZHUFANG, K. An multicast routing based on ant colony optimization algorithm for DTN. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Genetic and Evolutionary Computing**. Shenzhen, China: IEEE, 2010. p. 354–357.
- ZYBA, G. et al. Dissemination in opportunistic mobile ad-hoc networks: the power of the crowd. In: **Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications**. Shanghai, China: IEEE, 2011. p. 1179–1187.