

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
APLICADA

LUÍS GUILHERME BERGAMINI MENDES

**UMA NOVA VERSÃO DO PROTOCOLO GRANT PARA
REDES TOLERANTES A ATRASOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2018

LUÍS GUILHERME BERGAMINI MENDES

**UMA NOVA VERSÃO DO PROTOCOLO GRANT PARA
REDES TOLERANTES A ATRASOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Computação Aplicada”.
Área de Concentração: Redes e Sistemas Distribuídos.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M538n Mendes, Luís Guilherme Bergamini
2018 Uma nova versão do protocolo GrAnt para redes tolerantes a atrasos / Luís Guilherme Bergamini Mendes.-- 2018.
120 p.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.
Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada. Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Computacionais. Linha de Pesquisa: Redes e Sistemas Distribuídos, Curitiba, 2018.
Bibliografia: p. 111-113.

1. Redes de computação - Protocolos. 2. Roteadores (Redes de computação). 3. Redes ad hoc (Redes de computadores). 4. Tolerância a falhas (Computação). 5. Inteligência coletiva. 6. Otimização matemática. 7. Algoritmos de formigas. 8. Computação - Dissertações. I. Vendramin, Ana Cristina Barreiras Kochem, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.39

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 63

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS
LINHA DE PESQUISA: REDES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS

No dia 29 de junho de 2018 às 15h30 reuniu-se na Sala B204 da Sede Centro a banca examinadora composta pelos pesquisadores indicados a seguir, para examinar a dissertação de mestrado do(a) candidato Luís Guilherme Bergamini Mendes, intitulada: **Uma nova versão do protocolo GrAnt para Redes Tolerantes a Atrasos**

Orientador(a): Prof^a. Dr^a Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin

Após a apresentação, o(a) candidato(a) foi arguido(a) pelos examinadores que, em seguida à manifestação dos presentes, consideraram o trabalho de pesquisa: () Aprovado. () Aprovado com restrições. Revisor indicado para verificação: _____. () Reprovado.

Observações:

Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às __h__, dela sendo lavrado a presente ata, que segue assinada pela Banca Examinadora e pelo Candidato.

O candidato está ciente que a concessão do referido título está condicionada à: (a) satisfação dos requisitos solicitados pela Banca Examinadora; (b) entrega da dissertação em conformidade com as normas exigidas pela UTFPR; (c) atendimento ao requisito de publicação estabelecido nas normas do Programa; e (d) entrega da documentação necessária para elaboração do Diploma. A Banca Examinadora determina um **prazo máximo de _____ dias**, considerando os prazos máximos definidos no Regulamento Geral do Programa, para o cumprimento dos requisitos (desconsiderar caso reprovado), sob pena de, não o fazendo, ser desvinculado do Programa sem o Título de Mestre.

Prof^a. Dr^a Ana Cristina Barreiras Kochem Vendramin – Presidente – UTFPR _____

Prof. Dr. Manoel Camillo de Oliveira Penna Neto - PUC-PR _____

Prof^a. Dr^a Anelise Munaretto – UTFPR _____

Prof^a. Dr^a Myriam Regattieri Delgado – UTFPR _____

Assinatura do Candidato: _____

Reservado à Coordenação

DECLARAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE

A Coordenação do Programa declara que foram cumpridos todos os requisitos exigidos pelo Programa de Pós-Graduação para a obtenção do título de Mestre.

Curitiba, ____ de _____ de 20__.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço o carinho e apoio incondicional dados pelos meus pais Antonio Celso dos Santos Mendes e Rosa Maria Bergamini Mendes, que sempre me proporcionaram as melhores condições e incentivos para que eu buscasse uma boa educação e caráter.

Ao meu avô Antônio Celso Mendes, por sempre me instigar ao pensamento filosófico e crítico, além de ter percebido a vocação e me estimular na área da Computação desde cedo.

À minha querida Gisele Valencio Oliveira, companheira de todos os momentos, que me apoiou e dividiu integralmente o peso e dificuldade do árduo caminho percorrido para a elaboração desta dissertação, por todo o carinho e compreensão.

A todos os meus amigos, pelo inestimável apoio seja na discussão de ideias relevantes a este trabalho ou aos momentos de descontração.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Cristina Kochem Vendramin, pela presteza em sempre me guiar em qualquer horário do dia e pela compreensão de todas as dificuldades.

Aos membros da banca examinadora que participaram da defesa deste trabalho, Prof. Dr. Manoel Camillo de Oliveira Penna Neto, Prof^a. Dr^a. Anelise Munaretto e Prof^a. Dr^a. Myriam Regattieri Delgado, pelas valiosas correções e sugestões para melhoria desta dissertação.

A todos que não citei, mas certamente contribuíram para que eu pudesse chegar onde cheguei.

RESUMO

MENDES, Luís Guilherme Bergamini. UMA NOVA VERSÃO DO PROTOCOLO GRANT PARA REDES TOLERANTES A ATRASOS. 105 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Esta dissertação apresenta uma nova versão do protocolo GrAnt (*Greedy Ant*), o qual utiliza a meta-heurística ACO (*Ant Colony Optimization* ou Otimização por Colônia de Formigas) para promover o roteamento em redes complexas e dinâmicas, como as DTNs (*Delay/Disruption Tolerant Networks* ou Redes Tolerantes a Atrasos/Desconexões). A nova versão, batizada de rGrAnt (*Rule-based Greedy Ant*), foi desenvolvida para prover ao GrAnt a habilidade de extrair informações *online* da conectividade social dos nós, os quais podem residir em ambientes de redes desde muito desconectados e esparsos até altamente conectados. Com essas informações, o rGrAnt pode guiar o módulo de roteamento do protocolo através de um conjunto de regras na decisão de (1) quando considerar informações de funções heurísticas e/ou concentração de feromônio, (2) quais informações podem ser incorporadas em ambos função heurística e concentração de feromônio e (3) se o encaminhamento de mensagens deve ser menos ou mais restritivo. Em nós com baixa conectividade, é interessante tornar o encaminhamento de mensagens no protocolo GrAnt menos restritivo, de forma a melhor aproveitar os poucos contatos disponíveis. Ao contrário, em nós com alta conectividade, torna-se necessário restringir o encaminhamento de mensagens de forma a não sobrecarregar sempre o mesmo conjunto de nós e enlaces. O desempenho do rGrAnt foi comparado com o GrAnt em três cenários diferentes de simulação. Resultados mostram que, nos três cenários, o rGrAnt obtém uma maior taxa de entrega de mensagens do que o GrAnt.

Palavras-chave: Redes Tolerantes a Atrasos, Otimização por Colônia de Formigas, Protocolo de Roteamento GrAnt, Conectividade dos Nós.

ABSTRACT

MENDES, Luís Guilherme Bergamini. A NEW VERSION OF THE GRANT PROTOCOL FOR DELAY TOLERANT NETWORKS. 105 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This work presents a new version of the Greedy Ant (GrAnt) protocol, which uses the Ant Colony Optimization (ACO) meta-heuristic to route traffic in complex and dynamic Delay/Disruption Tolerant Networks. The new version, called rGrAnt, was developed to provide the protocol the ability to extract information online from nodes' social connectivity, which can reside from disconnected and sparse to highly connected networking environments. With that information, rGrAnt can guide the ACO routing module using a set of rules for deciding (1) when to consider data from heuristic functions and/or pheromone concentration, (2) which data can be incorporated in both heuristic and pheromone parameters, and (3) if the message forwarding phase must be less or more restrictive. In nodes with low connectivity, GrAnt should be less restrictive when forwarding messages, in order to make better use of the few available contacts. In contrast, in nodes with high connectivity, it is necessary to restrict forwarding so as not to overload the same sets of nodes and links. rGrAnt was compared to GrAnt in three different mobility scenarios. Results show that, in the three scenarios, rGrAnt achieves a higher delivery ratio than GrAnt.

Keywords: Delay Tolerant Networks, Ant Colony Optimization, GrAnt Routing Protocol, Node Connectivity.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	–	Transferências na Internet utilizando TCP/IP	21
FIGURA 2	–	Transferências em DTNs utilizando o protocolo <i>bundle</i>	25
FIGURA 3	–	Módulo de roteamento do GrAnt	43
FIGURA 4	–	Conectividade do cenário WD com 339 nós na rede	45
FIGURA 5	–	Conectividade do cenário PoI com 120 nós na rede	47
FIGURA 6	–	Conectividade dos nós no cenário do transporte público de Curitiba	48
FIGURA 7	–	Taxa de entrega (WD) variando <i>buffer</i>	78
FIGURA 8	–	Redundância (WD) variando <i>buffer</i>	78
FIGURA 9	–	Conectividade dos nós no cenário WD com 75 nós na rede	79
FIGURA 10	–	Conectividade dos nós no cenário WD com 142 nós na rede	80
FIGURA 11	–	Conectividade dos nós no cenário WD com 594 nós na rede	80
FIGURA 12	–	Conectividade dos nós no cenário WD com 1104 nós na rede	81
FIGURA 13	–	Taxa de entrega (WD) variando n° de nós	81
FIGURA 14	–	Redundância (WD) variando n° de nós	82
FIGURA 15	–	Taxa de entrega (PoI) variando <i>buffer</i>	83
FIGURA 16	–	Redundância (PoI) variando <i>buffer</i>	83
FIGURA 17	–	Conectividade dos nós no cenário PoI com 12 nós na rede	84
FIGURA 18	–	Conectividade dos nós no cenário PoI com 36 nós na rede	85
FIGURA 19	–	Conectividade dos nós no cenário PoI com 120 nós na rede	85
FIGURA 20	–	Conectividade dos nós no cenário PoI com 240 nós na rede	86
FIGURA 21	–	Conectividade dos nós no cenário PoI com 360 nós na rede	86
FIGURA 22	–	Taxa de entrega (PoI) variando n° de nós	87
FIGURA 23	–	Redundância (PoI) variando n° de nós	87
FIGURA 24	–	Taxa de entrega (PoI, tempo de parada) variando <i>buffer</i>	88
FIGURA 25	–	Redundância (PoI, tempo de parada) variando <i>buffer</i>	89
FIGURA 26	–	Conectividade (PoI, tempo de parada) com 12 nós	90
FIGURA 27	–	Conectividade (PoI, tempo de parada) com 36 nós	90
FIGURA 28	–	Conectividade (PoI, tempo de parada) com 120 nós	91
FIGURA 29	–	Conectividade (PoI, tempo de parada) com 240 nós	91
FIGURA 30	–	Conectividade (PoI, tempo de parada) com 360 nós	92
FIGURA 31	–	Taxa de entrega (PoI, tempo de parada) variando n° de nós	92
FIGURA 32	–	Redundância (PoI, tempo de parada) variando n° de nós	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Parâmetros de Simulação	48
TABELA 2	– Resultados do WD para $NC = 1$	71
TABELA 3	– Resultados do WD para $NC \leq 2$	71
TABELA 4	– Resultados do WD para $NC \leq 3$	71
TABELA 5	– Resultados do WD para $NC \leq 4$	71
TABELA 6	– Resultados do Var3 no cenário PoI com 4 MB de <i>buffer</i>	72
TABELA 7	– Resultado do Var1 no cenário PoI com 4 MB de <i>buffer</i>	72
TABELA 8	– Resultados do Var3 no cenário PoI com 8 MB de <i>buffer</i>	72
TABELA 9	– Resultado do Var1 no cenário PoI com 8 MB de <i>buffer</i>	72
TABELA 10	– Resultado do Var1 no cenário WD para $NC \leq 5$ e $NC \leq 6$	73
TABELA 11	– Resultado do Var1 no cenário PoI para $NC \leq 5$ e $NC \leq 6$	73
TABELA 12	– Resultados dos Vars no WD para $NC \geq 70$	73
TABELA 13	– Resultados do Var7b no WD para NCs progressivamente menores ...	73
TABELA 14	– Resultados dos Vars no WD para $NC \geq 65$	74
TABELA 15	– Resultados do Var6c no WD para NCs progressivamente menores ...	74
TABELA 16	– Resultados dos Vars no WD para $NC \geq 56$	74
TABELA 17	– Resultados dos Vars no WD para $NC \geq 55$	74
TABELA 18	– Resultados do WD para $NC \geq 15$	75
TABELA 19	– Resultados do Var5b no WD	75
TABELA 20	– Resultados do Var5b no PoI	75
TABELA 21	– Resultados do PoI para $NC \geq 17$	76
TABELA 22	– Resultados do GrAnt e rGrAnt (Transporte Público de Curitiba) ...	94
TABELA 23	– Resultados do GrAnt (WD) variando o <i>buffer</i>	100
TABELA 24	– Resultados do rGrAnt (WD) variando o <i>buffer</i>	100
TABELA 25	– Resultados do GrAnt (WD) variando o n° de nós	100
TABELA 26	– Resultados do rGrAnt (WD) variando o n° de nós	101
TABELA 27	– Resultados do GrAnt (PoI) variando o <i>buffer</i>	102
TABELA 28	– Resultados do rGrAnt (PoI) variando o <i>buffer</i>	102
TABELA 29	– Resultados do GrAnt (PoI) variando o n° de nós	102
TABELA 30	– Resultados do rGrAnt (PoI) variando o n° de nós	103
TABELA 31	– Resultados do GrAnt (PoI, tempo de parada) variando o <i>buffer</i>	104
TABELA 32	– Resultados do rGrAnt (PoI, tempo de parada) variando <i>buffer</i>	104
TABELA 33	– Resultados do GrAnt (PoI, tempo de parada) variando o n° de nós ..	104
TABELA 34	– Resultados do rGrAnt (PoI, tempo de parada) variando o n° de nós .	105

LISTA DE ALGORITMOS

ALGORITMO 1	Pseudocódigo do módulo de roteamento do GrAnt	42
ALGORITMO 2	Pseudocódigo do Var1	50
ALGORITMO 3	Pseudocódigo do Var2	51
ALGORITMO 4	Pseudocódigo do Var2a	52
ALGORITMO 5	Pseudocódigo do Var2b	53
ALGORITMO 6	Pseudocódigo do Var2c	55
ALGORITMO 7	Pseudocódigo do Var2d	57
ALGORITMO 8	Pseudocódigo do Var3	58
ALGORITMO 9	Pseudocódigo do Var4	59
ALGORITMO 10	Pseudocódigo do Var4a	60
ALGORITMO 11	Pseudocódigo do Var4b	61
ALGORITMO 12	Pseudocódigo do Var4c	61
ALGORITMO 13	Pseudocódigo do Var4d	62
ALGORITMO 14	Pseudocódigo do Var4e	63
ALGORITMO 15	Pseudocódigo do Var5a	65
ALGORITMO 16	Pseudocódigo do Var6a	67
ALGORITMO 17	Pseudocódigo do Var7a	68

LISTA DE SIGLAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
ACS	<i>Ant Colony System</i>
AS	<i>Ant System</i>
CA	<i>Cultural Algorithm</i>
DTN	<i>Delay/Disruption Tolerant Network</i>
EWMA	<i>Exponential Weighted Moving Average</i>
FA	Formiga de Avanço
FIFO	<i>First In, First Out</i>
FR	Formiga de Retorno
GrAnt	<i>Greedy Ant</i>
ISS	<i>International Space Station</i>
NC	Número de Contatos
PoI	<i>Points of Interest</i>
PROPHET	<i>Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity</i>
rGrAnt	<i>Rule-based Greedy Ant</i>
S-ACO	<i>Simple Ant Colony Optimization</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
The ONE	<i>The Opportunistic Network Environment</i>
TTL	<i>Time To Live</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
WD	<i>Working Day</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2 MOTIVAÇÃO	17
1.3 OBJETIVOS	17
1.4 CONTRIBUIÇÕES	18
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2 REDES TOLERANTES A ATRASOS/DESCONEXÕES	19
2.1 COMUNICAÇÃO NA INTERNET	19
2.2 MOTIVAÇÃO PARA O USO DE DTN	21
2.3 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO PARA DTNS	22
2.4 CONTATOS INTERMITENTES E OPORTUNISTAS	23
2.5 PROTOCOLO BUNDLE	24
2.6 NÓS DE DTN	25
2.7 APLICAÇÕES POTENCIAIS DAS DTNS	27
3 OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	28
3.1 ALGORITMO SIMPLES DE ACO (S-ACO)	31
3.2 ALGORITMO <i>ANT SYSTEM</i> (AS)	32
3.3 ALGORITMO <i>ANT COLONY SYSTEM</i> (ACS)	33
4 PROTOCOLO GRANT	35
4.1 UTILIDADE DOS NÓS	36
4.1.1 Centralidade	36
4.1.2 Proximidade social	37
4.2 MÓDULOS DO GRANT	38
4.2.1 Módulo de roteamento	38
5 VARIAÇÕES DO PROTOCOLO GRANT	44
5.1 METODOLOGIA	44
5.2 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO VARS	49
5.2.1 Baixa conectividade	49
5.2.1.1 Protocolo Var1	49
5.2.1.2 Protocolo Var2	50
5.2.1.3 Protocolo Var2a	51
5.2.1.4 Protocolo Var2b	52
5.2.1.5 Protocolo Var2c	54
5.2.1.6 Protocolo Var2d	55
5.2.1.7 Protocolo Var3	57
5.2.1.8 Protocolo Var4	58
5.2.1.9 Protocolo Var4a	59
5.2.1.10 Protocolo Var4b	60
5.2.1.11 Protocolo Var4c	61
5.2.1.12 Protocolo Var4d	61
5.2.1.13 Protocolo Var4e	62

5.2.2 Alta conectividade	63
5.2.2.1 Protocolo Var5a	63
5.2.2.2 Protocolo Var5b	65
5.2.2.3 Protocolo Var5c	66
5.2.2.4 Protocolo Var6a	66
5.2.2.5 Protocolo Var6b	67
5.2.2.6 Protocolo Var6c	67
5.2.2.7 Protocolo Var7a	68
5.2.2.8 Protocolo Var7b	68
5.2.2.9 Protocolo Var7c	69
6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	70
6.1 AJUSTE DE PARÂMETROS	70
6.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO	76
6.2.1 Cenário WD	77
6.2.2 Cenário Poi	82
6.2.2.1 Configuração padrão	82
6.2.2.2 Maior tempo de parada dos nós	88
6.2.3 Cenário do transporte público da cidade de Curitiba	93
7 CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS	97
Apêndice A - TABELAS - CENÁRIO WD	100
Apêndice B - TABELAS - CENÁRIO POI	102
Apêndice C - TABELAS - CENÁRIO POI (MAIOR TEMPO)	104

1 INTRODUÇÃO

A Internet tem sido um grande sucesso na interconexão de dispositivos ao redor do mundo e isso somente foi possível devido a um conjunto de protocolos de comunicação chamado *TCP/IP* (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). O TCP/IP, presente nas centenas de milhares de redes que compõem a Internet, garante o roteamento e troca de mensagens com baixos atrasos e poucos erros, contanto que os enlaces estejam conectados de forma contínua entre dois nós fonte e destino. Os links na Internet geralmente são cabeados, porém tecnologias sem fio como satélites também são parte importante da rede (WARTHMAN, 2015).

Fora da Internet, em que dispositivos sem fio com capacidade de energia limitada e armazenamento escasso estão se desenvolvendo cada vez mais, as comunicações ocorrem em redes independentes, cada qual com protocolos de comunicação especializados. Geralmente tais redes são incompatíveis, cada uma sendo capaz de enviar mensagens dentro de seus próprios limites, mas sem a capacidade de se comunicar com outras. Cada uma dessas redes possui características próprias, como tempos de entrega de mensagens, mecanismos de endereçamento, qualidade de serviço e questões de segurança. Ao contrário da Internet, essas redes enfrentam períodos de desconexão arbitrariamente longos, altas taxas de erros e grandes assimetrias no envio de mensagens e recebimento de respostas (CERF et al., 2007).

Uma DTN, do inglês *Delay/Disruption Tolerant Network*, é uma rede capaz de tolerar longos atrasos e interrupções nas comunicações, incluindo as grandes distâncias do espaço (FALL, 2003). As DTNs suportam a interoperabilidade entre redes diferentes, traduzindo os protocolos distintos e acomodando a mobilidade e capacidade de energia reduzida dos dispositivos sem fio que vêm evoluindo. Originalmente, as DTNs foram desenvolvidas para uso interplanetário, em que a velocidade da luz pode parecer lenta devido às imensas distâncias envolvidas. Porém, as DTNs podem possuir aplicações diversas na Terra, abrangendo usos comerciais, científicos, militares e de utilidade pública (FALL; FARREL, 2008).

No contexto das DTNs, o roteamento de mensagens é um dos principais problemas abordados na literatura. Para solução desse problema, diversos protocolos de roteamento foram propostos. A seguir são descritos alguns deles.

No protocolo chamado Epidêmico, ao ocorrer um contato, ocorre a transmissão de todas as mensagens que o nó encontrado não possui, ou seja, ocorre um espelhamento dos *buffers* dos dois nós envolvidos no contato. Este protocolo possui um alto consumo de recursos, como bateria dos dispositivos e recursos de rede, logo não é considerado escalável com o crescimento da rede (VAHDAT; BECKER, 2000). Para o descarte de mensagens, o protocolo Epidêmico utiliza o modelo FIFO (*First In, First Out*).

O *Spray-and-Wait* trata-se de uma tentativa de melhoria do Epidêmico, no qual as cópias são transmitidas a todos os nós vizinhos e, em seguida, ocorre um período de espera até que um dos nós entregue a mensagem ao destino e retorne uma confirmação (SPYROPOULOS et al., 2005).

O PROPHET (*Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity*) é um protocolo que utiliza um histórico de encontros e transitividade em uma tentativa de determinar os melhores nós para se encaminhar uma mensagem, de forma a evitar a abordagem de replicação excessiva gerada pelo protocolo Epidêmico (LINDGREN et al., 2004).

O protocolo GrAnt (*Greedy Ant*) é o objeto de estudo desse trabalho, no qual são utilizadas informações sobre a utilidade dos nós para determinar os melhores caminhos para encaminhar mensagens, escalonar mensagens e gerenciar o espaço do *buffer* dos nós (VENDRAMIN et al., 2012b). O GrAnt utiliza a meta-heurística Otimização por Colônia de Formigas (ACO, do inglês *Ant Colony Optimization*), em que se estuda o comportamento de formigas durante a busca por caminhos mais curtos entre seus ninhos e fontes de alimento como inspiração para solução de problemas computacionais complexos. Pesquisas de Dorigo et al. (1996) mostraram que a inteligência do sistema não se encontra nos agentes individuais, mas sim no resultado da interação entre esses agentes e o meio em que se encontram. Através de trilhas de feromônio, as formigas traçam rotas que são reforçadas quando outras formigas passam pelo mesmo caminho. Esse modelo serve, então, como inspiração para técnicas de roteamento em redes, como nas DTNs. O termo *greedy*, ou guloso, do protocolo GrAnt refere-se ao uso de regras determinísticas ao invés das probabilísticas geralmente aplicadas no ACO. Com o uso do ACO, o GrAnt alcança uma taxa mais alta de entrega de mensagens, uma menor replicação de mensagens e um número menor de mensagens descartadas se comparado com os protocolos Epidêmico e

PROPHET (VENDRAMIN et al., 2012b).

Uma outra versão do GrAnt, chamada CGrAnt, utiliza um algoritmo cultural (CA, do inglês *Cultural Algorithm*) além do ACO para efetuar o roteamento em DTNs. Essa versão constitui um sistema de inteligência coletiva híbrido que utiliza o CA e ACO e um conjunto de métricas para caracterizar a conectividade social de usuários móveis (VENDRAMIN et al., 2016)(VENDRAMIN et al., 2012a).

Além do GrAnt e CGrAnt, outros protocolos que utilizam o ACO foram propostos para solucionar problemas em DTNs. No protocolo ACR, o nó fonte decide quando encaminhar uma mensagem de acordo com o peso (feromônio) no enlace para um nó intermediário (ZHENGUO et al., 2012). Nesse protocolo, os nós periodicamente transmitem pacotes para seus vizinhos de forma a estabelecer concentrações de feromônio nesses enlaces. Cada nó pode enviar pacotes em tempos diferentes e um limitador de saltos é utilizado para evitar sobrecarga na rede. Essa mesma transmissão de pacotes é utilizada para fazer o processo de evaporação de feromônio. No ACR, o encaminhamento é feito apenas se o nó encontrado não possui uma cópia da mesma mensagem. O protocolo BeeAntDTN possui inspiração natural, levando em consideração o comportamento de abelhas que coletam informações sobre uma fonte de alimento, e formigas que encontram o caminho mais curto entre o ninho e a fonte de alimento (ABABOU et al., 2014b). O BeeAntDTN é dividido em duas fases: (1) coleta de informações, em que abelhas artificiais são mensagens criadas no nó fonte e enviadas para três nós vizinhos que possuem o maior grau de conectividade com o destino, com o objetivo de coletar informações de qualidade do caminho, e (2) busca de saltos, em que cada nó do caminho criado pelas abelhas busca em seus vizinhos aquele com maior chance de encontrar o destino, através de uma regra de transição probabilística. Ababou et al. (2018) desenvolveram um protocolo chamado EERPFAnt focado em eficiência energética utilizando lógica fuzzy e ACO. Já o AntPROPHET combina a lógica do ACO com o protocolo PROPHET em busca de uma melhora na taxa de entrega de mensagens e diminuição do *overhead* gerado pela replicação de mensagens (ABABOU et al., 2014a). O protocolo criado por Wang et al. (2012) destina-se ao controle de congestionamentos em DTNs utilizando o ACO, em que o feromônio atua na melhora da taxa de entrega de mensagens e funções heurísticas previnem congestionamentos em tempo real.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O módulo de roteamento do GrAnt possui um algoritmo que se aplica de forma indiscriminada para nós com qualquer nível de conectividade, sejam eles pouco ou muito conectados. No entanto, percebe-se que o encaminhamento de mensagens efetuado por um nó com baixa conectividade poderia ser mais otimizado de forma a melhor aproveitar os poucos contatos disponíveis em cada instante de tempo. Por outro lado, a lógica inversa aplica-se a nós com alta conectividade, já que nesse tipo de ambiente o protocolo deveria ser capaz de restringir os encaminhamentos de mensagens de forma a não sobrecarregar sempre os mesmos nós e/ou enlaces.

Com isso em mente, entende-se que o módulo de roteamento do protocolo GrAnt deve ter seu algoritmo alterado para otimizar de forma *online* e dinâmica as entregas de mensagens de acordo com o nível corrente de conectividade de cada nó.

1.2 MOTIVAÇÃO

A principal motivação para a elaboração deste trabalho é prover ao protocolo GrAnt a habilidade de analisar a conectividade corrente de cada nó de modo a escolher melhor a informação a ser utilizada por cada nó em cada decisão de encaminhamento de mensagens. Como consequência, o protocolo GrAnt se adaptará dinamicamente a diferentes tipos de ambientes de redes, desde ambientes esparsos até ambientes altamente conectados e proverá uma melhor taxa de entrega de mensagens.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é apresentar uma nova versão do protocolo GrAnt, chamada rGrAnt (*Rule-based Greedy Ant*), que possa ser melhor aplicado em nós com baixa e alta conectividade, de forma a melhorar o desempenho do GrAnt em termos da taxa de entrega de mensagens.

Além disso, a presente dissertação propõe os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a conectividade dos nós por meio da observação do número de contatos de cada nó dentro de uma janela de tempo pré-estabelecida;
- Propor variações do protocolo GrAnt para nós com baixa conectividade, tendo em mente a possibilidade de se encaminhar mais mensagens do que o GrAnt;

- Propor variações do protocolo GrAnt para nós com alta conectividade, tendo em mente a possibilidade de se encaminhar menos mensagens do que o GrAnt;
- Decidir em quais momentos considerar informações de funções heurísticas e/ou concentração de feromônio;
- Decidir quais informações devem ser incorporadas na função heurística e concentração de feromônio;
- Decidir quando o módulo de roteamento do protocolo deve ser mais ou menos restritivo;
- Comparar o GrAnt com o rGrAnt em três cenários de simulação.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

O resultado desse trabalho foi disseminado através da seguinte publicação:

MENDES, L. G. B.; VENDRAMIN, A. C. K.; MUNARETTO, A.; DELGADO, M. R. A Rule-based Greedy Ant (rGrAnt) Protocol for Networking Environments. In: Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS 2018), São Paulo, SP, Brasil (Aceito para publicação).

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em sete capítulos. Após essa introdução do Capítulo 1, o Capítulo 2 apresenta uma breve descrição das DTNs, incluindo uma comparação com as comunicações tradicionais na Internet, motivações para seu uso e aplicações potenciais. O Capítulo 3 descreve a meta-heurística ACO, incluindo seus princípios básicos e os principais algoritmos presentes na literatura. O Capítulo 4 apresenta resumidamente o protocolo GrAnt, incluindo suas principais características e módulos. O Capítulo 5 mostra as variações do protocolo GrAnt que foram desenvolvidas e a metodologia utilizada para os testes. O Capítulo 6 apresenta o ajuste de parâmetros e a análise de desempenho do protocolo rGrAnt. Por fim, o Capítulo 7 descreve as conclusões obtidas nesse trabalho e direciona os trabalhos futuros.

2 REDES TOLERANTES A ATRASOS/DESCONEXÕES

A Internet permite a conexão de uma grande variedade de dispositivos e é altamente heterogênea em suas condições de operação e tipos de redes envolvidas (VENDRAMIN et al., 2012b). Isso se deve à proliferação de dispositivos móveis e às aplicações de redes sociais. Dessa forma, espera-se que a comunicação exista a qualquer momento e em qualquer lugar, mesmo que não exista uma infraestrutura de rede adequada. Como consequência, surgem novas necessidades de conectividade e adaptação às constantes mudanças no ambiente. Tais redes complexas e dinâmicas são as conhecidas como DTNs (*Delay/Disruption Tolerant Networks*) (FALL, 2003).

2.1 COMUNICAÇÃO NA INTERNET

Para diferenciar as comunicações em DTNs com comunicações via Internet, esta seção faz uma breve análise de como mensagens trafegam pela Internet, que se baseia no conceito de *comutação de pacotes*. Um pacote é definido como um bloco de informação, como por exemplo a parte de um e-mail ou de uma página web. Cada pedaço trafega de forma independente através de uma rede de roteadores que direcionam o pacote até o destino correto. Os pacotes podem chegar fora de ordem, porém é trabalho do mecanismo de transporte do destino reordená-los de forma correta. Roteadores, fonte e destino são chamados coletivamente de *nós* da rede (WARTHMAN, 2015).

A usabilidade da Internet depende de quatro importantes condições que também podem ser interpretadas como limitações (WARTHMAN, 2015):

1. Caminho contínuo e bidirecional entre fonte e destino para suportar interações fim-a-fim.
2. Baixos tempos de entrega (na ordem de milissegundos) para o envio de um pacote e o respectivo recebimento da resposta.

3. Taxas simétricas de transmissão de dados, ou seja, tanto da fonte para o destino quanto do destino para a fonte.
4. Baixas taxas de corrupção de dados e perdas de pacotes em cada enlace.

Dados são transportados pela Internet através de cinco camadas de rede principais, sendo a de aplicação considerada a mais alta e a física a mais baixa (WARTHMAN, 2015):

- **Camada de aplicação:** responsável por gerar e consumir as informações do usuário.
- **Camada de transporte:** responsável pela segmentação dos dados do usuário em partes menores no nó fonte e pela correspondente reconstrução da informação no nó destino, fazendo uso de controles de erro e fluxo. Na Internet, essa camada é representada pelo TCP.
- **Camada de rede:** responsável pelo roteamento dos dados que foram gerados nas camadas superiores. Na Internet, esse protocolo é representado pelo IP.
- **Camada de enlace:** responsável pela transmissão e recepção dos dados. Alguns protocolos comuns são o Ethernet e PPP (*Point-to-Point Protocol*).
- **Camada física:** responsável por tratar fluxos de bits no meio físico, seja um fio de cobre ou uma onda de rádio.

Os pacotes consistem em uma hierarquia de encapsulamentos realizados pelas camadas de rede. Durante a transmissão, dados de camadas mais altas vão sendo encapsulados juntamente com seus cabeçalhos em um objeto de camada mais baixa, que por sua vez recebe seu próprio cabeçalho. Os cabeçalhos, adicionados de forma sucessiva, são utilizados por cada camada de protocolo para o controle e processamento dos dados, formando a chamada *pilha de protocolo*, partindo da camada de aplicação até a camada física. No recebimento do pacote, os cabeçalhos são removidos até que se obtenha o dado originalmente enviado.

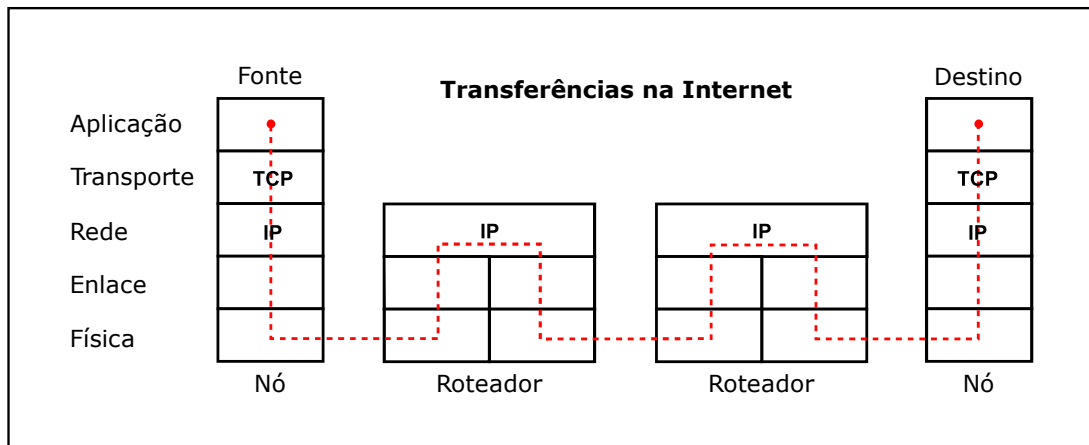


Figura 1: Transferências na Internet utilizando TCP/IP

Fonte: Adaptado de Warthman (2015)

A Figura 1 mostra o caminho percorrido por uma mensagem através da Internet. A mensagem cruza as diversas camadas descritas anteriormente, passando por roteadores até atingir o destino final.

2.2 MOTIVAÇÃO PARA O USO DE DTN

Muitos ambientes de comunicação não atendem às quatro condições básicas de usabilidade da Internet, pois possuem (CERF et al., 2007):

- Conectividade intermitente, já que não existe um caminho contínuo entre fonte e destino. Isso denomina-se *particionamento de rede* e, nesses casos, o protocolo TCP torna-se inviável.
- Atrasos longos ou variáveis.
- Taxas de dados assimétricas.
- Altas taxas de erros, requerendo correções e retransmissões em caso de pacotes perdidos ou corrompidos.

As DTNs superam os problemas acima utilizando o conceito de armazenar, transportar e encaminhar (*store-carry-and-forward*) (WARTHMAN, 2015). Mensagens inteiras ou blocos de mensagens são guardadas nos nós intermediários até eventualmente chegarem ao destino final.

Roteadores comuns armazenam mensagens por apenas alguns milissegundos enquanto aguardam pela disponibilidade de um próximo nó que possa encaminhar a mensagem até o destino. Por esse motivo, seu armazenamento interno possui baixa capacidade. Ao contrário dos roteadores comuns, roteadores DTN necessitam de armazenamento permanente e de maior capacidade pelos seguintes motivos (WARTHMAN, 2015):

- Um próximo nó que possa encaminhar uma mensagem até o destino pode levar um longo tempo para surgir.
- Um nó pode enviar ou receber informações muito mais rapidamente que outros.
- A mensagem, uma vez transmitida, pode precisar ser retransmitida caso ocorra algum erro.

2.3 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO PARA DTNS

Em uma DTN, um caminho completo da fonte até o destino muitas vezes não existe, por esse motivo é necessário empregar transferências de custódias de mensagens (VENDRAMIN et al., 2012b). Até que uma oportunidade de contato surja e que uma ou mais mensagens possam ser encaminhadas para esse contato, um nó deve armazenar mensagens em sua memória interna, possivelmente por um longo período de tempo. Também é possível que apenas uma oportunidade de contato exista ou que a memória interna desse contato não seja suficiente para receber custódias. Nesses cenários desafiadores, novas oportunidades aparecem para o desenvolvimento de protocolos de roteamento que saibam lidar com essas limitações da rede e dos nós.

Em primeiro lugar, considerando a duração limitada dos contatos entre os nós, determinar quais e em qual ordem as mensagens devem ser encaminhadas torna-se muito importante. Em segundo lugar, caso mais de um contato exista em um dado instante, determinar para quais nós encaminhar as mensagens também é essencial. Se for considerado espaço de armazenamento e largura de banda infinita, encaminhar o maior número possível de mensagens seria a melhor estratégia possível. No entanto, geralmente recursos são limitados nas DTNs. Finalmente, se o espaço de armazenamento de um nó está cheio e uma nova mensagem é recebida, é necessário determinar qual mensagem deve ser descartada para o armazenamento da nova.

Segundo Hua et al. (2009), protocolos de roteamento para DTNs podem ser classificados em:

1. de inundação ou de inundação controlada, em que se encaminham mensagens para todos os nós encontrados sem se preocupar com limitações da rede e espaço de armazenamento dos nós.
2. baseados em previsões, em que se verificam quais nós são mais adequados para o encaminhamento com base em dados históricos e sociais de cada nó.
3. baseados em agendamento, em que a trajetória de nós especiais é conhecida, podendo-se prever o momento ideal de cada contato.

Desconsiderando as limitações da rede e dos nós, o protocolo Epidêmico, descrito no Capítulo 1, fornece uma solução ideal dentro da categoria de inundação (VAHDAT; BECKER, 2000).

Soluções baseadas em previsões tentam selecionar contatos de forma a reduzir a sobrecarga gerada pela abordagem por inundação. Um protocolo notável nessa categoria é o PROPHET (LINDGREN et al., 2004), conforme descrito no Capítulo 1.

2.4 CONTATOS INTERMITENTES E OPORTUNISTAS

Um número crescente de dispositivos de comunicação opera em condições limitadas de energia. Isso é comum no espaço interplanetário e está se tornando cada vez mais comum em aplicações terrestres, como nos telefones móveis.

Quando os nós comunicantes estão em movimento, enlaces podem ser obstruídos a qualquer momento, causando intermitências. No ambiente da Internet, a conectividade intermitente causa perda de dados, fazendo com que o protocolo TCP requisite uma retransmissão. Se os erros são muito severos a conexão é encerrada, o que causa erros nas aplicações. As DTNs, em contraste, conseguem operar normalmente em tais ambientes devido a técnica de *store-carry-and-forward*. A conectividade nas DTNs pode ocorrer de duas formas (WARTHMAN, 2015): *oportunista* ou *agendada*.

Pessoas em movimento, veículos, aeronaves, satélites, etc, podem fazer contatos *oportunistas* e trocar informações quando porventura estiverem na linha de visão um do outro e com distância suficiente para comunicar-se levando em consideração suas capacidades limitadas de energia. Contatos oportunistas são utilizados para nossa própria

comunicação humana, por exemplo, quando encontramos alguém por acaso e iniciamos uma conversa. O mesmo conceito é utilizado em meios eletrônicos, como telefones celulares que trocam informações com a torre quando entram em seu alcance.

No espaço, tudo está em movimento e a velocidade da luz, apesar de ser a maior que existe, apresenta atrasos significantes. Em nosso próprio sistema solar esse atraso é na ordem de dezenas de minutos (WARTHMAN, 2015). Os nós comunicantes movem-se de forma previsível, por exemplo em suas órbitas elípticas ao redor do Sol, portanto pode-se prever janelas de transmissão para comunicações futuras. Para isso, até que o contato ocorra, utiliza-se o conceito de *store-carry-and-forward*. Para que o conceito de *agendamento* funcione, é necessário que as medidas de tempo sejam sincronizadas por toda a DTN (CERF et al., 2007).

2.5 PROTOCOLO BUNDLE

O protocolo *bundle* permite que o mecanismo de *store-carry-and-forward* funcione nas DTNs (CERF et al., 2007). Trata-se de uma camada de rede nova, acima de todas as outras camadas tradicionais. Isso torna possível que aplicações continuem operando normalmente, porém com a capacidade estendida de se comunicar em ambientes envolvendo longos tempos de entrega e desconexões frequentes. Um único protocolo *bundle* é utilizado em toda a DTN. Em contraste, protocolos mais baixos como os da camada física podem ser diferentes e escolhidos para melhor atender cada ambiente de comunicação (SCOTT; BURLEIGH, 2007). A Figura 2 exemplifica a transmissão de uma mensagem através de uma DTN utilizando o protocolo *bundle*. Observa-se que os nós utilizam as camadas tradicionais da Internet (aplicação, transporte, rede, enlace, física), porém com a camada adicional do protocolo *bundle*. Percebe-se também que podem ocorrer atrasos potenciais no encaminhamento entre os nós, que podem inclusive executar protocolos de transporte diferentes do TCP e protocolos de rede diferentes do IP.

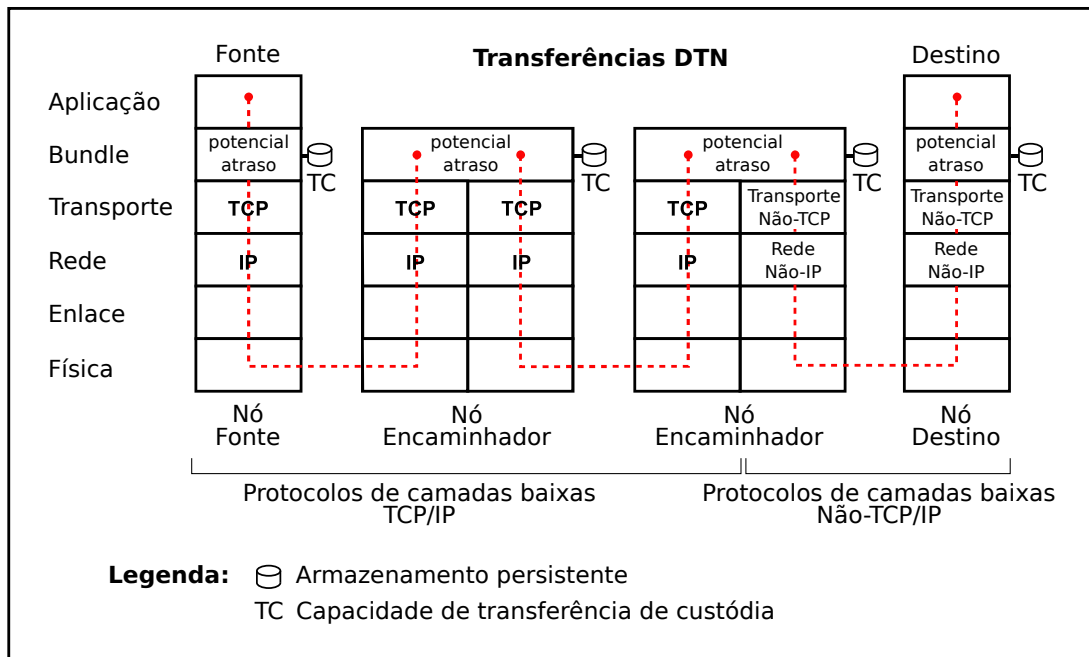


Figura 2: Transferências em DTNs utilizando o protocolo *bundle*

Fonte: Adaptado de Warthman (2015)

Um pacote desse protocolo consiste em três elementos (WARTHMAN, 2015): (1) cabeçalho, (2) dados de usuário da aplicação fonte, incluindo instruções de como processar, guardar e descartar os dados e (3) opcionalmente, um indicativo de fim do pacote (*trailer*). Os pacotes estendem a hierarquia de cabeçalhos criada pelos protocolos de Internet (como TCP/IP) e não os alteram de nenhuma forma, apenas os encapsulam para fornecer a capacidade adicional de comunicação da DTN. O protocolo *bundle* pode quebrar pacotes em partes menores, assim como fazem os protocolos IP em datagramas e TCP em segmentos (SCOTT; BURLEIGH, 2007).

Protocolos como o TCP, chamados interativos, não conseguem funcionar em enlaces com longos atrasos. Eles necessitam da troca de várias mensagens de controle até o estabelecimento de uma sessão válida para comunicação, ou então falham completamente (WARTHMAN, 2015). Por esse motivo, nós de DTN não podem comunicar-se dessa forma e requerem sessões simples e com mínima troca de mensagens de controle. Mensagens de confirmação chegam a ser até mesmo opcionais (CERF et al., 2007).

2.6 NÓS DE DTN

Em uma DTN, um nó é uma entidade que executa o protocolo *bundle*. Em qualquer momento, um nó pode funcionar como fonte, destino ou encaminhador de pacotes

(roteador ou *gateway*). Os nós encaminhadores de pacotes também são chamados de nós intermediários (FALL; FARREL, 2008).

Na função de fonte ou destino, o nó apenas envia ou recebe pacotes, sem encaminhar pacotes de outros nós. Se o nó opera em um enlace com atrasos, é necessário que exista uma memória persistente para enfileirar os pacotes até que um caminho de saída exista.

Na função de roteador, o nó encaminha pacotes para outros nós que executam o mesmo conjunto de protocolos das camadas mais baixas. Já na função de *gateway*, o nó encaminha pacotes para nós que executam protocolos diferentes nas camadas mais baixas, porém ele próprio executa todos os protocolos envolvidos de forma a poder realizar a tradução das diferenças.

Na Internet, o TCP garante a transmissão de dados fim-a-fim através da retransmissão de segmentos que não foram confirmados pelo destino. Os protocolos da camada de rede, enlace e física também possuem suas próprias garantias de integridade. Nas DTNs, o protocolo *bundle* depende desses mecanismos para garantir a confiabilidade na comunicação. No entanto, nós da DTN fazem o isolamento dos protocolos das camadas mais baixas, agindo como nós intermediários (WARTHMAN, 2015). A vantagem é que os demais protocolos ficam isolados dos altos atrasos envolvidos.

A retransmissão de dados perdidos ou corrompidos é suportada pelas DTNs tanto na camada de transporte quanto na camada *bundle*. Porém, como nenhum mecanismo de transporte opera fim-a-fim em uma DTN, a confiabilidade só pode ser implementada na camada *bundle* (CERF et al., 2007).

A transferência de custódias permite que a retransmissão de dados seja possível nas DTNs. Essa transferência é organizada entre os nós a partir de um pedido inicial da aplicação fonte. Quando um nó i transmite a custódia de um pacote para outro nó j , um cronômetro é iniciado. Se nenhuma resposta for recebida no período estipulado, o pacote é retransmitido. O tempo de espera pode ser definido globalmente ou computado localmente, baseado em experiências anteriores do nó em questão.

Um nó que possui a custódia de um pacote deve armazená-lo até que outro nó aceite a custódia ou que o tempo de vida (*time-to-live* ou TTL) expire. A transferência de custódia melhora a confiabilidade fim-a-fim, mas não a garante (CERF et al., 2007).

2.7 APLICAÇÕES POTENCIAIS DAS DTNS

A arquitetura baseada no conceito de *store-carry-and-forward* é uma generalização do conceito originalmente desenvolvido para as redes interplanetárias. O objetivo principal é a interoperabilidade entre ambientes de redes diferentes com a capacidade de sobrevivência a falhas de hardware e software. As DTNs possuem diversas aplicações (WARTHMAN, 2015):

- Pesquisa científica e engenharia.
- Serviço público e segurança: comunicação durante situações de desastre, ajuda humanitária, cidades inteligentes, controle de redes elétricas, controle de tráfego aéreo.
- Uso pessoal: troca de mensagens e arquivos em locais sem infraestrutura de rede de comunicação.
- Uso comercial: rastreamento de veículos, controle de estoques, monitoramento de safras, comunicação em minas subterrâneas.
- Monitoramento ambiental: migração animal, propriedades do solo, condições atmosféricas, eventos sísmicos.
- Inteligência e militar: monitoramento de transporte de cargas, comunicações durante buscas e resgates, comunicação e controle com veículos não-tripulados (UAV, do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*).
- Agências espaciais: comunicação com a Estação Espacial Internacional (ISS, do inglês *International Space Station*), comunicação interplanetária, monitoramento de lixo espacial.

Este capítulo fez um breve resumo das DTNs, mostrando as principais diferenças em relação à Internet, motivações para o uso, a descrição dos mecanismos de comunicação envolvidos e aplicações potenciais. No capítulo seguinte é apresentada a meta-heurística Otimização por Colônia de Formigas, outro conceito necessário antes da descrição do protocolo de roteamento GrAnt.

3 OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

Inteligência Coletiva (do inglês *Swarm Intelligence*) é um termo criado nos anos 80 para se referir a sistemas de robótica celular em que unidades autônomas ou agentes interagem com base em regras simples de comportamento (BENI, 1988). Um agente é algo que engloba desde uma sub-rotina de computador até um organismo inteligente como um ser humano, desde que apresente alguma característica de autonomia que o diferencie do ambiente em que está inserido (CASTRO, 2006). Grupos de agentes não sofisticados que se comunicam e coletivamente buscam uma solução para um problema de forma distribuída podem ser chamados de *swarm*. O termo Inteligência Coletiva sofreu mudanças de significado ao longo do tempo e, mais recentemente, refere-se a algoritmos que solucionam problemas com base no comportamento coletivo de organismos sociais, como por exemplo colônias de insetos (BONABEAU et al., 1999).

A inteligência coletiva é considerada um ramo de uma área maior chamada Computação Natural, a qual descreve sistemas computacionais inspirados em processos biológicos e da natureza (BALLARD, 1999). Existem situações típicas em que a computação natural pode ser aplicada. Muitas vezes, tem-se em mãos um processo complexo e dinâmico envolvendo muitas variáveis e soluções. Nesses casos, o ambiente pode mudar periodicamente ou até mesmo em intervalos de tempo irregulares, dessa forma não é possível obter uma solução ótima e determinística (CASTRO, 2006).

Segundo Castro (2006), algoritmos de inteligência coletiva são aplicados em problemas computacionais por sua capacidade de localizar soluções diversas de forma iterativa. Agentes evoluem e mantêm suas posições ao redor de soluções consideradas ótimas. Sistemas que convergem para esse tipo de solução através da adição de partes menores são chamados *bottom-up*. Exemplos típicos desses sistemas são formigas, que formam colônias, seres humanos, que formam sociedades, e até mesmo células, que formam, por exemplo, o sistema imunológico do corpo humano.

Cinco princípios básicos de sistemas baseados em inteligência coletiva foram levantados por Millonas (1994):

1. **Proximidade:** os indivíduos formam enlaces sociais através de suas interações;
2. **Qualidade:** os indivíduos devem possuir mecanismos para avaliar suas interações com o ambiente e outros indivíduos;
3. **Diversidade:** os indivíduos devem ser capazes de reagir a situações novas;
4. **Estabilidade:** as respostas do indivíduo às flutuações do ambiente não devem mudar a todo momento;
5. **Adaptabilidade:** os indivíduos são capazes de se adaptar a mudanças no ambiente.

Como os indivíduos não possuem conhecimento global, devem interagir entre si e com o ambiente para solucionar o problema em questão. Quando uma solução é encontrada, ela é propagada para o grupo de forma que no futuro o mesmo problema possa ser solucionado de forma mais eficiente.

As redes de comunicação podem se aproveitar do conceito de inteligência coletiva pois estão tornando-se cada vez mais complexas, sendo desejável que possam se auto-organizar diante das constantes mudanças de topologia, carga, diversidade de serviços envolvidos, etc (VENDRAMIN et al., 2012b).

Um dos principais fenômenos estudados por entomologistas, que são estudiosos de insetos, é a capacidade das formigas de encontrar o caminho mais curto entre seus ninhos e fontes de alimento. Isso é interessante para uma colônia de formigas pois caminhos longos iriam dificultar o carregamento do alimento, além da ameaça de competidores mais fortes na monopolização da fonte. Em estudos realizados por Pasteels et al. (1989a) e Deneubourg et al. (1990), o forrageamento de formigas foi observado de modo a se desenvolver um modelo formal para descrição de seu comportamento.

No experimento de ponte binária, duas pontes de mesmo comprimento foram colocadas entre o ninho e a fonte de alimento. Inicialmente ambas as pontes eram atravessadas por formigas, mas com o passar do tempo uma delas acabou sendo escolhida e a outra ignorada. Isso levou a conclusão de que as formigas depositavam uma substância química chamada feromônio sempre em mesma quantidade, e esse feromônio não sofria nenhum processo de evaporação. O feromônio, o qual é secretado por algumas

espécies animais, serve para comunicação entre indivíduos da mesma espécie. São utilizados em colônias para sinalização, orientação, entre outros (SOUZA, 2007). Em período semelhante, Pasteels et al. (1989b) fez um experimento utilizando pontes de tamanhos diferentes, e observou que com o passar do tempo o caminho mais curto passava a ser dominante. Isso ocorre pois através do caminho mais curto, as formigas levam menos tempo para retornar ao ninho, depositando assim mais feromônio naquele caminho. Através desses estudos, chegou-se a conclusão de que a escolha do caminho é probabilística, sendo a probabilidade de escolha do menor caminho proporcional à diferença de comprimento dos caminhos. Assim, a probabilidade de uma formiga escolher um caminho A no instante de tempo $t + 1$ é dada por:

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

$n_A(t)$ e $n_B(t)$ representam o número de formigas nos caminhos A e B no tempo t , respectivamente. c é a quantificação do nível de atração por uma ponte ainda não explorada. α representa uma tendência em considerar a quantidade de feromônio durante o processo de escolha de uma ponte, ou seja, valores altos de α indicam que a probabilidade da próxima formiga seguir o caminho com maior concentração de feromônio será alta. Por fim, P_B é a probabilidade da formiga escolher o caminho B no instante de tempo $t + 1$.

De forma resumida, a meta-heurística ACO funciona da seguinte maneira:

- Inicialmente, as formigas não possuem nenhuma informação ao sair do ninho;
- As formigas movem-se aleatoriamente na busca de fonte de alimento;
- Ao encontrar uma fonte de alimentos, a formiga carrega o alimento de volta para o ninho. Nesse percurso, secreta feromônio através de uma glândula exócrina localizada em seu abdômen. Essa trilha atrairá outras formigas no futuro;
- Novas formigas podem encontrar a trilha de feromônio e reforçá-la.

Percebe-se que a comunicação entre as formigas dá-se de forma indireta através de suas interações com o meio. Além disso, um processo denominado realimentação negativa ou evaporação faz a limitação da quantidade de feromônio nos caminhos. Sendo uma função do tempo, o feromônio evapora e evita que todas as formigas sigam por um único caminho, criando a possibilidade de maior exploração do espaço de busca.

3.1 ALGORITMO SIMPLES DE ACO (S-ACO)

O algoritmo conhecido como S-ACO (*Simple Ant Colony Optimization*) tem como objetivo encontrar o caminho mais curto entre dois nós de um grafo. Esse algoritmo teve como base para seu desenvolvimento o comportamento das colônias de formigas (DORIGO; CARO, 1999).

Inicialmente, tem-se um grafo composto por um conjunto de vértices e arestas que os conectam. Associa-se uma concentração de feromônio $\tau_{i,j}$ entre cada aresta ligando dois vértices i e j . No instante de tempo inicial, cada aresta recebe um pequeno valor aleatório de feromônio $\tau_{i,j}(0)$, fazendo com que as formigas selecionem caminhos aleatórios no começo do processo. K agentes móveis (ou formigas) são colocados no vértice de origem. A cada intervalo de tempo t , uma formiga move-se de um vértice para outro, atravessando qualquer aresta disponível. Incrementalmente, a formiga vai construindo um caminho (solução) até o vértice destino.

Uma formiga em um vértice i seleciona o próximo vértice j com base em uma regra de transição probabilística (DORIGO; CARO, 1999):

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

- $p_{i,j}^k$: probabilidade da formiga k de selecionar o vizinho j do vértice atual i ;
- N_i : conjunto de vértices conectados a i ;
- $\tau_{i,j}^\alpha(t)$: concentração de feromônio (peso) na aresta que conecta o vértice i a j no instante de tempo t ;
- α : constante positiva que amplifica a influência do feromônio. Valores muito altos dão importância excessiva ao feromônio, causando uma rápida convergência para caminhos sub-ótimos.
- $\sum_{j \in N_i}$: somatório da concentração de feromônio (pesos) de todas as arestas saindo de i conectando a cada vizinho j ;

Ao chegar ao destino final, cada formiga retorna ao nó inicial atualizando as concentrações de feromônio em cada aresta por onde passa. A concentração de feromônio atualizada, no S-ACO, é proporcional à qualidade da solução na qual a aresta entre i e j

se encontra, expressa como o inverso do comprimento do caminho em termos do número de saltos (DORIGO; CARO, 1999):

$$\Delta\tau_{i,j}^k(t) \propto \frac{1}{NSaltos^k(t)} \quad (3)$$

$$\tau_{i,j}(t+1) = \tau_{i,j}(t) + \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_{i,j}^k(t) \quad (4)$$

- $\Delta\tau_{i,j}^k(t)$: feromônio depositado pela formiga k na aresta entre os nós i e j , que faz parte da solução encontrada;
- $NSaltos^k(t)$: número de saltos, ou comprimento do caminho construído pela formiga k até o instante t . Quanto menos saltos, maior o incremento de feromônio;
- $\tau_{i,j}(t+1)$: concentração de feromônio na aresta entre i e j no instante $t+1$;
- n_k : todas as formigas k que passaram pela aresta, de forma a contabilizar a atualização de feromônio de todas.

Para permitir que as formigas explorem caminhos novos, um processo de evaporação é necessário. No S-ACO, a evaporação é dada por (DORIGO; CARO, 1999):

$$\tau_{i,j}(t + \Delta t) = (1 - \rho)\tau_{i,j}(t) \quad (5)$$

A constante $\rho \in (0, 1]$ representa a taxa de evaporação, fazendo com que as formigas “esqueçam” decisões anteriores. Quanto maior o valor de ρ , mais aleatória será a busca, e $\rho = 1$ representa uma busca totalmente aleatória.

3.2 ALGORITMO *ANT SYSTEM* (AS)

Cronologicamente, o algoritmo AS foi o primeiro a ser desenvolvido (DORIGO et al., 1996). O AS foi criado para o problema do caixeiro viajante (TSP, *Travelling Salesman Problem*), o qual consiste em encontrar o menor caminho entre um conjunto de cidades, visitando todas as cidades uma única vez e ao final retornando à cidade inicial.

O AS baseia-se na meta-heurística Busca Tabu (GLOVER, 1986) e sua principal contribuição é incluir funções heurísticas para a probabilidade de transição de um agente $P_{i,j}^k$.

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

$$p_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{i,j}^\alpha(t)\eta_{i,j}^\beta(t)}{\sum_{u \in N_i(t)} \tau_{i,u}^\alpha(t)\eta_{i,u}^\beta(t)} & \text{se } j \in N_i(t) \\ 0 & \text{se } j \notin N_i(t) \end{cases} \quad (6)$$

- $p_{i,j}^k$: representa a probabilidade da formiga k selecionar a cidade j a partir da cidade i ;
- $N_i(t)$: representa o conjunto de cidades ligadas à i em um instante de tempo t ;
- $\tau_{i,j}^\alpha(t)$: representa a concentração de feromônio na aresta que liga i a j . Esse valor serve como um histórico das melhores movimentações anteriores, e funciona como uma realimentação positiva que intensifica uma solução em particular;
- $\eta_{i,j}^\beta(t)$: representa alguma função heurística que indica uma influência explícita para alguma solução mais atrativa e conveniente, ou seja, depende do problema considerado. Uma função heurística adequada para o problema de minimização de distância pode ser dada por (DORIGO et al., 1996):

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{d_{i,j}} \quad (7)$$

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

- α e β : representam constantes positivas que amplificam as influências da concentração de feromônio e função heurística, respectivamente. Se $\alpha = 0$, a concentração de feromônio é desprezada. Se $\beta = 0$, a função heurística é desprezada e o algoritmo AS assume um comportamento similar ao S-ACO da seção anterior.

3.3 ALGORITMO *ANT COLONY SYSTEM* (ACS)

O algoritmo ACS foi desenvolvido por Gambardella e Dorigo (1996) como uma melhoria para o algoritmo AS, descrito anteriormente. O ACS propõe uma nova regra de transição que visa intensificar a qualidade de soluções encontradas anteriormente ou explorar o espaço em busca de novas soluções. Uma formiga k localizada em uma cidade i selecionará a próxima cidade j com base na regra descrita a seguir.

A Equação 8 define qual estratégia o algoritmo utilizará, seja de **intensificação** ou **exploração** de caminhos. Primeiramente, define-se parâmetro r_0 , que representa uma probabilidade no intervalo $[0, 1]$. Em seguida, um valor aleatório r é sorteado entre $[0, 1]$. Se $r_0 \geq r$, o algoritmo adotará a estratégia de intensificação, ou seja, as formigas irão selecionar de forma gulosa o melhor enlace disponível, representado pelo maior valor de $\tau \times \eta^\beta$. Caso contrário, se $r_0 < r$, o algoritmo adotará a estratégia de exploração, utilizando para isso a Equação 6 do AS com o parâmetro $\alpha = 1$. Portanto, quanto menor o valor de r_0 , maior a probabilidade de novas buscas serem incentivadas. Para valores maiores de r_0 , maior a probabilidade de intensificação dos melhores enlaces encontrados.

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in N_i(t)} \{\tau_{i,u}(t) \times \eta_{i,u}^\beta(t)\} & \text{se } r_0 \geq r \\ J & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

- $r \in [0, 1]$: valor aleatório sorteado;
- $r_0 \in [0, 1]$: parâmetro definido de antemão;
- $N_i(t)$: conjunto de cidades que podem ser visitadas no instante t ;
- u : cidade pertencente ao conjunto $N_i(t)$;
- $J \in N_i(t)$: cidade escolhida de acordo com a probabilidade de transição do algoritmo AS (Equação 6).

Este capítulo fez um breve resumo do ACO, mostrando as principais características dessa meta-heurística e os principais algoritmos desenvolvidos. Utilizando como base as DTNs apresentadas no capítulo anterior e o ACO apresentado nesse capítulo, o capítulo seguinte apresenta o protocolo GrAnt.

4 PROTOCOLO GRANT

O protocolo GrAnt (VENDRAMIN et al., 2012b) emprega uma busca ACO completa com o objetivo de direcionar o tráfego em DTNs para os nós mais promissores, limitando o número de mensagens redundantes e melhorando a taxa de entrega. O termo *greedy*, ou guloso, refere-se ao uso de regras determinísticas ao invés das probabilísticas geralmente aplicadas no ACO, ou seja, o GrAnt sempre escolhe a melhor opção disponível. O GrAnt utiliza feromônio e função heurística para determinar os melhores caminhos entre uma determinada fonte e destino, ao contrário do estado da arte em protocolos de roteamento para DTNs, que se baseiam apenas em informações locais de nós vizinhos (LINDGREN et al., 2004) (DALY; HAAHR, 2007) (ZHOU et al., 2009).

Para poder se adaptar às grandes variações sofridas nas DTNs, as seguintes considerações foram observadas ao projetar o protocolo GrAnt (VENDRAMIN et al., 2012b):

1. É necessário permitir caminhos redundantes, para evitar que o algoritmo convirja para um ou poucos caminhos;
2. Ao invés de fazer a evaporação de feromônio por tempo, o GrAnt faz evaporação baseada em evento, que somente ocorre quando um nó detecta que um novo caminho para o destino foi encontrado;
3. Um nó fonte pode levar um longo tempo para encontrar um caminho para o destino, por isso, as formigas são encapsuladas nas mensagens;
4. O número de formigas não é fixo, ao contrário de ACOs clássicos. O número é completamente dinâmico de acordo com contatos já estabelecidos e sucesso de entrega de mensagens. Novas formigas são criadas e enviadas somente quando a recepção da respectiva mensagem for desconhecida e melhores encaminhadores surgirem;
5. Ao invés de uma escolha probabilística, é utilizada uma regra de transição gulosa, ou seja, a melhor opção é sempre escolhida. Isso permite a reutilização de bons encaminhadores, considerando funções heurísticas e feromônio.

O funcionamento do GrAnt pode ser resumido nos seguintes passos. Primeiramente, uma Formiga de Avanço (FA) k é enviada juntamente com uma mensagem m em direção a um destino d . A FA k coleta informações de qualidade sobre cada nó x que visita no caminho para d . Após chegar ao destino, uma Formiga de Retorno (FR) é criada e enviada no caminho reverso criado pela FA. A FR armazena a qualidade total Q_{path}^k do caminho encontrado pela FA, e deposita uma quantidade de feromônio proporcional a esse valor nos enlaces entre os nós do caminho reverso. Caso mensagens futuras sejam direcionadas ao mesmo destino, o feromônio nos enlaces é reforçado e auxilia no direcionamento de novas FAs.

Para caracterizar a utilidade dos nós como encaminhadores de mensagens, o GrAnt analisa informações sobre a interação social entre os nós, conforme descrito na Seção 4.1.

4.1 UTILIDADE DOS NÓS

O estudo de redes sociais é importante para redes complexas, principalmente em DTNs, pois a conectividade sem fio dos nós é baseada em interações sociais de pessoas ao invés de ser simplesmente um movimento aleatório (WASSERMAN; FAUST, 1994). É essencial conhecer características tais como o número de indivíduos que um nó conhece em uma rede, qual a influência dos indivíduos na rede, qual a chance de dois indivíduos aleatórios se conhecerem, etc (POOL; KOCHEN, 1978). O protocolo GrAnt caracteriza a utilidade de cada nó considerando sua **centralidade** e **proximidade social** em relação a outros nós.

4.1.1 CENTRALIDADE

O GrAnt considera duas importantes medidas de centralidade: **de grau** e **de intermediação**.

- **Centralidade de grau** (FREEMAN, 1979): um nó possui alta centralidade de grau quando é dito mais popular, ou seja, possui mais oportunidades de encaminhar mensagens a outros nós. Cada nó guarda internamente o número de contatos estabelecidos por unidade de tempo. Nós com boas medidas de centralidade de grau no passado podem ser bons encaminhadores no futuro. Com base nessa observação, o protocolo GrAnt utiliza EWMA (*Exponential Weighted Moving Average*) para estimar a centralidade de grau futura de um nó i :

$$DC_i(t + \Delta t) = \theta \times DC_i(t - \Delta t) + (1 - \theta) \times DC_i(t) \quad (9)$$

$DC_i(t + \Delta t)$ é a previsão futura da popularidade do nó i no instante de tempo $t + \Delta t$. θ é um número de 0 a 1 que representa uma constante de suavização. $DC_i(t - \Delta t)$ e $DC_i(t)$ representam, respectivamente, a popularidade no instante passado $t - \Delta t$ e no presente t .

- **Centralidade de intermediação (*betweenness*):** a centralidade de intermediação tradicional mede a frequência com que um nó aparece nos caminhos mais curtos entre dois outros nós (FREEMAN, 1979). Como o GrAnt interessa-se por caminhos diferentes para cada destino d , a centralidade de intermediação é calculada de forma um pouco diferente. Um nó i só possui alta centralidade de intermediação para um nó d se aparece com frequência no caminho entre qualquer nó fonte e um destino d ($BetwU_{i,d}$). Um nó com alta centralidade de intermediação para um destino específico é, portanto, um melhor candidato a encaminhar mensagens para esse destino.

4.1.2 PROXIMIDADE SOCIAL

Outra importante informação utilizada pelo GrAnt é a proximidade social de um nó em relação a outros. Para isso, utiliza-se uma nova métrica baseada na duração e frequência de contato entre dois nós i e j .

$$Social_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j} \times d_{i,j}(t + \Delta t)}{T} \quad (10)$$

$\lambda_{i,j}$ representa o número de vezes que os nós i e j estabeleceram contato na janela de tempo T .

$d_{i,j}(t + \Delta t)$ representa a duração de contato prevista no futuro entre os nós i e j no instante de tempo $t + \Delta t$, e é calculada como:

$$d_{i,j}(t + \Delta t) = \mu \times d_{i,j}(t - \Delta t) + (1 - \mu) \times d_{i,j}(t) \quad (11)$$

μ representa um coeficiente de peso entre 0 e 1, e $d_{i,j}(t - \Delta t)$ e $d_{i,j}(t)$ representam, respectivamente, a duração de contato no instante passado $t - \Delta t$ e presente t .

4.2 MÓDULOS DO GRANT

O protocolo GrAnt é composto pelos seguintes módulos (VENDRAMIN et al., 2012b):

- **Roteamento:** determina a rota que uma mensagem deve seguir para chegar ao destino;
- **Escalonamento:** determina a ordem de envio das mensagens;
- **Gerenciamento de *buffer* dos nós:** determina qual mensagem deve ser descartada quando o limite do *buffer* é atingido e uma nova mensagem é recebida.

Ambos os módulos de escalonamento e gerenciamento de *buffer* utilizam as seguintes informações sobre cada mensagem para tomar suas decisões: prioridade, número de réplicas encaminhadas e probabilidade de encontrar o destino final. O presente trabalho tem como objetivo atuar apenas no módulo de roteamento do GrAnt. Por esse motivo, apenas esse módulo está detalhado na próxima seção.

4.2.1 MÓDULO DE ROTEAMENTO

O módulo de roteamento do protocolo GrAnt consiste em duas fases: **busca de caminho** e **retorno**.

A **busca de caminho** é composta por duas funções: **encaminhamento de mensagem** e **medição da qualidade do caminho**.

O **encaminhamento de mensagem** é responsável por definir qual caminho a mensagem deve seguir para eventualmente chegar ao destino. A decisão de encaminhamento de um nó para outro é baseada em uma regra de transição gulosa que se aproveita de todas as boas oportunidades de contato. A regra de transição utiliza duas métricas populares do paradigma ACO: feromônio $\tau_{(i,j)d}$, no enlace (i, j) no caminho para o destino d e função heurística $\eta_{(x),d}$ associada ao nó x no caminho para o destino d .

Uma FA k em um nó i decide se deve encaminhar uma mensagem m para um novo contato j baseada em três condições, verificadas sequencialmente (VENDRAMIN et al., 2012b):

1. Esta condição encaminha m por um caminho de boa qualidade encontrado anteriormente. A condição sempre verifica se o feromônio no enlace (i, j) é maior que

um limite mínimo δ_{init} e se a utilidade do contato j (U_j) é melhor que a utilidade do nó corrente i (U_i). Se ambas as condições forem verdadeiras, a mensagem m é encaminhada e as condições seguintes não são testadas. A utilidade do nó é calculada de forma diferente caso o nó seja fonte ou intermediário. Caso i seja o nó fonte de m , este pode não possuir utilidade de intermediação para d ($BetwU_{i,d}$). Portanto, considera-se somente a utilidade de proximidade social em relação a d (ou seja, $U_i = Social_{i,d}$ e $U_j = Social_{j,d}$). No entanto, se i for um nó intermediário de m , a utilidade considerará tanto a proximidade social quanto a intermediação. Essas duas métricas são incorporadas na função heurística a seguir, onde x representa os nós sendo analisados (i e j):

$$U_x = \eta_{(x),d}(t) = BetwU_{x,d} + Social_{x,d} \quad (12)$$

2. Esta condição busca um novo encaminhador para m dentre os contatos j atuais do nó i , considerando que um encaminhador anterior já foi encontrado e armazenado em uma variável chamada $best_fwd$, com a sua utilidade correspondente armazenada em $U_{best_fwd}^m$. A inicialização dessas duas variáveis é tratada na condição seguinte. As variáveis $U_{best_fwd}^m$ e $best_fwd$ são respectivamente atualizadas com U_j e j , quando existir um valor anterior para $U_{best_fwd}^m$ (não vazio) e a relação $U_j > U_{best_fwd}^m$ for verdadeira. Nesse caso, a condição 3 não é testada. A variável $U_{best_fwd}^m$ é uma importante contribuição do protocolo GrAnt, pois limita dinamicamente o número de cópias de m . As utilidades de j e $best_fwd$ consideram o produto da função heurística com o feromônio, onde x representa o nó sendo analisado (i e j):

$$U_x = \eta_{(x),d}(t) \times \tau_{(i,j)d}(t) \quad (13)$$

3. Esta condição inicializa as variáveis $U_{best_fwd}^m$ e $best_fwd$. Se nenhuma das condições anteriores foram satisfeitas, essa condição verifica se a relação $U_j \geq U_i$ é verdadeira. Caso seja, as variáveis $U_{best_fwd}^m$ e $best_fwd$ são inicializadas com U_j e j , respectivamente. As utilidades de i e j são calculadas de forma diferente em nós fonte e intermediários. Se o nó é fonte, considera-se apenas a utilidade de proximidade social $Social_{x,d}$, e para nós intermediários considera-se o produto da função heurística com o feromônio.

Após o teste das condições, o GrAnt atualiza no nó uma variável chamada $Forw_m$, que representa o número de vezes que a mensagem foi encaminhada para nós j . Essa

informação é incrementada em uma unidade a cada encaminhamento.

A função de **medição da qualidade do caminho** é chamada cada vez que uma mensagem deve ser entregue ao destino. Quando a busca por caminho é iniciada, uma FA é criada e encapsulada na mensagem de dados e depois é enviada ao destino através de um ou mais nós intermediários. A busca por novos caminhos continua até que se chegue ao destino ou até que se receba a informação que a mensagem foi entregue. Ao longo do caminho, a FA carrega as seguintes informações: o ID do nó que originou a mensagem, o ID dos nós pelos quais a FA passou e a previsão da qualidade futura de cada nó. A seguir é feita a atualização de uma variável de qualidade parcial, chamada $q_{path_{s,d}}^k$, associada ao caminho $path_{s,d}^k$ construído pela formiga k entre a fonte s e o destino d .

$$q_{path_{s,d}}^k(t) = \sum_{\forall i \in path_{s,d}^k} Q_i(t + \Delta t) \quad (14)$$

A parcela $q_{path_{s,d}}^k(t)$ é a qualidade parcial do caminho no instante t . A previsão da qualidade futura $Q_i(t + \Delta t)$ é a centralidade de grau $DC_i(t + \Delta t)$ do nó i pertencendo ao caminho $path_{s,d}^k$ no instante de tempo $t + \Delta t$.

Quando a FA k chega no destino final, a qualidade total do caminho construído $Q_{path_{s,d}}^k$ é calculada considerando-se a média da qualidade dos nós que pertencem ao caminho e o inverso do número de saltos $nHops$ que compõe o caminho.

$$Q_{path_{s,d}}^k(t) = \frac{q_{path_{s,d}}^k(t)}{nHops} + \frac{1}{nHops} \quad (15)$$

Quando há menos saltos no caminho, menos recursos de rede são consumidos e menos interferências são geradas.

Após o cálculo da qualidade do novo caminho, uma FR é criada com as informações obtidas pela FA, e então a FA é excluída. A FR é enviada no caminho inverso percorrido pela FA, com base no fenômeno de “mundo pequeno” resultante de observações tais como (MILGRAM, 1967 apud VENDRAMIN et al., 2012b):

1. Indivíduos aleatórios são frequentemente conectados por um pequeno número de conhecidos;
2. Alguns encontros possuem comportamento repetido, suficiente para se construir um grafo de relacionamentos;

3. Os nós possuem rotinas que resultam em lugares frequentemente visitados e encontros repetidos.

Nós mais próximos do destino possuem uma maior chance de serem visitados pela FR, pois a prioridade atribuída a mensagens FR indicam que elas são sempre encaminhadas por primeiro e excluídas por último. A recepção de uma FR k enviada por um nó j para cada vizinho i produz dois efeitos:

1. Aumenta em uma unidade a utilidade de intermediação de i em relação ao destino d ($BetwU_{i,d}$);
2. Atualiza a concentração de feromônio em direção a d de acordo com os valores:

$$\begin{cases} \tau_{(i,j),d}(t) = (1 - \rho) \times \tau_{(i,j),d}(t - \Delta t) + Q_{path_{s,d}}^k(t) & \text{se } (i, j) \in path_{s,d}^k \\ \tau_{(i,x),d}(t) = (1 - \rho) \times \tau_{(i,x),d}(t - \Delta t) & \text{se } (i, x) \notin path_{s,d}^k \end{cases} \quad (16)$$

Onde $\tau_{(i,y),d}(t - \Delta t)$ representa o feromônio no enlace (i, y) durante a última atualização $(t - \Delta t)$ e $Q_{path_{s,d}}^k$ é a concentração de feromônio depositado pela formiga FR k no enlace (i, j) (onde $i, j \in path_{s,d}^k$). O termo $(1 - \rho) \times \tau_{(i,y),d}(t - \Delta t)$ representa o processo de evaporação, em que ρ é a taxa de evaporação necessária para que as formigas “esqueçam” valores anteriores de feromônio. A evaporação é somente ativada quando um novo valor de feromônio é depositado, sendo uma contribuição do protocolo GrAnt.

O recebimento da FR também serve como confirmação de que a mensagem foi recebida pelo destino, permitindo que os nós que ainda armazenam a mensagem façam o descarte da mesma e de suas variáveis associadas.

O pseudocódigo a seguir resume o módulo de roteamento do GrAnt. O valor $\tau_{(i,j),d}(t)$ é o feromônio no enlace (i, j) para o destino d no tempo t , e $\eta_{(x),d}(t) = Social_{x,d} + BetwU_{x,d}$ é a função heurística do nó $x = (i, j)$ no tempo t .

```

1 dada uma mensagem m no buffer do nó i
2 para cada conexão j faça
3   se nó i é a fonte de m então
4     se  $(\tau_{(i,j),d}(t) > \delta_{init})$  e  $(Social_{j,d} > Social_{i,d})$  então
5       nova Tupla<Mensagem, Encaminhador>(m,j);
6     senão se  $(U_{best\_fwd}^m \neq \emptyset)$  e  $(\tau_{(i,j),d}(t) \times \eta_{(j),d}(t) > U_{best\_fwd}^m)$  então
7        $U_{best\_fwd}^m = \tau_{(i,j),d}(t) \times \eta_{(j),d}(t)$ ;
8        $best\_fwd = j$ ;
9     senão se  $(U_{best\_fwd}^m == \emptyset)$  e  $(Social_{j,d} \geq Social_{i,d})$  então
10       $U_{best\_fwd}^m = \tau_{(i,j),d}(t) \times \eta_{(j),d}(t)$ ;
11       $best\_fwd = j$ ;
12    fim
13  senão // nó intermediário
14    se  $(\tau_{(i,j),d}(t) > \delta_{init})$  e  $(\eta_{(j),d}(t) > \eta_{(i),d}(t))$  então
15      nova Tupla<Mensagem, Encaminhador>(m,j);
16    senão se  $(U_{best\_fwd}^m \neq \emptyset)$  e  $(\tau_{(i,j),d}(t) \times \eta_{(j),d}(t) > U_{best\_fwd}^m)$  então
17       $U_{best\_fwd}^m = \tau_{(i,j),d}(t) \times \eta_{(j),d}(t)$ ;
18       $best\_fwd = j$ ;
19    senão se  $(U_{best\_fwd}^m == \emptyset)$  e
20       $(\tau_{(i,j),d}(t) \times \eta_{(j),d}(t) \geq \tau_{(i,d),d}(t) \times \eta_{(i),d}(t))$  então
21       $U_{best\_fwd}^m = \tau_{(i,j),d}(t) \times \eta_{(j),d}(t)$ ;
22       $best\_fwd = j$ ;
23    fim
24 fim

```

Algoritmo 1: Pseudocódigo do módulo de roteamento do GrAnt.

Fonte: Vendramin et al. (2012b)

A Figura 3 ilustra o módulo de roteamento do GrAnt.

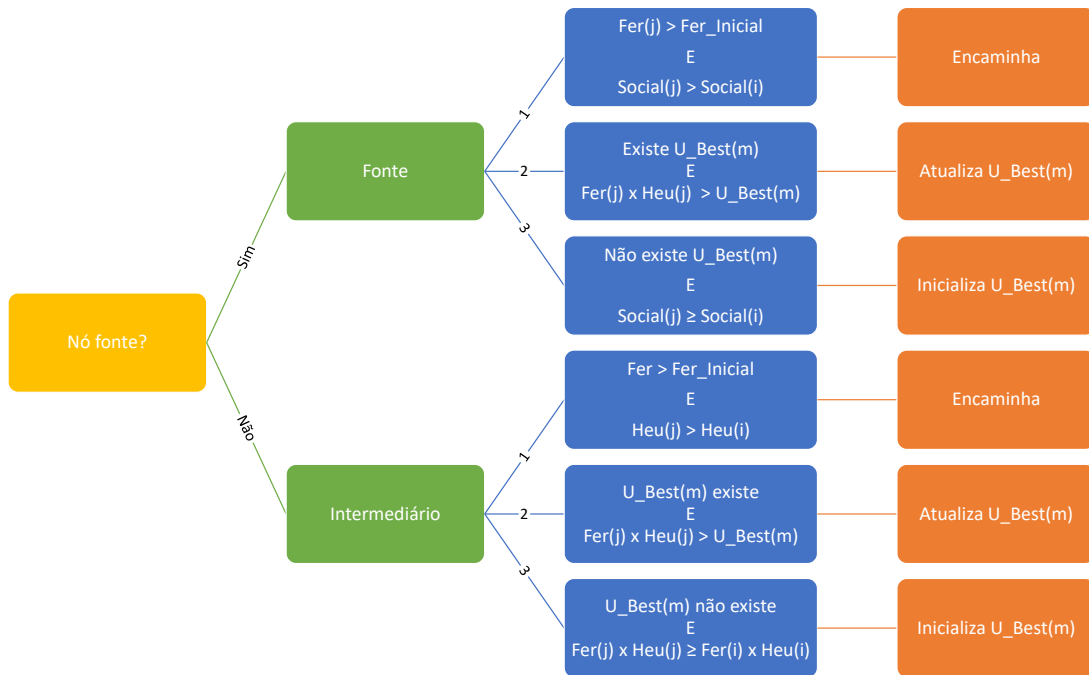


Figura 3: Módulo de roteamento do GrAnt

Este capítulo apresentou o protocolo GrAnt que utiliza a meta-heurística ACO para prover o roteamento em DTNs. O capítulo a seguir investiga variações propostas para o protocolo GrAnt de forma a melhorar a taxa entrega de mensagens.

5 VARIAÇÕES DO PROTOCOLO GRANT

O presente capítulo apresenta a metodologia adotada para criar variações que irão compor o rGrAnt, bem como uma descrição detalhada de cada uma das variações criadas.

5.1 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia utilizada com o objetivo de melhorar o desempenho do protocolo de roteamento GrAnt em termos da métrica taxa de entrega de mensagens. Foram desenvolvidas variações do GrAnt especificamente voltadas para nós com baixa e alta conectividade, de acordo com o número de contatos que possuem por tempo.

Para os nós caracterizados por uma baixa conectividade, foram criados os protocolos batizados de Var1, Var2, Var2a, Var2b, Var2c, Var2d, Var3, Var4, Var4a, Var4b, Var4c, Var4d e Var4e. Já para os nós com alta conectividade, os quais possuem grande número de conexões por instante de tempo, foram criadas as variações Var5a, Var5b, Var5c, Var6a, Var6b, Var6c, Var7a, Var7b e Var7c. Para os nós com média conectividade, o protocolo GrAnt é mantido.

Utilizou-se o simulador The ONE desenvolvido na Universidade Aalto, na Finlândia, em parceria com o Centro de Pesquisas da Nokia. O The ONE é capaz de gerar movimentos dos nós com base em diversos modelos, fazer o encaminhamento de mensagens entre nós de DTN, visualizar a mobilidade e repasse de mensagens em tempo real através de sua interface gráfica, importar dados de mobilidade a partir de arquivos *trace* e gerar relatórios contendo estatísticas diversas (KERÄNEN et al., 2009).

Para avaliar o desempenho de todos esses protocolos em relação ao GrAnt, primeiramente fez-se necessário avaliar a conectividade dos nós. Utilizou-se o cenário de simulação chamado WD (*Working Day*) (EKMAN et al., 2008), que simula a rotina das pessoas que dormem em suas casas, saem para trabalhar durante o dia, podem ir para

outra atividade após o expediente e, ao final do dia, retornam às suas residências. Esse cenário, utilizado em (VENDRAMIN et al., 2012b) durante o desenvolvimento do GrAnt e também amplamente utilizado em pesquisas de DTN por ser fornecido por padrão pelo simulador The ONE, retrata de forma mais realista o dia-a-dia das pessoas. Foram utilizados os seguintes parâmetros de simulação: tempo total de 800 mil segundos, TTL das mensagens de 1800 minutos, tamanho do *buffer* de 10 MB, alcance das interfaces de rede de 10 metros, velocidade de transmissão das interfaces de rede de 2 Mbps, total de nós na rede de 339, tráfego de dados correspondente a uma nova mensagem gerada a cada 100-150 segundos, tamanho das mensagens de 500 KB, distribuição dos nós em 7 grupos que seguem rotina, um grupo de “andarilhos” que se movem de forma aleatória e 7 grupos de ônibus que circulam pela área da simulação em rotas pré-estabelecidas em um mapa da cidade de Helsinki.

Utilizando o cenário WD para avaliar a conectividade dos nós, foi obtido o NC (Número de Contatos) que cada nó teve a cada janela de 5000 segundos (ver Figura 4). De forma a suavizar mudanças abruptas de conectividade, foi considerada a média entre o valor de conectividade corrente e o da janela de tempo anterior.

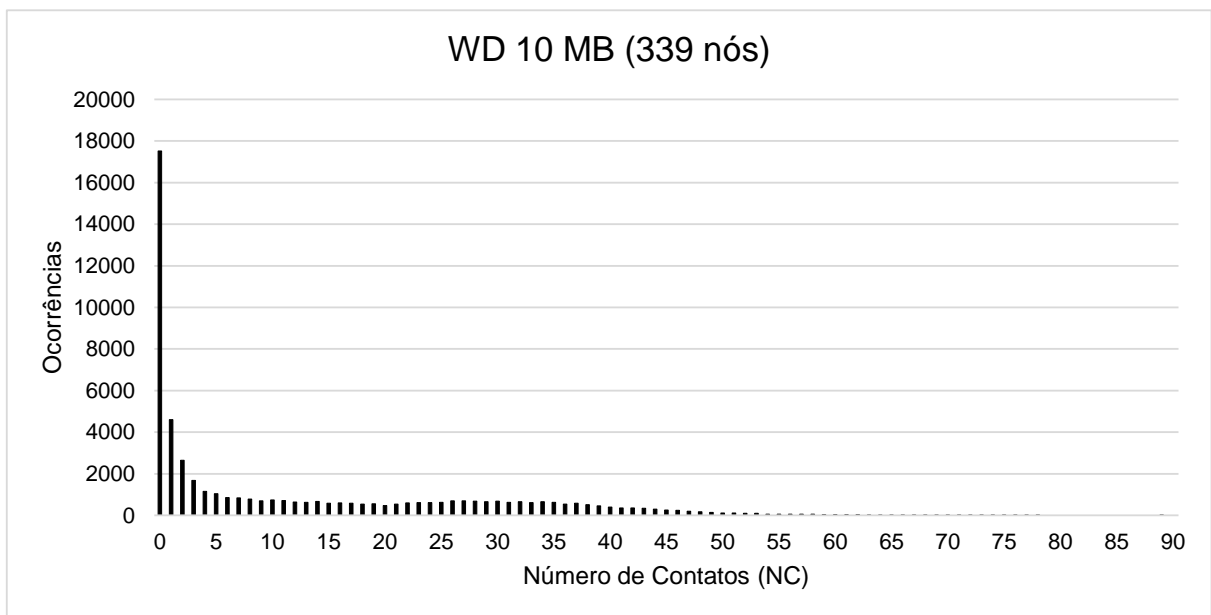


Figura 4: Conectividade do cenário WD com 339 nós na rede

Com base na Figura 4, pode-se concluir que os nós não tiveram contatos aproximadamente 18 mil vezes (a cada janela de 5000 segundos), 1 contato aproximadamente 5 mil vezes, e assim sucessivamente. O máximo de contatos foi de 89 e a média de contatos foi de 12,3.

Após definidos os NCs dos nós no cenário WD, iniciaram-se as simulações utilizando os protocolos para baixa conectividade. Primeiramente, para os nós com apenas um contato ($NC = 1$) dentro da janela de 5000 segundos (considerando a média com a janela anterior), foram aplicados os Vars para nós com baixa conectividade. Para os nós com duas ou mais conexões ($NC \geq 2$), foi mantido o GrAnt. Esse procedimento foi repetido em outras simulações da seguinte forma: para nós com um ou dois contatos dentro da janela de 5000 segundos (ou seja, $NC \leq 2$), foram aplicados os Vars para nós com baixa conectividade e para nós com três ou mais contatos ($NC \geq 3$) foi mantido o GrAnt. Em seguida, para nós com 1, 2 ou 3 contatos (ou seja, $NC \leq 3$), foram aplicados os Vars, e para nós com demais NCs, foi mantido o GrAnt. Por fim, para nós com $NC \leq 4$ foram aplicados os Vars, e para os demais NCs foi mantido o GrAnt. Nesses testes, escolheu-se o protocolo Var que resultou em uma melhor taxa de entrega de mensagens.

Em seguida, o protocolo escolhido foi simulado em um cenário mais probabilístico chamado PoI (*Points of Interest*), também utilizado em (VENDRAMIN et al., 2012b) durante o desenvolvimento do GrAnt e também amplamente utilizado em pesquisas de DTN devido ao fato de ser fornecido por padrão com o simulador The ONE. O cenário PoI simula grupos de pessoas em suas comunidades, havendo uma alta probabilidade de um nó ir para sua comunidade domiciliar, uma probabilidade média dos nós se encontrarem em pontos de interesse em comum e uma probabilidade baixa dos nós irem para PoIs diferentes de sua comunidade. A mesma configuração utilizada no desenvolvimento do GrAnt foi utilizada: tempo de simulação de 800 mil segundos, TTL de 600 minutos, *buffer* dos nós de 4 MB, alcance das interfaces de rede de 10 metros, velocidade de transmissão de 2 Mbps, tráfego de dados correspondente a uma nova mensagem gerada a cada 50-90 segundos, tamanho das mensagens de 500 KB, mapa da cidade de Helsinki e 120 nós no total distribuídos em 4 grupos de 30.

Caso o protocolo Var escolhido no WD e aplicado ao PoI mostrasse um desempenho inferior ao GrAnt em relação à taxa de entrega de mensagens, o GrAnt seria escolhido para aquela faixa de NC. Caso contrário, o protocolo Var escolhido no WD seria utilizado.

A Figura 5 mostra a conectividade dos nós no cenário PoI utilizando a configuração mencionada. O número máximo de contatos de cada nó foi de 35, com média de 10,4070.

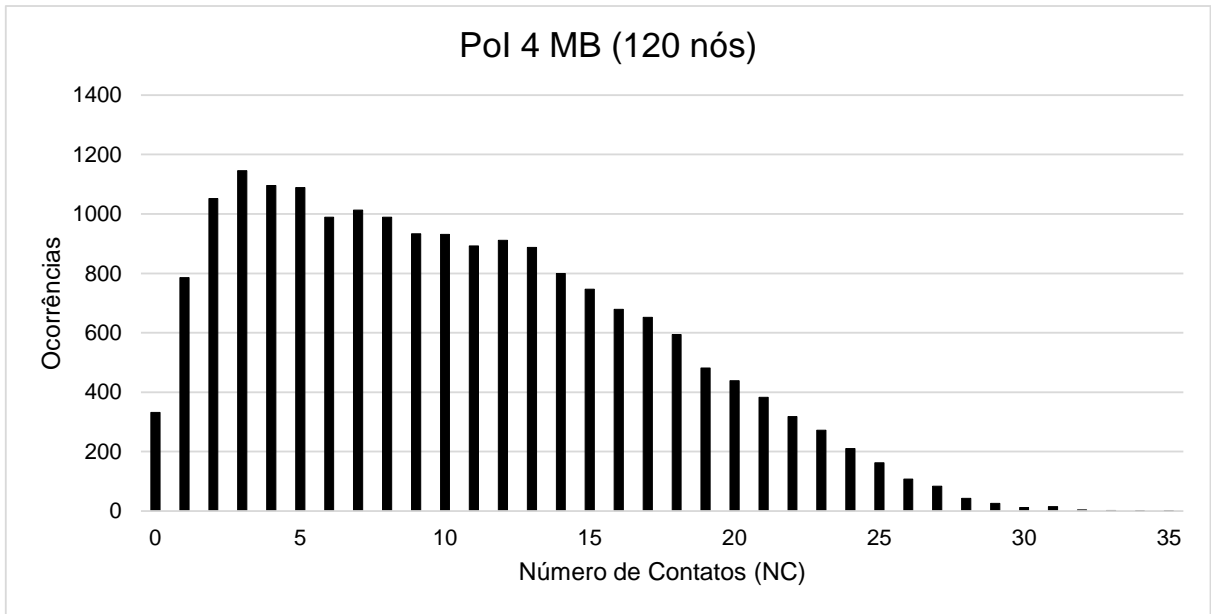


Figura 5: Conectividade do cenário PoI com 120 nós na rede

Em seguida, aplicaram-se os protocolos Vars para nós com alta conectividade (valores de NC altos) e, gradativamente, foi-se diminuindo o valor do NC até que os protocolos não tivessem mais ganho em termos de taxa de entrega de mensagens em relação ao GrAnt.

Após escolhidos os protocolos Vars para compor o rGrAnt na fase de ajuste de parâmetros (ver Seção 6.1), iniciou-se a fase de análise de desempenho (ver Seção 6.2) utilizando outras instâncias dos cenários WD e PoI e, além disso, considerando um outro cenário de simulação não utilizado na fase de ajuste de parâmetros, o cenário do transporte público da cidade de Curitiba.

O cenário de transporte público de Curitiba foi criado por Herek (2018), que construiu um modelo de mobilidade virtual retratando toda a frota de ônibus de Curitiba, a qual inclui 267 linhas e um total de 1280 veículos. Foi utilizado o traçado e registros reais dos movimentos dos veículos. A configuração desse cenário consiste em um tempo de simulação de 3 horas, TTL de 180 minutos, *buffer* dos nós de 250 MB, alcance das interfaces de rede de 200 metros, velocidade de transmissão de 11 Mbps, tamanho das mensagens de 5 KB e mapa da cidade com área de aproximadamente 435 km². Todos os ônibus movem-se a velocidades entre 10 e 47 km/h e funcionam como origens de mensagens. Para o destino das mensagens foi considerada apenas a Praça Rui Barbosa, situada no centro da cidade.

A Figura 6 mostra a conectividade dos nós no cenário do transporte público de

Curitiba.

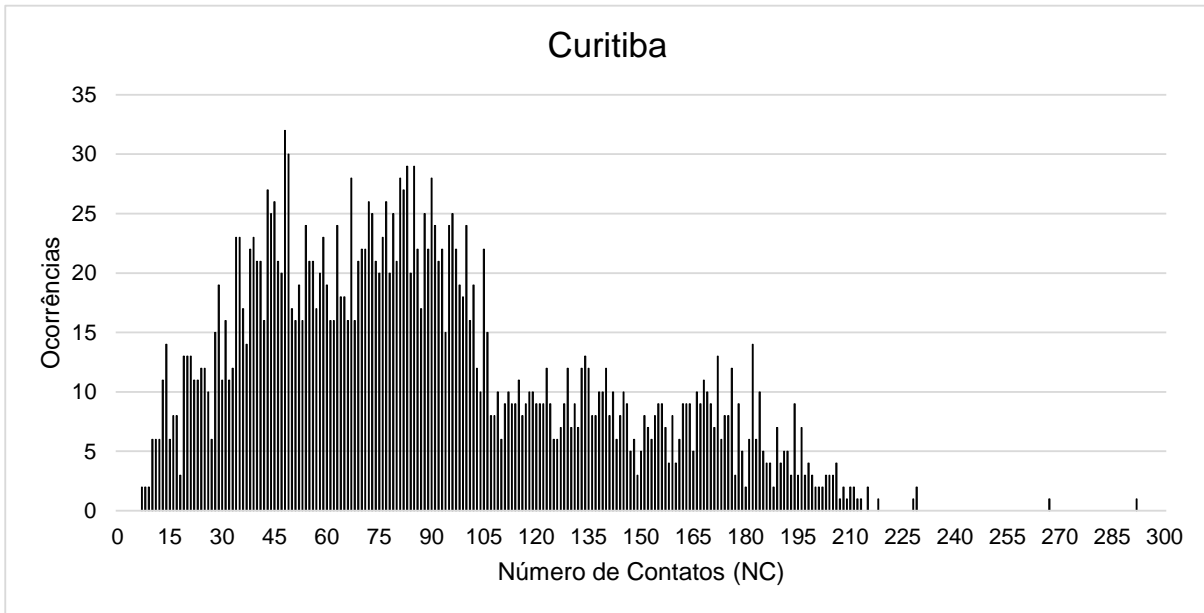


Figura 6: Conectividade dos nós no cenário do transporte público de Curitiba

A Tabela 1 apresenta um resumo das configurações de simulação utilizadas nos cenários WD, PoI e transporte público da cidade de Curitiba.

Parâmetros de Simulação	Cenário PoI	Cenário WD	Cenário de Curitiba
Duração (s)	800.000	800.000	10.800
Período de Aquecimento (s)	5.000	5.000	5.000
Núm. de Simulações	30	30	30
Núm. de Nós	120	339	1.280
Área (m^2)	8.800 x 7.800	10.000 x 8.000	26.600 x 39.400
Velocidade dos Nós (m/s)	0,5-1,5	0,8-1,4 ^a , 7-10 ^b	2,8-13,5
Tempo de Espera no Destino (s)	100-200	100-200, 10-30 ^c	16
TTL das Mensagens (min)	600	1.500	180
Taxa de Geração de Mensagens (s)	50-90	100-150	900
Tamanho das Mensagens (KB)	500	500	5
Buffer dos Nós (MB)	8	10	250
Feromônio Mínimo δ_{init}	0,01	0,01	0,01

^a pedestres

^b carros e ônibus

^c ônibus esperam nos pontos

Tabela 1: Parâmetros de Simulação

5.2 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO VARS

Esta seção apresenta os protocolos de roteamento Vars para nós com baixa conectividade (Seção 5.2.1) e alta conectividade (Seção 5.2.2).

5.2.1 BAIXA CONECTIVIDADE

Para nós com baixa conectividade, foram criados os protocolos batizados de Var1, Var2, Var2a, Var2b, Var2c, Var2d, Var3, Var4, Var4a, Var4b, Var4c, Var4d e Var4e, que estão descritos nas seções seguintes.

O objetivo desses protocolos é ser menos restritivo em termos de encaminhamento de mensagens em relação ao GrAnt.

5.2.1.1 PROTOCOLO VAR1

O Var1 é a primeira proposta de variação do GrAnt (ver Seção 4) para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var1 possui as seguintes alterações.

- O Var1 elimina o papel do U_{Best} , pois ele atua como um limitador de encaminhamento de mensagens.
- Para nós intermediários, se existe feromônio ou Heu_J for maior que Heu_I , ocorre o encaminhamento. No GrAnt, se existe feromônio e Heu_J for maior que Heu_I , ocorre o encaminhamento. Essa alteração da condição lógica E para OU torna o protocolo Var1 menos restritivo.
- Ainda para nós intermediários, como o papel do U_{Best} foi eliminado, outra condição de encaminhamento foi criada. Se $FerHeu_J$ for maior ou igual a $FerHeu_I$ e a mensagem nunca foi encaminhada, ocorre o encaminhamento.
- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior ou igual a $Social_I$, ocorre o encaminhamento. No GrAnt, caso exista feromônio e $Social_J$ for maior ou igual a $Social_I$, ocorre o encaminhamento. Novamente, a alteração da condição lógica E para OU torna o protocolo Var1 menos restritivo.
- Ainda para nós origem, como o papel do U_{Best} foi eliminado, outra condição de encaminhamento foi criada. Se $Social_J$ for maior ou igual a $Social_I$ e a mensagem nunca foi encaminhada, ocorre o encaminhamento.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4 se ( $FerHeu_J \geq FerHeu_I$ ) e (Mensagem nunca foi encaminhada) então
5   | Encaminha;
6
7 // Nos nós origem
8 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J > Social_I$ ) então
9   | Encaminha;
10 se ( $Social_J \geq Social_I$ ) e (Mensagem nunca foi encaminhada) então
11  | Encaminha;

```

Algoritmo 2: Pseudocódigo do Var1

5.2.1.2 PROTOCOLO VAR2

O Var2 é a segunda proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var2 possui as seguintes alterações:

- Para nós intermediários, caso exista feromônio a mensagem será encaminhada. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas caso exista feromônio e o valor de Heu_J for maior que Heu_I .
- Para nós origem, caso exista feromônio a mensagem será encaminhada. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas caso exista feromônio e o valor de $Social_J$ for maior que $Social_I$.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) então
3   | Encaminha;
4 se ( $U_{Best}$  existe) então
5   | se ( $FerHeu_J > U_{Best}$ ) então
6     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
7     | Encaminha;
8 senão
9   | se ( $FerHeu_J \geq FerHeu_I$ ) então
10    | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
11    | Encaminha;
12
13 // Nos nós origem
14 se (Existe feromônio) então
15   | Encaminha;
16 se ( $U_{Best}$  existe) então
17   | se ( $FerHeu_J > U_{Best}$ ) então
18     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
19     | Encaminha;
20 senão
21   | se ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
22     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
23     | Encaminha;

```

Algoritmo 3: Pseudocódigo do Var2

5.2.1.3 PROTOCOLO VAR2A

O Var2a é a terceira proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var2a possui as seguintes alterações:

- Para nós intermediários e origem, caso o U_{Best} exista, o encaminhamento ocorrerá se o valor de $FerHeu_J$ for maior ou igual ao U_{Best} . No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se o valor de $FerHeu_J$ for maior que o U_{Best} .

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) e ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4 se ( $U_{Best}$  existe) então
5   | se ( $FerHeu_J \geq U_{Best}$ ) então
6     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
7     | Encaminha;
8 senão
9   | se ( $FerHeu_J \geq FerHeu_I$ ) então
10    | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
11    | Encaminha;
12
13 // Nos nós origem
14 se (Existe feromônio) e ( $Social_J > Social_I$ ) então
15   | Encaminha;
16 se ( $U_{Best}$  existe) então
17   | se ( $FerHeu_J \geq U_{Best}$ ) então
18     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
19     | Encaminha;
20 senão
21   | se ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
22     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
23     | Encaminha;

```

Algoritmo 4: Pseudocódigo do Var2a

5.2.1.4 PROTOCOLO VAR2B

O Var2b é a quarta proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var2b possui as seguintes alterações:

- Para nós intermediários, se houver feromônio, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e Heu_J for maior que Heu_I .
- Ainda para nós intermediários, caso o U_{Best} exista, ocorrerá o encaminhamento se $FerHeu_J$ for maior ou igual ao U_{Best} . No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas

se $FerHeu_J$ for maior que o U_{Best} .

- Para nós origem, se houver feromônio, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$.
- Ainda para nós origem, caso o U_{Best} exista, ocorrerá o encaminhamento se $FerHeu_J$ for maior ou igual ao U_{Best} . No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se $FerHeu_J$ for maior que o U_{Best} .

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) então
3   | Encaminha;
4 se ( $U_{Best}$  existe) então
5   | se ( $FerHeu_J \geq U_{Best}$ ) então
6     |   | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
7     |   | Encaminha;
8 senão
9   | se ( $FerHeu_J \geq FerHeu_I$ ) então
10    |   | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
11    |   | Encaminha;
12
13 // Nos nós origem
14 se (Existe feromônio) então
15   | Encaminha;
16 se ( $U_{Best}$  existe) então
17   | se ( $FerHeu_J \geq U_{Best}$ ) então
18     |   | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
19     |   | Encaminha;
20 senão
21   | se ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
22     |   | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
23     |   | Encaminha;

```

Algoritmo 5: Pseudocódigo do Var2b

5.2.1.5 PROTOCOLO VAR2C

O Var2c é a quinta proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var2c possui as seguintes alterações:

- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou Heu_J for maior que Heu_I , ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas caso exista feromônio e Heu_J for maior que Heu_I . A mudança de E para OU torna a condição lógica menos restritiva.
- Ainda para nós intermediários, caso o U_{Best} não exista, o encaminhamento ocorrerá apenas se Heu_J for maior ou igual a Heu_I . No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se $FerHeu_J$ for maior ou igual a $FerHeu_I$.
- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior que $Social_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas caso exista feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$. A mudança de E para OU torna a condição lógica menos restritiva.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4 se ( $U_{Best}$  existe) então
5   | se ( $FerHeu_J > U_{Best}$ ) então
6     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
7     | Encaminha;
8 senão
9   | se ( $Heu_J \geq Heu_I$ ) então
10    | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
11    | Encaminha;
12
13 // Nos nós origem
14 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J > Social_I$ ) então
15   | Encaminha;
16 se ( $U_{Best}$  existe) então
17   | se ( $FerHeu_J > U_{Best}$ ) então
18     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
19     | Encaminha;
20 senão
21   | se ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
22     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
23     | Encaminha;

```

Algoritmo 6: Pseudocódigo do Var2c

5.2.1.6 PROTOCOLO VAR2D

O Var2d é a sexta proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var2d possui as seguintes alterações:

- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou Heu_J for maior que Heu_I , ocorre o encaminhamento. No GrAnt, caso exista feromônio e Heu_J for maior que Heu_I , ocorre o encaminhamento. A mudança da condição lógica E para OU torna o Var2d menos restritivo que o GrAnt em termos de encaminhamento de mensagens.
- Ainda para nós intermediários, caso o U_{Best} exista, o encaminhamento ocorrerá se

$FerHeu_J$ for maior ou igual ao U_{Best} . No GrAnt, o encaminhamento ocorre somente se $FerHeu_J$ for maior que o U_{Best} .

- Ainda para nós intermediários, caso o U_{Best} não exista, o encaminhamento ocorrerá se Heu_J for maior ou igual a Heu_I . No GrAnt, o encaminhamento ocorre somente se $FerHeu_J$ for maior ou igual a $FerHeu_I$.
- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior que $Social_I$, ocorre o encaminhamento. No GrAnt, caso exista feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$, ocorre o encaminhamento.
- Ainda para nós origem, caso o U_{Best} exista, o encaminhamento ocorrerá se $FerHeu_J$ for maior ou igual a $FerHeu_I$. No GrAnt, caso o U_{Best} exista, o encaminhamento ocorrerá se $FerHeu_J$ for maior que $FerHeu_I$.


```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4 se ( $U_{Best}$  existe) então
5   | se ( $FerHeu_J \geq U_{Best}$ ) então
6     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
7     | Encaminha;
8 senão
9   | se ( $Heu_J \geq Heu_I$ ) então
10    | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
11    | Encaminha;
12
13 // Nos nós origem
14 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J > Social_I$ ) então
15   | Encaminha;
16 se ( $U_{Best}$  existe) então
17   | se ( $FerHeu_J \geq U_{Best}$ ) então
18     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
19     | Encaminha;
20 senão
21   | se ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
22     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
23     | Encaminha;

```

Algoritmo 7: Pseudocódigo do Var2d

5.2.1.7 PROTOCOLO VAR3

O Var3 é a sétima proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var3 possui as seguintes alterações:

- O papel do U_{Best} foi eliminado.
- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou Heu_J for maior que Heu_I , o encaminhamento ocorrerá. No GrAnt, caso exista feromônio e Heu_J for maior que Heu_I , o encaminhamento ocorrerá.
- Ainda para nós intermediários, como o U_{Best} não existe, uma nova condição de

encaminhamento foi criada. Se Heu_J for maior ou igual a Heu_I e a mensagem nunca tiver sido encaminhada, ocorrerá o encaminhamento.

- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior que $Social_I$, o encaminhamento ocorrerá. No GrAnt, caso exista feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$, o encaminhamento ocorrerá. A mudança da condição lógica de E para OU torna o Var3 menos restritivo que o GrAnt em termos de encaminhamento de mensagens.
- Ainda para nós origem, como o U_{Best} não existe, uma nova condição de encaminhamento foi criada. Se $Social_J$ for maior ou igual a $Social_I$ e a mensagem nunca tiver sido encaminhada, ocorrerá o encaminhamento.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4 se ( $Heu_J \geq Heu_I$ ) e (Mensagem nunca foi encaminhada) então
5   | Encaminha;
6
7 // Nos nós origem
8 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J > Social_I$ ) então
9   | Encaminha;
10 se ( $Social_J \geq Social_I$ ) e (Mensagem nunca foi encaminhada) então
11  | Encaminha;

```

Algoritmo 8: Pseudocódigo do Var3

5.2.1.8 PROTOCOLO VAR4

O Var4 é a oitava proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var4 possui as seguintes alterações:

- O papel do U_{Best} foi eliminado.
- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou Heu_J for maior ou igual a Heu_I , ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e Heu_J for maior que Heu_I .
- Ainda para nós intermediários, como não existe o U_{Best} , uma nova condição de encaminhamento foi criada. Se a mensagem nunca foi encaminhada, encaminha.

- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior ou igual a $Social_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$.
- Ainda para nós origem, como não existe o U_{Best} , uma nova condição de encaminhamento foi criada. Se a mensagem nunca foi encaminhada, o encaminhamento ocorrerá.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $Heu_J \geq Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4 se (Mensagem nunca foi encaminhada) então
5   | Encaminha;
6
7 // Nos nós origem
8 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
9   | Encaminha;
10 se (Mensagem nunca foi encaminhada) então
11  | Encaminha;

```

Algoritmo 9: Pseudocódigo do Var4

5.2.1.9 PROTOCOLO VAR4A

O Var4a é a nona proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var4a possui as seguintes alterações:

- O papel do U_{Best} foi eliminado.
- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou Heu_J for maior que Heu_I , ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e Heu_J for maior que Heu_I .
- Ainda para nós intermediários, como não existe o U_{Best} , uma nova condição de encaminhamento foi criada. Se a mensagem nunca foi encaminhada, encaminha. Caso já tenha sido encaminhada, um novo encaminhamento apenas ocorrerá quando $FerHeu_J$ for maior ou igual a $FerHeu_I$.

- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior ou igual a $Social_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$.
- Ainda para nós origem, como não existe o U_{Best} , uma nova condição de encaminhamento foi criada. Se a mensagem nunca foi encaminhada, o encaminhamento ocorrerá.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4 se (Mensagem nunca foi encaminhada) então
5   | Encaminha;
6 senão
7   | se ( $FerHeu_J \geq FerHeu_I$ ) então
8     | Encaminha;
9
10 // Nos nós origem
11 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
12   | Encaminha;
13 se (Mensagem nunca foi encaminhada) então
14   | Encaminha;

```

Algoritmo 10: Pseudocódigo do Var4a

5.2.1.10 PROTOCOLO VAR4B

O Var4b é a décima proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var4b possui as seguintes alterações:

- O papel do U_{Best} foi eliminado.
- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou Heu_J for maior ou igual a Heu_I , ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e Heu_J for maior que Heu_I .
- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior ou igual a $Social_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $Heu_J \geq Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4
5 // Nos nós origem
6 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
7   | Encaminha;

```

Algoritmo 11: Pseudocódigo do Var4b

5.2.1.11 PROTOCOLO VAR4C

O Var4c é a décima primeira proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var4c possui as seguintes alterações:

- O papel do U_{Best} foi eliminado.
- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou $FerHeu_J$ for maior ou igual a $FerHeu_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e Heu_J for maior que Heu_I .
- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior ou igual a $Social_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $FerHeu_J \geq FerHeu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4
5 // Nos nós origem
6 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J \geq Social_I$ ) então
7   | Encaminha;

```

Algoritmo 12: Pseudocódigo do Var4c

5.2.1.12 PROTOCOLO VAR4D

O Var4d é a décima segunda proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var4d possui as seguintes alterações:

- O papel do U_{Best} foi eliminado.
- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou Heu_J for maior que Heu_I , ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e Heu_J for maior que Heu_I .
- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior que $Social_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4
5 // Nos nós origem
6 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J > Social_I$ ) então
7   | Encaminha;

```

Algoritmo 13: Pseudocódigo do Var4d

5.2.1.13 PROTOCOLO VAR4E

O Var4e é a décima terceira e última proposta de variação do GrAnt para nós com baixa conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var4e possui as seguintes alterações:

- O papel do U_{Best} foi eliminado.
- Para nós intermediários, caso exista feromônio ou $FerHeu_J$ for maior que $FerHeu_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e Heu_J for maior que Heu_I .
- Para nós origem, caso exista feromônio ou $Social_J$ for maior que $Social_I$, ocorrerá o encaminhamento. No GrAnt, o encaminhamento ocorre apenas se existir feromônio e $Social_J$ for maior que $Social_I$.

```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) ou ( $FerHeu_J > FerHeu_I$ ) então
3   | Encaminha;
4
5 // Nos nós origem
6 se (Existe feromônio) ou ( $Social_J > Social_I$ ) então
7   | Encaminha;
```

Algoritmo 14: Pseudocódigo do Var4e

5.2.2 ALTA CONECTIVIDADE

Para nós com alta conectividade, foram criados os protocolos Var5a, Var5b, Var5c, Var6a, Var6b, Var6c, Var7a, Var7b e Var7c, que estão descritos nas seções seguintes.

O objetivo desses protocolos é ser mais restritivo em termos de encaminhamento de mensagens se comparados com o GrAnt.

Todos os protocolos Vars para nós com alta conectividade consideram apenas o inverso do número de saltos ($\frac{1}{n_{\text{Hops}}}$) no cálculo da qualidade de um caminho. No GrAnt, considera-se também a popularidade dos nós. A popularidade foi retirada pois em um cenário de alta conectividade todos os nós podem ser considerados populares, ou seja, podem possuir a mesma probabilidade de entregar uma mensagem para um determinado destino.

Os Vars indicados com a letra “a” consideram como função heurística apenas o percentual de *buffer* livre dos nós, os Vars indicados com a letra “b” consideram apenas a proximidade social e os Vars indicados com a letra “c” consideram ambos percentual de *buffer* livre e proximidade social. No GrAnt, o percentual de *buffer* livre dos nós não é utilizado para tomada de decisões de encaminhamento. Em relação ao GrAnt, os Vars 5, 6 e 7 não consideram a centralidade de intermediação de um nó em relação ao destino, pois em um cenário de alta conectividade, a maioria dos nós irá aparecer em caminhos para um destino.

5.2.2.1 PROTOCOLO VAR5A

O Var5a é a primeira proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Em relação ao GrAnt, o Var5a possui as seguintes alterações:

- A função heurística considera apenas o percentual de *buffer* livre dos nós. No GrAnt, a função heurística considera a proximidade social e a centralidade de intermediação.
- Para nós intermediários, caso o primeiro teste seja verdadeiro, o U_{Best} é inicializado. No GrAnt, caso o primeiro teste seja verdadeiro, apenas ocorre o encaminhamento.
- Ainda para nós intermediários, caso o U_{Best} não exista, o encaminhamento ocorrerá apenas se $FerHeu_J$ for maior que $FerHeu_I$. No GrAnt, o encaminhamento ocorrerá se $FerHeu_J$ for maior ou igual a $FerHeu_I$.
- Para nós origem, caso o primeiro teste seja verdadeiro, o U_{Best} é inicializado. No GrAnt, caso o primeiro teste seja verdadeiro, apenas ocorre o encaminhamento.
- Ainda para nós origem, caso o U_{Best} não exista, o encaminhamento ocorrerá apenas se Heu_J for maior que Heu_I . No GrAnt, o encaminhamento ocorrerá se Heu_J for maior ou igual a Heu_I .


```

1 // Nos nós intermediários
2 se (Existe feromônio) e ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
3   | Inicializa  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
4   | Encaminha;
5 se ( $U_{Best}$  existe) então
6   | se ( $FerHeu_J > U_{Best}$ ) então
7     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
8     | Encaminha;
9 senão
10  | se ( $FerHeu_J > FerHeu_I$ ) então
11    | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
12    | Encaminha;
13
14 // Nos nós origem
15 se (Existe feromônio) e ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
16   | Inicializa  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
17   | Encaminha;
18 se ( $U_{Best}$  existe) então
19   | se ( $FerHeu_J > U_{Best}$ ) então
20     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
21     | Encaminha;
22 senão
23   | se ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
24     | Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
25     | Encaminha;

```

Algoritmo 15: Pseudocódigo do Var5a

5.2.2.2 PROTOCOLO VAR5B

O Var5b é a segunda proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Em relação ao Var5a, o Var5b considera apenas a proximidade social em sua função heurística.

O pseudocódigo do Var5b é idêntico ao Var5a, conforme Algoritmo 15, a diferença encontra-se apenas na função heurística.

5.2.2.3 PROTOCOLO VAR5C

O Var5c é a terceira proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Em relação aos Var5a e Var5b, o Var5c considera ambos percentual de *buffer* livre e proximidade social em sua função heurística.

O pseudocódigo do Var5c é idêntico ao Var5a, conforme Algoritmo 15, a diferença encontra-se apenas na função heurística.

5.2.2.4 PROTOCOLO VAR6A

O Var6a é a quarta proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Comparados com o protocolos Var5, os protocolos Var6 são mais restritivos em termos de encaminhamento de mensagens. Em relação ao GrAnt, o Var6a possui as seguintes alterações:

- A função heurística considera apenas o percentual de *buffer* livre dos nós. No GrAnt, a função heurística considera a proximidade social e a centralidade de intermediação.
- Para nós intermediários, o primeiro teste foi eliminado. No GrAnt, caso exista feromônio e Heu_J for maior que Heu_I , ocorre o encaminhamento.
- Ainda para nós intermediários, caso o U_{Best} não exista, o encaminhamento ocorrerá apenas se $FerHeu_J$ for maior que $FerHeu_I$. No GrAnt, caso o U_{Best} não exista, o encaminhamento ocorrerá apenas se $FerHeu_J$ for maior ou igual a $FerHeu_I$.
- Para nós origem, o primeiro teste foi eliminado. No GrAnt, caso exista feromônio e Heu_J for maior que Heu_I , ocorre o encaminhamento.
- Ainda para nós origem, caso o U_{Best} não exista, o encaminhamento ocorrerá apenas se Heu_J for maior que Heu_I . No GrAnt, caso o U_{Best} não exista, o encaminhamento ocorrerá apenas se Heu_J for maior ou igual a Heu_I .

```

1 // Nos nós intermediários
2 se ( $U_{Best}$  existe) então
3   se ( $FerHeu_J > U_{Best}$ ) então
4     Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
5     Encaminha;
6 senão
7   se ( $FerHeu_J > FerHeu_I$ ) então
8     Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
9     Encaminha;
10
11 // Nos nós origem
12 se ( $U_{Best}$  existe) então
13   se ( $FerHeu_J > U_{Best}$ ) então
14     Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
15     Encaminha;
16 senão
17   se ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
18     Atualiza  $U_{Best}$  com  $FerHeu_J$ ;
19     Encaminha;

```

Algoritmo 16: Pseudocódigo do Var6a

5.2.2.5 PROTOCOLO VAR6B

O Var6b é a quinta proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Em relação ao Var6a, o Var6b considera apenas a proximidade social em sua função heurística.

O pseudocódigo do Var6b é idêntico ao Var6a, conforme Algoritmo 16, a diferença encontra-se apenas na função heurística.

5.2.2.6 PROTOCOLO VAR6C

O Var6c é a sexta proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Em relação ao Var6a e Var6b, o Var6c considera ambos percentual de *buffer* livre e proximidade social em sua função heurística.

O pseudocódigo do Var6c é idêntico ao Var6a, conforme Algoritmo 16, a diferença

encontra-se apenas na função heurística.

5.2.2.7 PROTOCOLO VAR7A

O Var7a é a sétima proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Comparados com os protocolos Var5 e Var6, os protocolos Var7 são os mais restritivos em termos de encaminhamento de mensagens. Em relação ao GrAnt, o Var7a possui as seguintes alterações:

- A função heurística considera apenas o percentual de *buffer* livre dos nós.
- O feromônio foi eliminado, pois para nós com alta conectividade, a utilização do feromônio faz com que poucos enlaces sejam utilizados muito frequentemente, sobrecarregando os nós. Por esse motivo, a primeira condição de encaminhamento do GrAnt foi totalmente eliminada.
- Se o U_{Best} existe, o encaminhamento ocorrerá se Heu_J for maior que o U_{Best} .
- Se o U_{Best} não existe, o encaminhamento ocorrerá se Heu_J for maior que Heu_I .
- A lógica de encaminhamento para nós intermediários e origem é igual.

```

1 // Nos nós origem e intermediários
2 se ( $U_{Best}$  existe) então
3   | se ( $Heu_J > U_{Best}$ ) então
4   |   | Atualiza  $U_{Best}$  com  $Heu_J$ ;
5   |   | Encaminha;
6 senão
7   | se ( $Heu_J > Heu_I$ ) então
8   |   | Atualiza  $U_{Best}$  com  $Heu_J$ ;
9   |   | Encaminha;

```

Algoritmo 17: Pseudocódigo do Var7a

5.2.2.8 PROTOCOLO VAR7B

O Var7b é a oitava proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Em relação ao Var7a, o Var7b considera apenas a proximidade social em sua função heurística.

O pseudocódigo do Var7b é idêntico ao Var7a, conforme Algoritmo 17, a diferença encontra-se apenas na função heurística.

5.2.2.9 PROTOCOLO VAR7C

O Var7c é a nona proposta de variação do GrAnt para nós com alta conectividade. Em relação ao Var7a e Var7b, o Var7c considera ambos percentual de *buffer* livre e proximidade social em sua função heurística.

O pseudocódigo do Var7c é idêntico ao Var7a, conforme Algoritmo 17, a diferença encontra-se apenas na função heurística.

Este capítulo apresentou a metodologia utilizada para a criação de variações do módulo de roteamento do protocolo GrAnt, assim como o detalhamento de todas as variações criadas para nós caracterizados por baixa e alta conectividade. O Capítulo 6, a seguir, fará a avaliação de desempenho das variações que serão utilizadas para compor o rGrAnt.

6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O presente capítulo apresenta duas fases: (a) a fase de ajuste de parâmetros do rGrAnt, avaliando o desempenho das variações criadas em uma instância específica dos cenários WD e PoI, descritos na Seção 5.1; (b) a fase de análise de desempenho para investigar como o rGrAnt se comporta como um protocolo de roteamento quando comparado com o GrAnt usando outras instâncias dos cenários WD e PoI e um outro cenário não considerado na fase de ajustes de parâmetros, relativo ao transporte público da cidade de Curitiba, também descrito na Seção 5.1.

6.1 AJUSTE DE PARÂMETROS

As simulações iniciaram-se para os nós com baixa conectividade, com $NC = 1$ até $NC \leq 4$ para o cenário WD descrito na Seção 5.1. Nessas simulações foram testados os desempenhos dos protocolos Vars e GrAnt.

As principais métricas observadas foram a taxa de entrega de mensagens (*delivery ratio*) e a relação de redundância (*redundancy ratio*) (KERÄNEN et al., 2009). A taxa de entrega de mensagens é um percentual definido como:

$$\text{Taxa de Entrega de Mensagens} = \frac{\text{Mensagens entregues}}{\text{Mensagens criadas}} \quad (17)$$

Já a relação de redundância é definida como:

$$\text{Relação de Redundância} = \frac{\text{Mensagens encaminhadas} - \text{Mensagens entregues}}{\text{Mensagens entregues}} \quad (18)$$

As mensagens são criadas nos nós origem. O número de mensagens encaminhadas é incrementado em uma unidade a cada encaminhamento de uma determinada mensagem de um nó para outro. O número de mensagens efetivamente entregues representa o total

de mensagens entregues com sucesso nos seus respectivos destinos.

A Tabela 2 mostra o desempenho dos protocolos GrAnt, Epidêmico e dos Vars no cenário WD para $NC = 1$.

	GrAnt	Epidêmico	Var1	Var2	Var2a	Var2b	Var2c	Var2d	Var3	Var4	Var4a	Var4b	Var4c	Var4d	Var4e
Taxa de Entrega	0,5699	0,576	0,5971	0,5732	0,5794	0,5771	0,5829	0,5882	0,5971	0,579	0,579	0,5859	0,5852	0,5946	0,5909
Relação de Redundância	14,3889	20,5098	17,8883	14,2357	16,3849	16,4239	16,5806	18,1514	17,8886	20,2979	20,2979	20,0147	20,165	15,8436	16,0895

Tabela 2: Resultados do WD para $NC = 1$

Na Tabela 2, já existem Vars que ganham do Epidêmico em termos da métrica taxa de entrega de mensagens. Por este motivo, ele não foi mais considerado nas simulações seguintes.

As Tabelas 3, 4 e 5 mostram os resultados obtidos pelo GrAnt e pelos Vars considerando, respectivamente, $NC \leq 2$, $NC \leq 3$ e $NC \leq 4$.

	GrAnt	Var1	Var2	Var2a	Var2b	Var2c	Var2d	Var3	Var4	Var4a	Var4b	Var4c	Var4d	Var4e
Taxa de Entrega	0,5699	0,6001	0,573	0,5755	0,5804	0,5826	0,6064	0,6039	0,5749	0,5751	0,589	0,5895	0,5912	0,5926
Relação de Redundância	14,3889	19,6119	14,2513	18,1602	18,1254	18,1448	20,4272	19,5233	23,9257	24,1916	23,5886	23,5605	17,3757	17,0874

Tabela 3: Resultados do WD para $NC \leq 2$

	GrAnt	Var1	Var2	Var2a	Var2b	Var2c	Var2d	Var3	Var4	Var4a	Var4b	Var4c	Var4d	Var4e
Taxa de Entrega	0,5699	0,6004	0,5679	0,5815	0,5787	0,5934	0,602	0,6089	0,5838	0,5826	0,5915	0,5873	0,5876	0,5857
Relação de Redundância	14,3889	21,4896	14,6009	19,5071	19,9924	18,9921	23,5538	21,2817	26,3619	26,4379	26,2432	26,5101	18,3522	18,4118

Tabela 4: Resultados do WD para $NC \leq 3$

	GrAnt	Var1	Var2	Var2a	Var2b	Var2c	Var2d	Var3	Var4	Var4a	Var4b	Var4c	Var4d	Var4e
Taxa de Entrega	0,5699	0,6101	0,566	0,5646	0,5741	0,594	0,6045	0,6054	0,5794	0,5797	0,5821	0,5909	0,5893	0,5901
Relação de Redundância	14,3889	22,6693	14,6444	22,0469	21,6412	20,2321	25,5997	22,552	29,2647	29,3032	29,3237	28,973	19,3243	19,1955

Tabela 5: Resultados do WD para $NC \leq 4$

Após avaliar os resultados, escolheu-se o protocolo Var3 (Seção 5.2.1.7) para $NC \leq 3$ e o protocolo Var1 (Seção 5.2.1.1) para $NC = 4$. Em relação ao Var1, o Var3 é mais simples e menos restritivo.

Em seguida, os Vars escolhidos no WD foram aplicados no cenário PoI descrito na Seção 5.1. As Tabelas 6 e 7 mostram os resultados das simulações no cenário PoI com *buffer* de 4 MB utilizando o protocolo Var3 para $NC = 1$, $NC \leq 2$ e $NC \leq 3$ e o resultado do Var1 para $NC = 4$, respectivamente.

	GrAnt	$NC = 1$	$NC \leq 2$	$NC \leq 3$
Taxa de Entrega	0,6259	0,6169	0,6169	0,6161
Relação de Redundância	6,9462	7,1736	7,6859	8,0833

Tabela 6: Resultados do Var3 no cenário PoI com 4 MB de *buffer*

	GrAnt	$NC = 4$
Taxa de Entrega	0,6259	0,6071
Relação de Redundância	6,9462	8,8243

Tabela 7: Resultado do Var1 no cenário PoI com 4 MB de *buffer*

Verificou-se que para *buffers* de baixa capacidade (≤ 4 MB), os protocolos Vars para nós com baixa conectividade não têm um desempenho superior ao GrAnt em termos de taxa de entrega de mensagens, pois com *buffers* menores é interessante restringir o encaminhamento das mensagens da forma que o GrAnt faz, e os protocolos Vars para nós com baixa conectividade são justamente menos restritivos no encaminhamento. Dessa forma, escolheu-se manter o GrAnt nos nós com baixa conectividade quando o *buffer* for menor ou igual a 4 MB.

A partir de então, as simulações no cenário PoI passaram a ser feitas com *buffer* igual a 8 MB e os resultados confirmaram as escolhas feitas com o cenário WD. A Tabela 8 mostra os resultados das simulações no cenário PoI com *buffer* de 8 MB utilizando o protocolo Var3 para $NC = 1$, $NC \leq 2$ e $NC \leq 3$. A Tabela 9 mostra o resultado do Var1 para $NC = 4$, também no cenário PoI com *buffer* de 8 MB.

	GrAnt	$NC = 1$	$NC \leq 2$	$NC \leq 3$
Taxa de Entrega	0,8052	0,8062	0,8065	0,8176
Relação de Redundância	7,0863	7,1962	7,5894	7,9272

Tabela 8: Resultados do Var3 no cenário PoI com 8 MB de *buffer*

	GrAnt	$NC = 4$
Taxa de Entrega	0,8052	0,8181
Relação de Redundância	7,0863	8,3757

Tabela 9: Resultado do Var1 no cenário PoI com 8 MB de *buffer*

Na sequência, foi testado o protocolo Var1 para NCs maiores, de forma a validar o número máximo de contatos de um nó para o qual ele pode ser utilizado. A Tabela

10 mostra os resultados da simulação do Var1 no cenário WD para $NC \leq 5$ e $NC \leq 6$. A Tabela 11 mostra os resultados da simulação do Var1 no cenário PoI, também para $NC \leq 5$ e $NC \leq 6$.

	GrAnt	$NC \leq 5$	$NC \leq 6$
Taxa de Entrega	0,5699	0,6082	0,6078
Relação de Redundância	14,3889	23,8145	25,0489

Tabela 10: Resultado do Var1 no cenário WD para $NC \leq 5$ e $NC \leq 6$

	GrAnt	$NC \leq 5$	$NC \leq 6$
Taxa de Entrega	0,8052	0,8211	0,8163
Relação de Redundância	7,0863	8,7934	9,2553

Tabela 11: Resultado do Var1 no cenário PoI para $NC \leq 5$ e $NC \leq 6$

Em ambos os cenários, os valores de taxa de entrega de mensagens do Var1 superaram os valores obtidos pelo GrAnt, porém percebe-se uma queda de desempenho na taxa de entrega de mensagens e um aumento na taxa de redundância ao utilizar o Var1 para $NC \leq 6$ se comparado o resultado do Var1 para $NC \leq 5$. Por este motivo, decidiu-se utilizar o Var1 para $NC \leq 5$.

Definidos os protocolos Vars utilizados por nós com baixa conectividade, foram testados os Vars para nós com alta conectividade. Primeiramente, testaram-se os Vars nos nós com $NC \geq 70$ (Tabela 12), por ser considerado um alto nível de conectividade.

	GrAnt	Var5a	Var5b	Var5c	Var6a	Var6b	Var6c	Var7a	Var7b	Var7c
Taxa de Entrega	0,5699	0,5621	0,5671	0,5694	0,5621	0,5671	0,5694	0,5702	0,5715	0,5702
Relação de Redundância	14,3889	14,5544	14,5534	14,318	14,5544	14,5534	14,318	14,2287	14,3667	14,2287

Tabela 12: Resultados dos Vars no WD para $NC \geq 70$

De acordo com a Tabela 12, percebe-se que o Var7b teve o melhor desempenho em termos da taxa de entrega de mensagens em comparação com o GrAnt. Na Tabela 13, testa-se somente o Var7b para NCs progressivamente menores, até encontrar o momento em que ele não apresenta mais ganhos em comparação com o GrAnt.

	GrAnt	$NC \geq 70$	$NC \geq 68$	$NC \geq 66$	$NC \geq 65$
Taxa de Entrega	0,5699	0,5715	0,5763	0,5721	0,5679
Relação de Redundância	14,3889	14,3667	14,3949	14,2692	14,5741

Tabela 13: Resultados do Var7b no WD para NCs progressivamente menores

Observando-se a Tabela 13, percebe-se que em $NC \geq 65$ o Var7b perde para o GrAnt em termos da taxa de entrega de mensagens. Em conclusão, o Var7b só pode ser utilizado até $NC \geq 66$.

Em seguida, na Tabela 14 é apresentado o desempenho dos Vars para nós com alta conectividade em $NC \geq 65$, de forma a verificar se existe algum outro Var que ganha do GrAnt em termos da taxa de entrega de mensagens.

	GrAnt	Var5a	Var5b	Var5c	Var6a	Var6b	Var6c	Var7a	Var7b	Var7c
Taxa de Entrega	0,5699	0,5749	0,5663	0,5758	0,5749	0,5663	0,5760	0,5716	0,5679	0,5680
Relação de Redundância	14,3889	14,3689	14,5428	14,3126	14,3689	14,5428	14,2897	14,3393	14,5741	14,4877

Tabela 14: Resultados do Vars no WD para $NC \geq 65$

De acordo com a Tabela 14, o Var6c possui o melhor desempenho em comparação com o GrAnt. Na Tabela 15, apresenta-se somente o Var6c para NCs progressivamente menores, até encontrar o momento em que ele não apresenta mais ganhos em comparação com o GrAnt.

	GrAnt	$NC \geq 64$	$NC \geq 61$	$NC \geq 60$	$NC \geq 59$	$NC \geq 58$	$NC \geq 57$	$NC \geq 56$
Taxa de Entrega	0,5699	0,5758	0,5711	0,5707	0,5700	0,5718	0,5704	0,5641
Relação de Redundância	14,3889	14,3148	14,436	14,3483	14,3767	14,4506	14,6424	14,7203

Tabela 15: Resultados do Var6c no WD para NCs progressivamente menores

Observando-se a Tabela 15, percebe-se que o Var6c passa a perder para o GrAnt em $NC \geq 56$.

Em sequência, na Tabela 16 apresentam-se os Vars para $NC \geq 56$ de forma a verificar se algum ganha do GrAnt em termos da taxa de entrega de mensagens.

	GrAnt	Var5a	Var5b	Var5c	Var6a	Var6b	Var6c	Var7a	Var7b	Var7c
Taxa de Entrega	0,5699	0,5614	0,5639	0,5669	0,5628	0,5661	0,5641	0,5635	0,5674	0,5680
Relação de Redundância	14,3889	14,6278	14,6633	14,5641	14,6368	14,6069	14,7203	14,6797	14,3661	14,6561

Tabela 16: Resultados do Vars no WD para $NC \geq 56$

Na Tabela 16, verificou-se que nenhum Var teve desempenho superior ao GrAnt. Em seguida, testaram-se os Vars em $NC \geq 55$, conforme apresentado na Tabela 17.

	GrAnt	Var5a	Var5b	Var5c	Var6a	Var6b	Var6c	Var7a	Var7b	Var7c
Taxa de Entrega	0,5699	0,5663	0,5735	0,5617	0,5643	0,5700	0,5617	0,5704	0,5671	0,5657
Relação de Redundância	14,3889	14,6689	14,5106	14,781	14,6355	14,4868	14,8267	14,4226	14,6034	14,6727

Tabela 17: Resultados do Vars no WD para $NC \geq 55$

De acordo com a Tabela 17, o Var5b possui o melhor desempenho em relação ao GrAnt. Na Tabela 16, apesar de nenhum Var possuir desempenho superior ao GrAnt, observa-se que o Var6c possui taxa de entrega de mensagens superior ao Var5b, portanto decidiu-se manter o Var6c em $NC \geq 56$.

Em sequência, o Var5b foi testado para $NC \geq 15$, que se aproxima dos Vars definidos para nós com baixa conectividade, conforme apresentado na Tabela 18.

	GrAnt	Var5a	Var5b	Var5c	Var6a	Var6b	Var6c	Var7a	Var7b	Var7c
Taxa de Entrega	0,5699	0,4038	0,588	0,4177	0,4368	0,5087	0,45	0,406	0,576	0,4127
Relação de Redundância	14,3889	34,576	15,9281	33,1746	20,0706	10,9188	19,3071	34,3412	15,3391	33,3379

Tabela 18: Resultados do WD para $NC \geq 15$

Para $NC \geq 15$, vê-se que o Var5b apresenta ganhos na taxa de entrega de mensagens em relação ao GrAnt. Portanto, torna-se necessário diminuir o NC de 14 até 6, que é o limite para utilização do Var1 conforme conclusões retiradas das Tabelas 10 e 11. Conforme observa-se na Tabela 19, o Var5b apresenta ganhos na taxa de entrega de mensagens em relação ao GrAnt em todas as situações.

	GrAnt	$NC \geq 15$	$NC \geq 14$	$NC \geq 10$	$NC \geq 6$
Taxa de Entrega	0,5699	0,5880	0,5851	0,5859	0,5896
Relação de Redundância	14,3889	15,9281	16,0268	14,3462	12,8604

Tabela 19: Resultados do Var5b no WD

Porém, ao efetuar o mesmo teste no cenário probabilístico PoI com 8 MB de *buffer* (ver Tabela 20), percebe-se que o Var5b perde para o GrAnt em relação à taxa de entrega de mensagens.

	GrAnt	$NC \geq 15$	$NC \geq 14$	$NC \geq 10$	$NC \geq 6$
Taxa de Entrega	0,8052	0,8047	0,7995	0,7945	0,7813
Relação de Redundância	7,0863	7,3138	7,3431	7,2095	6,6048

Tabela 20: Resultados do Var5b no PoI

Em $NC \geq 17$ (ver Tabela 21), o Var5b volta a ganhar do GrAnt na taxa de entrega de mensagens.

	GrAnt	Var5b
Taxa de Entrega	0,8052	0,8062
Relação de Redundância	7,0863	7,2201

Tabela 21: Resultados do PoI para $NC \geq 17$

Portanto, escolheu-se utilizar o GrAnt de $6 \leq NC \leq 16$ e o Var5b (Seção 5.2.2.2) de $17 \leq NC \leq 55$. Entre $56 \leq NC \leq 65$ escolheu-se utilizar o Var6c (Seção 5.2.2.6), e para $NC \geq 66$ definiu-se o uso do Var7b (Seção 5.2.2.8).

6.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Com base nos resultados apresentados na Seção 6.1, cujo objetivo foi investigar variações do protocolo GrAnt que pudessem se adaptar melhor para nós com baixa e alta conectividade, definiu-se que cada protocolo Var passaria a representar um comportamento como consequência de uma regra. Foram definidos os comportamentos *EsparsaN* para nós com baixa conectividade e *ConectadoN* para nós com alta conectividade. O comportamento chamado Esparso1 representa a utilização do Var3, o comportamento Esparso2 representa a utilização do Var1, o comportamento Conectado1 representa a utilização do Var5b, o comportamento Conectado2 representa a utilização do Var6c e, por fim, o comportamento Conectado3 representa a utilização do Var7b.

Definiu-se o seguinte conjunto de regras, com base no Número de Contatos (NC) e no Tamanho do *Buffer* (TB) dos nós:

- Se TB é alto e NC é muito baixo \rightarrow Esparso1
- Se TB é alto e NC é baixo \rightarrow Esparso2
- Se TB é alto e NC é médio \rightarrow GrAnt
- Se TB é baixo e NC é muito baixo ou baixo ou médio \rightarrow GrAnt
- Se NC é moderadamente alto \rightarrow Conectado1
- Se NC é alto \rightarrow Conectado2
- Se NC é muito alto \rightarrow Conectado3

O especialista definiu os termos linguísticos e os experimentos descritos na Seção 6.1 definiram os intervalos para o TB e NC dos nós:

- TB = {baixo, alto}, em que baixo = $[0,4]$ e alto = $[5,\infty]$;
- NC = {muito baixo, baixo, médio, moderadamente alto, alto, muito alto}, em que muito baixo = $[1,3]$, baixo = $[4,5]$, médio = $[6,16]$, moderadamente alto = $[17,55]$, alto = $[56,65]$, e muito alto = $[66,\infty]$.

Nas próximas seções, investiga-se como o protocolo rGrAnt, utilizando o conjunto de regras e os comportamentos descritos anteriormente, se comporta como um protocolo de roteamento quando comparado com o GrAnt, variando-se o tamanho do *buffer* dos nós e o número de nós na rede, para os cenários WD e PoI. Para a variação do tamanho do *buffer*, foram considerados valores de 4 a 16 MB, variando de 2 em 2 MB. Além disso, o rGrAnt foi testado no cenário do transporte público da cidade de Curitiba.

Nos cenários PoI e WD, o *buffer* dos nós é relativo a dispositivos móveis usados por humanos para armazenar seus próprios dados e custódias de mensagens em nome de outros humanos, por isso é um recurso escasso e de baixa capacidade. Ao contrário, no cenário do transporte público da cidade de Curitiba, existem dispositivos de armazenamento de dados reservados para isso, portanto o *buffer* não é um recurso escasso e seu tamanho é maior se comparado ao *buffer* dos nós no PoI e WD.

Todos os resultados apresentados mostram valores médios de 30 execuções com um intervalo de confiança de 95%.

Os protocolos Vars não foram comparados com os protocolos Epidêmico e PRO-PHET, pois o GrAnt apresenta uma maior taxa de entrega de mensagens e uma menor taxa de replicação de mensagens em relação a esses protocolos (VENDRAMIN et al., 2012b).

6.2.1 CENÁRIO WD

Primeiramente foi avaliado desempenho dos protocolos rGrAnt e GrAnt variando o tamanho do *buffer* dos nós no cenário WD. As Figuras 7 e 8 mostram o desempenho dos protocolos em relação à taxa de entrega de mensagens e relação de redundância de mensagens, respectivamente.

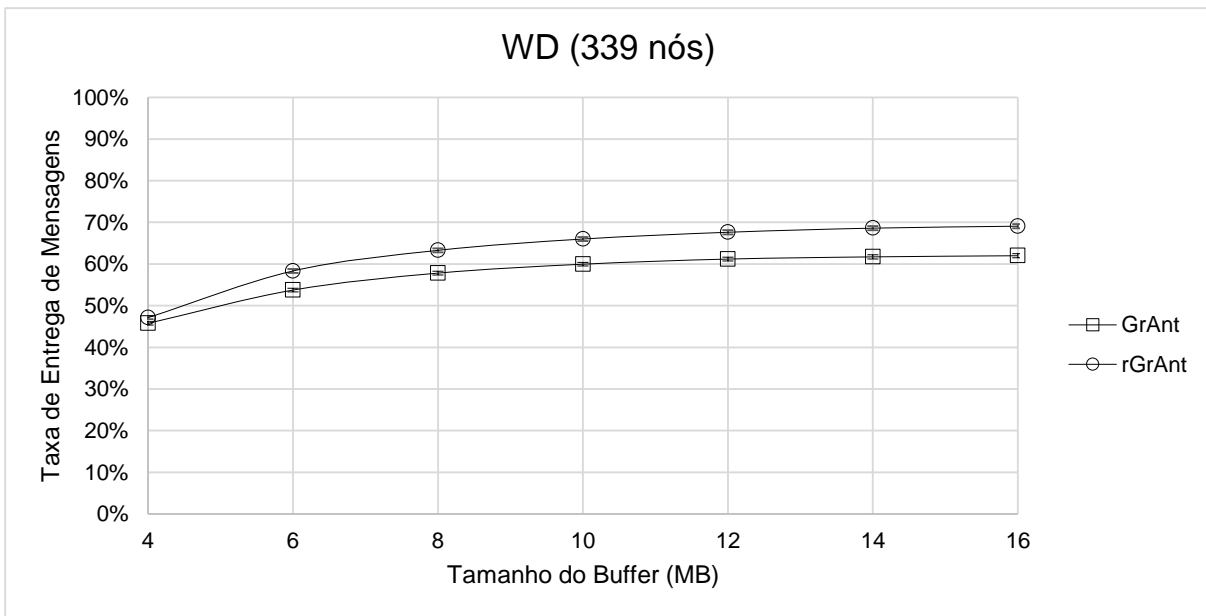


Figura 7: Taxa de entrega (WD) variando *buffer*

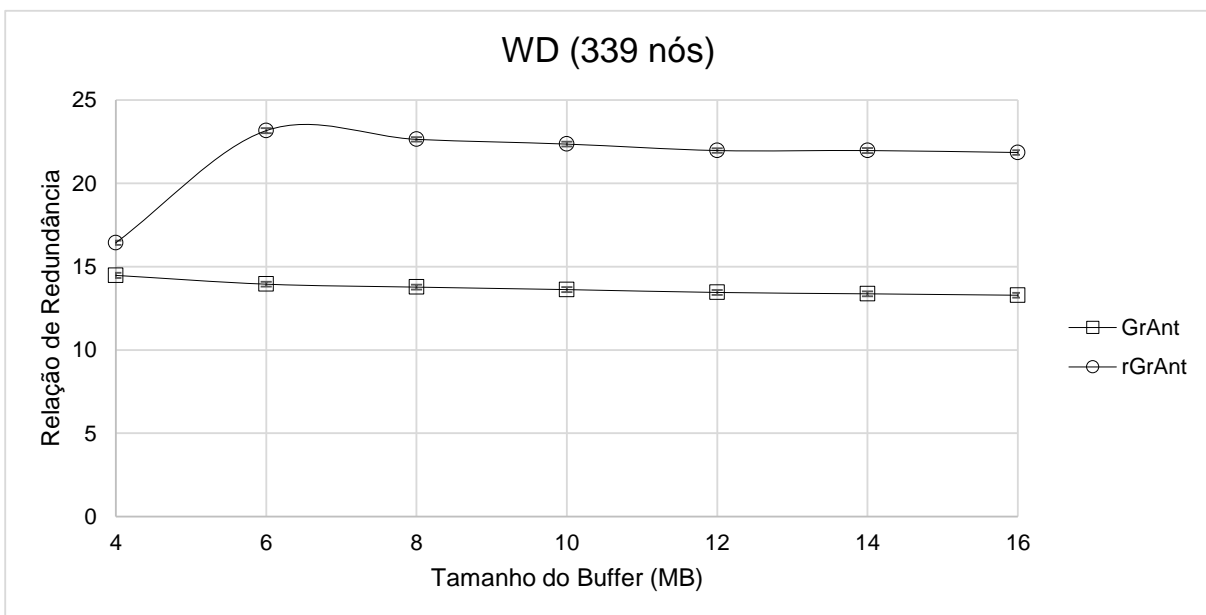


Figura 8: Redundância (WD) variando *buffer*

As Tabelas 23 e 24, localizadas no Apêndice A, mostram os valores numéricos para as taxas de entrega de mensagens, números de mensagens entregues e relações de redundância para o GrAnt e rGrAnt, respectivamente.

Percebe-se que o rGrAnt consegue sempre ganhar do GrAnt em termos da taxa da entrega de mensagens. Em contrapartida, a utilização do rGrAnt gerou um aumento na relação de redundância. No *buffer* de 4 MB observa-se uma taxa de redundância menor,

o que é explicado devido ao uso do GrAnt para *buffers* pequenos em nós com poucos contatos.

Além da variação do tamanho do *buffer*, o rGrAnt também foi testado variando-se o número de nós na rede.

As Figuras 9, 10, 11, 12 mostram a conectividade dos nós no cenário WD com 75, 142, 594 e 1104 nós na rede, respectivamente. A conectividade dos nós no cenário WD com 339 nós pode ser vista na Figura 4, na Seção 5.1. Todos os resultados consideram a média do número de contatos ocorridos dentro da janela de tempo de 5000 segundos com a janela anterior, conforme descrito na Seção 5.1.

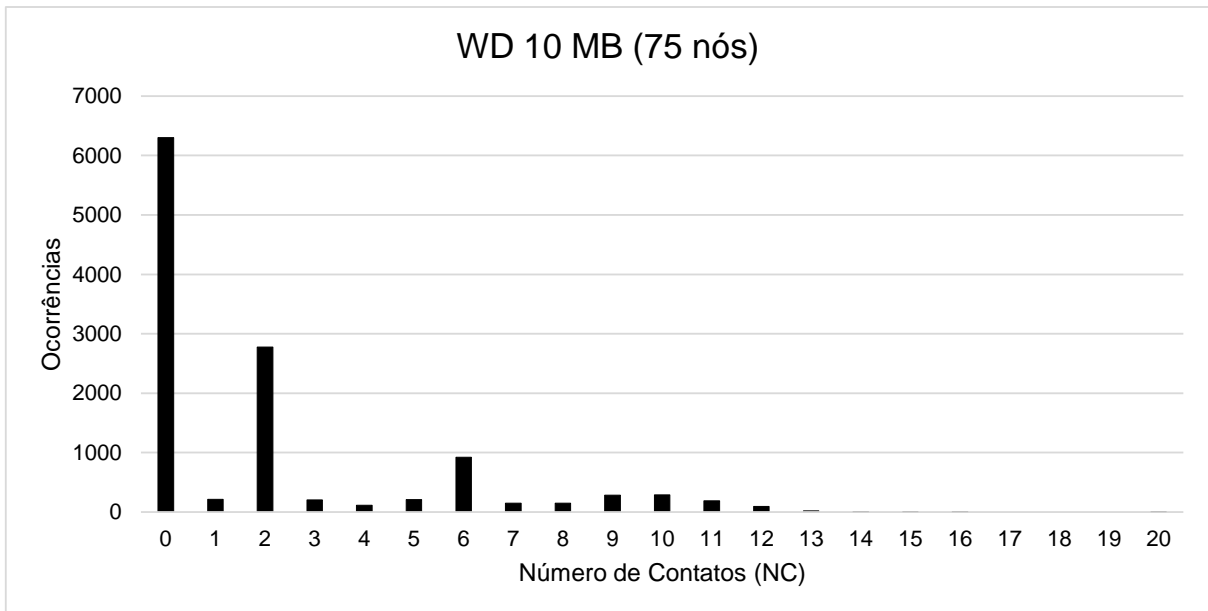


Figura 9: Conectividade dos nós no cenário WD com 75 nós na rede

Com 75 nós na rede, os nós tiveram em média 2,0706 e no máximo 20 contatos.

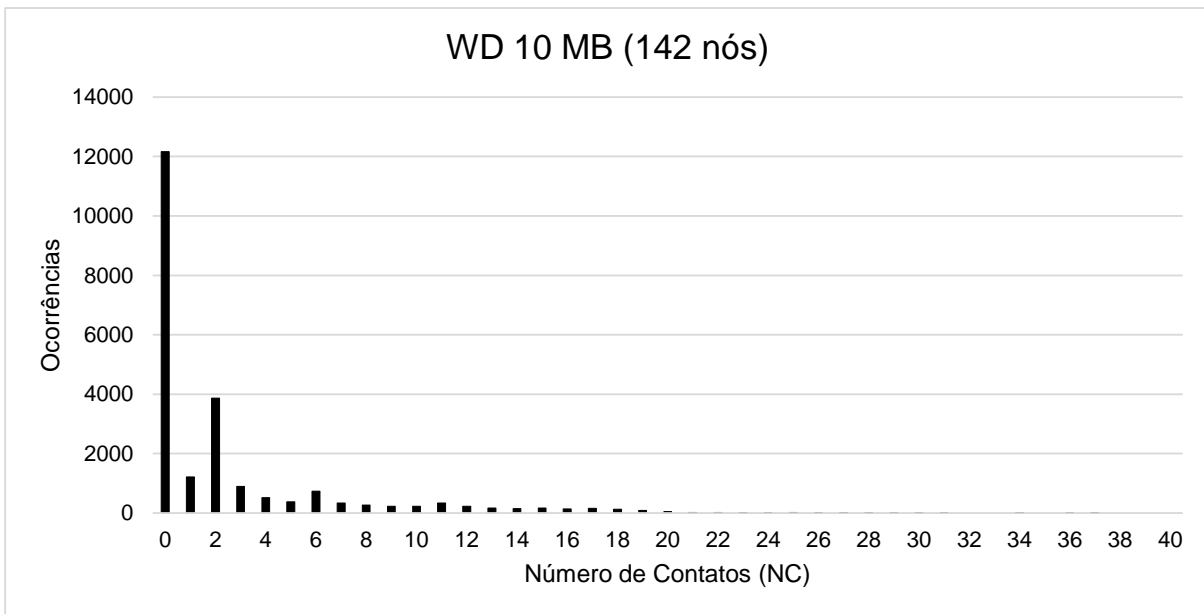


Figura 10: Conectividade dos nós no cenário WD com 142 nós na rede

Com 142 nós na rede, os nós tiveram em média 2,4312 e no máximo 37 contatos.

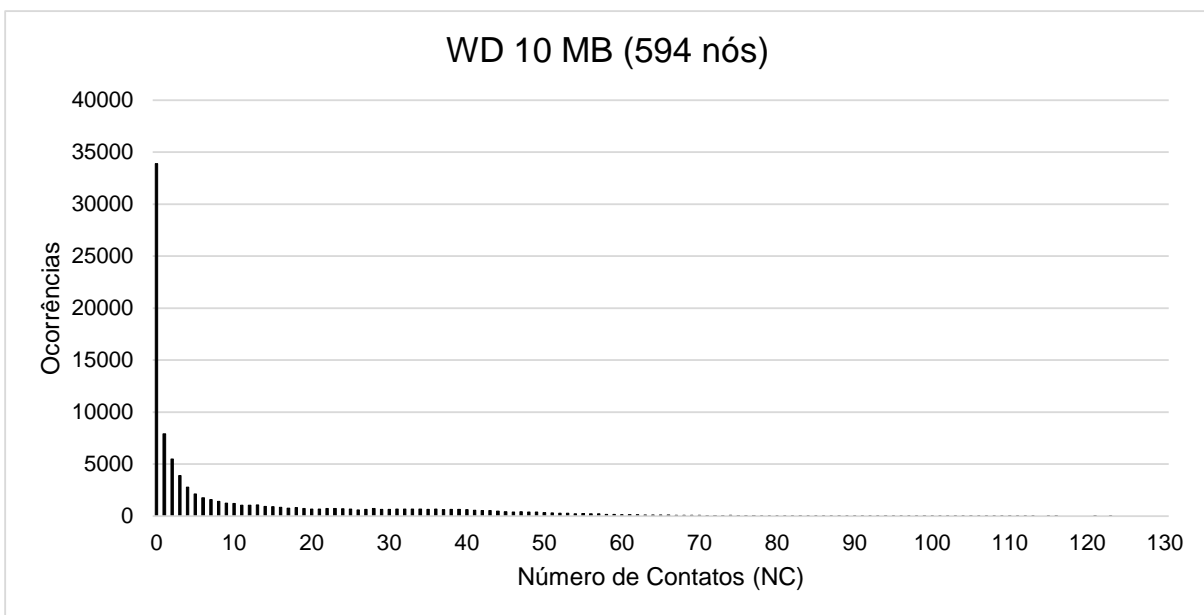


Figura 11: Conectividade dos nós no cenário WD com 594 nós na rede

Com 594 nós na rede, os nós tiveram em média 11,8557 e no máximo 123 contatos.

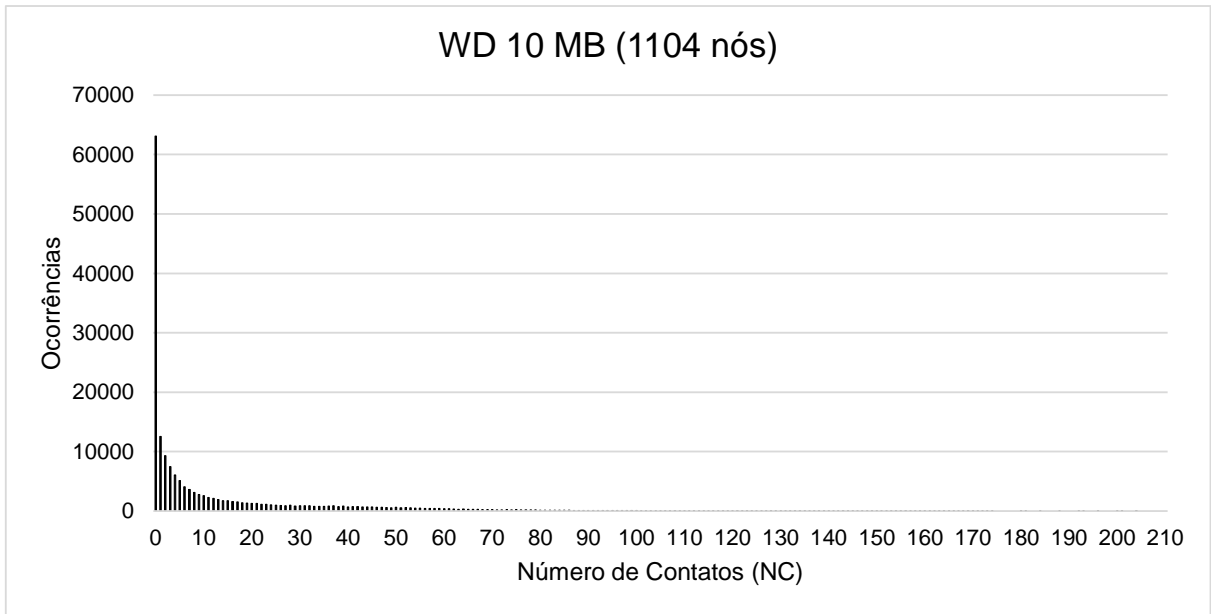


Figura 12: Conectividade dos nós no cenário WD com 1104 nós na rede

Com 1104 nós na rede, os nós tiveram em média 13,1493 e no máximo 204 contatos.

A Figura 13 mostra a taxa de entrega de mensagens e a Figura 14 mostra a relação de redundância variando o número de nós na rede.

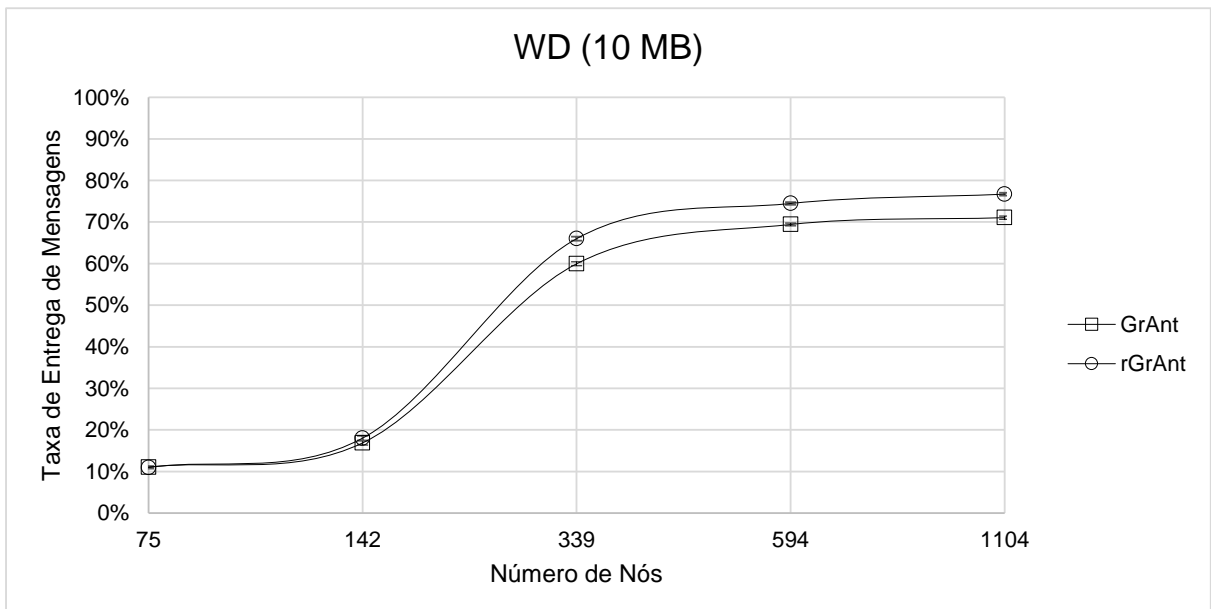


Figura 13: Taxa de entrega (WD) variando nº de nós

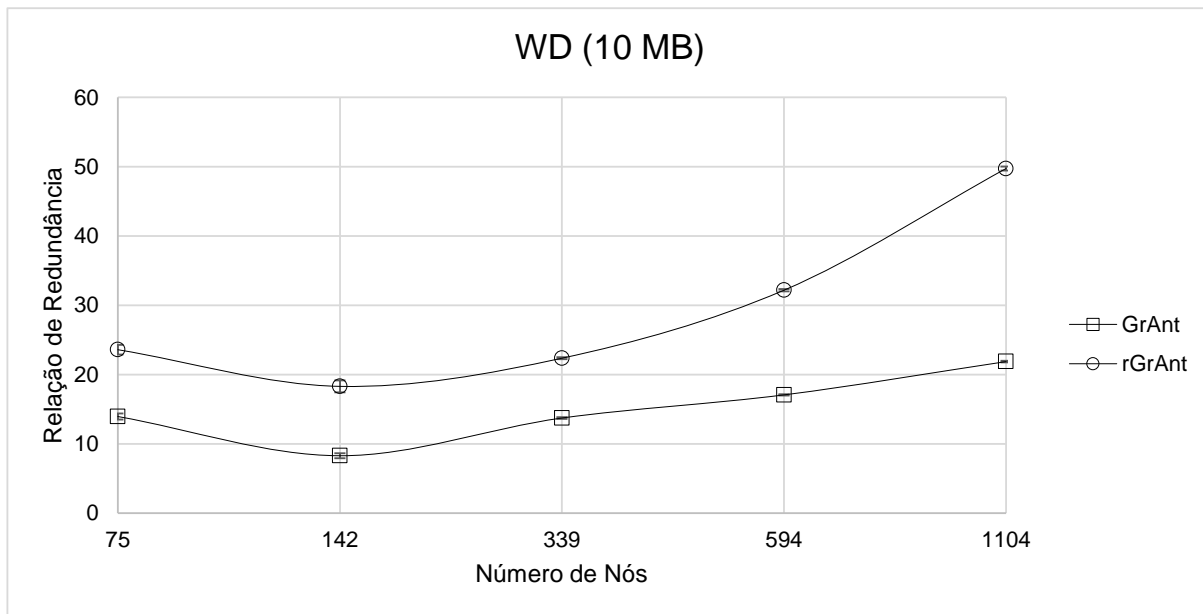


Figura 14: Redundância (WD) variando nº de nós

As Tabelas 25 e 26, localizadas no Apêndice A, mostram os valores numéricos para as taxas de entrega de mensagens, números de mensagens entregues e relações de redundância para o GrAnt e rGrAnt, respectivamente.

Com a variação do número de nós na rede, percebe-se que em cenários com poucos nós o rGrAnt não é estatisticamente diferente do GrAnt. Com o aumento do número de nós, o rGrAnt passa a mostrar ganhos na taxa de entrega de mensagens em relação ao GrAnt, porém com uma maior relação de redundância.

6.2.2 CENÁRIO POI

No cenário PoI foram realizados testes com a configuração padrão (Seção 6.2.2.1) e também com o tempo de parada dos nós 100 vezes maior que a configuração padrão (Seção 6.2.2.2). Isso foi feito no cenário PoI para que os nós fiquem mais tempo em cada local que visitam, já que nesse cenário o movimento dos nós é bem mais aleatório se comparado ao movimento dos nós no cenário WD, os quais seguem rotinas.

6.2.2.1 CONFIGURAÇÃO PADRÃO

Primeiramente foi avaliado desempenho dos protocolos rGrAnt e GrAnt variando o tamanho do *buffer* dos nós no cenário PoI. As Figuras 15 e 16 mostram o desempenho dos protocolos em relação à taxa de entrega de mensagens e relação de redundância de

mensagens, respectivamente.

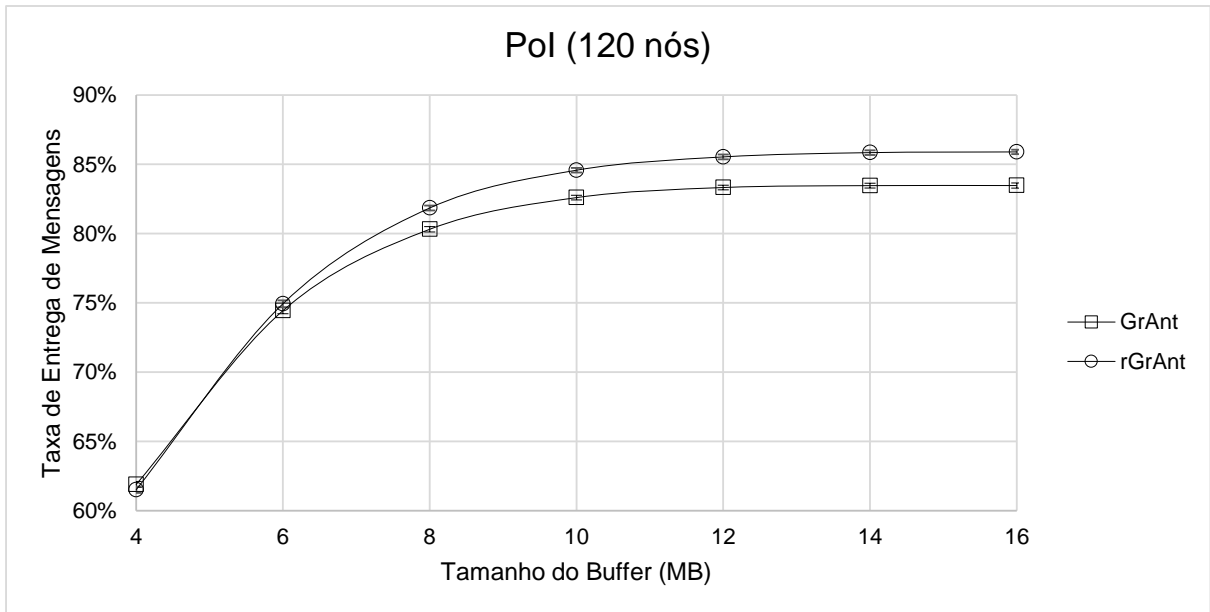


Figura 15: Taxa de entrega (PoI) variando *buffer*

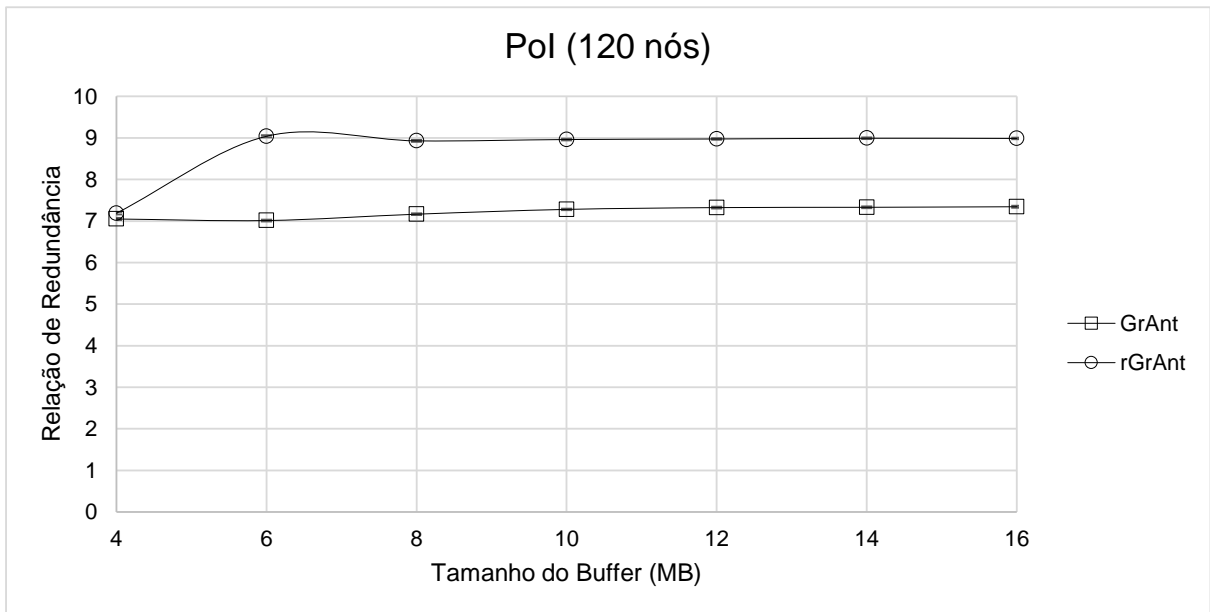


Figura 16: Redundância (PoI) variando *buffer*

As Tabelas 27 e 28, localizadas no Apêndice B, mostram os valores numéricos para as taxas de entrega de mensagens, números de mensagens entregues e relações de redundância para o GrAnt e rGrAnt, respectivamente.

Com tamanhos de *buffer* dos nós pequenos, percebe-se que o rGrAnt não consegue ganhos estatisticamente relevantes se comparado ao GrAnt em relação à taxa de entrega

de mensagens. Porém, com o aumento do tamanho do *buffer*, os ganhos passam a ser significativos. A relação de redundância do rGrAnt mostra-se maior que o GrAnt, com exceção do *buffer* de 4 MB devido ao uso do protocolo GrAnt em nós com poucos contatos.

Além da variação do tamanho do *buffer*, o rGrAnt também foi testado variando-se o número de nós na rede.

As Figuras 17, 18, 19, 20 e 21 mostram a conectividade dos nós no cenário PoI com 12, 36, 120, 240 e 360 nós na rede, respectivamente. Todos os resultados consideram a média do número de contatos ocorridos dentro da janela de tempo de 5000 segundos com a janela anterior, conforme descrito na Seção 5.1.

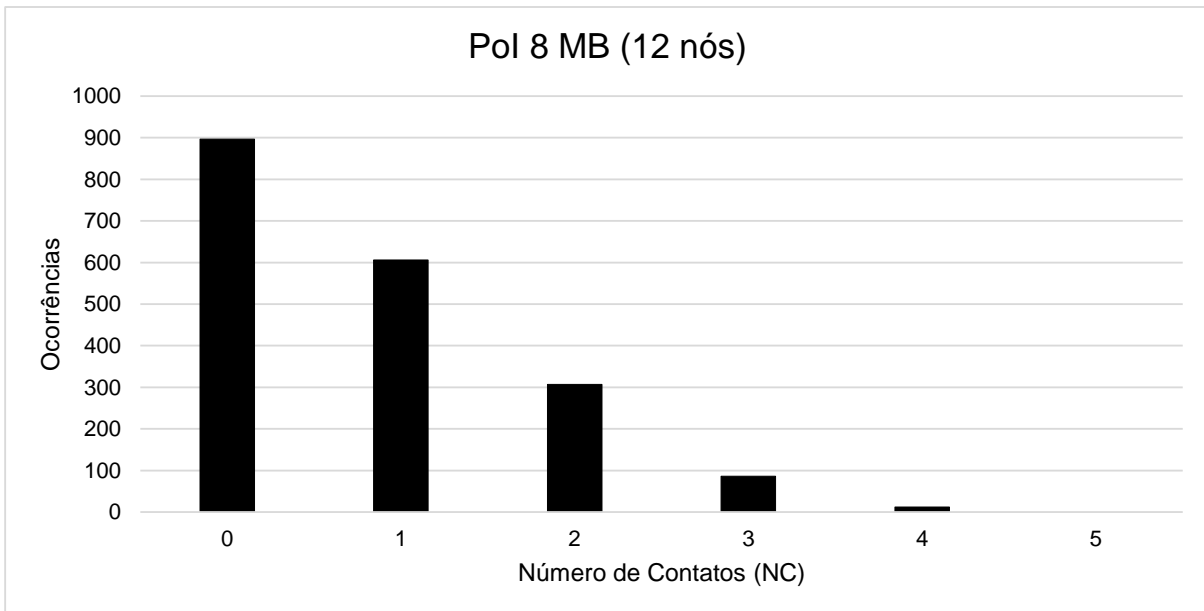


Figura 17: Conectividade dos nós no cenário PoI com 12 nós na rede

Com 12 nós na rede, os nós tiveram em média 0,7998 e no máximo 4 contatos.

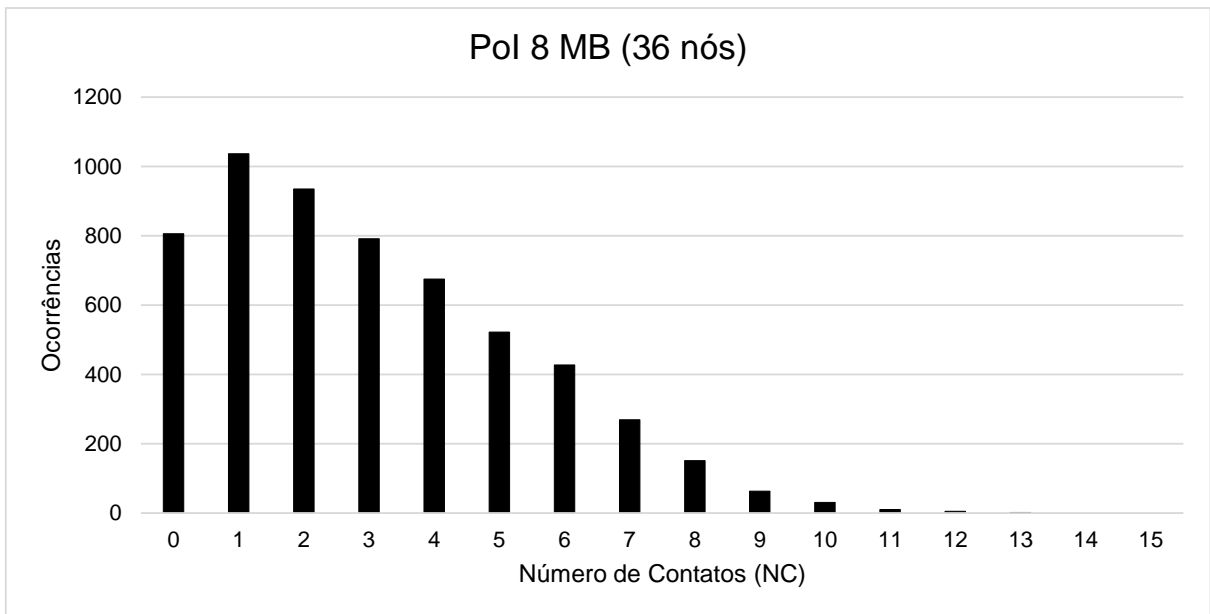


Figura 18: Conectividade dos nós no cenário PoI com 36 nós na rede

Com 36 nós na rede, os nós tiveram em média 3,0252 e no máximo 13 contatos.

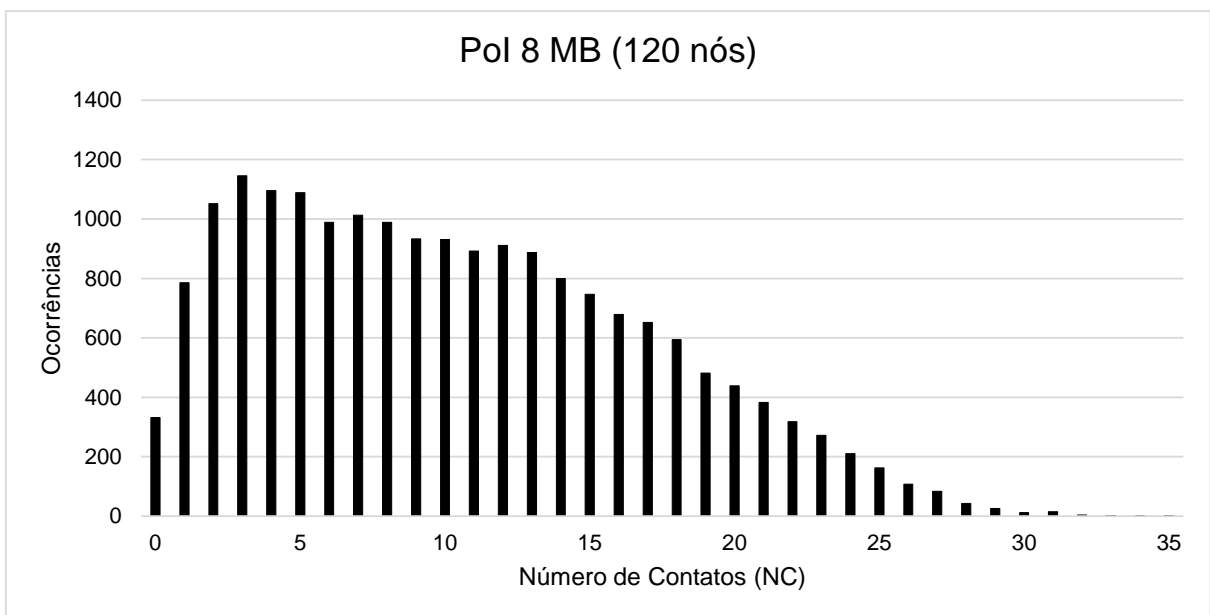


Figura 19: Conectividade dos nós no cenário PoI com 120 nós na rede

Com 120 nós na rede, os nós tiveram em média 10,4070 e no máximo 35 contatos.

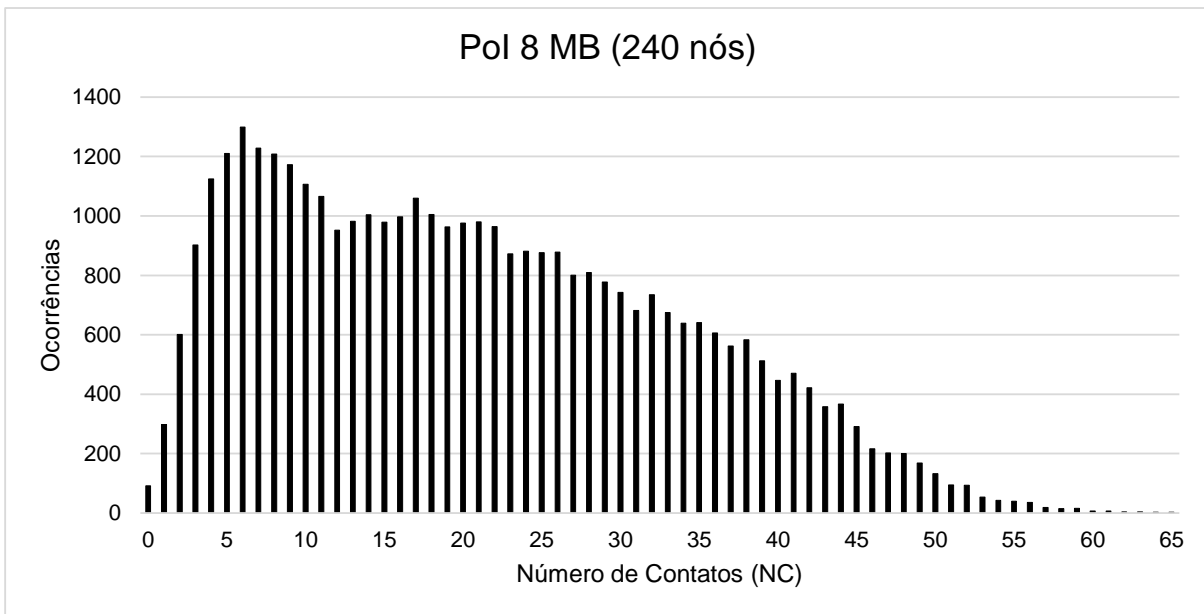


Figura 20: Conectividade dos nós no cenário PoI com 240 nós na rede

Com 240 nós na rede, os nós tiveram em média 20,8833 e no máximo 65 contatos.

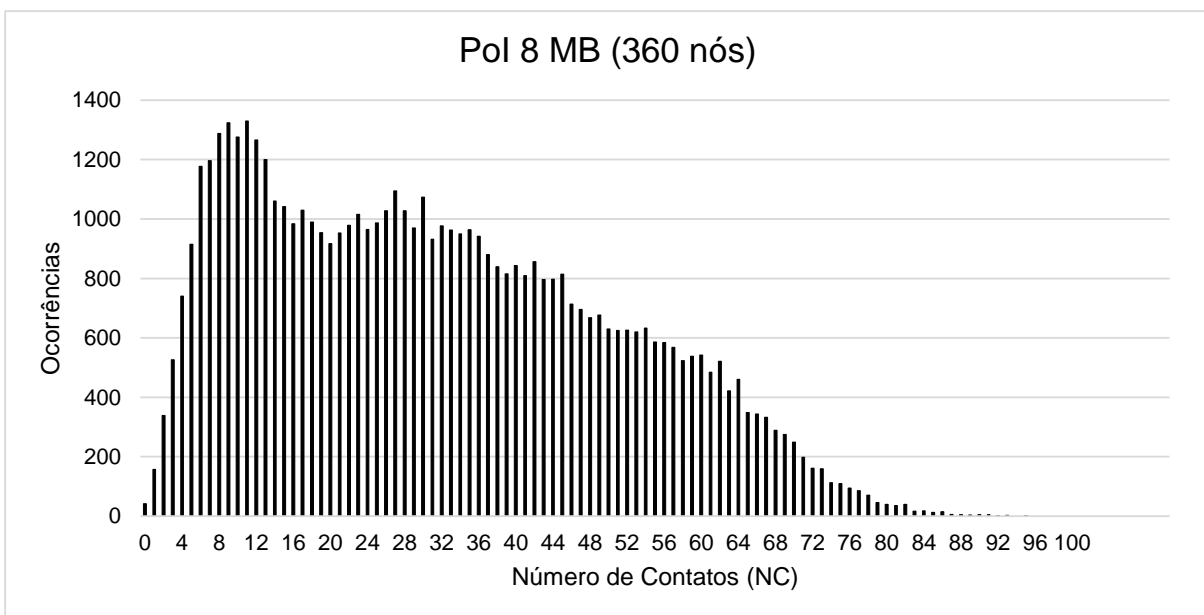


Figura 21: Conectividade dos nós no cenário PoI com 360 nós na rede

Com 360 nós na rede, os nós tiveram em média 31,4608 e no máximo 95 contatos.

A Figura 22 mostra a taxa de entrega de mensagens e a Figura 23 mostra a relação de redundância variando o número de nós na rede.

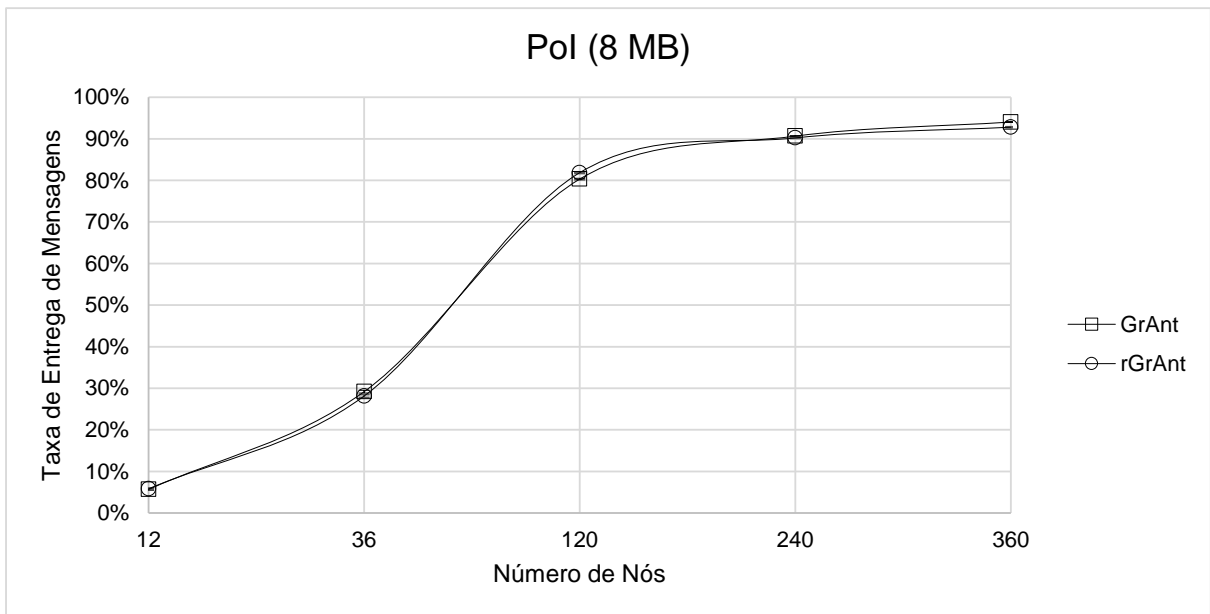


Figura 22: Taxa de entrega (PoI) variando n° de nós

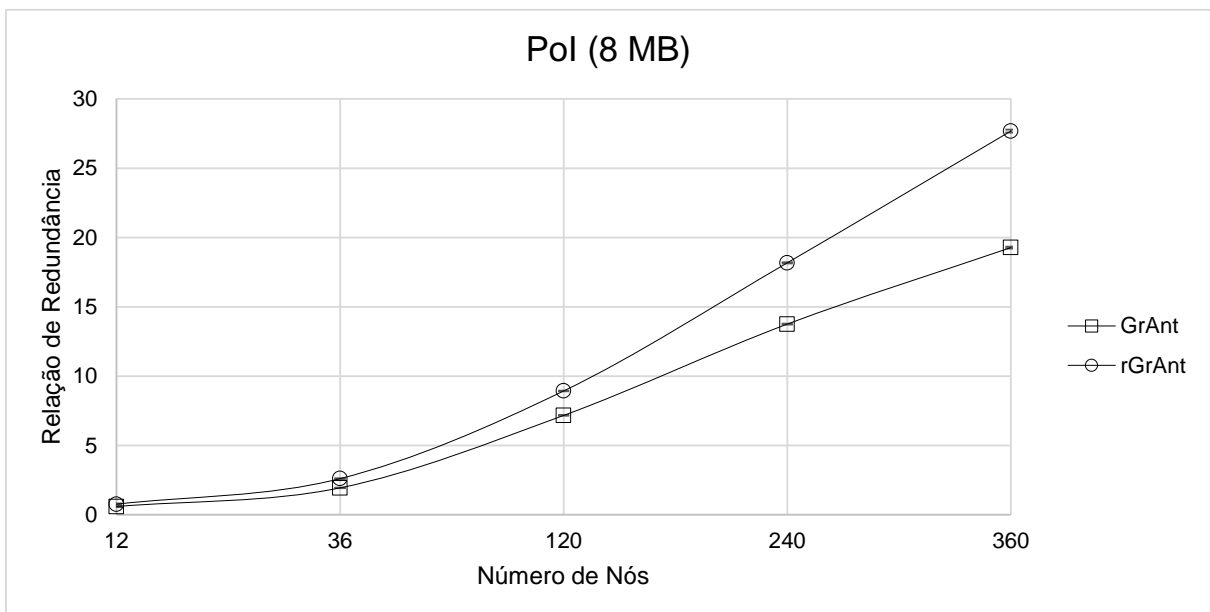


Figura 23: Redundância (PoI) variando n° de nós

As Tabelas 29 e 30, localizadas no Apêndice B, mostram os valores numéricos para as taxas de entrega de mensagens, números de mensagens entregues e relações de redundância para o GrAnt e rGrAnt, respectivamente.

Com o tamanho do *buffer* fixo em 8 MB e variando-se o número dos nós na rede, percebe-se que o rGrAnt não possui desempenho superior ao GrAnt em termos da taxa de entrega de mensagens na maioria dos casos. Com 12 e 120 nós, houve um ganho

significativo. Além disso, em todos os casos a relação de redundância do rGrAnt é maior que o GrAnt, sendo a diferença ainda mais acentuada à medida que o número de nós aumenta.

6.2.2.2 MAIOR TEMPO DE PARADA DOS NÓS

Além da análise feita com o cenário PoI utilizando a configuração padrão, foram feitos testes com o tempo de parada dos nós 100 vezes maior, ou seja, os nós ficam parados em seu local de destino por um tempo 100 vezes maior do que na configuração do PoI padrão.

Primeiramente foi avaliado desempenho dos protocolos rGrAnt e GrAnt variando o tamanho do *buffer* dos nós. As Figuras 24 e 25 mostram o desempenho dos protocolos em relação à taxa de entrega de mensagens e relação de redundância de mensagens, respectivamente.

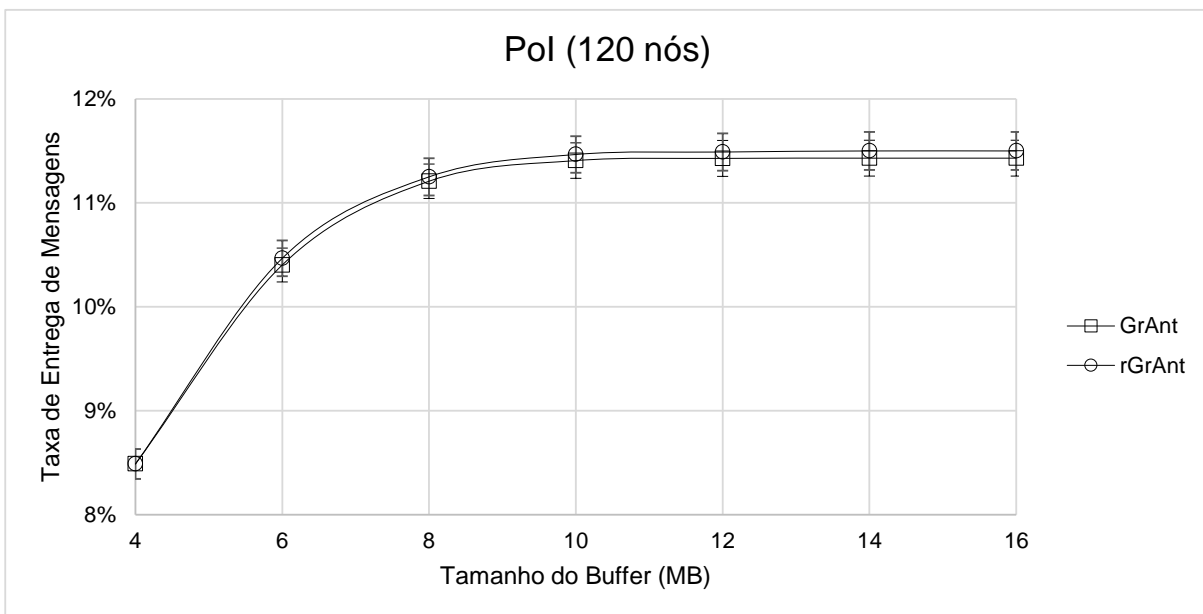


Figura 24: Taxa de entrega (PoI, tempo de parada) variando *buffer*

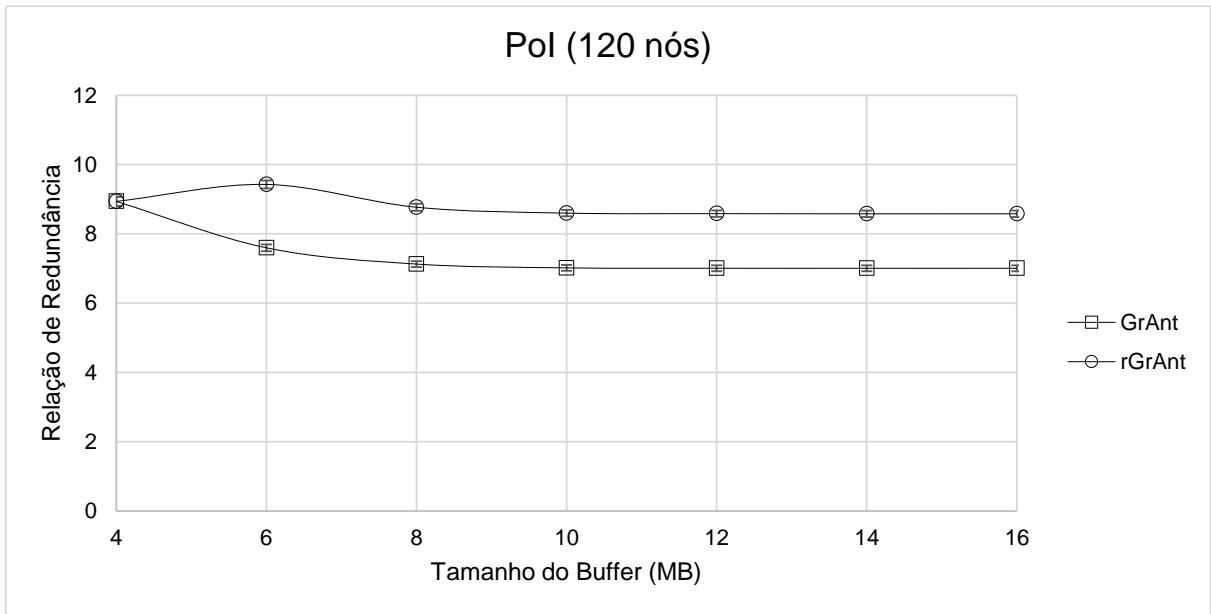


Figura 25: Redundância (PoI, tempo de parada) variando *buffer*

As Tabelas 31 e 32, localizadas no Apêndice C, mostram os valores numéricos para as taxas de entrega de mensagens, números de mensagens entregues e relações de redundância para o GrAnt e rGrAnt, respectivamente.

Nesse caso, percebe-se que o rGrAnt obteve ganhos em termos da taxa de entrega de mensagens para tamanhos de *buffer* maiores que 4 MB, porém os resultados não são estatisticamente diferentes se for considerado o intervalo de confiança. A relação de redundância do rGrAnt é superior ao GrAnt, com exceção do *buffer* de 4 MB devido ao uso do protocolo GrAnt para nós com baixa conectividade.

Além da variação do tamanho do *buffer*, o rGrAnt também foi testado variando-se o número de nós na rede.

As Figuras 26, 27, 28, 29 e 30 mostram a conectividade dos nós no cenário PoI com tempo de parada maior dos nós com 12, 36, 120, 240 e 360 nós, respectivamente.

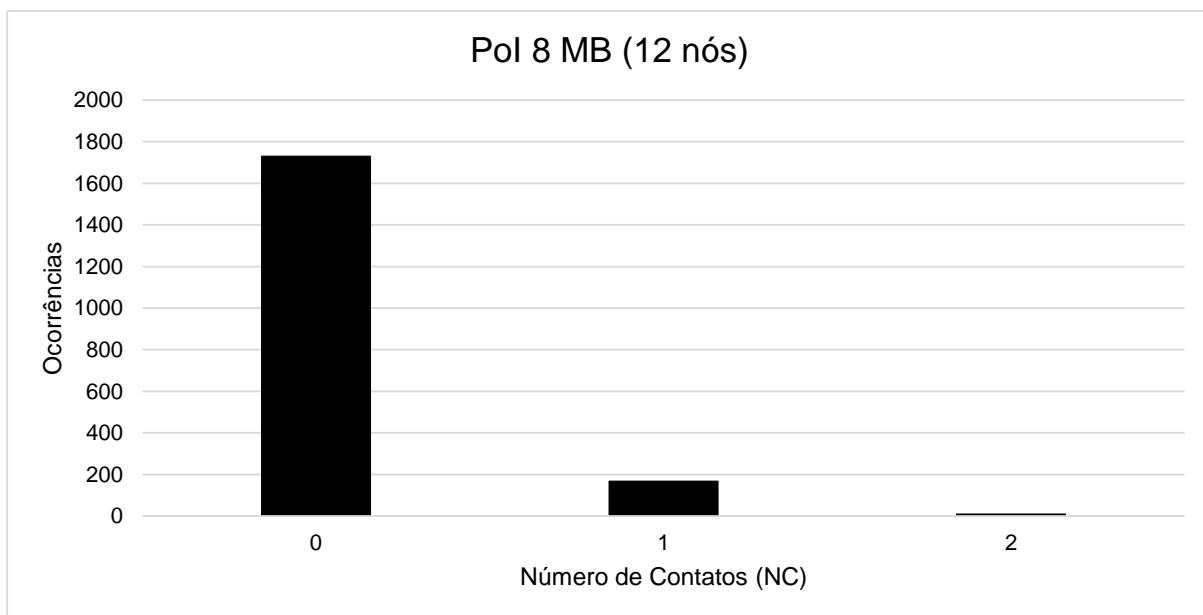


Figura 26: Conectividade (PoI, tempo de parada) com 12 nós

Com 12 nós na rede, os nós tiveram em média 0,0985 e no máximo 2 contatos.

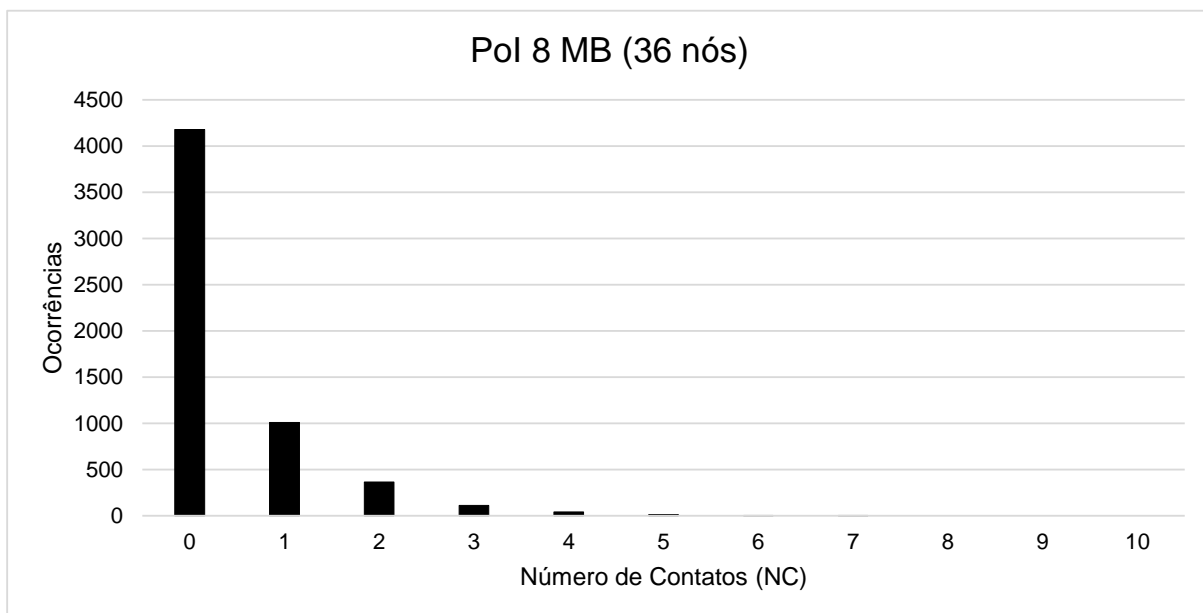


Figura 27: Conectividade (PoI, tempo de parada) com 36 nós

Com 36 nós na rede, os nós tiveram em média 0,4060 e no máximo 7 contatos.

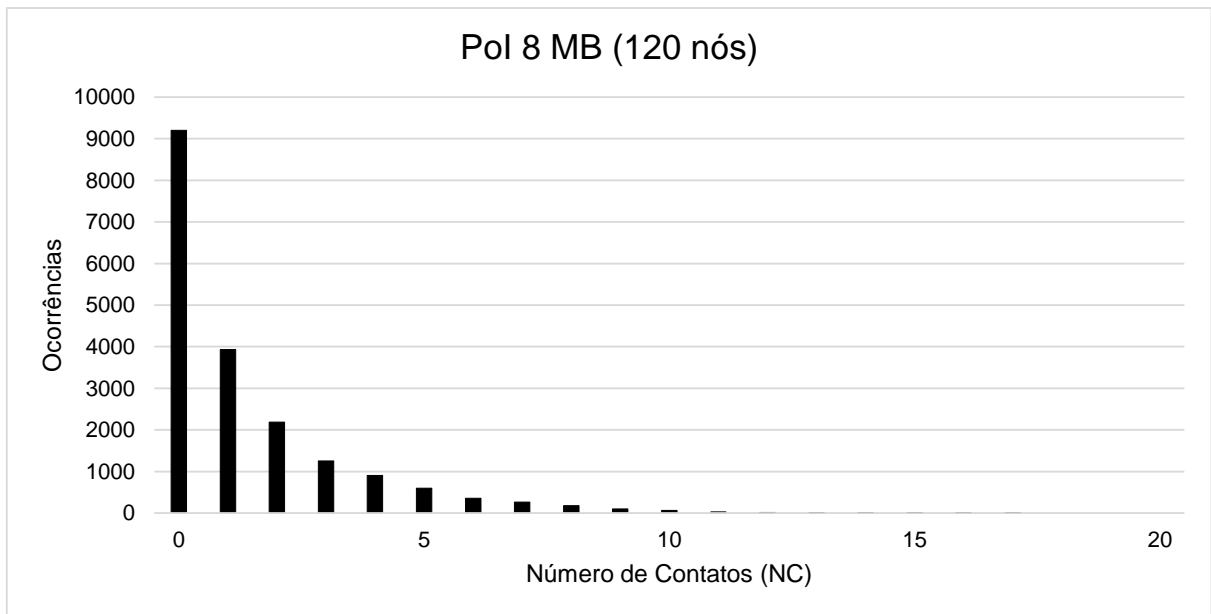


Figura 28: Conectividade (PoI, tempo de parada) com 120 nós

Com 120 nós na rede, os nós tiveram em média 1,3753 e no máximo 17 contatos.

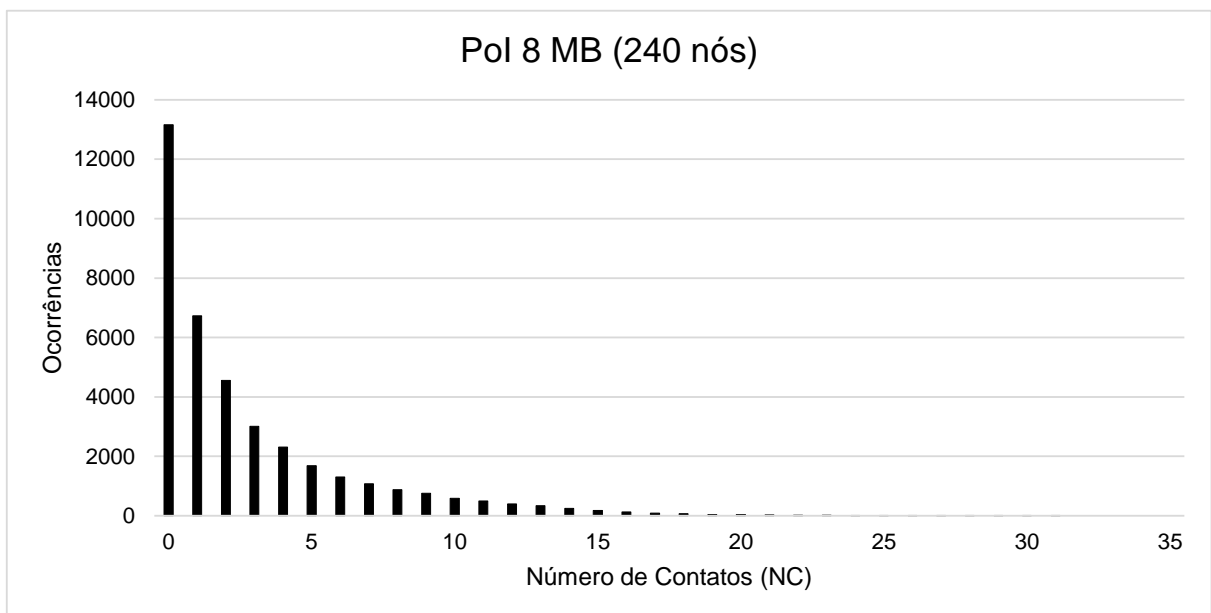


Figura 29: Conectividade (PoI, tempo de parada) com 240 nós

Com 240 nós na rede, os nós tiveram em média 2,7943 e no máximo 31 contatos.

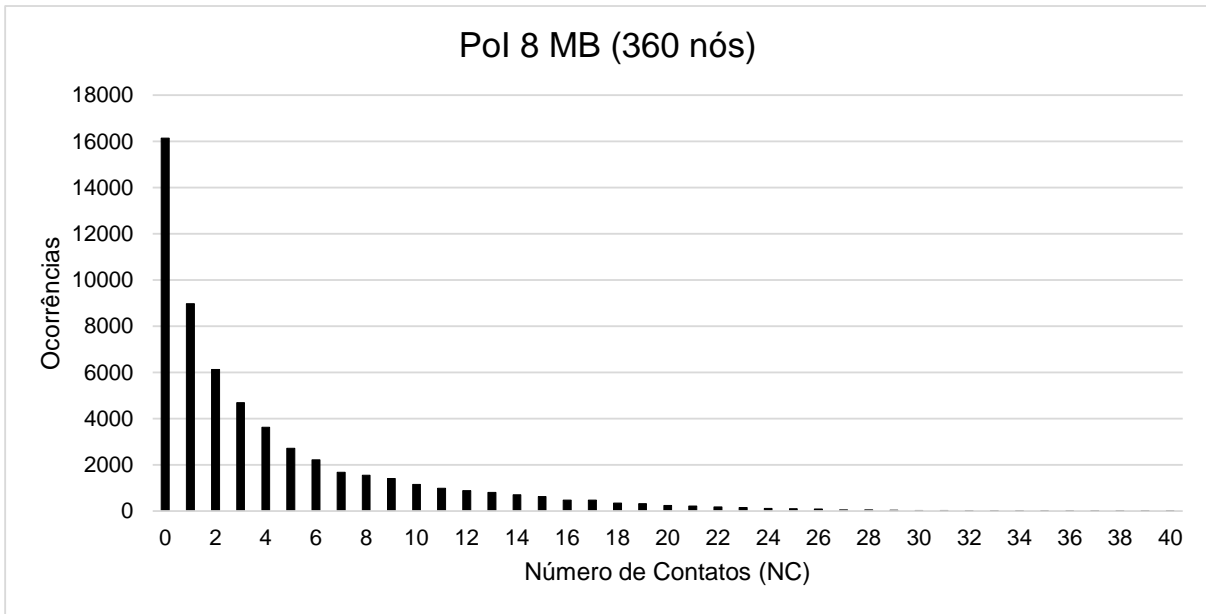


Figura 30: Conectividade (PoI, tempo de parada) com 360 nós

Com 360 nós na rede, os nós tiveram em média 4,1184 e no máximo 40 contatos.

A Figura 31 mostra a taxa de entrega de mensagens e a Figura 32 mostra a relação de redundância variando o número de nós na rede.

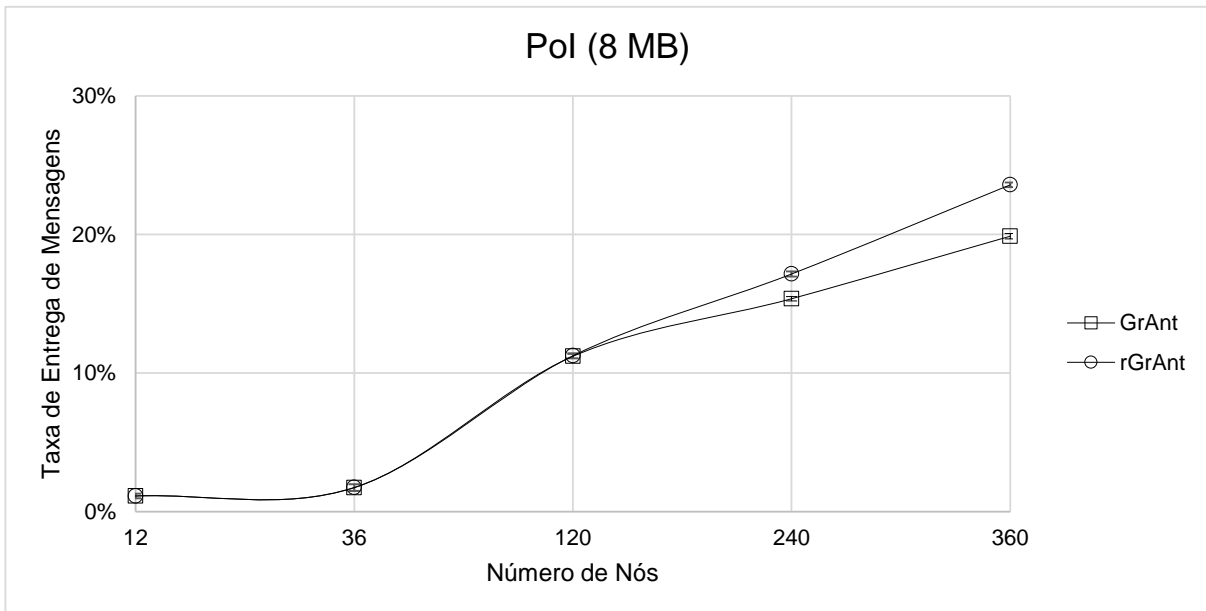


Figura 31: Taxa de entrega (PoI, tempo de parada) variando nº de nós

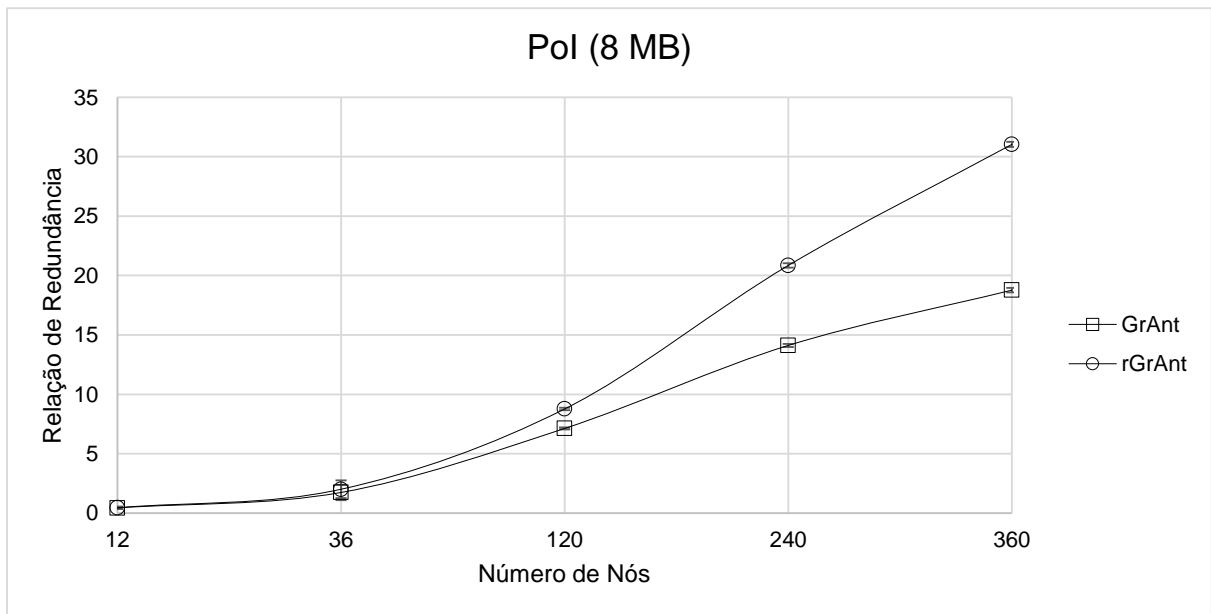


Figura 32: Redundância (PoI, tempo de parada) variando n° de nós

As Tabelas 33 e 34, localizadas no Apêndice C, mostram os valores numéricos para as taxas de entrega de mensagens, números de mensagens entregues e relações de redundância para o GrAnt e rGrAnt, respectivamente.

Variando o número de nós na rede para o cenário PoI com tempo de parada dos nós 100x maior que a configuração original, percebem-se ganhos estatisticamente significativos a partir de 120 nós em termos da taxa de entrega de mensagens. Além disso, em todos os casos a relação de redundância do rGrAnt é maior que o GrAnt, sendo a diferença ainda mais acentuada à medida que o número de nós aumenta.

6.2.3 CENÁRIO DO TRANSPORTE PÚBLICO DA CIDADE DE CURITIBA

Durante a fase de análise de desempenho do rGrAnt, também foram executados experimentos considerando outro cenário, relativo ao transporte público da cidade de Curitiba. Nesses experimentos, foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 1.

A Tabela 22 mostra as taxas de entrega de mensagens, relações de redundância e número de mensagens entregues do GrAnt e rGrAnt obtidos nas simulações utilizando esse cenário.

Protocolo	Tx. Entrega Msg.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
GrAnt	22,7390 \pm 0,1509%	3490,0333 \pm 23,2107	18,6741 \pm 0,1448
rGrAnt	23,4043 \pm 0,1746%	3592,1000 \pm 26,8584	8,2283 \pm 0,0608

Tabela 22: Resultados do GrAnt e rGrAnt (Transporte Público de Curitiba)

Observando os resultados, percebe-se que o rGrAnt teve ganhos na taxa de entrega de mensagens e também na relação de redundância. De acordo com a Figura 6, conclui-se que o cenário do transporte público de Curitiba possui muitos nós com alta conectividade. Devido a isso, os protocolos Vars escolhidos para NCs maiores são aplicados com maior frequência nesse cenário, fazendo com que haja uma maior restrição no encaminhamento das mensagens. Essa abordagem mostra-se efetiva, pois apresenta ganhos estatisticamente significativos em ambas as métricas taxa de entrega de mensagens e relação de redundância.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs-se a criar uma nova versão do protocolo GrAnt, chamada rGrAnt, com a habilidade de analisar a conectividade dos nós e, assim, escolher melhor a informação a ser utilizada por cada nó em cada decisão de encaminhamento de mensagem. Através de um conjunto de regras que define qual comportamento aplicar em cada nível de conectividade, o protocolo rGrAnt se adapta melhor a diferentes ambientes de redes, desde esparsos e desconectados até altamente conectados.

No cenário WD, o rGrAnt obteve ganhos significativos em termos da taxa de entrega de mensagens em todas as situações testadas. Por exemplo, com tamanho de *buffer* dos nós de 10 MB, o rGrAnt teve taxa de entrega de mensagens de $66,0020 \pm 0,4759\%$, número de mensagens entregues de $4126,9 \pm 30,4054$ e relação de redundância de $22,3564 \pm 0,1437$. Por outro lado, o GrAnt teve taxa de entrega de mensagens de $59,9593 \pm 0,4309\%$, número de mensagens entregues de $3830,7333 \pm 27,5371$ e relação de redundância de $13,6233 \pm 0,1509$. Isso mostra que o rGrAnt teve um ganho de $10,078\%$ na taxa de entrega de mensagens.

No cenário PoI, o modelo de movimento probabilístico dos nós não permitiu ganhos expressivos da mesma forma que ocorreu no WD, porém também apresentou ganhos em diversas situações que foram consideradas. Com tamanho de *buffer* dos nós de 8 MB, o rGrAnt teve taxa de entrega de mensagens de $81,8483 \pm 0,1774\%$, número de mensagens entregues de $9378,1333 \pm 20,3336$ e relação de redundância de $8,9281 \pm 0,0235$. Já o GrAnt teve taxa de entrega de mensagens de $80,3120 \pm 0,1940\%$, número de mensagens entregues de $9202,2 \pm 22,2104$ e relação de redundância de $7,1642 \pm 0,0212$. Isso mostra que o rGrAnt teve um ganho de aproximadamente 2% na taxa de entrega de mensagens.

No cenário do transporte público de Curitiba, o rGrAnt apresentou ganhos tanto na taxa de entrega de mensagens quanto na relação de redundância, comprovando a eficácia do rGrAnt nesse cenário de alta conectividade. Nesse cenário, o rGrAnt teve

taxa de entrega de mensagens de $23,4043 \pm 0,1746\%$, número de mensagens entregues de $3592,1 \pm 26,8584$ e relação de redundância de $8,2283 \pm 0,0608$. O GrAnt teve taxa de entrega de mensagens de $22,7390 \pm 0,1509\%$, número de mensagens entregues de $3490,0333 \pm 23,2107$ e relação de redundância de $18,6741 \pm 0,1448$. Isso representa um ganho do rGrAnt de aproximadamente 3% na taxa de entrega de mensagens com redução de aproximadamente 44% na relação de redundância.

Em conclusão, os objetivos geral e específicos propostos para esse trabalho foram atingidos e os resultados obtidos comprovaram os ganhos do rGrAnt em cenários comparados com o GrAnt.

Para trabalhos futuros, pretende-se analisar outros parâmetros do ACO que possam ser adaptados *online* de forma a melhorar o desempenho do rGrAnt em outros ambientes de rede. O protocolo rGrAnt, que foi implementado como um sistema clássico baseado em regras, poderia ser adaptado para utilizar um sistema baseado em fuzzy de forma a melhor explorar os intervalos de conectividade dos nós dentro da rede. Pretende-se ainda comparar o custo computacional do rGrAnt com o GrAnt. Além dos três cenários de simulação que foram considerados, outros cenários poderiam ser testados de forma a validar a eficácia do protocolo rGrAnt em diferentes ambientes.

REFERÊNCIAS

- ABABOU, M.; BELLAFKIH, M.; ELKOUCH, R. Energy efficient routing protocol for delay tolerant network based on fuzzy logic and ant colony. **International Journal of Intelligent Systems and Applications**, v. 10, p. 69–77, 2018.
- ABABOU, M. et al. AntProPHET: A new routing protocol for delay tolerant networks. In: **Proceedings of 2014 Mediterranean Microwave Symposium (MMS2014)**. Marrakech, Morocco: IEEE, 2014. p. 1–6.
- ABABOU, M. et al. BeeAntDTN: A nature inspired routing protocol for delay tolerant networks. In: **Proceedings of 2014 Mediterranean Microwave Symposium (MMS2014)**. Marrakech, Morocco: IEEE, 2014. p. 1–6.
- BALLARD, D. H. **An Introduction to Natural Computation (Complex Adaptive Systems)**. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1999.
- BENI, G. The concept of cellular robotic system. In: **Proceedings IEEE International Symposium on Intelligent Control**. Arlington, VA, USA: IEEE, 1988. p. 57–62.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZC, G. **Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems**. New York, USA: Oxford University Press, 1999.
- CASTRO, L. N. **Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms and Applications**. Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall/CRC, 2006.
- CERF, V. G. et al. **IETF RFC-4838 - Delay-Tolerant Networking Architecture**. 2007. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/rfc/rfc4838.txt>>. Acesso em: 19 de Abril de 2018.
- 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.
- 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.
- DORIGO, M.; CARO, G. di. **Ant Colony Optimization Meta-Heuristic, New Ideas in Optimization**. Maidenhead, England: McGraw-Hill, 1999. 11–32 p.
- 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.
- EKMAN, F. et al. Working day movement model. In: **Proceedings of 1st ACM/SIG-MOBILE Workshop on Mobility Models for Networking Research**. Hong Kong, China: ACM, 2008. p. 33–40.

- 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.
- 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.
- GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computer and Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986.
- HEREK, T. A. **Análise de uma Rede Oportunista no Transporte Público Urbano e Proposta de Novos Protocolos de Roteamento Adaptados**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2018.
- 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.
- KERÄNEN, A.; OTT, J.; KÄRKKÄINEN, T. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. In: **SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques**. New York, NY, USA: ICST, 2009. ISBN 978-963-9799-45-5.
- LINDGREN, A.; DORIA, A.; SCHELÉN, O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. **Lectures Notes in Computer Science**, v. 3126, p. 239–254, 2004.
- 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.
- PASTEELS, J. M.; DENEUBOURG, J. l.; GOSS, S. Self-organization mechanisms in ant societies (i): Trail recruitment to newly discovered food sources. **Experientia Suppl.**, v. 76, p. 579–581, 1989.
- PASTEELS, J. M.; DENEUBOURG, J. l.; GOSS, S. Self-organization mechanisms in ant societies (i): Trail recruitment to newly discovered food sources. **Experientia Suppl.**, v. 76, p. 579–581, 1989.
- POOL, I. de S.; KOCHEN, M. Contacts and influence. **Social Networks**, v. 1, n. 1, p. 5–51, 1978.
- SCOTT, K.; BURLEIGH, S. **IETF RFC-5050 - Bundle Protocol Specification**. 2007. Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc5050.txt>>. Acesso em: 19 de Abril de 2018.

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.

VAHDAT, A.; BECKER, D. **Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks**. 2000. Duke University. Technical Report-CS-2000-06. Disponível em: <<http://issg.cs.duke.edu/epidemic/epidemic.pdf>>. Acesso em: 6 de agosto de 2018.

VENDRAMIN, A. C. B. K. et al. CGrAnt: a swarm intelligence-based routing protocol for delay tolerant networks. In: **The Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2012)**. Philadelphia: Proceedings of the 14th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, 2012. p. 33–40.

VENDRAMIN, A. C. K. et al. GrAnt: Inferring best forwarders from complex networks' dynamics through a greedy ant colony optimization. **Computer Networks**, v. 56, n. 3, 2012.

VENDRAMIN, A. C. K. et al. A social-aware routing protocol for opportunistic networks. **Expert Systems with Applications**, v. 54, p. 351–363, 2016.

WANG, C. et al. Routing algorithm based on ant colony optimization for dtn congestion control. In: **2012 15th International Conference on Network-Based Information Systems**. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2012. p. 715–720.

WARTHMAN, F. **Delay- and Disruption- Tolerant Networks (DTNs), A Tutorial, Version 3.2**. 2015. Disponível em: <http://ipnsig.org/wp-content/uploads/2015/09/DTN_Tutorial_v3.2.pdf>. Acesso em: 19 de Abril de 2018.

WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social Network Analysis: Methods and Applications**. Cambridge, Massachusetts, USA: Cambridge University Press, 1994.

ZHENGUO, Y. et al. ACR An Ant-Colony-based Routing in Delay Tolerant Networks. **Journal of Computer Research and Development**, Journal of Computer Research and Development, v. 49, n. 12, p. 2501, 2012.

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.

APÊNDICE A – TABELAS - CENÁRIO WD

<i>Buffer</i> (MB)	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
4	45,7537 ± 0,4058%	2923,2333 ± 25,9193	14,4765 ± 0,1554
6	53,7443 ± 0,4357%	3433,7667 ± 27,8536	13,9483 ± 0,1436
8	57,8180 ± 0,4532%	3694,0000 ± 28,9562	13,7716 ± 0,1460
10	59,9593 ± 0,4309%	3830,7333 ± 27,5371	13,6233 ± 0,1509
12	61,1870 ± 0,4552%	3909,2333 ± 29,0727	13,4517 ± 0,1479
14	61,7153 ± 0,5033%	3943,0333 ± 32,1538	13,3705 ± 0,1475
16	61,9923 ± 0,4932%	3960,6667 ± 31,5382	13,2846 ± 0,1439

Tabela 23: Resultados do GrAnt (WD) variando o *buffer*

<i>Buffer</i> (MB)	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
4	47,1343 ± 0,3825%	3011,4333 ± 24,4358	16,4345 ± 0,1275
6	58,3313 ± 0,4715%	3726,7000 ± 30,1113	23,1636 ± 0,1512
8	63,2810 ± 0,4784%	4042,9667 ± 30,5760	22,6404 ± 0,1335
10	66,0020 ± 0,4759%	4216,9000 ± 30,4054	22,3564 ± 0,1437
12	67,6203 ± 0,5142%	4320,3000 ± 32,8401	21,9697 ± 0,1357
14	68,6107 ± 0,4954%	4383,5000 ± 31,6289	21,9697 ± 0,1510
16	69,0790 ± 0,5072%	4413,4667 ± 32,4129	21,8503 ± 0,1385

Tabela 24: Resultados do rGrAnt (WD) variando o *buffer*

Nós	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
75	11,0457 ± 0,2470%	704,8333 ± 15,7791	13,9408 ± 0,4384
142	16,8773 ± 0,5115%	1076,6333 ± 32,6513	8,2814 ± 0,3608
339	59,9573 ± 0,4757%	3830,6000 ± 30,3966	13,7229 ± 0,1251
594	69,4153 ± 0,3356%	4434,2667 ± 21,4407	17,0620 ± 0,0915
1104	71,0547 ± 0,3847%	4537,5333 ± 24,5681	21,8664 ± 0,1150

Tabela 25: Resultados do GrAnt (WD) variando o número de nós

Nós	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
75	10,9743 ± 0,2653%	700,2333 ± 16,9318	23,5808 ± 0,6981
142	18,0230 ± 0,5654%	1149,7000 ± 36,0490	18,2895 ± 0,8610
339	66,0020 ± 0,4759%	4216,9000 ± 30,4054	22,3564 ± 0,1437
594	74,4663 ± 0,3105%	4756,8667 ± 19,8367	32,1658 ± 0,1685
1104	76,7023 ± 0,3371%	4898,2333 ± 21,5282	49,7222 ± 0,2906

Tabela 26: Resultados do rGrAnt (WD) variando o número de nós

APÊNDICE B – TABELAS - CENÁRIO POI

<i>Buffer</i> (MB)	Tx. Entrega Msg.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
4	61,8962 ± 0,2170%	7092,0000 ± 24,8899	7,0490 ± 0,0262
6	74,4397 ± 0,2217%	8529,2333 ± 25,4243	7,0113 ± 0,0227
8	80,3120 ± 0,1940%	9202,2000 ± 22,2104	7,1642 ± 0,0212
10	82,5990 ± 0,1680%	9464,1667 ± 19,2119	7,2795 ± 0,0188
12	83,3267 ± 0,1674%	9547,6667 ± 19,1890	7,3225 ± 0,0225
14	83,4637 ± 0,1738%	9563,3667 ± 19,9129	7,3302 ± 0,0221
16	83,4690 ± 0,1867%	9563,9333 ± 21,0609	7,3435 ± 0,0246

Tabela 27: Resultados do GrAnt (PoI) variando o *buffer*

<i>Buffer</i> (MB)	Tx. Entrega Msg.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
4	61,5147 ± 0,2266%	7048,2000 ± 25,9293	7,1879 ± 0,0301
6	74,9370 ± 0,2462%	8586,3333 ± 28,1783	9,0385 ± 0,0265
8	81,8483 ± 0,1774%	9378,1333 ± 20,3336	8,9281 ± 0,0235
10	84,5750 ± 0,1654%	9690,6333 ± 18,9573	8,9604 ± 0,0213
12	85,5360 ± 0,1746%	9800,6667 ± 20,0413	8,9738 ± 0,0191
14	85,8443 ± 0,1680%	9835,9667 ± 19,2731	8,9913 ± 0,0208
16	85,8963 ± 0,1592%	9842,0000 ± 18,2426	8,9866 ± 0,0194

Tabela 28: Resultados do rGrAnt (PoI) variando o *buffer*

Nós	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
12	5,6483 ± 0,1996%	646,3667 ± 22,8466	0,5903 ± 0,0428
36	29,1790 ± 0,3286%	3340,7333 ± 37,6087	1,9352 ± 0,0191
120	80,3120 ± 0,1940%	9202,2000 ± 22,2104	7,1642 ± 0,0212
240	90,6420 ± 0,1289%	10380,3000 ± 14,7517	13,7509 ± 0,0339
360	94,0350 ± 0,0953%	10768,8333 ± 10,9260	19,2694 ± 0,0686

Tabela 29: Resultados do GrAnt (PoI) variando o número de nós

Nós	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
12	5,8077 ± 0,1999%	664,5000 ± 22,8982	0,7606 ± 0,0525
36	28,1333 ± 0,3549%	3220,9333 ± 40,6662	2,6027 ± 0,0285
120	81,8483 ± 0,1774%	9378,1333 ± 20,3336	8,9281 ± 0,0235
240	90,2147 ± 0,1110%	10331,4333 ± 12,7023	18,1724 ± 0,0430
360	92,7960 ± 0,0836%	10626,9333 ± 9,5529	27,6769 ± 0,1054

Tabela 30: Resultados do rGrAnt (PoI) variando o número de nós

APÊNDICE C – TABELAS - CENÁRIO POI (MAIOR TEMPO)

<i>Buffer</i> (MB)	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
4	8,4880 ± 0,1434%	972,5000 ± 16,4006	8,9380 ± 0,1352
6	10,4023 ± 0,1630%	1191,8000 ± 18,6991	7,5980 ± 0,0990
8	11,2083 ± 0,1655%	1284,2000 ± 18,9750	7,1291 ± 0,0850
10	11,4070 ± 0,1707%	1307,0667 ± 19,5649	7,0194 ± 0,0846
12	11,4280 ± 0,1728%	1309,4333 ± 19,7671	7,0081 ± 0,0856
14	11,4303 ± 0,1724%	1309,7000 ± 19,7154	7,0066 ± 0,0855
16	11,4303 ± 0,1724%	1309,7000 ± 19,3840	7,0066 ± 0,0855

Tabela 31: Resultados do GrAnt (PoI, tempo de parada) variando o *buffer*

<i>Buffer</i> (MB)	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
4	8,4880 ± 0,1434%	972,5000 ± 16,4006	8,9380 ± 0,1352
6	10,4667 ± 0,1721%	1199,2333 ± 19,7074	9,4271 ± 0,1164
8	11,2503 ± 0,1791%	1288,9667 ± 20,5097	8,7689 ± 0,1026
10	11,4657 ± 0,1759%	1313,7333 ± 20,1920	8,5996 ± 0,0930
12	11,4893 ± 0,1794%	1316,5333 ± 20,5207	8,5843 ± 0,0926
14	11,4997 ± 0,1827%	1317,6000 ± 20,9475	8,5800 ± 0,0935
16	11,4997 ± 0,1827%	1317,6333 ± 20,9472	8,5798 ± 0,0935

Tabela 32: Resultados do rGrAnt (PoI, tempo de parada) variando *buffer*

Nós	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
12	1,1293 ± 0,1720%	129,5000 ± 19,7256	0,4382 ± 0,0913
36	1,7317 ± 0,2397%	198,4667 ± 27,5217	1,7396 ± 0,6478
120	11,2083 ± 0,1655%	1284,2000 ± 18,9750	7,1291 ± 0,0850
240	15,3633 ± 0,1564%	1759,4000 ± 17,8980	14,1133 ± 0,1291
360	19,8750 ± 0,1924%	2276,0000 ± 22,0092	18,7706 ± 0,1887

Tabela 33: Resultados do GrAnt (PoI, tempo de parada) variando o número de nós

Nós	Tx. Entrega Msgs.	Msgs. Entregues	Rel. Redundância
12	1,1310 ± 0,1719%	129,6667 ± 19,7129	0,4556 ± 0,0945
36	1,7400 ± 0,2379%	199,4000 ± 27,2806	2,0107 ± 0,7457
120	11,2503 ± 0,1791%	1288,9667 ± 20,5097	8,7689 ± 0,1026
240	17,1503 ± 0,1857%	1964,1333 ± 21,2784	20,8462 ± 0,1861
360	23,5837 ± 0,1693%	2700,7333 ± 19,3505	31,0361 ± 0,2140

Tabela 34: Resultados do rGrAnt (PoI, tempo de parada) variando o número de nós