

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

CLOVIS RONALDO DA COSTA BENTO

**PROTOCOLO DE ROTEAMENTO BIOINSPIRADO PARA MANETS
BASEADO EM REDES DE FUNGOS – HYPHANET**

TESE

CURITIBA

2020

CLOVIS RONALDO DA COSTA BENTO

**PROTOCOLO DE ROTEAMENTO BIOINSPIRADO PARA MANETS
BASEADO EM REDES DE FUNGOS – HYPHANET**

**HYPHANET – BIOINSPIRED ROUTING PROTOCOL FOR MANETS
BASED ON FUNGI NETWORKS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille

CURITIBA

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado, mesmo para fins comerciais, desde que atribuam o devido crédito ao autor pela criação original.

TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº 220

A Tese de Doutorado intitulada **Protocolo De Roteamento Bioinspirado Para Manets Baseado Em Redes De Fungos - Hyphanet** defendida em sessão pública pelo candidato **Clovis Ronaldo Da Costa Bento** no dia **25 de setembro de 2020**, foi julgada aprovada em sua forma final para a obtenção do título de **Doutor em Ciências**, Área de Concentração – Telecomunicações e Redes, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

Emilio Carlos Gomes Wille, Dr. – UTFPR (Orientador)

Anelise Munaretto Fonseca, Dra – UTFPR

Carlos Marcelo Pedroso, Dr. – UFPR

Maura Harumi Sugai Guérios, Dra – UP

Marcelo Eduardo Pellenz, Dr – PUC/PR

Curitiba, 25 de setembro de 2020.

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

Dedico este trabalho à minha esposa Giani e aos
meus filhos Raul Victor e André Luiz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à todas as pessoas que, direta ou indiretamente, tornaram este trabalho possível de ser realizado, em especial o meu orientador Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille, pela confiança, dedicação e contribuições que foram fundamentais para a conclusão desta pesquisa.

Aos amigos e colegas que me incentivaram e inspiraram.

Aos professores que apontaram o caminho da construção do conhecimento.

À UTFPR/CPGEI (campus Curitiba), instituição que me acolheu e oportunizou o desenvolvimento desta tese, fornecendo o acesso a recursos materiais e humanos de alta qualidade e de forma gratuita.

À minha família pelo apoio e compreensão.

"A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos." (Marcel Proust).

RESUMO

BENTO, Clovis Ronaldo da Costa. **Protocolo de Roteamento Bioinspirado para MANETs Baseado em Redes de Fungos – HyphaNet**. 2020. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Uma rede *ad hoc* móvel (MANET) corresponde a um grupo de dispositivos móveis que se comunicam entre si e sem qualquer infraestrutura de suporte. A topologia da rede não é estruturada, os dispositivos são nós da rede que atuam como terminais e roteadores. O roteamento na MANET é extremamente desafiador devido à mobilidade dos nós e aos recursos limitados de largura de banda e energia. Atualmente, as principais tendências mostram que as MANETs ocupam cada vez mais espaço no mercado doméstico e corporativo com o crescimento do número de usuários e de novas aplicações. Assim como diversos sistemas foram inspirados no comportamento de insetos sociais (formigas, abelhas, entre outros), as colônias de fungos também demonstram potencial de bioinspiração por exibirem comportamento e capacidade para auto-organização de redes naturais adaptativas, robustas, resilientes e eficientes no transporte de nutrientes. A fundamentação teórica na área de fungos foi obtida através de pesquisa exploratória, priorizando pesquisas que tratam do crescimento e da formação de redes fúngicas, e os processos envolvidos na produção e transporte de nutrientes, assim como das aplicações conhecidas dos fungos na área tecnológica. Desta forma, uma comparação entre rede fúngica e uma rede de comunicação é obtida. Muitas espécies de fungos formam redes de filamentos a partir da germinação de esporos, que se estendem para a formação de redes de hifas, cujo crescimento e sobrevivência são baseados na dinâmica de absorção, reciclagem e transporte de nutrientes. Os filamentos (ou hifas) podem ser comparados a enlaces, suas pontas e as ramificações são os nós, e o micélio a totalidade da rede. Baseado nestes conceitos, esta tese apresenta uma proposta para o desenvolvimento de um protocolo de roteamento bioinspirado para redes MANETs baseado na dinâmica das colônias de fungos, denominado de HyphaNet. O protocolo desenvolvido é do tipo *on-demand* e *multipath*. O HyphaNet mostra-se promissor e testes de desempenho (atraso médio, taxas de transmissão e de entrega, e sobrecarga de roteamento) realizados com base no simulador NS-2, em cenários de baixo tráfego do tipo CBR/UDP, apresentam resultados superiores ao protocolo clássico AODV e resultados semelhantes ao protocolo SARA, baseado em formigas.

Palavras-chave: Rede Fúngica. Atratividade de Nó. Protocolo Bioinspirado. Otimização por Conversão de Massa.

ABSTRACT

BENTO, Clovis Ronaldo da Costa. **HyphaNet – BioInspired Routing Protocol for MANETs Based on Fungi Networks**. 2020. 126 p. Thesis (Doctorate in Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

A mobile ad hoc network (MANET) corresponds to a group of mobile devices that communicate with each other and without any supporting infrastructure. The network topology is not structured, the devices are network nodes that act as terminals and routers. MANET routing is extremely challenging due to node mobility and limited bandwidth and power resources. Major trends currently show that MANETs are taking up more and more space in the domestic and corporate market with the growth in the number of users and new applications. As diverse systems have been inspired by the behavior of social insects (ants, bees, among others), fungal colonies also demonstrate the potential of bioinspiration because they exhibit behavior and capacity for self-organization of adaptive, robust, resilient and efficient transport networks of nutrients. Theoretical foundations in the area of fungi were obtained through exploratory research, prioritizing research that deals with the growth and formation of fungal networks, and the processes involved in the production and transport of nutrients, as well as the applications of fungi that already exist in the technological area. In this way, a comparison between a fungal network and a communication network is obtained. Filaments (or hyphae) can be compared to links, their tips and branches are the nodes and the mycelium the entire network. Many species of fungi form filament networks from the germination of spores, which extend into the formation of hyphae networks, whose growth and survival are based on the dynamics of absorption, recycling and transport of nutrients. Based on these concepts, this thesis presents a proposal for the development of a bioinspired routing protocol for MANET networks based on the dynamics of fungal colonies, called HyphaNet. The protocol developed is of the type on-demand and multipath. HyphaNet is promising and performance tests (average delay, transmission and delivery rates and overhead) performed based on the NS-2 simulator, in low traffic scenarios of the CBR / UDP type, present results superior to those of the classic AODV protocol and results similar to the SARA protocol, based on ants.

Keywords: Fungal Network. Node Attractiveness. Bio-inspired Protocol. Mass Conversion Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Interligação do sistema ferroviário de Tóquio.	17
Figura 2 – Comparativo entre as dinâmicas do crescimento do fungo com MANETs. . .	19
Figura 3 – Topologia de rede com protocolo DSDV e exemplo da tabela de roteamento do nó A.	31
Figura 4 – Exemplo de funcionamento do ZRP com o tráfego de mensagens IERP. . . .	34
Figura 5 – Exemplo de uma topologia mostrando o conteúdo da tabela de roteamento do nó i , com as informações: feromônio (Υ_j), custo (C), saltos (h) e ocupações (s), de cada rota para os nós A, B, C e D.	38
Figura 6 – Exemplos de fungos frequentemente encontrados na natureza e no ambiente doméstico.	51
Figura 7 – Estrutura básica dos fungos do tipo cogumelo e morfologia das hifas.	52
Figura 8 – Fases do crescimento dos fungos miceliais.	53
Figura 9 – Exemplos de estruturas de redes de dois fungos: <i>P. polycephalum</i> e <i>Pinicillium</i>	56
Figura 10 – Equiparação direta da estrutura do micélio com a estrutura da rede de comunicação.	57
Figura 11 – Translocação de nutrientes dentro de um micélio.	58
Figura 12 – Crescimento para diferentes valores de α_n e ρ_n do modelo de simulação em Falconer <i>et al.</i> (2005).	63
Figura 13 – Sequência esquemática do crescimento fúngico. As figuras superiores mostram a Memória Direcional guiando o crescimento para a mesma direção inicial (θ). As inferiores mostram a ramificação induzida pela colisão (ramificação emergindo atrás da ponta principal) sempre que o crescimento é bloqueado por um beco sem saída.	64
Figura 14 – Um labirinto de uma estrutura microfluídica resolvido pela espécie de fungo <i>A. mellea</i> que manifesta alto grau de memória direcional e uma taxa de ramificação muito baixa.	65
Figura 15 – Fluxograma da fase de busca de rotas.	73
Figura 16 – Exemplo de uma topologia com a perspectiva do nó i no momento do processo de seleção de rota, mostrando as informações da atratividade dos nós vizinhos.	79
Figura 17 – Exemplo da influência da atratividade no roteamento no HyphaNet.	81
Figura 18 – Exemplo da pré-atualização das biomassas móvel e imóvel. (a) Valores das biomassas no caminho $O-A-B-C-D$ antes da pré-atualização; (b) Valores após a pré-atualização com o pacote de dados; (c) Atualização das biomassas pela mensagem HYPH-ACK.	86
Figura 19 – Fluxograma do envio da mensagem HYPHA-ACK.	87
Figura 20 – Diagrama de fluxo de mensagens no HyphaNet.	88
Figura 21 – Topologia fixa com 17 nós para testar a convergência do HyphaNet.	94
Figura 22 – Influência da ocupação dos "buffers" na seleção de rotas.	95
96figure.caption.47	
Figura 24 – Gráficos da qualidade da rota e do nível de biomassa imóvel.	97
98figure.caption.49	
Figura 26 – Gráficos do desempenho em função dos parâmetros μ e Ω	99
100figure.caption.51	
Figura 28 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (<i>delivery</i>) e (<i>overhead</i>).	101

Figura 29 – Gráficos comparativos do atraso e taxa de transferência (<i>throughput</i>).	101
Figura 30 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (<i>delivery</i>) e da perda de pacotes nas filas (<i>dropped</i>).	102
Figura 31 – Gráficos comparativos do atraso e taxa de transferência (<i>throughput</i>).	103
Figura 32 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (<i>delivery</i>) e <i>Overhead</i>	104
Figura 33 – Gráficos comparativos do atraso e taxa de transferência (<i>throughput</i>).	104
Figura 34 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (<i>delivery</i>) e do (<i>overhead</i>).	105
Figura 35 – Gráficos comparativos do atraso e taxa de entrega (<i>delivery</i>).	105
Figura 36 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (<i>delivery</i>) e do (<i>overhead</i>).	106
Figura 37 – Formato da mensagem HELLO para divulgação de informações entre nós vizinhos.	119
Figura 38 – Formato das mensagens <i>Route Request</i> (RREQUEST) e <i>Route Reply</i> (RREPLY) nos procedimentos de descoberta e confirmação de rota.	120
Figura 39 – Formato da mensagem <i>Route Error</i> (RERROR) no procedimento de indicação de falha de enlace.	121
Figura 40 – Formato da mensagem <i>Route Repair Request</i> (RREPAIR-REQ) e <i>Route Repair Reply</i> (RREPAIR-REP) nos procedimentos de reparo de falha de enlace.	122
Figura 41 – Formato da mensagem <i>Data Acknowledgment</i> (HYPHA-ACK) no procedimento de confirmação de entrega de dados e distribuição de massa móvel fictícia.	123
Figura 42 – Formato do subcabeçalho de dados.	124
Figura 43 – Convergência vs. Número de iterações.	126
Quadro 1 – Exemplos de protocolos de redes ad hoc conforme a categoria.	26
Quadro 2 – Correspondência entre colônia de abelhas e rede de comunicação.	49
Quadro 3 – Mapeamento entre rede de fungos e rede de comunicação.	66
Quadro 4 – Tipos de mensagens HyphaNet.	71
Quadro 5 – Comparação do processo de roteamento entre ACO e HyphaNet.	89
Quadro 6 – Parâmetros utilizados para configuração mínima do simulador NS-2.35.	92
Quadro 7 – Parâmetros de configuração do HyphaNet utilizados nas simulações.	93

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

AAAS	<i>American Association For The Advancement Of Science</i>
ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
ABR	<i>Associative-Based Routing</i>
ACK	<i>Acknowledgment</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
AODV	<i>Ad hoc On-demand Distance Vector Routing</i>
BA	<i>Bat Algorithm</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CGSR	<i>Clusterhead Gateway. Switch Routing</i>
CS	<i>Cuckoo Search</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
DDR	<i>Distributed Dynamic Routing</i>
DSDV	<i>Destination Sequenced Distance Vector</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>
DST	<i>Distributed Spanning Tree</i>
FA	<i>Firefly Algorithm</i>
FSR	<i>Fisheye State Routing</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GSR	<i>Global State Routing</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IARP	<i>Intrazone Routing Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IERP	<i>Interzone Routing Protocol</i>
LAR	<i>Location-Aided Routing</i>
MAODV	<i>Multicast Ad hoc On-demand Distance Vector Routing</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
NDP	<i>Neighbor Discovery Protocol</i>
NS	<i>Network Simulator</i>
OLSR	<i>Optimized Link State Routing</i>
PDR	<i>Packet Delivery Ratio</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RFID	<i>Radio-Frequency IDentification</i>
RTS	<i>Request To Send</i>

RWP	<i>Random WayPoint</i>
SI	<i>Swarm Intelligence</i>
SLURP	<i>Scalable Location Update Routing Protocol</i>
STAR	<i>Source Tree Adaptive Routing</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
ZHLS	<i>Zone-Based Hierarchical Link State routing protocol</i>
ZRP	<i>Zone Routing Protocol</i>

ACRÔNIMOS

AntHocNet	<i>Ant-based hybrid routing algorithm for mobile ad Hoc Networks</i>
ARA	<i>Ant-colony based Routing Algorithm</i>
BeeAdHoc	<i>Bee-inspired routing in mobile Ad Hoc networks</i>
BeeIP	<i>Bee Inspired Protocol</i>
DYMO	<i>Dynamic On-demand MANET Routing Protocol</i>
FUNNet	<i>Fungal Network</i>
HyphaNet	<i>Hyphae ad hoc mobile Networks</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i>
ROAM	<i>Real-time Optimised Ad hoc Middleware</i>
SARA	<i>Simple Ant Routing Algorithm</i>
TORA	<i>Temporary Ordered Routing Algorithm</i>
WI-FI	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
ZigBee	<i>Zonal Intercommunication Global-standard, where Battery life is long, which is Economical to deploy, and which exhibits Efficient use of resources</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	20
1.3	METODOLOGIA	20
1.3.1	Classificação da pesquisa	21
1.3.2	Técnica de levantamento de dados	21
1.3.3	Análise e interpretação dos resultados	22
1.4	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	22
2	PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO PARA REDES MÓVEIS	24
2.1	REDES <i>AD HOC</i> MÓVEIS	24
2.2	PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO <i>AD HOC</i>	25
2.2.1	Roteamento Reativo	26
2.2.1.1	<i>Ad hoc On-demand Distance Vector Routing (AODV)</i>	26
2.2.1.2	Outros protocolos reativos	28
2.2.1.2.1	<i>Dynamic Source Routing (DSR)</i>	28
2.2.1.2.2	<i>Temporary Ordered Routing Algorithm (TORA)</i>	28
2.2.1.2.3	<i>Associative-Based Routing (ABR)</i>	29
2.2.2	Roteamento Proativo	30
2.2.2.1	<i>Optimized Link State Routing (OLSR)</i>	30
2.2.2.2	<i>Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)</i>	31
2.2.3	Roteamento Híbrido	32
2.2.3.1	<i>Zone Routing Protocol (ZRP)</i>	32
2.3	ROTEAMENTO BIOINSPIRADO EM COLÔNIA DE FORMIGAS	34
2.3.1	<i>Simple Ant Routing Algorithm (SARA)</i>	35
2.3.1.1	Descoberta de rotas	36
2.3.1.2	Seleção de rotas	37
2.3.1.3	Manutenção de rotas	38
2.3.1.4	Recuperação de falhas	40
2.3.2	AntHocNet	40
2.3.2.1	Descoberta de rotas	41
2.3.2.2	Seleção de rotas	42
2.3.2.3	Manutenção e exploração de rotas	43
2.3.2.4	Recuperação de falhas	44
2.3.3	Hopnet	45
2.3.4	Enhanced-Ant-AODV	46
2.4	ROTEAMENTO BIOINSPIRADO EM COLÔNIA DE ABELHAS	47
2.4.1	BeeAdHoc	47
2.4.2	BeeIP	48
2.4.3	Bee-MANET	48
3	COLÔNIA DE FUNGOS E APLICAÇÕES	50
3.1	MORFOLOGIA	51

3.2	CRESCIMENTO DOS FUNGOS MICELIAIS	52
3.3	REDES DE FUNGOS	55
3.3.1	Mecanismo de transporte de nutrientes	57
3.3.2	Modelo de evolução espaço-temporal para fungos	60
3.4	ALGORITMOS BIOINSPIRADOS EM REDES DE FUNGOS	62
3.4.1	Algoritmos de Busca Espacial	63
3.4.2	Rede FUNNet	64
3.4.2.1	Analogias entre redes de comunicação e FUNNet	65
3.4.2.2	Roteamento no FUNNet	67
3.4.2.3	Desempenho do FUNNet	68
4	PROPOSTA DO PROTOCOLO PARA MANETS BASEADO EM FUNGOS	70
4.1	PROTOCOLO HYPHANET	70
4.2	FORMATOS DE DADOS DO HYPHANET	71
4.3	MECANISMO DE DESCOBERTA DE ROTAS	71
4.3.1	Mensagens de Solicitação de Rota	72
4.3.1.1	Controle das Mensagens de Solicitação de Rota	74
4.3.1.2	Construção de Rotas entre Origem e Destino	75
4.3.2	Mensagens de Confirmação de Rota	76
4.4	MECANISMO DE SELEÇÃO DE ROTAS	77
4.4.1	A conversão de biomassa móvel em imóvel	81
4.5	MENSAGENS <i>HELLO</i>	82
4.6	MECANISMOS DE RECUPERAÇÃO DE FALHAS	83
4.6.1	Mecanismo de Reparo de Rota	83
4.6.2	Mensagem de Erro de Rota	84
4.6.3	Manutenção da Conectividade Local	84
4.7	MENSAGENS <i>HYPHA ACKNOWLEDGMENT</i>	84
4.8	COMPARAÇÃO ENTRE HYPHANET E O MODELO ACO	87
5	SIMULAÇÃO E ANÁLISE	90
5.1	SIMULAÇÃO DO HYPHANET	90
5.1.1	Modelo de mobilidade	90
5.1.2	Modelo de tráfego	91
5.1.3	Parâmetros de configuração	91
5.2	MÉTRICAS DE DESEMPENHO	92
5.3	TESTE DE CONVERGÊNCIA EM UM TOPOLOGIA FIXA	94
5.4	AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS EM TOPOLOGIA MÓVEL	97
5.4.1	Teste de desempenho com os parâmetros α, β	97
5.4.2	Teste de desempenho com os parâmetros μ, Ω	98
5.5	AVALIAÇÃO DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO	99
5.5.1	Cenário 1	99
5.5.2	Cenário 2	100
5.5.3	Cenário 3	102
5.5.4	Cenário 4	103
5.5.5	Cenário 5	105
6	CONCLUSÃO	107
6.1	TRABALHOS FUTUROS	109

REFERÊNCIAS	111
GLOSSÁRIO	118
APÊNDICES	118
APÊNDICE A – FORMATO DAS MENSAGENS DO HYPHANET . .	119
APÊNDICE B – ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA	125

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia em redes sem fio está evoluindo rapidamente, tendo em vista a quantidade de tecnologias disponíveis embarcadas em dispositivos de vários tipos, instalados em *smartphones*, câmeras, veículos, entre outros, com amplos recursos de comunicação de dados sem fio. Para este cenário, observa-se um crescimento de aplicações e usuários e, no futuro, o tamanho da rede aumentará drasticamente à medida que a tecnologia melhora e, portanto, a escalabilidade será uma questão importante para as redes sem fio atenderem às exigências das redes heterogêneas modernas.

No contexto das redes sem fio, uma rede *ad hoc* móvel (MANET) é um conjunto descentralizado de nós móveis que trocam informações temporariamente por meio da transmissão sem fio ponto a ponto. A topologia da rede não é estruturada, os nós atuam como terminais e roteadores e podem entrar ou sair livremente da rede. Desta forma, um nó pode se comunicar com qualquer nó dentro da rede, diretamente com aqueles que estão dentro de seu alcance de transmissão ou através de roteamento multisaltos. Nas MANETs, os nós possuem a característica da mobilidade, portanto, são necessários mecanismos de auto-organização capazes de lidar com a natureza dinâmica da topologia, recuperação de falhas e segurança, além da heterogeneidade, restrições de recursos e escalabilidade (MUELLER *et al.*, 2004; DUCATELLE, 2007).

Na busca de soluções para esses desafios, pesquisas visam encontrar inspiração ao analisar sistemas biológicos com estrutura e comportamento semelhantes às exigências das redes modernas. Neste contexto, muitas espécies de fungos formam complexas redes de filamentos condutores de material nutriente quando necessitam sobreviver em ambientes heterogêneos. Crescem e se expandem através de regiões hostis para descobrir novos recursos. Assim como diversas tecnologias foram inspiradas no comportamento de insetos sociais, os fungos também demonstram possuir um comportamento triunfante na luta pela sobrevivência e sugerem possuir uma complexa capacidade para auto-organização de redes adaptativas robustas, resilientes, com aptidão de controle e mecanismos de transporte desejáveis nos protocolos de roteamento para redes *ad hoc* móveis.

Estas características sugerem que um sistema que faz uso dos princípios que regem a formação da rede fúngica para o desenvolvimento de protocolos de roteamento pode apresentar um bom desempenho comparado aos sistemas convencionais.

1.1 MOTIVAÇÃO

Atualmente o uso da inteligência artificial (IA) auxilia no projeto de algoritmos bioinspirados pelo comportamento coletivo de insetos sociais e outras sociedades de animais. Dentro do ramo da IA, tem-se os sistemas baseados em inteligência de enxames, do inglês *swarm intelligence* (SI), onde, por exemplo, encontra-se o clássico modelo conhecido como otimização por colônia de formigas, do inglês *Ant Colony Optimization* (ACO) (DORIGO; STÜTZLE, 2004), que se inspira no comportamento de como as formigas encontram alimento. Neste contexto, tem-se ainda outros modelos baseados na natureza, tais como: *Artificial Bee Colony* (ABC) (KARABOGA; BASTURK, 2007) que simula o comportamento inteligente de um enxame de abelhas na busca de néctar, assim como algoritmos metaheurísticos de otimização inspirados no comportamento de vaga-lumes (*firefly algorithm*–FA), morcegos (*bat algorithm*–BA), no pássaro cuco (*cuckoo search*–CS), entre outros (YANG, 2010a; YANG, 2010b). Esses sistemas naturais atingiram esse comportamento depois de evoluir por milhões de anos, por isso, atraem o interesse de pesquisadores para o desenvolvimento de algoritmos inspirados na natureza para lidar eficientemente com diferentes problemas.

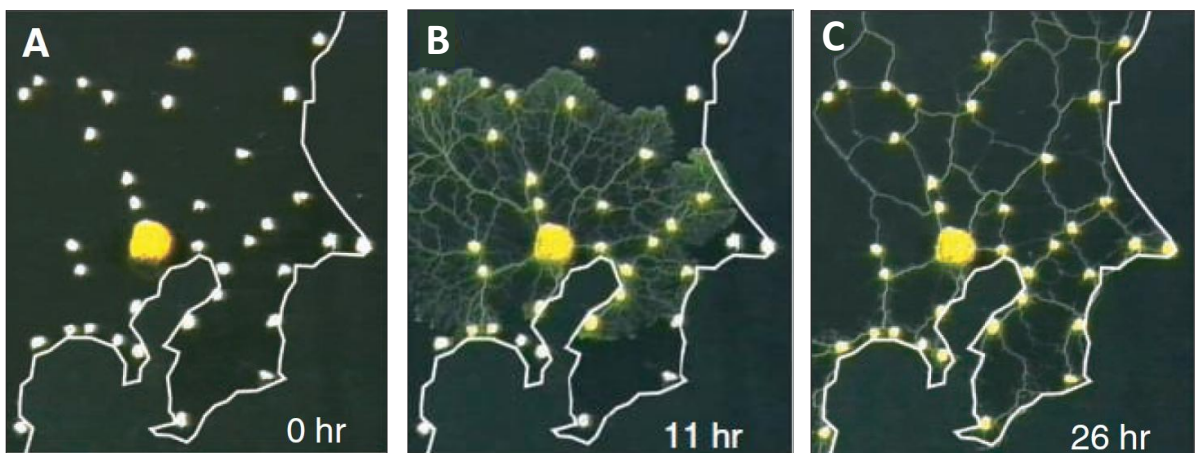
Recentemente, uma outra fronteira da natureza, os fungos, têm sido fonte de inspiração para o desenvolvimento de algoritmos, principalmente pelo modo como realizam a busca de alimentos e a otimização das redes de transportes de nutrientes (BRABAZON; MCGARRAGHY, 2018). Os fungos são organismos eucariontes, uni ou pluricelulares, heterotróficos e em geral, são saprófitos. Junto com as bactérias, são os principais decompositores do planeta (ESPÓSITO, 2010).

As potencialidades dos fungos na solução de problemas de roteamento em redes podem ser claramente observadas a partir do seguinte experimento: Tero *et al.* (2010) executaram um experimento de cultivo do fungo limoso da espécie *Physarum polycephalum* para simular a interligação das estações ferroviárias de Tóquio e da sua região metropolitana. Para representar o cenário de crescimento do *P. polycephalum*, um recipiente liso e molhado foi utilizado como superfície e flocos de aveia foram depositados representando as cidades principais em posições correspondentes ao mapa da região. O bolor inicial foi colocado numa posição central, que representaria a posição de Tóquio. Para completar o cenário, os obstáculos que poderiam produzir mudanças de direção e velocidade de crescimento (por exemplo, montanhas, rios, lagos, entre outros) eram representados por focos de luz, visto que o *P. polycephalum* evita a luz

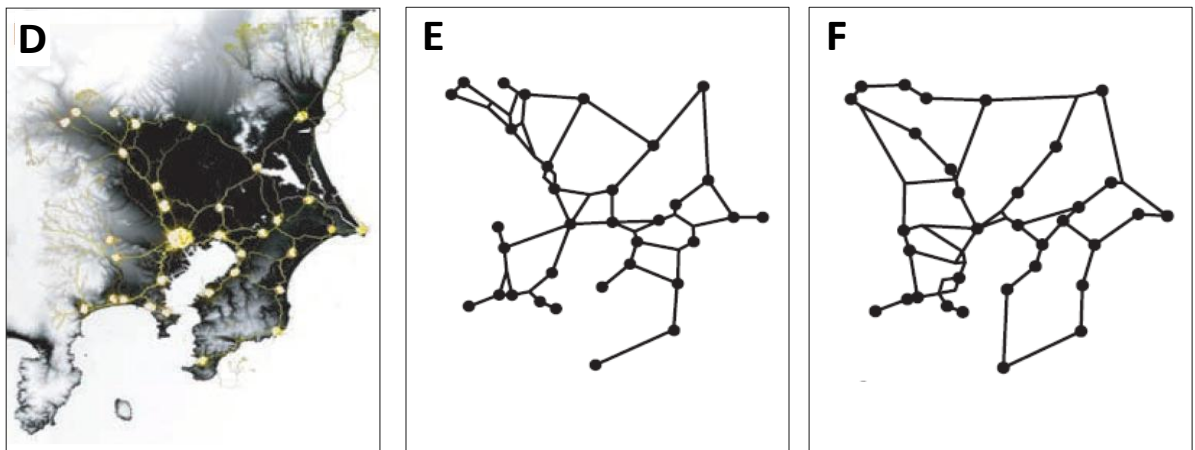
brilhante. Inicialmente, o bolor preencheu densamente o espaço com ramificações, em seguida as partes desnecessárias foram absorvidas, restando apenas uma rede cujos ramos se interligavam para conectar as fontes de alimento. A rede resultante assemelhava-se, impressionantemente, ao sistema ferroviário de Tóquio.

A Fig. 1 representa o experimento *P. polycephalum* para simular a interligação das estações ferroviárias de Tóquio.

Figura 1 – Interligação do sistema ferroviário de Tóquio.



- (a) Início do experimento, o bolor inicial no floco aveia que representa a cidade de Tóquio. (b) Após 11 horas. Expansão do *P. polycephalum* sobre a superfície. (c) Após 26 horas. A rede se simplifica restando apenas os ramos interligando os flocos de aveia.



- (d) Após 26 horas. Sobreposição da rede *P. polycephalum* no mapa da região de Tóquio. (e) Apenas a topologia da rede *P. polycephalum* após 26 horas. (f) A topologia atual da rede do sistema ferroviário da reação de Tóquio.

Fonte: (TERO *et al.*, 2010). Reimpresso com permissão da AAAS (*American Association For The Advancement Of Science*).

A Fig. 1a mostra o início do experimento com a colocação do bolor no floco representando a cidade de Tóquio. Na Fig. 1b, após 11 horas, observa-se que a estratégia do fungo limoso foi formar uma densa rede de hifas (filamentos condutores de nutrientes) cobrindo o máximo de espaço possível. Ao longo do tempo, os ramos se fortificam na medida em que encontram as fontes de alimento e, no contrário, desaparecem. Na Fig. 1c, após 26 horas, resta apenas a estrutura da rede útil para interconectar as fontes de alimento, o restante das ramificações subjacentes diluíram-se. Observa-se que as topologias mostradas nas Figs. 1e e 1f são muito semelhantes e a conclusão do trabalho é que os fungos do tipo *P. polycephalum* são capazes de construir redes otimizadas de forma natural.

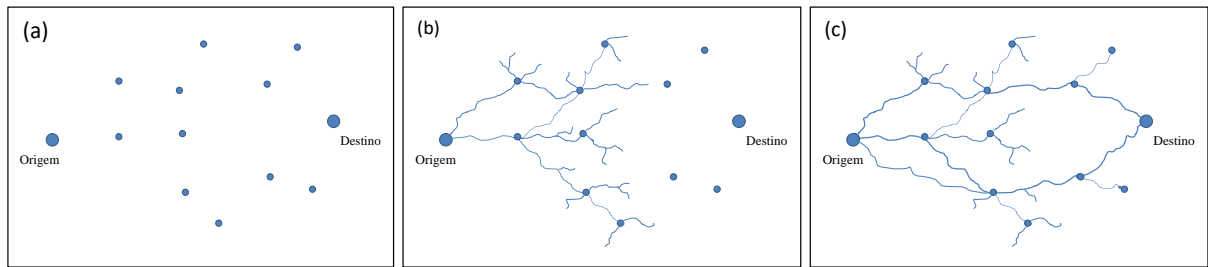
Neste contexto, buscar inspiração nesta outra fronteira da natureza é a motivação deste trabalho que apresenta uma proposta para o desenvolvimento de um protocolo de roteamento para redes MANETs baseado no comportamento de colônias de fungos, denominado de HyphaNet (*Hyphae ad hoc mobile Networks*). O presente trabalho de pesquisa teve forte influência em Hao et al. (2009), que apresenta uma proposta inovadora de modelagem do comportamento de fungos dentro de um contexto de redes de comunicação cabeadas. Mas, até a data da elaboração desta pesquisa não foi encontrado nenhum trabalho baseado em fungos no contexto de redes MANETs.

A dinâmica de crescimento de uma colônia de fungos e o comportamento de um protocolo de redes MANETs pode ser visualizada na Fig. 2. Observa-se que o modo como um fungo se expande pelo solo lembra como um protocolo executa a descoberta de rotas pela rede, ambos tem o objetivo de buscar e construir um caminho curto entre origem e destino, um para transmitir nutrientes e outro para transmissão de dados.

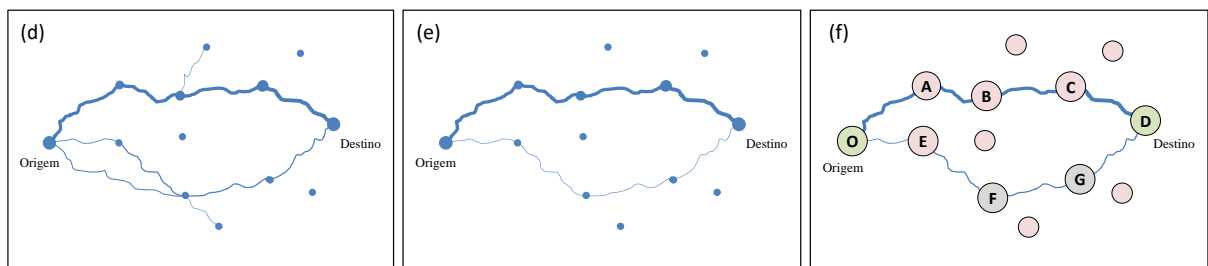
1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral, que resume a idéia central da tese, e os objetivos específicos para fornecer uma maior delimitação ao tema e detalhar os processos necessários para a realização do trabalho.

Figura 2 – Comparativo entre as dinâmicas do crescimento do fungo com MANETs.



(a) Ambiente antes do início do crescimento de fungos, onde os pontos representam nutrientes no solo.
(b) O fungo inicia a expansão em busca dos nutrientes.
(c) O fungo encontra destino com reserva de nutrientes.



(d) O fungo reforça as hifas de conexão ao destino.
(e) Uma ou mais hifas permanecem, mas uma delas é mais reforçada e os caminhos não utilizados são reciclados.
(f) A topologia final com as hifas reforçadas é definida e pode ser associada a uma MANET com o caminho O-A-B-C-D principal.

Fonte: Autoria própria.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é propor um protocolo de roteamento para redes MANETs baseado no comportamento das colônias de fungos, testá-lo em diversos cenários e situações, bem como, comparar seu desempenho com protocolos concorrentes.

O protocolo visa operação com funcionalidades e desempenho suficientes para a rede fornecer serviços de qualidade para cenários de baixo tráfego. Devido às frequentes mudanças de topologia em função da mobilidade dos nós, o protocolo propõe eficientes mecanismos de: descoberta, manutenção e recuperação de falhas. Além disso, o protocolo deve possuir uma eficiente heurística para seleção da melhor rota, e um algoritmo de otimização de caminhos.

Nesta nova abordagem, procurou-se descobrir quais informações dentro do universo dos fungos poderiam ser úteis para compor um novo protocolo para redes. O mecanismo de busca de nutrientes, a construção de hifas e o fluxo de massa na colônia fúngica, inspiram a concepção de um modelo funcional de operação do protocolo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos foram definidos para alcançar o objetivo geral:

- a) Elaborar uma revisão bibliográfica sobre os principais protocolos de roteamento existentes para redes *ad hoc* móveis;
- b) Pesquisar modelos bioinspirados existentes utilizados na solução de roteamento de redes de comunicação;
- c) Adaptar um modelo matemático de roteamento a partir de modelos presentes na literatura, referentes ao crescimento de redes fúngicas e algoritmos de roteamento baseados em fungos;
- d) Desenvolver um protocolo para MANETs (HyphaNet), considerando os processos de busca, manutenção e reparo de falhas de enlaces, bem como os processos de seleção e otimização de rotas, inspirando-se nas técnicas pesquisadas;
- e) Implementar o protocolo HyphaNet em linguagem C++ para o simulador NS-2.35;
- f) Simular o protocolo HyphaNet para diversos cenários utilizando o simulador ns-2.35 e comparar seu desempenho com protocolos AODV e SARA, conhecidos da literatura de redes MANETs. As métricas de desempenho consideradas são: atraso dos pacotes (*delay*), taxa de entrega dos pacotes (*delivery*), taxa de transferência de dados (*throughput*) e sobrecarga de roteamento (*overhead*);
- g) Calibrar os parâmetros de funcionamento do HyphaNet para seus valores ótimos, de modo a obter o melhor desempenho do sistema.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho busca a produção de conhecimento científico na área de redes *ad hoc* móveis através da pesquisa, desenvolvimento e implementação de um protocolo para MANETs cuja fundamentação teórica envolve temas multidisciplinares, pertencentes à duas áreas distintas: redes de comunicação móveis e biologia dos fungos (micologia).

Os procedimentos metodológicos para a realização deste trabalho estão apresentados nas seções seguintes: classificação da pesquisa, técnica de levantamento de dados, e análise e interpretação dos resultados.

1.3.1 Classificação da pesquisa

Para alcançar os objetivos deste trabalho foram utilizadas três tipos de pesquisa que podem ser classificadas como: exploratória, descritiva e aplicada.

A pesquisa exploratória foi empregada na busca da fundamentação teórica relacionada com fungos. Esta etapa exaustiva da pesquisa tinha os objetivos de aproximar e relacionar os conceitos de redes de comunicação com o tema emergente sobre fungos. Diversas bibliografias, livros e trabalhos publicados em artigos científicos, serviram de base para o entendimento dos conceitos chaves sobre o assunto. Particularmente, dois artigos tiveram maior relevância para auxiliar a execução desta tese: *Biomass recycling and the origin of phenotype in fungal mycelia* (FALCONER *et al.*, 2005) e *FUNNet – A Novel Biologically-Inspired Routing Algorithm Based on Fungi* (HAO *et al.*, 2009).

A pesquisa descritiva foi útil para investigar o máximo de referências bibliográficas sobre o objeto de estudo referente às redes *ad hoc* móveis, buscando informação disponível do estado da arte deste tema de forma sistematizada. Da mesma forma, diversas publicações em livros e artigos científicos permitiram compor uma revisão bibliográfica sintética e relevante para fornecer suporte à esta tese.

A pesquisa aplicada relaciona-se a este trabalho porque tem como motivação a necessidade de produzir conhecimento para aplicação de seus resultados, propondo soluções para problemas encontrados na realidade. No caso deste trabalho, a proposta é desenvolver um protocolo bioinspirado em fungos para resolver problemas de desempenho em redes dinâmicas. Como produto final, esta pesquisa resultou em um protocolo denominado de HyphaNet, cuja estrutura e modelo funcional estão formalizados, bem como um código funcional escrito em linguagem C++ capaz de rodar no simulador de redes NS-2.35. A pesquisa aplicada utiliza a fundamentação teórica como referência para a análise de dados obtidos, neste caso, por experimentos de simulação.

1.3.2 Técnica de levantamento de dados

Esta pesquisa utilizou a técnica de simulação para levantamento dados, neste caso, os dados são os resultados obtidos por experimentos de simulação por software realizados com o simulador de redes NS-2.35. Foram construídos diversos cenários para testar e comparar o desempenho do HyphaNet com dois protocolos conhecidos no meio acadêmico. Os dois

protocolos escolhidos são: AODV, um protocolo clássico, e o SARA baseado em colônia de formigas, a escolha deste último foi intencional por ser um protocolo bioinspirado e propiciar uma comparação mais justa entre eles. Os cenários levaram em conta modelos de tráfego e de mobilidade praticados na literatura da área de redes e os parâmetros de desempenho considerados são: atraso médio de pacotes, taxas de transferência e de entrega de pacotes e *overhead*. Os dados obtidos dos três protocolos foram registrados em gráficos para permitir a comparação dos resultados.

1.3.3 Análise e interpretação dos resultados

Os resultados obtidos a partir dos experimentos de simulação foram organizados por tipos de cenários e configuração dos parâmetros de operação. A principal estratégia para apresentação dos resultados foi a confecção de gráficos para visualizar o comportamento e as diferenças entre os protocolos.

A análise permite observar os resultados com exatidão e senso crítico, e determinar se o trabalho está em cumprimento dos objetivos propostos, enquanto que a interpretação busca explicações para ampliar o entendimento dos resultados baseado nos conceitos teóricos apreendidos e experiências vivenciadas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Além deste capítulo, este trabalho está organizado da seguinte forma:

- a) Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica sobre redes *ad hoc* móveis. Descreve alguns dos principais protocolos de roteamento e descreve com detalhes dois importantes protocolos de roteamento bioinspirados em ACO, o AntHocNet e o SARA;
- b) Capítulo 3: apresenta uma revisão bibliográfica sobre colônia de fungos e duas aplicações: o protocolo FUNNet, bioinspirado em fungos, e os métodos de busca inspirados em fungos;
- c) Capítulo 4: apresenta o desenvolvimento da tese. Explica o funcionamento do protocolo HyphaNet. Descreve a estrutura, os tipos de mensagens e os procedimentos de operação do protocolo;

- d) Capítulo 5: apresenta os resultados das simulações do HyphaNet e uma análise dos resultados para diversos cenários de mobilidade e tráfego. Os resultados são mostrados com auxílio de gráficos e compara os resultados entre os protocolos AODV, SARA e HyphaNet, para métricas: atraso de transmissão, taxa de entrega, taxa de transferências de dados e sobrecarga de roteamento;
- e) Capítulo 6: apresenta a conclusão, comentários das simulações e sugestões de trabalhos futuros.

2 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO PARA REDES MÓVEIS

Esta seção apresenta uma introdução sobre redes *ad hoc* móveis, os tipos de protocolos de roteamento e exemplos dos principais protocolos utilizados.

2.1 REDES AD HOC MÓVEIS

Redes *ad hoc* móveis, também conhecidas pela sigla MANETs (do inglês *Mobile Ad Hoc Networks*), são baseadas em plataformas móveis (por exemplo, um roteador com várias *hosts* e dispositivos de comunicação sem fio), referidos simplesmente como *nós*. Nas MANETs os dispositivos móveis são equipados com transmissores e receptores sem fio usando antenas que podem ser omnidirecionais, i.e., transmitem em todas as direções, ou altamente direcionais (ponto-a-ponto) com mecanismo possivelmente orientável, ou alguma combinação desses tipos (CORSON; MACKER, 1999). Ao contrário das tradicionais redes sem fio, nas MANETs a comunicação ocorre de forma descentralizada, a rede é tipicamente *multihop*, i.e., roteamento com múltiplos saltos, e os nós funcionam tanto como terminais ou roteadores de retransmissão sem qualquer infraestrutura fixa. Por ser uma rede móvel, sua topologia é dinâmica e deve possuir capacidade de auto-organização para construir e restaurar, amiúde, os processos de comunicação.

Inicialmente as MANETs foram desenvolvidas, principalmente, para aplicações militares, para criar redes de comunicação no campo de batalha. Em meados de 1997, o IEEE 802.11 (IEEE-802.11, 2016) foi o primeiro padrão de redes sem fio definido, a partir daí, surgiram as primeiras tecnologias de rádios comerciais, despertando o grande potencial de redes *ad hoc* fora do domínio militar. Nos últimos anos, o IEEE 802.11 consagrou-se como a tecnologia sem fio popularmente conhecida por WI-FI (*Wireless Fidelity*). Muito embora tenha havido o desenvolvimento de outras tecnologias de comunicação sem fio tais como: Bluetooth (padrão IEEE 802.15.1), ZigBee (padrão IEEE 802.15.4), WiMAX (padrão IEEE 802.16), RFID (*Radio-Frequency IDentification*), padrão ISO 18000, entre outras, cada qual dentro de uma categoria específica, o WI-FI ainda é a mais prestigiada devido à maturidade, abrangência de aplicações, altas taxas de transmissão, confiabilidade e custo de implantação. Entretanto, novas tecnologias emergem em exigência aos novos cenários de comunicação. Por exemplo, o LoRa para comunicações *Long Range* usando níveis de energia muito baixos para suporte às comunicações máquina a máquina (M2M) (LORAWAN, 2015) e a tecnologia celular de

quinta geração (5G) que amplia a presença de redes móveis heterogêneas e suporte às crescentes aplicações baseadas em dispositivos móveis, ambas contribuem com o advento da Internet das Coisas (IoT) (AQUINO, 2015).

Atualmente, as principais tendências mostram que as redes sem fios fixas e móveis ocupam cada vez mais espaço no mercado doméstico e corporativo pelas vantagens na flexibilidade de aplicações, WI-FI rápida e baixos custos de instalação e manutenção.

2.2 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO *AD HOC*

Em redes *ad hoc*, um pacote enviado pelo nó de origem deve ser retransmitido por nós intermediários até alcançar o destino pretendido, isso é conhecido como comunicação *multihop*. A falta de infraestrutura central, a topologia em mutação, os recursos limitados e a natureza descentralizada das redes *ad hoc* tornam os serviços de roteamento e gerenciamento da rede uma tarefa desafiadora (AYARI *et al.*, 2008).

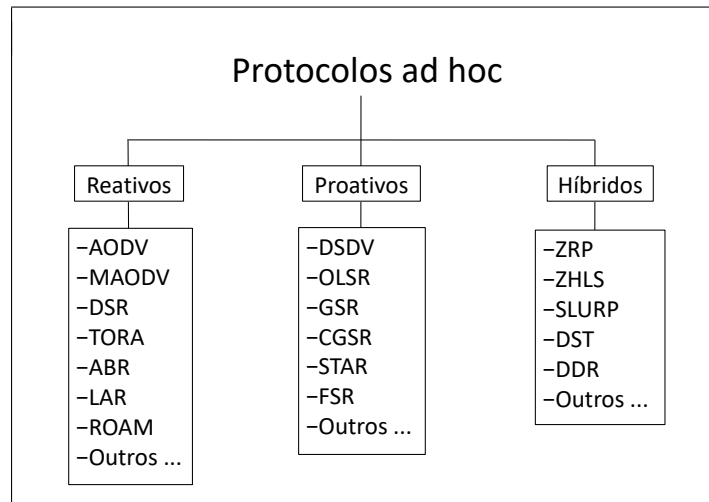
Basicamente as MANETs têm três mecanismos para auxiliar no desempenho dos protocolos de roteamento em encontrar e manter rotas confiáveis:

1. **Descoberta de rota** (*Route Discovery*): processo para descobrir novas rotas entre origem e destino;
2. **Manutenção de rota** (*Route Maintenance*): processo para conservar as rotas funcionais no modo ativo, reconfigurando os tempos de expiração quando são utilizadas ou otimizando as mesmas quando se tem múltiplas rotas para o mesmo destino;
3. **Recuperação de falhas de rota** (*Route Failure Recovery*): processo que pode variar de acordo com o protocolo, pode ser apenas uma notificação de falha para solicitar a retirada de uma rota das tabelas de rotas ou a recuperação total de uma rota. As falhas podem ocorrer devido ao movimento ou desaparecimento de um nó, ou devido às mudanças que influenciam a conectividade da comunicação sem fio, como um aumento de interferência de rádio ou uma diminuição na potência de transmissão usada (DUCATELLE, 2007).

Existem, basicamente, três categorias diferentes para protocolos de roteamento em redes *ad hoc*: Reativo, Proativo e Híbrido. Diversos trabalhos na literatura mostram os tipos e características de desempenho deste protocolos (NASKI, 2004; ALSLAIM *et al.*, 2014).

O Quadro 1 apresenta exemplos de protocolos conhecidos de acordo com sua categoria.

Quadro 1 – Exemplos de protocolos de redes ad hoc conforme a categoria.



Fonte: Autoria própria.

2.2.1 Roteamento Reativo

A estratégia dos protocolos de roteamento reativos, também conhecidos por roteamento sob demanda (do inglês, *on-demand*), é estabelecer uma rota apenas quando é necessária, enviando mensagens de solicitação de rota quando uma nova rota deve ser criada. Desta forma, a sobrecarga de controle (*overhead*) é menor, fazendo-os, em geral, mais escaláveis (BROCH *et al.*, 1998). No entanto, esses protocolos podem apresentar valores de latência maiores na determinação de rotas (ANNAMALAI, 2005). Nesta seção é apresentada uma descrição detalhada do protocolo AODV que será utilizado posteriormente para comparação de desempenho com o HyphaNet. Uma breve descrição também é fornecida de outros protocolos reativos que frequentemente aparecem na literatura.

2.2.1.1 *Ad hoc On-demand Distance Vector Routing (AODV)*

Em Perkins *et al.* (2003) o AODV é descrito como um protocolo de roteamento dinâmico destinado a ser usado por nós móveis em uma rede *ad hoc*. É um dos mais clássicos protocolos para MANETs e oferece características como: adaptação rápida às condições de enlace dinâmico, processamento e sobrecarga de memória baixos, baixa utilização de rede e determina rotas *unicast* para destinos dentro da rede. Usa números de sequência de destino para garantir uma rede livre de *loops*, comumente associados aos protocolos clássicos de vetor de distância, evitando o problema

"contando até infinito" do algoritmo de *Bellman-Ford* e oferece uma convergência rápida quando a topologia de rede muda (normalmente, quando um nó se move na rede).

O AODV utiliza mensagens Hello, periodicamente, para manter informações de conectividade com os nós adjacentes atualizadas nas tabelas de rotas. Para descoberta e manutenção de rotas, o AODV conta com dois mecanismos de operação (PERKINS *et al.*, 2003):

1. Descoberta de Rotas – No AODV, quando uma nova rota é necessária, o nó de origem transmite um *Route Request* (RREQ) por difusão, via UDP na porta 654, com endereço de destino e com um número de sequência de destino. Cada nó que recebe a solicitação armazena em cache o caminho sendo percorrido para depois ser utilizado como rota de volta ao originador da solicitação. Uma rota pode ser determinada quando o RREQ alcança fisicamente o destino ou algum nó intermediário que contenha uma rota válida para o este destino — uma rota está marcada como "válida" na tabela de rotas quando o tempo de vida da rota ainda não expirou. Uma vez encontrada a rota, por chegar ao destino, uma mensagem *Route Reply* (RREP) de retorno é enviada com endereço *unicast* para a origem do RREQ ao longo do caminho previamente armazenado, ou igualmente de qualquer nó intermediário capaz de atender à solicitação;
2. Manutenção e Reparo de Rotas – O AODV não exige que os nós mantenham rotas que não estejam em comunicação ativa e permite que os nós móveis reajam às quebras de enlaces e alterações na topologia de rede de maneira oportuna. Quando ocorre uma quebra de enlace em uma rota ativa, o nó a montante da quebra pode optar por reparar o enlace localmente se o destino não estiver mais longe do que o limite de saltos, denotado por *MAX_REPAIR_TTL*. Dessa forma, para reparar o enlace rompido, o nó incrementa o número de sequência para o destino e depois transmite um RREQ para esse destino. Caso o reparo não seja possível, o AODV envia a mensagem *Route Error* (RERR), a partir dos dois nós afetados, para notificar o conjunto de nós com conectividade local e, assim, invalidar as rotas referentes ao enlace perdido. No AODV, um nó inicia o processamento de uma mensagem RERR em três situações:
 - a) se detectar uma quebra de enlace para o próximo salto de uma rota ativa na sua tabela de roteamento durante a transmissão de dados, mas o reparo de rota não obteve êxito;

- b) se receber um pacote de dados destinado a um nó para o qual ele não possui uma rota ativa e não há reparo de rota em andamento;
- c) se recebe um RERR de um vizinho para uma ou mais rotas ativas.

2.2.1.2 Outros protocolos reativos

Nesta seção estão representados, com menos detalhes, outros tipos de protocolos reativos, devido sua relevância na área de redes *ad hoc* móveis.

2.2.1.2.1 *Dynamic Source Routing (DSR)*

O protocolo DSR (JOHNSON *et al.*, 2007) utiliza a técnica de roteamento na fonte, na qual cada nó da rede possui em sua tabela de roteamento todas as rotas "salto a salto", da origem até o nó de destino. É um protocolo do tipo reativo. Nesta técnica, o nó transmissor envia o pacote de dados e mais a sequência de nós que formam o caminho pelo qual o pacote deverá percorrer. Essa informação do caminho chega a cada nó intermediário que, por sua vez, a utiliza para determinar o próximo salto. No protocolo DSR, um *cache* de roteamento armazena as rotas conhecidas em cada nó. A principal característica deste protocolo é possuir o melhor desempenho em redes de porte reduzido (de até 200 nós ou de 5 a 10 saltos por rota) e de baixa velocidade de mobilidade. O DSR conta com dois mecanismos de operação: Descoberta de Rotas e Manutenção de Rotas.

2.2.1.2.2 *Temporary Ordered Routing Algorithm (TORA)*

O protocolo TORA, ou Algoritmo de Roteamento Ordenado Temporalmente (PARK; CORSON, 1997), é um protocolo de roteamento distribuído altamente adaptativo, *on-demand*, *multipath*, sem *loops* entre os nós de origem e de destino e projetado para operar em um ambiente de rede móvel altamente dinâmico. A principal característica do TORA é a capacidade de limitar os pacotes de controle a uma região pequena durante o processo de reconfiguração iniciado por uma quebra de caminho, de forma a manter as mensagens de controle dentro de um conjunto muito pequeno de nós próximo à ocorrência de uma alteração topológica. Para isso, os nós mantêm as informações de roteamento dos nós adjacentes e também têm a capacidade de detectar partições, que são partes isoladas do restante da rede causadas por múltiplas falhas de enlaces. O

protocolo é altamente adaptável, eficiente e escalável; sendo mais adequado para uso em redes *ad hoc* móveis grandes e densas.

O tempo é um fator importante para a TORA e faz o uso inovador de um "relógio físico ou lógico" para estabelecer a "ordem temporal" dos eventos de mudança topológica e assume que todos os nós têm relógios sincronizados (realizados por meio de uma fonte de tempo externa, como o *Global Positioning System*) (MURTHY; MANOJ, 2004).

O TORA executa três funções básicas: Descoberta de rotas, Manutenção de rotas e Remoção de rotas.

2.2.1.2.3 *Associative-Based Routing (ABR)*

O ABR, ou protocolo de Roteamento Baseado em Associatividade, é um protocolo de roteamento distribuído, *on-demand*, cuja característica marcante é a seleção de rotas com base na estabilidade dos enlaces de rádio. É um protocolo que utiliza informações de gerenciamento do *beacon*, um quadro proveniente das camadas baixas de protocolos, PHY e MAC (TOH, 1997).

Os quadros de *beacon* são enviados por difusão, periodicamente, pelo protocolo de enlace CSMA/CA da camada MAC, de modo que qualquer nó vizinho dentro do alcance do rádio pode receber e decodificar a informação. Cada nó vizinho mantém a contagem dos *beacons* de seus vizinhos e a armazena na variável A_j , que representa o grau de associatividade com o nó j , e classifica cada enlace como estável ou instável com base nesse valor. Valores altos de A_j implicam baixa mobilidade relativa entre os nós e estabilidade temporal no recebimento dos *beacons*.

O ABR executa o procedimento de descoberta de rotas de forma reativa. Quando um nó de origem deseja enviar dados, ele inunda a rede com o pacote *Broadcast Query* (BQ). Todos os nós intermediários que processam a BQ adicionam uma rota reversa em direção ao nó de origem e, antes de reenviar essa solicitação adiante, registram seu endereço e seu respectivo *beacon* na lista de nós visitados dentro desta BQ.

O procedimento de recuperação de falhas no ABR é iniciado quando ocorrer uma quebra de enlace em um nó intermediário. O nó que detecta a quebra, inicia um processo de reparo de rota local.

2.2.2 Roteamento Proativo

Nesta abordagem os protocolos de roteamento proativos (também conhecidos como *table-driven*) trocam informações de topologia periodicamente, produzindo rotas de forma constante e mantendo as tabelas de roteamento disponíveis de forma imediata, mesmo não havendo demanda de tráfego. A desvantagem dessa abordagem é o custo de manter as tabelas de roteamento, especialmente se a topologia for altamente variável. Dois exemplos de protocolos proativos estão apresentados a seguir:

2.2.2.1 *Optimized Link State Routing (OLSR)*

O OLSR (CLAUSEN; JACQUET, 2003) é um dos principais protocolos para redes *ad hoc*, sendo proativo, i.e., periodicamente troca informações sobre a rede com os nós, de modo a atualizar constantemente suas tabelas de roteamento. Está no processo de padronização pelo IEEE 802.11s para redes de malha sem fio (do inglês, *wireless mesh*).

Esse é um protocolo baseado em estados de enlace. Sua função principal é limitar a quantidade de nós da rede que encaminha mensagens de controle do tipo estados do enlace, a fim de que se possa eliminar mensagens redundantes. Para isso, é utilizada uma técnica chamada MPR (*MultiPoint Relay*). Para explicar melhor o funcionamento dessa técnica, quando um nó recebe um pacote de controle, ele normalmente retransmite esses dados aos nós vizinhos. Desse modo, ocorre uma "inundação" de pacotes pela rede e os nós receberão o mesmo pacote diversas vezes de diferentes vizinhos, gerando excesso de informações redundantes (*overhead*), ou seja, a rede funcionará sobrecarregada de informações desnecessárias.

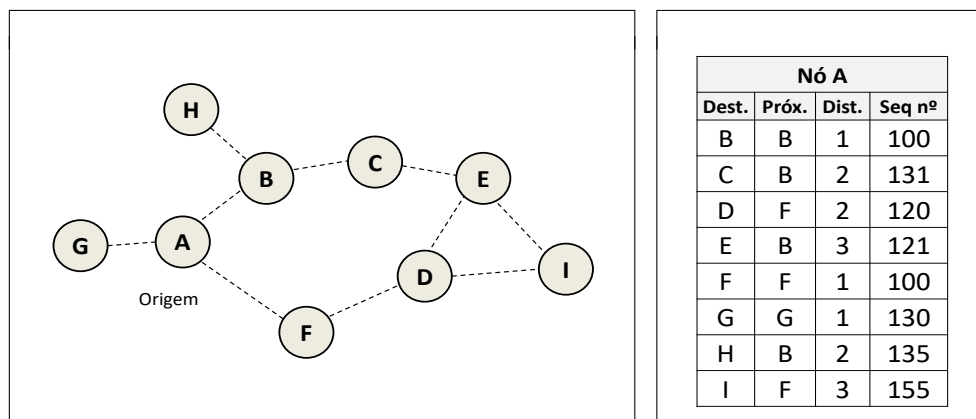
Com a técnica MPR, o OLSR funcionará menos sobrecarregado, pois o número de nós que retransmitirão os pacotes de controle é limitado. Isso funciona da seguinte maneira: dentre os nós da rede, haverá aqueles denominados MPR. A escolha de cada MPR é feita por um consenso entre os nós vizinhos localizados a um salto. Então, quando uma informação deve ser atualizada na rede, os pacotes enviados por um nó chegarão a todos os seus vizinhos, mas somente aqueles denominados MPR poderão retransmitir a informação adiante. Esse processo se repete com os próximos nós a receberem os pacotes. Dessa maneira, cada nó receberá as informações de estados de enlace apenas uma vez, pois possui apenas um vizinho MPR.

2.2.2.2 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)

O DSDV é um protocolo de roteamento de destino sequenciado com vetor de distância (PERKINS; BHAGWAT, 1994). Este é um dos primeiros protocolos propostos para redes sem fio *ad hoc* e é baseado no algoritmo distribuído de *Bellman-Ford* onde cada nó mantém uma tabela que contém a distância mais curta e o primeiro nó no caminho mais curto para todos os outros nós na rede. Para manter uma visão atualizada da topologia da rede, as tabelas são trocadas entre vizinhos em intervalos regulares ou quando um nó observar uma mudança significativa na topologia local. Desta forma, as rotas para todos os destinos estão prontamente disponíveis em todos os nós o tempo todo, de forma proativa. Desta forma, no DSDV não há a necessidade da fase de descoberta de rotas quando um nó de origem deseja fazer a transmissão de dados, portanto, resultando na redução dos atrasos dos pacotes.

Na Fig. 3 é mostrado um exemplo de topologia e uma tabela de roteamento do protocolo DSDV. Observa-se que a tabela pertence ao nó A e contém rotas para todos os nós da rede. A tabela possui informações de destino com a melhor rota em saltos e fornece o endereço do próximo nó para enviar a mensagem. O número de sequência serve para o nó atualizar a entrada somente se o novo número for maior que o atual.

Figura 3 – Topologia de rede com protocolo DSDV e exemplo da tabela de roteamento do nó A.



(a) Exemplo de topologia onde o nó A possui rotas para todos os nós da rede. **(b) Tabela de roteamento do nó A.**

Fonte: Autoria própria.

As tabelas de roteamento são dinâmicas devido à mobilidade da rede. Sempre que um nó percebe uma quebra de enlace, ele redefine a nova distância para infinito (∞) e envia uma atualização aos vizinhos. Na sequência, esses vizinhos que detectam mudanças em suas tabelas

de roteamento também retransmitem para seus vizinhos, e assim por diante. Desta forma, a informação do enlace com a quebra se propaga por toda a rede. Da mesma forma, quando um nó recebe uma atualização que implica na alteração da menor distância de uma rota, também ocorre a propagação por toda a rede. Para evitar duplicidade de informações, todos os nós que recebem mais de uma mensagem de atualização, consideram apenas aquela com o maior número de sequência.

Uma desvantagem do DSDV é quantidade excessiva de controle para manter a atualização do roteamento, produzindo uma sobrecarga de controle proporcional ao número de nós na rede e, portanto, não é escalonável em redes sem fio *ad hoc*, que têm largura de banda limitada e cujas topologias são altamente dinâmicas. Outra desvantagem do DSDV é a possibilidade de haver demora na atualização das tabelas de roteamento, resultando em roteamento obsoleto.

2.2.3 Roteamento Híbrido

Nos protocolos de roteamento híbridos encontram-se abordagens com características de estratégias reativas e proativas. Esses protocolos visam conciliar as virtudes de baixa latência do roteamento proativo com o baixo *overhead* dos reativos. Como exemplo de um protocolo de roteamento híbrido, uma descrição do ZRP é apresentada a seguir:

2.2.3.1 *Zone Routing Protocol (ZRP)*

O protocolo ZRP, proposto em Haas *et al.* (2002), foi o primeiro protocolo a operar de forma híbrida. Este protocolo usa o conceito de zonas de roteamento para o roteamento híbrido. Uma zona é definida como um conjunto de nós em torno de um nó central, formando um perímetro onde todos os nós estão dentro de uma distância mínima d_h , em saltos, menor ou igual a um parâmetro inteiro chamado de raio de zona r_z , ou seja, $d_h \leq r_z$. Todos os nós da rede formam suas próprias zonas de roteamento, que se sobrepõem na prática. Dentro de cada zona de roteamento tem-se o nó central, os nós internos e os nós periféricos na borda do perímetro.

As zonas definem áreas nas quais o ZRP limita a propagação das mensagens do roteamento proativo, reduzindo assim o custo das atualizações topológicas. Fora das zonas é realizado roteamento de forma reativa, aproveitando-se das rotas pré-elaboradas, com efeito, reduzindo a latência da rede. Em Pearlman e Haas (1999) são propostas duas técnicas para

estimar o raio de zona ideal ("busca mínima" e "tráfego adaptativo"), baseadas em medições diretas do tráfego dentro das zonas ZRP e na comparação das quantidades de tráfego de controle reativo e proativo, cujo objetivo é minimizar a quantidade de tráfego de controle.

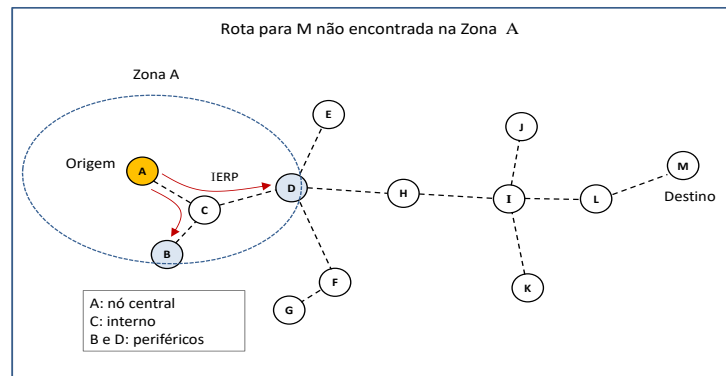
Atualmente, o ZRP suporta roteamento com qualidade de serviço (QoS) por meio da coleta de várias métricas de qualidade de rota (nos componentes de roteamento proativo e reativo). São definidos três subprotocolos para suporte das zonas de roteamento:

1. *Intrazone Routing Protocol* (IARP) – É o subprotocolo de roteamento intrazona, para manter, proativamente, rotas para os destinos dentro de uma vizinhança local (zona de roteamento). O ZRP não define o protocolo de roteamento intrazona a ser utilizado, podendo ainda ser implementado mais de um protocolo por zona;
2. *Interzone Routing Protocol* (IRP) – É o subprotocolo de roteamento interzona. Ao contrário do IARP, este protocolo é definido pelo ZRP. Tem o objetivo de explorar a estrutura da zona de roteamento e fazer pesquisas de rotas mais inteligentes, utilizando mensagens de requisição direcionadas aos nós periféricos ao invés de difusão na rede. Isto é conseguido pelo que é chamado de *bordercasting*, um conceito que representa a comunicação utilizando os nós das bordas da zona de roteamento;
3. *Neighbor Discovery Protocol* (NDP) – É o subprotocolo para gerar pacotes *Hello* e fazer a descoberta dos vizinhos.

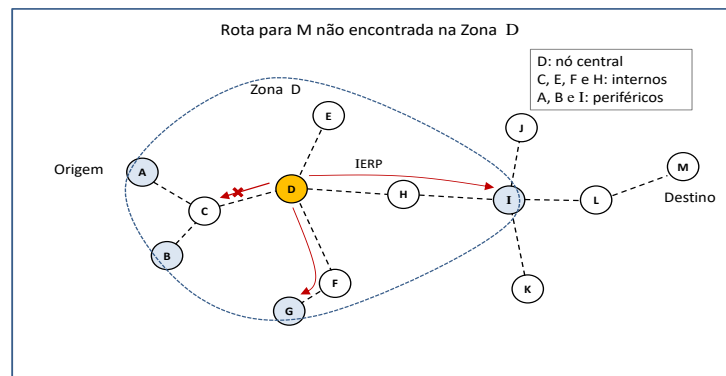
Na Fig. 4 tem-se um exemplo de funcionamento do protocolo ZPR. A rede mostra o nó *A* iniciando uma transmissão para o nó de destino *M*.

Nesta rede, as zonas são construídas com raio $r_z = 2$, então $d_h \leq 2$, isto implica que as mensagens poderão efetuar dois ou menos saltos para garantir a permanência dentro das zonas locais. Primeiramente o nó *A* consulta se o destino *M* não está dentro da zona *A*, simplesmente consultando sua tabela de roteamento. Neste caso, *M* é externo e *A* envia uma mensagem IERP aos seus nós periféricos (*B* e *D*) configuradas para dois saltos. Cada nó periférico, por sua vez, possui sua própria zona configurada e faz o mesmo procedimento de busca interna e, posteriormente, envia novas mensagens IERP. Neste caso, o nó *D* envia uma IERP para *G* e *I*. O nó *I* identifica o destino *M* em sua zona e envia uma confirmação de rota para a origem *A*.

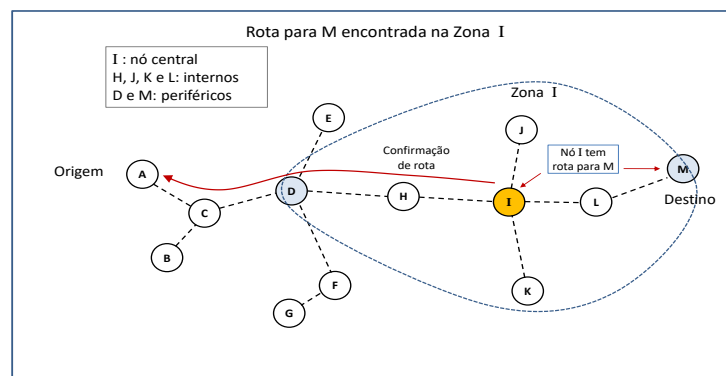
Figura 4 – Exemplo de funcionamento do ZRP com o tráfego de mensagens IERP.



(a) Nó A de origem não contém o destino em sua zona e solicita rota aos nós periféricos B e D.



(b) Nó D também não contém o destino em sua zona e solicita rota aos nós periféricos A, B, G e I.



(c) Nó I tem rota conhecida para a destino M e retorna mensagem de confirmação de rota para origem A.

Fonte: Autoria própria.

2.3 ROTEAMENTO BIOINSPIRADO EM COLÔNIA DE FORMIGAS

Os protocolos de roteamento bioinspirados são aqueles baseados na natureza. Diversos protocolos têm sido propostos embasados em inteligência de enxames, com vistas na capacidade

de constituírem sistemas auto-organizáveis (BHATTACHARYYA; DUTTA, 2015), em geral modelos baseados em colônia de formigas em cujos sistemas os indivíduos demonstram coletividade em prol de um objetivo comum da busca por alimento. O estudo de colônias de formigas levou a concepção da arquitetura ACO (*Ant Colony Optimization*) (DORIGO; STÜTZLE, 2004; LUKE, 2013). No ACO o comportamento das formigas otimiza a busca por alimento. As formigas são capazes de encontrar e convergir para o caminho mais curto entre seu ninho e a fonte de alimento. Enquanto se movimentam, as formigas sinalizam o caminho com feromônio, uma substância química produzida por elas que tem o papel de auxiliar na locomoção indicando direções e distâncias. Os caminhos mais curtos tendem a concentrar mais feromônio, isto atrai mais formigas, que por sua vez depositam mais esse produto, num ciclo crescente do nível da substância, até que a maioria das formigas convergem no caminho mais curto. Entretanto, o feromônio evapora com o passar do tempo. Esse processo é conhecido por *stigmergia* (do inglês *stigmergy*), mecanismo de coordenação indireta em que o traço deixado por uma ação em um meio estimula ações subsequentes (THERAULAZ; BONABEAU, 1999; HEYLIGHEN, 2016).

Alguns exemplos de protocolos baseados no ACO são apresentados a seguir, dentre eles o *Simple Ant Routing Algorithm* (SARA) (CORREIA; VAZÃO, 2010) foi selecionado para uma descrição mais detalhada neste trabalho, particularmente por ter sido selecionado para comparação do desempenho com o HyphaNet, na seção de simulação.

2.3.1 *Simple Ant Routing Algorithm* (SARA)

O SARA (CORREIA; VAZÃO, 2010) é um algoritmo de roteamento de inteligência de enxame, baseado na estrutura ACO, com estratégia de roteamento *on-demand*, probabilístico e *multipath*. É capaz de descobrir e manter vários caminhos por destino que, por compartilhamento, oferecem redução da sobrecarga e procedimentos para identificar possíveis situações de congestionamento de enlaces. O algoritmo, sistematicamente, aumenta a qualidade das rotas convergindo para os caminhos descobertos mais curtos, que serão selecionados para encaminhar pacotes de dados.

No processo de roteamento o algoritmo SARA utiliza uma heurística para calcular as probabilidades de seleção de rotas. A decisão para selecionar o enlace para o próximo salto em direção ao destino é uma função do estado e da capacidade de roteamento de um determinado enlace.

Seguindo o clássico conceito do ACO, no SARA as informações de roteamento são organizadas nas tabelas de feromônio. Um feromônio é denotado por $\Upsilon_{i,n}^d$ e indica a preferência estimada de i de escolher um certo vizinho n para chegar a um determinado destino d . Os níveis dos feromônios são atualizados dinamicamente por agentes formiga e pelos pacotes de dados que trafegam na rede. Diretamente conectados à i encontram-se os nós adjacentes que formam a sua vizinhança N_i . Desta vizinhança, pode-se extrair um subconjunto de nós denotado por N_i^d , em que todo $n \in N_i^d$ possui um caminho conhecido para d .

2.3.1.1 Descoberta de rotas

O procedimento de descoberta de rota no SARA é reativo e tem a função de definir um novo caminho da origem s para o destino d , na ausência de informações de rotas disponíveis na tabela de rotas em relação ao destino pretendido, quando se inicia uma nova sessão de dados. Para descoberta de caminhos, pacotes *FANT* (*Forward Ant*) representam agentes formiga ¹ enviados de s para d , por difusão, até encontrar a destinação. Ao encontrar o destino pretendido, pacotes *BANT* (*Backward Ant*) são enviados em *unicast* para a origem e devem retornar pelo caminho previamente armazenado e deixar um rastro de feromônios para sinalizar que a rota está operante. Durante este processo, o rastro de feromônio geralmente indica o caminho mais curto descoberto, mas, não necessariamente é o caminho mais curto da rede.

Para aumentar a qualidade do processo de descoberta, via o pacote *FANT*, o SARA adiciona duas funcionalidades importantes: a redução da difusão de pacotes e a garantia de entrega de mensagens. Para a redução da difusão é proposto um novo esquema chamado de *CNB* (*Controlled Neighbor Broadcast*), em que cada nó transmite os pacotes *FANT* para todos os seus vizinhos, mas apenas um deles propaga o *FANT* novamente, de forma probabilística (ver a Eq. 1 a seguir). Desta forma, é evitada a multiplicação de pacotes de controle na rede. Para a garantia de entrega das mensagens *FANT* são implementados dois temporizadores: o temporizador de confirmação de descoberta de rota T_0 e o temporizador de confirmação T_1 . O T_0 é iniciado pelo nó de origem e determina o limite de tempo para estabelecer a rota até o destino, neste período deve retornar um pacote *BANT*, senão um novo *FANT* é criado. O T_1 é iniciado por todos os nós transmissores no caminho de busca no momento do encaminhamento do *FANT*, incluindo o nó

¹ Agentes formiga: são agentes de controle do sistema. Cada formiga tem sua sessão de controle e mensagens de controle específicas.

de origem. Se T_1 expirar antes de receber o pacote de confirmação *CFANT* do próximo nó de encaminhamento, uma cópia do *FANT* será transmitida.

No SARA, o *FANT* utiliza a Eq. 1 para calcular a probabilidade $P_{i,n}^d$ de seleção do próximo nó a efetuar a difusão,

$$P_{i,n}^d = \frac{C_{i,n}^d}{\sum_{j \in N_i} C_{i,j}^d}, \quad (1)$$

$$C_{i,n}^d = \frac{1}{1 + s}, \quad \forall n \in N_i, \quad (2)$$

onde $P_{i,n}^d$ é a probabilidade do enlace $i \rightarrow n$ com rota "ainda desconhecida" para d ; $C_{i,n}^d$ é o custo de cada enlace $i \rightarrow n$ na rota "ainda desconhecida" para d , N_i é o conjunto de adjacências de i , j representa um elemento do conjunto N_i e s é o número de vezes em que o enlace foi anteriormente selecionado.

Por ser um processo de descoberta de rotas, o destino d ainda não é conhecido, mas faz parte das Eqs. 1 e 2 porque a rotina de busca leva em conta a possibilidade de outra mensagem *FANT* ter passado pela vizinhança. Em caso positivo, o nó que recebeu a visita anterior tem suas chances rebaixadas pela Eq. 2. Em caso negativo, todos os nós tem a mesma chance de ser o próximo nó a propagar a *FANT*.

2.3.1.2 Seleção de rotas

O processo de seleção de rotas tem a função de escolher uma rota para encaminhar os pacotes de dados. O SARA utiliza a heurística mostrada na Eq. 3 para estimar a probabilidade $P_{i,n}^d$, que representa as chances do nó i escolher um determinado nó n como o próximo salto para encaminhar um pacote para o destino d ,

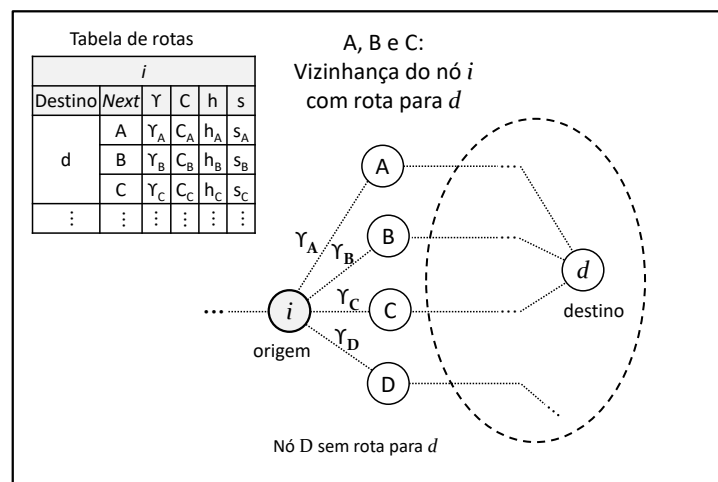
$$P_{i,n}^d = \frac{(\Upsilon_{i,n}^d + 1)^F}{e^{h_n^d}}, \quad \forall n \in N_i^d, \quad (3)$$

onde $P_{i,n}^d$ é a probabilidade do nó i enviar para n como o próximo nó que tem rota para o destino d , $\Upsilon_{i,n}^d$ é o feromônio do enlace que conecta o nó n na rota para d , F é o fator de convergência usado em casos de múltiplas rotas para convergir para aquela com maior feromônio. Se o fator F

for muito pequeno múltiplas rotas podem ficar com graus semelhantes de atratividade e impedir a convergência para uma única rota.

A heurística da Eq. 3 leva em conta as métricas ponderadas no cálculo da probabilidade, o número de saltos do nó n até o nó de destino d , denotado por h_n^d e o nível de feromônio presente no enlace entre o nó i e o nó n em direção ao nó de destino d , denotado por $\Upsilon_{i,n}^d$. A função exponencial tem o objetivo de aumentar a sensibilidade ao número de saltos. Na Fig. 5 está representada um exemplo de topologia com a tabela de roteamento do nó i e as informações utilizadas pelas heurísticas de descoberta e seleção de rotas.

Figura 5 – Exemplo de uma topologia mostrando o conteúdo da tabela de roteamento do nó i , com as informações: feromônio (Υ_j), custo (C), saltos (h) e ocupações (s), de cada rota para os nós A, B, C e D.



Fonte: Autoria própria.

Para manter a lista de adjacências, cada nó transmite, periodicamente, pacotes *Hello*. Desta forma, invariavelmente, todos os nós podem conhecer seus vizinhos apesar da topologia dinâmica de rede.

Para gerar e manter as tabelas de rotas nos nós da rede o SARA implementa os mecanismos básicos de descoberta, manutenção e recuperação de rotas, descritos a seguir:

2.3.1.3 Manutenção de rotas

O processo de manutenção de rotas é responsável por manter atualizadas as informações sobre as rotas ativas, ajustando o nível de feromônio. Rotas com altos níveis de feromônio são mais atrativas, enquanto que rotas com feromônio baixo são menos utilizadas.

Na estrutura ACO clássica, nenhum tráfego adicional é criado para manter uma rota ativa. Da mesma forma, no SARA os níveis $\Upsilon_{i,j}$ de feromônio nos enlaces $i \rightarrow j$ são ajustados com o próprio tráfego de pacotes, sem produzir tráfego de controle adicional. A intensidade do feromônio aumenta a cada pacote (dados ou controle) que cruza o enlace no tempo atual t_a por uma dada quantidade α e diminui o nível de feromônio, automaticamente, após um tempo τ_a pelo valor de γ . A Eq. 4 mostra o aumento do nível do feromônio,

$$\Upsilon_{i,j}(t_a) = \Upsilon_{i,j}(t) + \alpha, \quad \forall pkt(t_a), \quad (4)$$

$$t = t_{a-1} \quad se \quad t_{a-1} > \tau_{a-1}, \quad (5a)$$

$$t = \tau_{a-1} \quad se \quad t_{a-1} < \tau_{a-1}, \quad (5b)$$

onde $\Upsilon_{i,j}(t)$ é o estado do feromônio no enlace $i \rightarrow j$ no tempo t , t é o tempo do último evento de aumento ou diminuição ocorrido, t_{a-1} é um período de tempo antes do tempo atual t_a , α é o fator de aumento.

A Eq. 6 mostra a diminuição do nível do feromônio em τ_a ,

$$\Upsilon_{i,j}(\tau_a) = \begin{cases} \Upsilon_{i,j}(\tau_a) - \gamma, & \Upsilon_{i,j}(t_a) > \gamma, \\ 0, & \Upsilon_{i,j}(t_a) \leq \gamma, \end{cases} \quad (6)$$

onde γ é o fator de diminuição do feromônio.

Os feromônios têm vida útil conforme a taxa de aumento e diminuição de seus níveis. Desta forma, o correto ajuste dos parâmetros α e γ são fundamentais no funcionamento do SARA, pois ditam o número e as características dos caminhos disponíveis. Se α é muito pequeno e γ é muito grande, a intensidade do feromônio aumentará muito lentamente, e os caminhos podem se tornar instáveis. Por outro lado, se α é alto e γ reduzido, tende-se a criar caminhos estáveis, que dificilmente reagem a variações topológicas. De acordo com Correia e Vazão (2010) o ajuste desses dois valores é realizado *off-line* em cenários simulados.

Essa estratégia pode não ser eficaz para situações de tráfego assimétrico, caso de aplicações cliente-servidor e UDP. Desse modo, o SARA usa uma mensagem *FANT* especial, nomeada como *super FANT*, gerada pelo nó final (origem ou destino) onde o tráfego assimétrico

foi detectado. A *super FANT* é gerada com uma frequência menor que a taxa de pacotes que chega no nó de destino para reforçar o feromônio na direção contrária ao tráfego assimétrico.

Quando o nível de feromônio associado a um enlace chega a zero indica que a rota não é utilizada. Todavia, a rota não é excluída da tabela de roteamento, por entender-se que a mesma ainda pode ser válida na rede. Para controlar o tamanho da tabela de roteamento, o SARA usa o algoritmo *Least Recently Used* (LRU) (CORREIA; VAZÃO, 2010) para classificar as rotas e aquelas com feromônios nulos são candidatas a exclusão.

2.3.1.4 Recuperação de falhas

O SARA possui um procedimento de reparo de rota que é iniciado pelo nó que detecta uma falha de enlace, com objetivo de encontrar um caminho alternativo que possa alcançar o outro lado do enlace com falha em vez de alcançar o nó de destino.

O procedimento é chamado de DSA (*Deep Search Area*) e utiliza a difusão com mensagens RFANT (*Repair FANT*), temporizadas, com um valor TTL limitado em dois saltos, considerado suficiente para encontrar o outro lado do enlace com falha usando uma pequena quantidade de sobrecarga. Quando o RFANT atingir um nó que saiba como encaminhar o tráfego para o nó de destino, uma mensagem RBANT (*Repair BANT*), em unicast, retorna ao nó originador do reparo informando a nova rota.

Se o procedimento de reparo local falhar, uma mensagem de erro será enviada ao nó de origem e o procedimento de descoberta de rota será iniciado.

2.3.2 AntHocNet

O AntHocNet (CARO *et al.*, 2004; CARO *et al.*, 2005; DUCATELLE *et al.*, 2005; DUCATELLE *et al.*, 2006; DUCATELLE, 2007) é um protocolo para roteamento adaptativo em redes MANETs baseado em idéias do ACO. É um protocolo de roteamento híbrido, *multipath*, de estratégia probabilística, que usa agentes formigas de forma reativa para descoberta e configuração de rotas e técnicas para estimar a qualidade de um caminho com base em estimativas feitas por nós vizinhos (*bootstrapping*), nos mecanismos de manutenção, melhoria e exploração proativas de rotas.

No AntHocNet, o processo de descoberta e configuração de rotas é reativo. Durante o curso da sessão, o nó de origem usa formigas para, proativamente, buscar alternativas e melhorias

do caminho original. Isso permite ao protocolo adaptar-se às mudanças na rede e construir uma malha de caminhos alternativos entre a origem e o destino.

As informações de roteamento são organizadas nas chamadas tabelas de feromônio para a seleção de rotas, e os valores dos feromônios são atualizados conforme a dinâmica de utilização das rotas.

O AntHocNet utiliza mensagens de *Hello* para detecção dos vizinhos imediatos e para trocar informações da tabela de feromônios, desse modo executa a manutenção de rotas na rede pela escolha das rotas com o melhores feromônios. O feromônio obtido por *bootstrapping* é considerado menos confiável que o feromônio regular por ter sido estimado a partir de uma fonte não local e não diretamente por um agente formiga, por este motivo esse tipo de feromônio possui uso restrito no sistema e é armazenado em uma segunda tabela chamada de tabela de feromônio virtual.

Da mesma forma que o feromônio regular, o feromônio virtual é difundido pela rede através de mensagens *Hello*, porém com identificação própria que o diferencia, pois este não pode ser utilizado para manutenção de rotas, apenas para auxiliar na exploração proativa de rotas.

Outro mecanismo importante do AntHocNet é a habilidade para informar e corrigir falhas de enlaces, muitas vezes ocasionadas pela própria mobilidade da MANET. Os nós podem detectar falhas de transmissão *unicast* de formigas e pacotes, bem como o afastamento de vizinhos com a ausência de mensagens *Hello*.

2.3.2.1 Descoberta de rotas

No processo reativo para descoberta e configuração de rotas, um agente formiga do tipo *reactive forward* (RF_s^d) é enviado em difusão para a rede com a missão de encontrar um caminho entre s e d . Cada agente formiga, durante a busca, mantém uma lista $L = \{1, 2, \dots, d\}$ dos nós visitados. Em cada nó, uma formiga pode ser retransmitida em modo *unicast* ou difusão, conforme o nó atual tenha ou não informações de roteamento para d . Quando encontra o destino, uma formiga do tipo *reactive backward* (RB_s^d) é gerada e transmitida de volta à origem, para informar a nova rota, em *unicast*, pelo caminho reverso armazenado em sua lista de nós visitados. Durante o *reactive backward* a formiga atualiza o feromônio de cada nó i no caminho adquirido durante a busca. A atualização do feromônio é feita pela quantidade representada por τ_i^d , calculada pela

média inversa corrente entre o tempo estimado \widehat{T}_i^d e o tempo T_{hop} gasto pela quantidade de saltos h para a formiga alcançar o destino d a partir de i , conforme a Eq. 7

$$\tau_i^d = \left(\frac{\widehat{T}_i^d + hT_{hop}}{2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

onde T_{hop} é o tempo de um salto que depende da tecnologia do enlace (em Ducatelle *et al.* (2005), os autores utilizaram $T_{hop} = 0,003$ s para 2 Mbps), e \widehat{T}_i^d é o tempo estimado que um pacote leva para chegar ao destino, considerando-se os atrasos nas filas e na camada MAC de cada nó. Em seguida, o feromônio em cada nó é atualizado pela Eq. 8

$$\Upsilon_{i,n}^d = \rho \Upsilon_{i,n}^d + (1 - \rho) \tau_i^d, \quad \rho \in [0,1], \quad (8)$$

onde o parâmetro ρ é aplicado para amenizar possíveis oscilações nas estimativas de tempo coletadas pelas formigas (por exemplo, devido a rajadas locais de tráfego) e de atrasos devido ao número de saltos (em Ducatelle *et al.* (2005) $\rho = 0,7$).

2.3.2.2 Seleção de rotas

O sistema executa a seleção de rotas utilizando as informações de feromônios atualizadas nas tabelas de roteamento. Desse modo, esse processo de seleção é que vai conduzir os agentes formiga (mensagens de controle) e pacotes de dados através da rede.

Primeiramente, considerando-se a seleção para envio de mensagens de controle, a partir do nó i , uma formiga, em modo unicast, escolhe seu próximo salto n para chegar a d com a probabilidade $P_{i,n}^d$, obtida pela Eq. 9

$$P_{i,n}^d = \frac{(\Upsilon_{i,n}^d)^{\beta_1}}{\sum_{j \in N_i^d} (\Upsilon_{i,j}^d)^{\beta_1}}, \quad \beta_1 \geq 1, \quad (9)$$

onde N_i^d é o conjunto de vizinhos de i com rota para d , j representa os elementos do conjunto N_i^d e β_1 é um parâmetro que pode controlar o comportamento exploratório das formigas (em Ducatelle *et al.* (2005) utilizou-se $\beta_1 = 1$).

No caso de ser um pacote de dados chegando ao nó i , seu próximo salto será escolhido com a probabilidade $P_{i,n}^d$, obtida pela Eq. 10

$$P_{i,n}^d = \frac{(\Upsilon_{i,n}^d)^{\beta_2}}{\sum_{j \in N_i^d} (\Upsilon_{i,j}^d)^{\beta_2}}, \quad \beta_2 \geq \beta_1. \quad (10)$$

A diferença entre as Equações 9 e 10 é o expoente β_2 ser bem maior (≈ 20) para favorecer caminhos com os melhores feromônios, como mostrado em Ducatelle *et al.* (2006).

A estratégia de roteamento probabilística aliada à dinâmica de atualização dos caminhos leva à distribuição de carga de dados de acordo com a qualidade estimada dos caminhos, caracterizando o balanceamento de carga automático.

2.3.2.3 Manutenção e exploração de rotas

Nos processos de manutenção e exploração de rotas, o AntHocNet utiliza mensagens de *Hello* para detecção dos vizinhos imediatos e para trocar informações da tabela de feromônios. São mensagens curtas, em difusão, transmitidas em curtos intervalos de tempo t_{hello} (por exemplo, $t_{hello} = 1s$) de forma assíncrona por todos os nós. Um nó n , quando envia um *Hello*, carrega as informações sobre os destinos que possui em sua tabela de feromônios, mas não todo o conteúdo da tabela, apenas as entradas com o melhor valor do feromônio $\Upsilon_{n^*m}^d$, $m^* \in N_n^d$, que n tem disponível para d . O nó que recebe as mensagens de *Hello* escolhe a rota com o melhor feromônio, incrementa o custo do salto de i para n e recalcula o feromônio a ser registrado na tabela com os caminhos de i para d passando por n . O feromônio estimado com auxílio do *Hello* utiliza a técnica de *bootstrapping*, pois foi obtido a partir de informações dos vizinhos e é denotado por $B_{i,n}^d$ e seu valor é calculado pela Eq. 11

$$B_{i,n}^d = \left(\frac{1}{\Upsilon_{n^*m}^d} + \frac{\widehat{T}_i^n + T_{hop}}{2} \right)^{-1}. \quad (11)$$

O feromônio obtido por *bootstrapping* é considerado menos confiável que o feromônio regular por ter sido estimado a partir de uma fonte não local e não diretamente por uma formiga, por este motivo esse tipo de feromônio possui uso restrito no sistema. No local onde foi estimado, $B_{i,n}^d$ é visto como um feromônio regular se o nó já possui uma rota original e que agora recebe um caminho melhor, desta forma, $\Upsilon_{i,n}^d$ é atualizado para $B_{i,n}^d$. Entretanto, se o nó ainda não

possui uma entrada do tipo $\Upsilon_{i,n}^d$, manterá o campo vazio, sem nenhuma mudança. Isto ocorre por i não confiar no novo feromônio e porque o caminho representado ainda não foi amostrado por uma formiga gerada por ele. Neste caso, o recente $B_{i,n}^d$ é armazenado em uma segunda tabela chamada de tabela de feromônio virtual V_i .

Da mesma forma que o feromônio regular, o feromônio virtual é difundido pela rede através de mensagens *Hello*, porém com identificação própria que o diferencia, pois este não pode ser utilizado para manutenção de rotas, por não ser um feromônio regular, contudo terá papel relevante futuramente para auxiliar na exploração proativa de rotas. Ao longo do tempo, é possível qualquer nó conter os dois tipos de feromônio. Cada nó que é a fonte de uma sessão de comunicação, periodicamente, compara as informações de feromônios virtuais e regulares que possui disponível para as rotas vigentes. Se o melhor feromônio virtual for melhor que os regulares, o nó transmissor envia um agente formiga do tipo *proactive forward* ($PF_{s,d}$), em *unicast* para a rede, com a missão de confirmar tal caminho entre s e d . Quando chegar ao destino, retorna à origem como formiga *proactive backward* ($PB_{s,d}$) para informar que a rota foi atestada e um novo feromônio regular estimado $B_{i,n}^d$ será registrado na tabela de rotas.

2.3.2.4 Recuperação de falhas

O AntHocNet tem mecanismos para informar e corrigir falhas de enlaces, muitas vezes ocasionadas pela própria mobilidade da MANET. Os nós podem detectar falhas de transmissão *unicast* de formigas e pacotes, bem como o afastamento de vizinhos com a ausência de mensagens *Hello*. Se o evento foi uma falha na transmissão de um agente formiga (dá-se no instante em que a melhor rota está inativa), o nó transmite uma mensagem de *notificação de falha de enlace* aos seus vizinhos com uma lista dos destinos para os quais o nó perdeu seu melhor caminho, juntamente com novas melhores estimativas de tempo e número de saltos para esse destino (caso tenha restado alguma informação do tal destino), assim todos os vizinhos recebem a notificação e atualizam sua respectiva tabela de feromônios usando as novas estimativas para recalculá-los $B_{i,n}^d$. Os vizinhos, por sua vez, repassam a notificação mais adiante se perderam sua melhor rota ou fiquem sem opções de rotas pelo evento ocorrido, e assim sucessivamente, até que todos os nós envolvidos sejam notificados. Se o evento foi a transmissão com falha de um pacote de dados, o nó inicia um *reparo de rota local*. Neste processo, o nó transmite uma formiga de reparo de rota $RF_{s,d}$ na sua vizinhança, em difusão com limite de dois saltos, para o destino envolvido, de modo semelhante a uma formiga reativa. Se encontrar o destino dentro do limite de tempo

de reparo, uma mensagem de retorno de reparo $RB_{s,d}$ notifica o nó originador com a nova rota, senão uma *notificação de falha de enlace* é enviada.

2.3.3 Hopnet

O Hopnet, algoritmo de otimização por colônia de formiga híbrido para MANETs (do inglês, *Hybrid Optimization Ant Colony*) é um protocolo de roteamento bioinspirado em ACO, *multipath* e híbrido, ou seja, apresenta características dos protocolos reativos e proativos (WANG, 2007). A ideia do Hopnet é unir características de algoritmos de roteamento conhecidos como o *Zone Routing Protocol (ZRP)* e o *AntHocNet*, ambos protocolos híbridos. Assim como o ZRP, o Hopnet utiliza o conceito de zona de roteamento para tentar reduzir as mensagens de controle e o atraso na entrega dos pacotes de dados. As zonas de roteamento são definidas e mantidas por cada nó da rede que possui duas tabelas de roteamento: tabela de roteamento intrazona (intraRT) e tabela de roteamento interzona (interRT). A dimensão de cada zona é definida por um raio, ou seja, o número de saltos do nó central à borda da zona. No conceito de zona de roteamento, cada nó não necessita manter as rotas para toda a rede de forma proativa, apenas dentro da própria zona na sua intraRT, assim os procedimentos de atualização e recuperação de falhas se tornam ágeis e rápidos, porque a IntraRT é proativamente mantida. Por outro lado, todo roteamento para nós fora da zona é realizado com auxílio da interRT e atualizada de forma reativa, quando a origem não encontra rotas externas ativas. No Hopnet, por ser um protocolo baseado em ACO, os procedimentos de descoberta dos caminhos para os nós internos e externos e a manutenção das tabelas de roteamento são realizados por agentes formigas, como no *AntHocNet*.

No Hopnet, as formigas são classificadas em cinco categorias:

1. Formiga de Exploração Interna (FEI): são periodicamente enviadas dentro dos limites da zona a fim de manter as melhores rotas através de feromônio;
2. Formiga de Exploração Externa (FEE): são enviadas entre as fronteiras das zonas para encontrar a zona que contém o destino, quando o destino não se encontra na tabela de roteamento interna;
3. Formiga de Retorno (FR): enviadas à origem quando uma FEE encontra o destino externo;

4. Formiga de Notificação (FN): são usadas para notificar a rede, durante a transmissão de dados, sobre alterações na topologia. Elas são enviadas para o nó de origem e para todos os demais nós ao longo da rota para substituir as rotas inválidas nas tabelas externas;
5. Formiga de Erro (FE): são usadas para reparar enlaces com falhas entre nós. Elas são enviadas para o nó origem a fim de iniciar uma nova pesquisa para o destino.

2.3.4 Enhanced-Ant-AODV

O *Enhanced-Ant-AODV* é um protocolo bioinspirado para MANETs que combina o protocolo *Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV)* com *Ant Colony Optimization (ACO)* para melhorar a Qualidade de Serviço (QoS) da rede (SARKAR *et al.*, 2018). Este modelo propõe um mecanismo para seleção de rotas usando o valor do maior feromônio do caminho, baseado no mecanismo de colônia de formigas com o AODV. A inovação do *Enhanced-Ant-AODV* consiste em calcular o valor do feromônio de uma rota com base na confiabilidade de ponta a ponta do caminho entre origem e destino, considerando os parâmetros: congestionamento, número de saltos, potência do sinal recebido e energia residual dos nós ao longo do caminho. A rota que tem maior valor de feromônio será selecionada para transmissão do pacote de dados.

A Eq. 12 mostra como calcular o valor do feromônio PC_{ij} , do enlace ij , com base na confiabilidade do caminho,

$$PC_{ij} = \frac{Rn_{ij} \cdot En_{ij}}{Cn_{ij} \cdot Hn_{ij}}, \quad (12)$$

onde, Rn_{ij} é a intensidade do sinal de rádio do nó i recebido no nó j , En_{ij} é a energia residual do nó j , Cn_{ij} é o congestionamento no nó j , Hn_{ij} é o número de saltos que a solicitação de rota percorreu do originador para o nó j via nó i .

No *Enhanced-Ant-AODV* o mecanismo de descoberta de rotas e manutenção de rotas seguem um modelo semelhante ao AODV. O mecanismo de descoberta de rotas é iniciado se nenhuma rota é encontrada quando um nó deseja enviar pacotes de dados para o destino. No procedimento de descoberta o nó de origem transmite o pacote de solicitação de rota (REQ_ANT). A REQ_ANT será encaminhada salto a salto pelos vizinhos até atingir o nó de destino, podendo circular na rede mais de uma cópia desta mensagem. Enquanto trafega, a REQ_ANT cria uma rota reversa para o originador da solicitação. Em seguida, calcula a quantidade de feromônio e

atualiza a tabela de roteamento. Quando o nó de destino recebe a REQ_ANT, ele atualiza sua tabela de roteamento com a rota para nó de origem. Antes de enviar uma resposta de solicitação de rota (REP_ANT) à origem, o destino aguarda um certo período de tempo para receber REQ_ANT em todos os caminhos, em seguida ele seleciona o caminho com maior quantidade de feromônio e envia o pacote REP_ANT para o próximo salto para alcançar o originador do REQ_ANT.

No caminho de retorno, cada nó intermediário processa o REP_ANT, atualizando sua tabela de roteamento com rota para o originador da REP_ANT. Em seguida, encaminha a REP_ANT ao próximo nó em direção ao originador da REQ_ANT. Esse processo continua até que a REP_ANT atinja seu destino. Quando a REP_ANT chega ao originador de REQ_ANT, o nó atualiza a tabela de roteamento e, assim, o caminho completo será criado da origem para o destino. Desta forma, a origem envia o pacote de dados através do caminho estabelecido.

2.4 ROTEAMENTO BIOINSPIRADO EM COLÔNIA DE ABELHAS

O Algoritmo Colônia de Abelhas Artificiais (do inglês *Artificial Bee Colony* - ABC) consiste de um algoritmo com inspiração natural e se encaixa nos conceitos de inteligência coletiva. Os algoritmos baseados em colônias de abelhas são inspirados no comportamento de abelhas na busca de alimentos. São projetados para problemas dinâmicos, variáveis no tempo e multiobjetivos. As abelhas se comunicam diretamente usando um protocolo de comunicação sofisticado e também usam sinais de resposta estigmérgica, semelhantes às formigas (KARABOGA; BASTURK, 2007).

Embora este trabalho não aplique os protocolos bioinspirados em abelhas para efeito de comparação de desempenho com o HyphaNet, são apresentados, na sequência, três exemplos relevantes de protocolos de roteamento do tipo ABC:

2.4.1 BeeAdHoc

O algoritmo BeeAdHoc foi proposto por Wedde *et al.* (2005) com objetivo de ser um protocolo de roteamento energeticamente eficiente. É baseado no conceito de colônia de abelhas.

O protocolo tem dois tipos de abelhas que são nomeadas batedoras e coletoras (ou forrageiras). As abelhas batedoras funcionam como agentes de descoberta de rotas e são projetadas para encontrar caminhos de nós de origem para nós de destino dentro das redes.

As batedoras utilizam sessões de difusão de mensagens para todos os vizinhos de um nó até atingir o nó de destino, mas têm um tempo de vida limitado para permanecer na rede. As abelhas coletoras são as trabalhadoras principais no BeeAdHoc, por serem responsáveis pelo transporte dos pacotes de dados vindo da camada de transporte.

As abelhas coletoras são divididas em dois tipos: latência e tempo de vida.

As coletoras de latência reúnem as informações de latência da rede para completar as tabelas de roteamento, assim um nó pode encaminhar pacotes com mínimo atraso. As coletoras de tempo de vida (do inglês, *lifetime*) coletam a informação da capacidade restante da bateria dos nós que visitam, de modo a otimizar o uso de rotas com poucos recursos e aumentar o tempo de vida da rede.

2.4.2 BeeIP

O BeeIP é um protocolo de roteamento para redes *ad hoc* do tipo reativo baseado no comportamento coletivo de abelhas (GIAGKOS; WILSON, 2010). É um protocolo robusto, escalável e eficiente. No BeeIP a abordagem reativa é usada para coletar informações sobre a topologia de rede somente quando os dados são necessários para transmitir entre os nós. O BeeIP tem a característica de utilizar parâmetros das camadas mais baixas de protocolos PHY e MAC, com o propósito de auxiliar o algoritmo a prever e calcular o desempenho futuro dos enlaces entre a origem e o destino.

Resultados da simulação mostram que o BeeIP apresenta melhor desempenho que outros protocolos clássicos. Por exemplo, alcança maiores taxas de entrega de dados e menos sobrecarga de controle do que o protocolo DSDV e um resultado ligeiramente melhor em comparação com o AODV, incluindo menos sessões de descoberta de rota.

2.4.3 Bee-MANET

O protocolo de roteamento Bee-MANET foi desenvolvido para comunicação em MANETs inspirado em inteligência de enxame de abelhas (ALBAYRAK; ZENGIN, 2014). O Bee-MANET tem como objetivo aumentar a taxa de transferência de dados e diminuir o número de pacotes de controle que circulam na rede.

Existem três tipos de abelhas no protocolo de roteamento Bee-MANET: Batedora de ida, Batedora de volta e Acumuladora.

As informações de rotas, presentes na tabela de roteamento de cada nó, são adquiridas na área da rede pelos agentes abelhas batedoras, que são representadas por sessões de mensagens de controle com a finalidade de coletar dados da rede. Os agentes colhem informação de distância e do tempo de atraso, associados com os nós que eles visitaram e armazenam nos nós de origem. Assim, os nós têm informações para selecionar o caminho mais adequado ao nó de destino. As abelhas batedoras de cada colmeia na colônia têm o dever de procurar comida quando necessário e correspondem aos agentes de controle de ida e volta e acumuladoras nas redes de comunicação, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Correspondência entre colônia de abelhas e rede de comunicação.

Colônia de abelhas	Rede de comunicação
Colmeia	Nós
Área de nectar	Rede
Batedoras	Agentes de ida, de volta e acumuladoras
Coletoras	Pacotes de dados
Área de danças	Tabelas de roteamento

Fonte: (ALBAYRAK; ZENGIN, 2014)

A abelha batedora de ida (do inglês, *forward scout*) é enviada em difusão na rede para encontrar uma rota até o destino. Enquanto trafega na rede, cada nó processa esta mensagem e verifica se não há formação de laços e aproveita para adicionar uma rota de retorno até a origem. Se o nó for o destino, uma abelha batedora de volta (do inglês, *backward scout*) é enviada à origem para confirmar o caminho encontrado. Se o nó não for um nó de destino, uma abelha acumuladora é criada e a batedora de ida é adicionada a ela. A acumuladora ainda aguarda um período de tempo ($\approx 0.1ms$) e adiciona todas as abelhas de ida que, eventualmente, chegam ao mesmo nó. Desta forma, a tendência é diminuir a quantidade de abelhas batedoras na rede, distribuindo-as em listas dentro das acumuladoras. As acumuladoras são enviadas para os vizinhos e à medida que avançam processam as batedoras conforme o objetivo de cada uma, até chegarem ao destino.

3 COLÔNIA DE FUNGOS E APLICAÇÕES

Esta seção apresenta conceitos sobre fungos com definição, morfologia, reprodução, classificação e o processo de crescimento da sua estrutura. Por fim, apresenta uma revisão das diferentes abordagens inspiradas no comportamento das redes fúngicas para desenvolvimento de estratégias para aplicações como: algoritmos de busca e de redes de comunicação.

Os fungos são organismos eucariontes, unicelulares ou pluricelulares, que apresentam estruturas microscópicas e macroscópicas, heterotróficos e aeróbios ou anaeróbios facultativos (leveduras). Pertencem ao Reino Fungi, segundo a classificação de R. H. Whittaker (WHITTAKER, 1969), ou ao domínio Eukarya, proposto por Carl R. Woese, Otto Kandler e Mark L. Wheelis (WOESE *et al.*, 1990).

Anteriormente à classificação de Whittaker, os fungos, assim como bactérias e algas foram classificados no reino vegetal, por essa razão estes organismos são tradicionalmente estudados em botânica e microbiologia, área que estuda microrganismos. No caso dos fungos, a micologia é a parte da botânica que estuda os fungos. Embora os fungos não sejam mais classificados como vegetais, ainda assim são estudados na botânica por estarem frequentemente associados com plantas.

As principais características dos fungos são: não possuem clorofila, a reprodução através de esporos é comum em várias espécies de fungos, podem se reproduzir de forma sexuada ou assexuada, a nutrição dos fungos é heterotrófica, ou seja, os nutrientes que necessitam para viver são obtidos através de matéria orgânica. Porém, os fungos não ingerem as matérias orgânicas, mas obtêm seus nutrientes através de um processo de absorção. A hidrólise da matéria orgânica ocorre fora do fungo, ou seja, eles liberam enzimas que hidrolizam a matéria orgânica e só depois deste processo os nutrientes são absorvidos. Desenvolvem-se, principalmente, em locais com grande presença de material orgânico e umidade com preferência pela escassez de luminosidade, possuem a capacidade de armazenar o glicogênio, um polissacarídeo usado como principal reserva energética.

Alguns fungos podem estabelecer associações com outros organismos, como algas e raízes, denominadas, respectivamente, líquens e micorrizas. Estudos sugerem que estas associações foram muito importantes para a conquista do ambiente terrestre pelas plantas, pois na época das primeiras colonizações os solos eram muito pobres, então os fungos ajudavam na

absorção de nutrientes como carbono, fósforo, nitrogênio, entre outros (BOSWELL; DAVIDSON, 2003; RAVEN, 2014).

Na Fig. 6 estão representados exemplos comuns de fungos encontrados na natureza com seus respectivos nomes.

Figura 6 – Exemplos de fungos frequentemente encontrados na natureza e no ambiente doméstico.



(a) *Boletus edulis*.

(b) *Pycnoporus sanguineus*.

(c) *Penicillium solitum*.

(d) Líquen: Ascomicetos com Cianobactérias.

Fonte: Imagens de domínio público (PIXABAY, 2018)

3.1 MORFOLOGIA

Alguns fungos existem na forma de leveduras, e outros na forma de filamentos sendo pluricelulares. A estrutura que representa o corpo ou a colônia dos fungos é denominada de micélio fúngico. O micélio é formado pelo conjunto de filamentos, denominados de hifas, o qual pode funcionar como estrutura de sustentação, reprodução e de absorção dos nutrientes. As hifas são estruturas fúngicas individuais semelhantes a "tubos" microscópicos (CORADIN, 2010), responsáveis pelo transporte de nutrientes e crescimento fúngico e crescem com alongamento nas extremidades e surgimento de novas extremidades por ramificação. Certos fungos, muito conhecidos como cogumelos, possuem estruturas reprodutoras chamadas de corpos frutíferos ou corpos de frutificação, que ficam acima do solo. A parede celular das hifas é composta de quitina. Algumas espécies de fungos podem alternar entre leveduras e hifas.

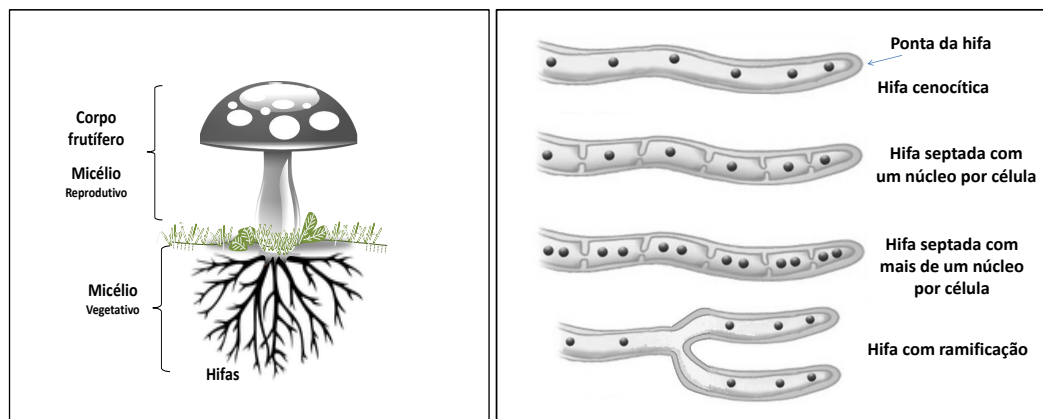
A estrutura do micélio pode ser dos seguintes tipos:

1. Micélio vegetativo: estrutura que funciona como elemento de sustentação e absorção de nutrientes, pode ser penetrativo ou superficial;
2. Micélio aéreo: micélio que se projeta na superfície e cresce acima do meio de cultivo;

3. Micélio reprodutivo: é uma diferenciação do micélio aéreo que sustenta as estruturas reprodutivas, onde são produzidos os esporos.

A Fig. 7a mostra a estrutura básica de um fungo do tipo basidiomiceto conhecido como cogumelo. A Fig. 7b mostra a morfologia das hifas. As hifas do tipo cenocíticas possuem um citoplasma plurinucleado, encontrada em fungos plasmodiais. Alguns fungos mais complexos apresentam hifas septadas (divididas), onde o espaço entre cada septo pode ter um (monocariótica) ou dois núcleos (dicariótica). Nesta figura tem-se também um exemplo de hifa cenocítica ramificada.

Figura 7 – Estrutura básica dos fungos do tipo cogumelo e morfologia das hifas.



(a) Cogumelo

(b) Tipos de hifas e ramificação

Fonte: Imagens de domínio público (PIXABAY, 2018).

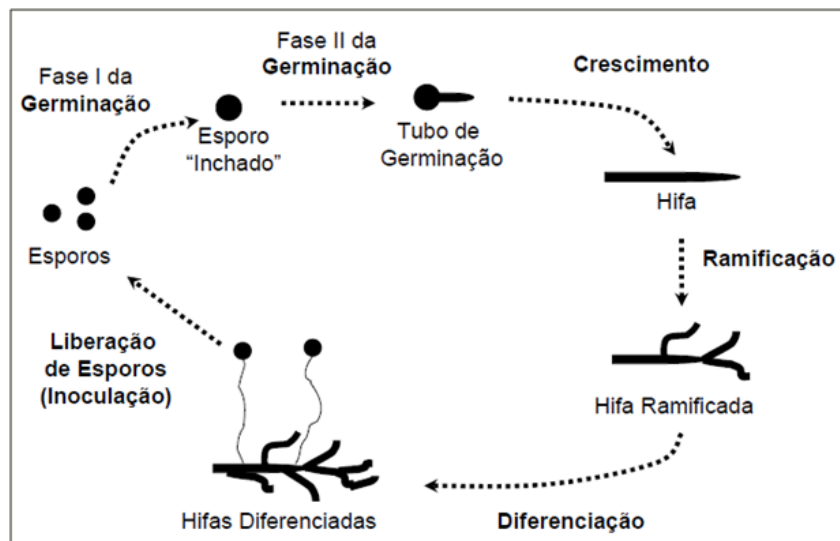
3.2 CRESCIMENTO DOS FUNGOS MICELIAIS

Os mecanismos de crescimento dos fungos miceliais podem ser divididos em quatro estágios principais: germinação do esporo, crescimento da hifa, ramificação e, finalmente, diferenciação fúngica, conforme a Fig. 8.

A germinação do esporo inicia-se com processos metabólicos, resultando num aumento na taxa de respiração e na síntese de proteínas e ácidos nucleicos a partir das reservas de nutriente do próprio esporo. Neste início o esporo fica inchado. O material produzido resulta na formação de um tubo (tubo de germinação) que estende através do crescimento na ponta iniciando a formação da hifa. As hifas podem se ramificar pela derivação das pontas e também ocorrer ramificação subapical, ou seja, antes das pontas, dando prosseguimento à expansão do

micélio, assegurando o aumento da área superficial da colônia, o que presumivelmente aumenta a probabilidade de encontrar e assimilar nutrientes. As ramificações também provocam fusões entre hifas, chamadas de anastomoses, de diferentes locais da mesma colônia para comunicação e troca de nutrientes. Por fim, a diferenciação refere-se ao processo de mudança das hifas. Por conveniência, durante ao amadurecimento da colônia, hifas vegetativas podem mudar para hifas especializadas na reprodução (CORADIN, 2010).

Figura 8 – Fases do crescimento dos fungos miceliais.



Fonte: (CORADIN, 2010).

Em ambiente úmido e rico em matéria orgânica, as hifas desse micélio podem crescer rapidamente. O crescimento das hifas ocorre pelas extremidades, explorando o substrato para obtenção de alimento. Ao crescer sobre áreas pobres em nutrientes alguns fungos (por exemplo, basidiomicetos) formam estruturas lineares compostas ou muitas hifas paralelas (OLSSON, 2001). Em geral, durante a busca por alimento o número de filamentos, ramificações e o material total na rede aumentam ao longo do tempo. O micélio fúngico cresce na medida em que recebe nutrientes, neste caso é uma combinação de dois tipos de biomassa: biomassa móvel e biomassa imóvel (FALCONER *et al.*, 2005), conforme a descrição a seguir:

1. Biomassa móvel – É o material que flui pelos tubos comunicantes das hifas a fim de prover nutrientes para as extremidades do micélio. A biomassa móvel tende a se tornar biomassa imóvel quando e onde for conveniente para o organismo.

2. Biomassa imóvel – É o material que constitui o micélio e a complexa rede de tubos dentro das hifas, através da qual a biomassa móvel poderá fluir. A biomassa imóvel pode estar em um dos dois estados: não isolada e isolada:

- a) Não isolada, que é a biomassa considerada como representante das hifas, capazes de absorção significativa de recursos externos e corresponde, principalmente, às pontas de hifas ativas dentro de uma colônia.
- b) Isolada, que é a biomassa do micélio presente em áreas com pouca ou nenhuma absorção de nutrientes. São áreas do micélio basicamente utilizadas para sustentação.

A evolução da rede fúngica em escala local também é caracterizada por perda seletiva de conexões (por autólise ¹) e das hifas mais fracas. Muitos tipos de micélios fúngicos exibem autólise de partes mais antigas da colônia, especialmente quando crescem em meio pobre em nutrientes (OLSSON, 2001). Assim, as redes de fungos progridem de uma árvore de ramificação radial para uma rede tipo grade (gelosia), através de um processo de fusão e reforço para formar *loops*, remoção seletiva e reciclagem de material redundante (HEATON *et al.*, 2012).

O crescimento fúngico sofre influência por estímulos de fatores internos (autotropismo) e externos (tropismo) bem conhecidos. A direção do crescimento dos fungos exibem uma variedade de respostas em relação à gravidade (gravitropismo ou geotropismo), luz (fototropismo), produtos químicos (quimiotropismo) e alguns outros estímulos externos, incluindo o galvanotropismo (influência da corrente elétrica). Hifas em crescimento parecem ativamente evitar umas às outras, um exemplo de autotropismo negativo (MESKKAUSKAS *et al.*, 2004). Em Moore e Meskauskas (2017) é reforçada a idéia de que as hifas têm a habilidade de detectar a presença de outra hifa, seja em virtude do processo da respiração que reduz a concentração de oxigênio e aumenta o nível de dióxido de carbono ou pela presença de um metabólito secretado.

Outra importante influência externa são os obstáculos que alteram o curso do crescimento e ramificação das pontas das hifas. Diferentes espécies apresentam diferentes comportamentos na presença de obstáculos. Por exemplo, numa colisão, há fungos que simplesmente mudam de direção, é o caso do *Neurospora crassa*, entretanto o *Pycnoporus cinnabarinus* se ramifica longe da ponta principal, ou seja, ramificação subapical (ASENOVA *et al.*, 2016b).

¹ Autólise: destruição de tecido vivo ou morto por enzimas e células do próprio organismo; autodigestão.

3.3 REDES DE FUNGOS

Muitas espécies de fungos formam redes de filamentos, oriundas das extensões das hifas. Desta forma, crescem e se expandem através de regiões deficientes em nutrientes para descobrir novos recursos. Portanto, é lógico intuir que existe algum tipo de processo de transporte para mover os recursos necessários para o crescimento das hifas (HEATON *et al.*, 2012).

Ao contrário de outras redes de transporte biológico, tais como plantas ou sistemas vasculares em animais, a rede formada por esses organismos não é parte do organismo, é o próprio organismo. Essas redes se desenvolvem à medida que o organismo se expande em um ambiente irregular à procura de novos recursos e deve transportar nutrientes entre regiões de produção e consumo separadas espacialmente e também manter a integridade da rede em face à predação ou dano aleatório.

As redes fúngicas são construídas por processos de desenvolvimento iterativos locais em vez de planos predeterminados ou controle centralizado. Embora muita atenção tenha sido dedicada ao crescimento das pontas das hifas, os mecanismos responsáveis pela decisão de formar um ramo são desconhecidos (WATTERS *et al.*, 2000; CORADIN, 2010). O crescimento envolvendo sobreprodução de enlaces e nós, seguido de poda seletiva de alguns enlaces e reforço de outros lembra a teoria de evolução darwiniana em que os descendentes mais aptos prevalecem pela seleção natural. Desta forma, é concebível que a identificação das regras desse processo permita o desenvolvimento de uma genérica "Otimização de colônia de fungos" (HEATON *et al.*, 2012), algoritmo semelhante aos que evoluíram a partir do estudo de padrões de comportamento de colônias de formigas (DORIGO; STÜTZLE, 2004) ou com base no comportamento do *P. polycephalum*. Estudos recentes do *P. polycephalum* investigam a capacidade deste organismo em resolver problemas como labirintos (NAKAGAKI *et al.*, 2000), antecipar eventos (SAIGUSA *et al.*, 2008) e simular redes de transportes eficientes (TERO *et al.*, 2010). Nesses casos, várias hifas agem de forma colaborativa e inteligente, semelhante ao comportamento de organismos individuais ou superorganismos como abelhas ou colônias de formigas.

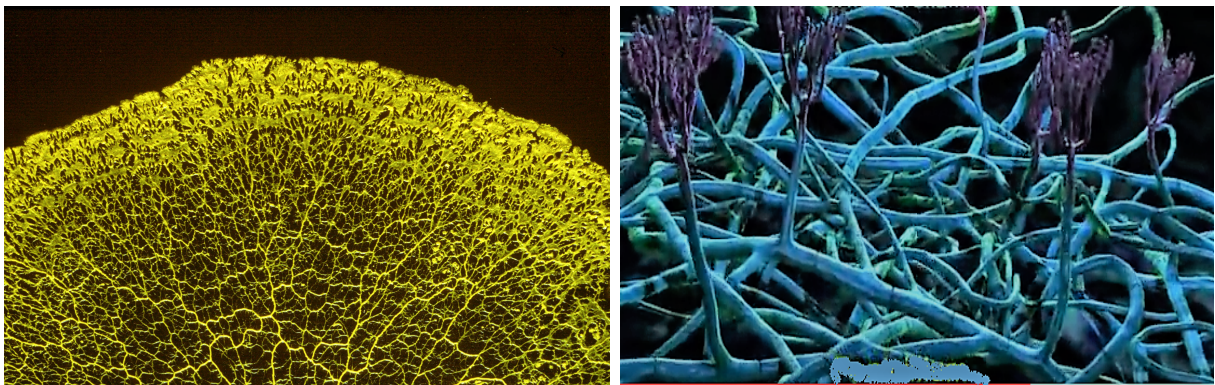
O comportamento dos fungos pela sobrevivência propõe haver uma "inteligência" fúngica suficientemente complexa e capaz de controle para auto-organização de redes adaptativas que pode extrapolar para outros domínios e inspirar na criação de eficientes algoritmos de espaço de busca (ASENOVA *et al.*, 2016b) e protocolos de roteamento (HAO *et al.*, 2009). Muito embora, tendo-se o conceito de que inteligência é uma função centralizada, essa proposição

parece contradizer a afirmação anterior de que as redes fúngicas desenvolvem-se sem controle centralizado e seu crescimento é uma decisão da ponta da hifa com possíveis influências de tropismo.

Espécies de fungos miceliais, por exemplo, *Armillaria ostoyae*, formam as mais amplas redes biológicas até agora caracterizadas, popularmente conhecidas como *Wood Wide Web*. Em botânica, *Wood World Web* (em português, traduz-se por "teia mundial madeireira" ou "rede subterrânea florestal" ou "internet natural da Terra"), é o processo onde árvores de diferentes espécies são unidas umas às outras através de uma *internet* de fungos que liga as suas raízes. Raízes e fungos se combinam para formar o que é chamado de micorriza, cujo crescimento favorece a conexão de plantas individuais por uma complexa e colaborativa rede subterrânea de hifas (FLEMING, 2014; YONG, 2016).

Na Fig. 9 tem-se exemplos de redes dos fungos *P. polycephalum* e *Pinicillium*. Observa-se dois modelos diferentes, mas que têm em comum a expansão e a ramificação dos filamentos para ocupar espaço em busca de nutrientes.

Figura 9 – Exemplos de estruturas de redes de dois fungos: *P. polycephalum* e *Pinicillium*.



(a) *P. polycephalum*

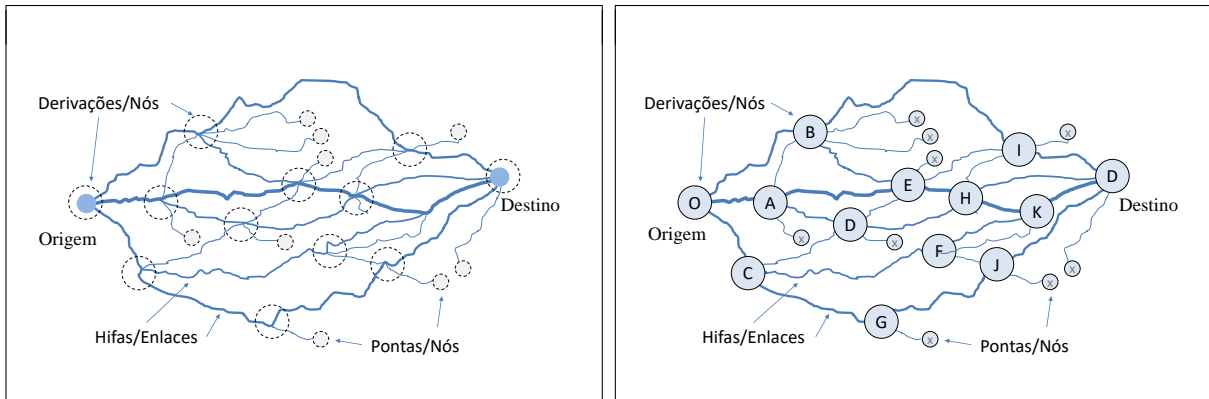
(b) *Pinicillium*

Fonte: Imagens de domínio público (PIXABAY, 2018)

O conjunto de filamentos e interconexões resultantes do crescimento do fungo formam a estrutura do micélio, cujas redes resultantes funcionam para responder fortemente às condições ambientais locais. Neste trabalho de pesquisa, cujo objetivo é buscar inspiração nos fungos, é feita uma equiparação direta da estrutura do micélio com uma rede de comunicação sem fio, de tal maneira que filamentos (ou hifas) podem ser comparados à enlaces, as pontas e as ramificações das hifas são nós de roteamento.

A Fig. 10 mostra a equiparação entre a estrutura do micélio com a estrutura da rede de comunicação.

Figura 10 – Equiparação direta da estrutura do micélio com a estrutura da rede de comunicação.



(a) Estrutura do micélio. As pontas e derivação das hifas são demarcadas como nós terminais ou de roteamento na rede de comunicação. (b) Estrutura da rede de comunicação sobreposta ao micélio após a equiparação.

Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Mecanismo de transporte de nutrientes

À medida que as redes fúngicas se expandem no espaço e podem ser comparadas às redes de comunicação, torna-se importante conhecer as medidas da distância euclidiana entre os nós e compará-las com o caminho mais curto entre dois nós da rede, para fornecer um padrão de rota. De acordo com Heaton *et al.* (2012), boas redes fúngicas devem ser eficientes no sentido de que os caminhos de cada nó para o centro devem ser relativamente curtos e a soma dos comprimentos de todos os links na rede devem ser baixos, então a rede é considerada econômica para construir e manter.

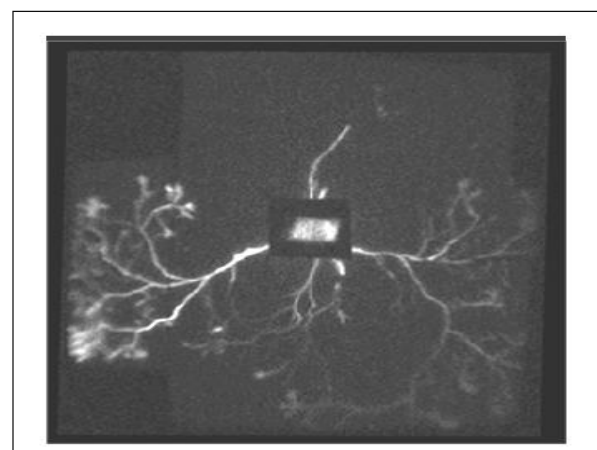
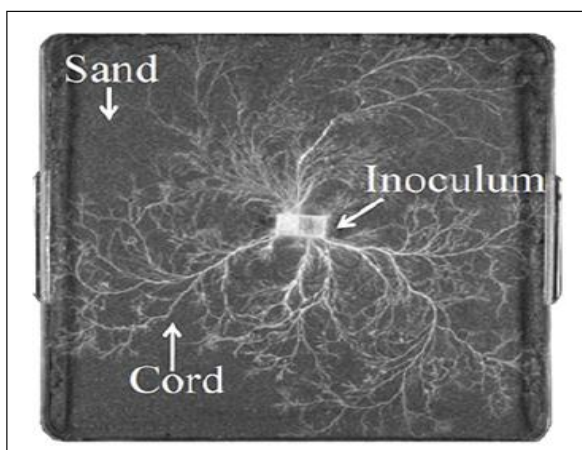
Os fungos necessitam de fontes de nutrientes para lhes fornecer energia para manutenção celular e também fornecer a matéria-prima para a construção das células (CORADIN, 2010). A absorção de nutrientes, a partir das fontes das partículas onde estão se desenvolvendo, e os mecanismos de transporte por translocação fazem das redes de fungos sistemas que evoluíram para maximizar a eficiência do transporte. Pesquisas com o fungo *Rhizoctonia solani* em Olsson (1995), mostram que pelo menos dois mecanismos de translocação são responsáveis pela realocação de nutrientes: difusão simples, e o movimento ativo de metabólitos intracelulares de regiões de excesso local para regiões de escassez local. A difusão simples vai do mais

concentrado para o menos concentrado, mas o movimento ativo não precisa seguir esta direção. Enquanto a absorção direta e a difusão de nutrientes no interior das hifas podem ser suficientes para manter o crescimento local de curto alcance quando os recursos são abundantes (OLSSON, 2001), a translocação de longa distância é necessária para fornecer nutrientes a uma velocidade suficiente para o crescimento das extremidades, particularmente em fungos que formam colônias extensas e, portanto, são muito grandes para distribuir nutrientes através da difusão apenas (DAVIDSON, 1998; BOSWELL; DAVIDSON, 2003). É comum que partes do micélio deixem de estar envolvidas na translocação à medida que novas hifas são criadas.

Para alguns tipos de fungos, a arquitetura da rede se desenvolve mais além com a formação de estruturas de alta condutividade especializada, denominados cordões ou rizomorfos (LINDAHL; OLSSON, 2004; CAIRNEY, 2005). A maioria das redes de fungos contém *loops*, e análises teóricas indicam que, se uma rede for atacada ou sujeita a cargas flutuantes, a forma ideal não é mais uma árvore de ramificação, mas a que conterà laços, pois é bem sabido que os enlaces redundantes podem conferir um certo grau de robustez a uma rede de transporte.

Na Fig. 11 é mostrado um exemplo de translocação de nutrientes dentro de um micélio de qualquer fungo, a partir do centro até as pontas das hifas.

Figura 11 – Translocação de nutrientes dentro de um micélio.



- (a) Estrutura do micélio original e o ponto na região central para a inoculação do composto C^{14} – AIB. (b) Imagem do detector de cintilação mostrando a região do micélio por onde fluiu o composto C^{14} – AIB, após 32 horas da inoculação.

Fonte: (HEATON *et al.*, 2012)

Este experimento foi realizado por Heaton *et al.* (2012) em redes do fungo *Phanerochaete velutina*. Observa-se o movimento de nutrientes pelo contraste gerado após

a inoculação do composto C^{14} – Amino Isobutirato (C^{14} – AIB). As imagens foram obtidas por um detector de cintilação por fóton-contagem (câmara de fóton-contagem com discriminação espectral e espacial para testes biológicos).

As imagens da Fig. 11 mostram o experimento de translocação em dois momentos: (a) uma rede micelial original e completa, fotografada imediatamente antes da inoculação do C^{14} – AIB. A inoculação foi feita na região central do micélio na expectativa que o composto pudesse fluir por diversos caminhos alternativos; (b) imagem da cintilação por contagem de fóton da distribuição do C^{14} – AIB integrada ao longo de 32 horas mostra os caminhos por onde fluiu o composto. O brilho da imagem reflete o número total de fótons emitidos de cada região e, portanto, a parte da rede que conduziu o fluxo de aminoácido, mostrando um exemplo de translocação de longa distância, cuja origem é o inóculo e o destino as extremidades das hifas.

A maioria dos fenômenos relacionados aos fungos podem ser incorporados a modelos matemáticos de simulação (BARTINICKI-GARCIA *et al.*, 1989) (Reynaga-Peña *et al.*, 1997) (BOSWELL; DAVIDSON, 2003) (CORADIN, 2010). Em Davidson (1998), por exemplo, é apresentado um modelo que permite testar a hipótese de que os micélios reagem ao seu ambiente de maneira global. Neste modelo considera-se o micélio fúngico como uma distribuição contínua de biomassa cuja interação com o seu meio ocorre através do transporte de nutrientes e água mediante dois mecanismos específicos que são centrais para a distribuição macroscópica da biomassa: absorção de nutrientes em excesso das necessidades locais e subsequente redistribuição interna (translocação) desse excesso.

Outro exemplo de modelo matemático de crescimento de hifas e experimentos com visualizações de computador é mostrado em Meskkauskas *et al.* (2004). Neste modelo o tropismo e regulação de ramificação são implementados usando o conceito de campo. Supõe-se que cada ponto do micélio gera dois tipos de campo. O primeiro tipo é usado para evitar a proximidade entre hifas de curta distância e regular as ramificações, este tem uma abordagem local e é gerado por conjuntos de pontos adjacentes em uma seção considerada. O segundo tipo de campo considera a interação de longo alcance, permite simular a influência de objetos distantes do local de crescimento, simulando por exemplo, o efeito causado por fontes de recursos remotas liberando substâncias químicas que se transformam em uma forma ativa enquanto se difundem pelo micélio, de modo que as fontes remotas podem ter um impacto mais forte do que o ambiente imediato.

3.3.2 Modelo de evolução espaço-temporal para fungos

Em Falconer *et al.* (2005) é apresentado um modelo matemático para auxiliar na compreensão da dinâmica espaço-temporal da absorção de nutrientes, conversão de massa móvel em massa imóvel para a construção do micélio e a reciclagem de recursos internos em colônia de fungos. Este modelo fornece uma visão genérica da dinâmica do crescimento do micélio fúngico, para qualquer tipo de fungo, de acordo com os ajustes dos parâmetros de configuração. O processo de reciclagem permite que massas imóveis ociosas sejam remobilizadas e reaproveitadas em outras partes do micélio. Neste modelo, o fenótipo² é resultante da interação entre processos locais simples que governam a captação e a reciclagem de recursos internos, e processos macroscópicos associados a seu transporte.

Este foi o primeiro modelo a incorporar os processos associados à reciclagem e transporte de biomassa que são fundamentais para organismos miceliais. O modelo explora a gama de formas de crescimento resultantes de diferentes conjuntos de configurações dos processos associados a reciclagem de biomassa, e para diferentes contextos ambientais.

Nas Eqs. 13a a 14d, tem-se o modelo matemático de Falconer *et al.* (2005) relacionando os processos de absorção, conversão de biomassa móvel em imóvel e reciclagem de biomassa imóvel. Sejam as seguintes equações:

$$D_n = \begin{cases} 10^{-7} D_b & n > n_0, \\ D_b & n < n_0, \end{cases} \quad (13a)$$

onde: a variável D_n e a constante D_b são coeficientes de difusão de biomassa móvel e imóvel não-isolada, respectivamente, n é a concentração local de biomassa móvel e n_0 é uma constante que representa o limiar de concentração de biomassa móvel,

$$\pi = \frac{n}{b_n + b_i}, \quad (13b)$$

onde: π indica a relação de concentração entre biomassas móvel e imóvel, b_n e b_i representam as concentrações de biomassa imóvel não-isolada e isolada, respectivamente,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_n \frac{\partial n}{\partial x} - (\alpha_n \pi^\theta - \rho_n \pi) b_n - (\alpha_i \pi^\theta - \rho_i \pi) b_i + (\lambda_1 b_n + \lambda_2 b_i) s, \quad (14a)$$

² Fenótipo é a reunião das características particulares ao indivíduo que podem ser visíveis ou detectáveis; manifestação perceptível do genótipo (RAVEN, 2014).

onde: λ_1 e λ_2 são taxas de absorção específicas para biomassa não-isolada e isolada, respectivamente. O valor s indica a concentração de nutrientes no substrato. Os parâmetros α e ρ representam as taxas de conversão de biomassa móvel em imóvel e taxa de reciclagem de biomassa imóvel em móvel, respectivamente. Os caracteres subscritos n e i referem-se às regiões que compreendem biomassa imóvel não isolada e isolada, respectivamente. O parâmetro θ é uma constante que regula a sensibilidade da imobilização de acordo com a concentração de massa móvel,

$$\frac{\partial b_n}{\partial t} = (1 - \xi) \left[\frac{\partial}{\partial x} D_b \frac{\partial b_n}{\partial x} + \gamma(\alpha_n \pi^\theta - \rho_n \pi) b_n \right], \quad (14b)$$

onde: o parâmetro γ denota a eficiência, tanto do processo de conversão de biomassa móvel/imóvel como do processo de reciclagem de biomassa imóvel/móvel, de acordo com a relação de concentração π , e ξ denota a taxa de conversão de biomassa imóvel não-isolada em isolada,

$$\frac{\partial b_i}{\partial t} = \xi \left[\frac{\partial}{\partial x} D_b \frac{\partial b_n}{\partial x} + \gamma(\alpha_n \pi^\theta - \rho_n \pi) b_n \right] + \gamma(\alpha_i \pi^\theta - \rho_i \pi) b_i, \quad (14c)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \omega(s_m - s) - (\lambda_1 b_n + \lambda_2 b_i) s, \quad (14d)$$

onde: ω é a velocidade de reposição do substrato e s_m é o valor máximo da concentração.

A biomassa móvel é produzida a uma velocidade proporcional à absorção local, difundindo-se na colônia e variando os níveis de concentração. A Eq. 14a mostra a taxa de produção de biomassa móvel e a dinâmica da difusão espacial e as relações de conversão de massa móvel para imóvel e a reciclagem de biomassa imóvel,

A Eq. 14b mostra que a taxa de produção de biomassa imóvel não-isolada é proporcional à taxa de difusão e à taxa de biomassa sobre a superfície, e à diferença entre as taxa de conversão de biomassa móvel e da reciclagem de biomassa imóvel (i.e., $\alpha_n \pi^\theta - \rho_n \pi$), neste caso, compreendendo apenas regiões de biomassa não-isolada, visto que biomassas isoladas não se convertem em biomassas não-isoladas.

A Eq. 14c representa a dinâmica de produção de biomassa imóvel isolada. A taxa de produção também é proporcional à taxa de difusão e à taxa de extensão de biomassa sobre a superfície, e à diferença entre as velocidades de conversão de biomassa móvel e da reciclagem de biomassa imóvel, considerando-se as regiões de biomassa isolada e não-isolada.

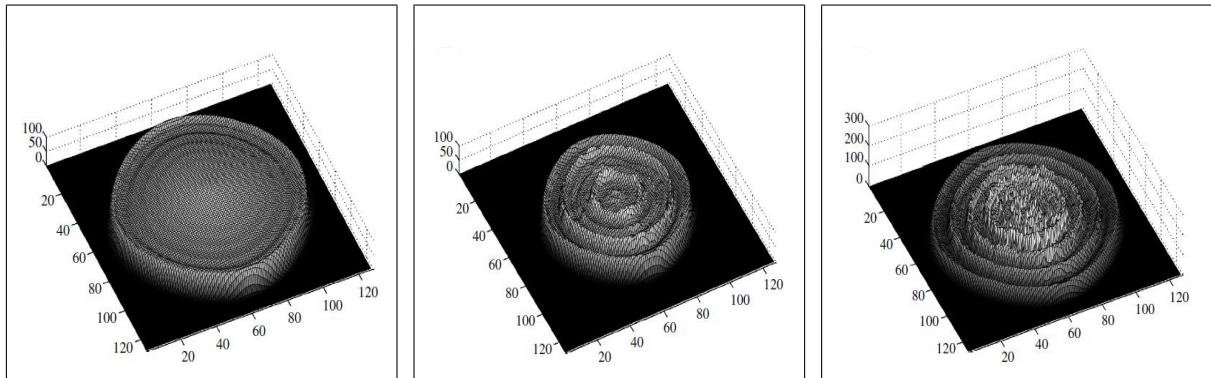
A Eq. 14d mostra a dinâmica da concentração de nutrientes do substrato externo. Observa-se que a concentração do substrato diminui conforme aumento das concentrações de biomassas imóveis, o que implica no consumo de biomassa móvel para a formação do micélio fúngico (b_n e b_i).

A Fig. 12 (a, b e c) mostra o impacto na morfologia do fungo para diferentes valores de α_n e ρ_n , mantendo-se fixo o conjunto de parâmetros: $\alpha_i = 0,5$, $\rho_i = 0,5$, $\gamma_1 = 1,0$, $\gamma_2 = 0,95$, $\theta = 3,0$, $\lambda_1 = 0,95$, $\lambda_2 = 0,01$, $D_b = 10$, $D_{nmax} = 10$, $\zeta = 0.01$, $\omega = 0.1$, $tempo = 15 s$. Na Fig. 12a com $\alpha_n = 0,6$, $\rho_n = 0,4$, a taxa de conversão de biomassa móvel para imóvel (imobilização) é maior que a taxa de conversão de biomassa imóvel para móvel (mobilização). Desta forma, surge o formato anéis concêntricos superficiais devido ao ganho de biomassa reforçando a estrutura. Na Fig. 12b com $\alpha_n = 0,5$, $\rho_n = 0,5$, surgem os anéis concêntricos bem definidos e as agregações de hifas devido à diminuição da taxa de imobilização ao aumento da taxa de mobilização. Isto significa que partes da região interna da estrutura perde biomassa por reciclagem, formando a textura na superfície do platô em forma dos anéis e agregações. Na Fig. 12c com $\alpha_n = 0,2$, $\rho_n = 0,8$, os anéis concêntricos e as agregações de hifas se intensificam devido à reciclagem de biomassa, em particular uma alta taxa de mobilização.

3.4 ALGORITMOS BIOINSPIRADOS EM REDES DE FUNGOS

A habilidade dos fungos para a exploração de ambientes na busca de nutrientes e a capacidade de formar e manter redes adaptativas estão atraindo a atenção de pesquisadores para novos paradigmas na construção de algoritmos de busca espacial e roteamento em redes de comunicação, respectivamente. Nesta seção considera-se como as habilidades das colônia de fungos podem inspirar na criação de algoritmos funcionais para solução de problemas.

Figura 12 – Crescimento para diferentes valores de α_n e ρ_n do modelo de simulação em Falconer *et al.* (2005).



(a) Com $\alpha_n = 0,6$, $\rho_n = 0,4$, anéis concêntricos superficiais. (b) Com $\alpha_n = 0,5$, $\rho_n = 0,5$, surgem anéis concêntricos bem definidos e agregações de hifas. (c) Com $\alpha_n = 0,2$, $\rho_n = 0,8$, adição de anéis concêntricos e difusão das agregações de hifas.

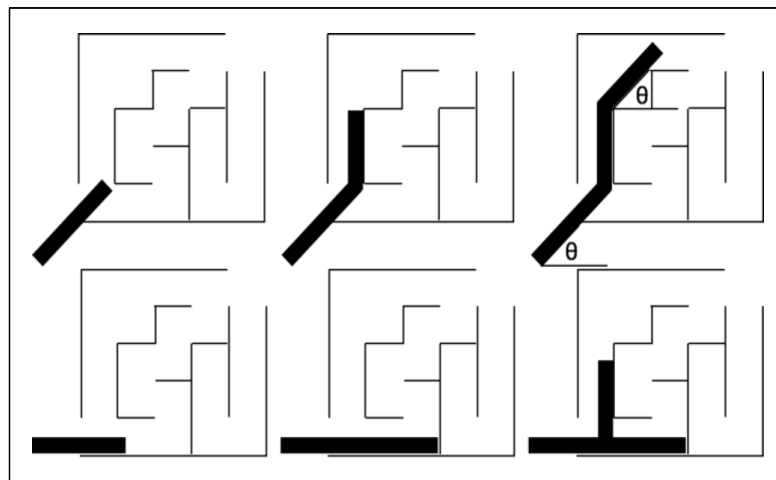
Fonte: (FALCONER *et al.*, 2005).

3.4.1 Algoritmos de Busca Espacial

A combinação de crescimento e ramificação da extremidade da hifa permite que algumas espécies específicas de fungos explorem ambientes físicos complexos usando uma variedade de algoritmos de busca de espaço eficientes (HEATON *et al.*, 2012). Em Hanson *et al.* (2006) é apresentado um algoritmo natural de busca espacial com bons resultados obtido pelo estudo do comportamento de diferentes espécies de fungos basidiomicetos em labirintos confinados de microestruturas, na ordem de $100\mu m$ de diâmetro, atualmente encontradas na tecnologia microfluídica (WHITESIDES, 2006). Este algoritmo natural é composto por uma estrutura principal e dois subalgoritmos denominados DM (*Directional Memory*) e CR (*Collision Response*) que simulam a memória direcional e ramificação como resposta às colisões, respectivamente, que são duas características inspiradas na observação do fungo enquanto se expandia e resolvia o labirinto. Observou-se que labirintos podem ser resolvidos por algumas espécies de fungos, o que varia é a resposta à colisão e o grau de memória. Por exemplo, na Fig. 13 estão representados os comportamentos dos subalgoritmos DM/CR para o fungo *Pycnoporus cinnabarinus* indicando o ponto de ramificação atrás do ponto de colisão. A Fig. 14 mostra o comportamento do *Armillaria mellea* que apresenta uma taxa de ramificação muito baixa. Mas todas essas espécies manifestam diferentes graus de memória direcional (ASENOVA *et al.*, 2016a),(HELD *et al.*, 2011).

O desempenho do algoritmo natural de busca espacial foi testado e comparado com alguns algoritmos clássicos de busca em grafos, tais como o algoritmo do tipo não informado³, DFS (*Depth-First-Search*), e os tipos informados, *A**, *Best First Search*, *Jump Point Search* e Dijkstra. Para medir a eficiência dos algoritmos foram consideradas as métricas: completude, otimalidade e espaço de estado.

Figura 13 – Sequência esquemática do crescimento fúngico. As figuras superiores mostram a Memória Direcional guiando o crescimento para a mesma direção inicial (θ). As inferiores mostram a ramificação induzida pela colisão (ramificação emergindo atrás da ponta principal) sempre que o crescimento é bloqueado por um beco sem saída.



Fonte: (ASENOVA *et al.*, 2016b)

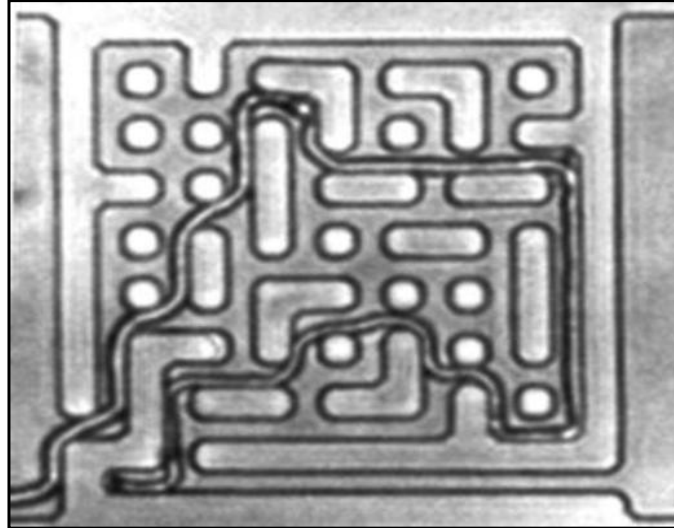
Em geral, o algoritmo de busca fúngico apresentou resultados melhores apenas em relação ao DFS, por exemplo, vantagem de 20 a 40 % maior, dependendo do tamanho do labirinto, mas inferiores aos algoritmos do tipo não informados. Mesmo assim, essas descobertas sugerem que pesquisas com algoritmos naturais de busca de espaço usados por microorganismos são justificadas e promissoras (ASENOVA *et al.*, 2016a; ASENOVA *et al.*, 2016b).

3.4.2 Rede FUNNet

A Rede FUNNet (HAO *et al.*, 2009) é uma proposta bioinspirada em redes fúngicas para resolver problemas de roteamento e gerenciamento em redes de comunicação cabeadas, que sofrem com o crescimento do tamanho da rede, aumento do tráfego e variação da topologia. Até

³ Algoritmos de busca que utilizam o método não informado para executar busca cega, utilizam apenas a definição do problema para encontrar a solução.

Figura 14 – Um labirinto de uma estrutura microfluídica resolvido pela espécie de fungo *A. mellea* que manifesta alto grau de memória direcional e uma taxa de ramificação muito baixa.



Fonte: (ASENOVA *et al.*, 2016b)

a data de realização desta pesquisa, o FUNNet é o único modelo de comunicação bioinspirado em fungos presente na literatura. Desta forma, o FUNNet propõe novas ferramentas e técnicas baseadas na forma de como o fungo cresce, estendendo suas hifas, gerando derivações e se auto-organizando como uma complexa estrutura em rede. Neste protocolo o roteamento é baseado apenas em informações da tabela de roteamento obtidas dos nós de uma vizinhança. Ou seja, cada nó conhece apenas seus vizinhos conectados diretamente pelo enlace de dados.

Como resultado da observação de redes miceliais e suas estruturas dinâmicas, o FUNNet propõe o Quadro 3 que mostra como uma rede de fungos pode representar uma rede de comunicação fazendo-se o mapeamento de processos entre ambas.

3.4.2.1 Analogias entre redes de comunicação e FUNNet

Com base no mapeamento entre redes fúngicas e de comunicação, o trabalho em Hao *et al.* (2009) mostra o significado das analogias e termos relativos a fungos aplicados ao FUNNet, conforme a descrição a seguir:

1. O micélio fúngico representa a topologia da rede de comunicação. A topologia de rede é definida classificando junções (pontos de derivação, anastomoses e fontes de alimento) como nós, e os cordões entre nós como enlaces;

Quadro 3 – Mapeamento entre rede de fungos e rede de comunicação.

Rede de fungos	Rede de comunicação
Hifa	Conexão entre nós (enlaces) ou informações da rede local mantidas por nós
Extremidades das hifas	Nós que recebem e enviam dados ou terminais da rede.
Micélio	Rede inteira ou a tabela de roteamento
Biomassa móvel	Trilha para tráfego de dados e tem um potencial para transferir dentro da biomassa imóvel
Mecanismo de transporte de biomassa móvel	Regras para roteamento de dados
Biomassa imóvel	Capacidade de tráfego ou habilidade dos nós para atrair fluxo de dados
Reciclagem de biomassa	Interação entre o tráfego de dados e a atração do fluxo, destinada a encontrar um padrão de aprendizagem para roteamento de rede
Consumo de biomassa	Redução da atração do tráfego de dados através do tempo
Absorção de nutrientes	Geração de pacotes de dados para envio
Morte de hifas	Desconexão de enlaces

Fonte: (HAO *et al.*, 2009)

2. Cada nó possui os parâmetros associados da biomassa móvel (M) e biomassa imóvel (I). A biomassa móvel deve ser difundida e convertida em biomassa imóvel ao longo de um caminho cujo roteamento foi bem sucedido. A biomassa imóvel representa o peso para atrair novo tráfego de um nó, ou seja, quanto maior a concentração de biomassa em um local, maior será a atratividade de tráfego na sua direção;
3. Quando uma demanda para enviar um pacote de dados é iniciada em uma rede de comunicação, como analogia à rede de fungos, uma quantidade de biomassa móvel será gerada. O sucesso na entrega dos pacotes de dados no destino gera uma mensagem de confirmação que reforça a rota, no fungo equivale à difusão e conversão uniforme da biomassa móvel em biomassa imóvel, ao longo da rota sobre a qual o fluxo transcorreu;
4. A direção de um pacote de dados transferido em uma rede de comunicação está associada a mecanismos de transporte de biomassa móvel em uma rede de fungos;
5. O tráfego de dados sempre irá fluir de uma região de maior densidade de biomassa móvel para uma de menor densidade;

6. A reciclagem de biomassa em uma rede de fungos significa a transformação entre biomassa móvel e biomassa imóvel. Desta forma, haverá diferentes concentrações de massa em diferentes locais da rede. Este conceito é usado em rede de comunicação, tanto na forma de um fator de atração de tráfego como de um indicador de congestionamento. Tendo em vista que pontos de grandes concentrações de biomassa imóvel atraem o tráfego de dados de forma exponencial, elas também podem indicar que um certo limiar de capacidade foi ultrapassado;
7. Em uma rede de fungos, o consumo de biomassa diminui a concentração de biomassa imóvel ao longo do tempo.

3.4.2.2 Roteamento no FUNNet

O processo de seleção de rotas no FUNNet utiliza uma heurística para calcular o próximo salto do pacote de dados, cujo resultado será a direção de maior concentração de biomassa imóvel que implica nos locais com maior capacidade de transporte. Sendo assim, o nó com maior concentração local de biomassa imóvel possui maior atratividade de fluxo de dados.

A Eq. 15 mostra o cálculo da probabilidade $P_{i,n}^d$, que indica a probabilidade de i selecionar um certo vizinho n , como próximo salto, em direção a um destino d . Diretamente conectados à i encontram-se os nós adjacentes que formam a sua vizinhança N_i . Associados diretamente ao nó n tem-se: C_n , T_n e I_n que representam a capacidade, tráfego atual e biomassa imóvel⁴, respectivamente.

$$P_{i,n}^d = \frac{(C_n + I_n - T_n)}{\sum_{j \in N_i} (C_j + I_j - T_j)}, \quad \forall n \in N_i. \quad (15)$$

Segundo o funcionamento do FUNNet, quando um pacote chegar ao destino as seguintes equações são atualizadas:

$$M_k = M_k + \frac{E}{R}, \quad (16a)$$

⁴ Nota-se que, nas formulações do FUNNet, grandezas de naturezas diferentes são diretamente relacionadas. Claramente existe a necessidade de uma normalização das diversas grandezas envolvidas para um correto funcionamento do algoritmo.

$$\lambda = I_k \left[\alpha \left(\frac{M_k + T_k}{I_k} \right)^\theta - \rho \left(\frac{M_k + T_k}{I_k} \right) \right], \quad (16b)$$

$$M_k = M_k - \lambda, \quad (16c)$$

$$I_k = I_k + \lambda, \quad (16d)$$

$$I_k = I_k - K, \quad \text{se } I_k > \epsilon, \quad (16e)$$

onde a Eq. 16a mostra a distribuição de biomassa móvel ao longo de um caminho percorrido pelo fluxo, M_k é a biomassa móvel de cada nó k no caminho percorrido, E é a quantidade de biomassa móvel gerada na origem no momento da geração dos pacotes de dados e R é o número de nós no mesmo caminho percorrido. Na Eq. 16b, λ indica a quantidade de biomassa móvel convertida em biomassa imóvel. As quantidades α , ρ , θ são parâmetros de funcionamento do FUNNet. A Eq. 16c indica o consumo de biomassa móvel, enquanto que a Eq. 16d mostra o aumento de biomassa imóvel. A Eq. 16e representa o controle de biomassa imóvel evitando que ela ultrapasse um limiar e as quantidades K e ϵ são parâmetros de controle.

O conjunto de equações 16a a 16e descreve, portanto, os processos característicos de difusão, reciclagem e consumo de biomassa dos fungos ⁵.

3.4.2.3 Desempenho do FUNNet

Em (HAO *et al.*, 2009) uma simples rede, contendo 30 nós, foi construída para testar a eficácia de FUNNet. O experimento baseou-se em gerar chamadas, em intervalos de tempo regulares, para enviar pacotes de dados de tamanho fixo entre nós de origem e destino selecionados aleatoriamente. Para comparar os resultados com outro protocolo, o experimento também foi executado com o AntNet (CARO; DORIGO, 1999).

O critério adotado para medir a qualidade de roteamento foi a média de saltos de um pacote de dados para chegar ao seu destino. Os valores dos parâmetros utilizados na simulação são: $\alpha = 0,5$, $\rho = 0,5$, $\theta = 5$, $E = 10$, $K = 0,015$. O valor de ϵ não foi citado no artigo.

A Tabela 1 mostra os resultados após a realização de um total de 5000 chamadas.

⁵ Nota-se que a formulação do FUNNet corresponde a uma discretização das equações diferenciais de Falconer *et al.* (2005) para a evolução temporal das massas móvel e imóvel não isolada.

Tabela 1 – Comparação da média de saltos entre FUNNet e AntNet.

	FUNNet	AntNet
Chamadas realizadas	5000	5000
Média de saltos	5,475	5,945

Fonte: (HAO *et al.*, 2009)

De acordo com o resultado, há uma redução do número de saltos em 7,9 % no FUNNet em relação ao AntNet. Este é o único experimento citado no artigo, mas os autores comentam a necessidade de se executar outros testes com diferentes métricas, tais como: atraso total de transmissão, tempo de busca e resposta à mudança da rede.

4 PROPOSTA DO PROTOCOLO PARA MANETS BASEADO EM FUNGOS

Os desafios mais importantes a serem tratados em MANETs estão relacionados à mobilidade e capacidade limitada da bateria dos nós. A mobilidade dos nós juntamente com as aplicações emergentes resultam em novos problemas que demandam soluções inovadoras de tecnologia. Buscar soluções observando a natureza por si só já traz grande motivação, e inspiração e mais ainda quando as pesquisas referem-se a seres ainda tão misteriosos quanto os fungos. As redes de fungos demonstram grande capacidade de sobrevivência, resiliência e adaptação, mesmo em ambientes hostis. O modo e a eficácia como estes seres se comportam podem orientar o desenvolvimento de processos e sistemas em outras áreas como, por exemplo, redes de comunicação. O desenvolvimento do protocolo HyphaNet veio da inspiração no comportamento de fungos. Embora a ideia de se utilizar fungos como inspiração para roteamento de redes tenha sido publicada inicialmente no trabalho de Hao *et al.* (2009), mas com foco em redes cabeadas e não MANETs, sempre há espaço para inovação e novas interpretações sobre o tema. Neste caso, a inovação está em implementar do conceito de otimização por colônia de fungos em um novo protocolo para roteamento em MANETs.

4.1 PROTOCOLO HYPHANET

O HyphaNet é uma proposta de protocolo de roteamento para MANETs bioinspirado no comportamento de colônia de fungos e baseado no algoritmo FUNNet. O protocolo HyphaNet tem o objetivo de resolver problemas de roteamento e gerenciamento em redes dinâmicas, cuja mobilidade e a variação da topologia são desafios para garantir a performance do tráfego de dados para várias aplicações.

De modo semelhante aos protocolos bioinspirados presentes na literatura, por exemplo, ACO, ABC, entre outros, o HyphaNet apresenta um modelo de comunicação para operar em redes móveis *ad hoc* sobre a arquitetura TCP/IP com um conjunto de protocolos de comunicação com novas particularidades bioinspiradas na dinâmica de sobrevivência das redes de fungos e uma nova heurística para o cálculo das probabilidades no processo de seleção de rotas. No HyphaNet o roteamento é do tipo reativo (*on-demand*) e opera com múltiplas rotas (*multipath*) e possui os seguintes mecanismos básicos de operação: descoberta de rotas, manutenção de rotas e reparo de rotas.

4.2 FORMATOS DE DADOS DO HYPHANET

Como em qualquer protocolo para redes móveis, o HyphaNet precisa desempenhar as funções básicas de descoberta, manutenção e reparo de rotas, cujo sucesso depende da organização e troca de mensagens entre os dispositivos da rede. As mensagens que compõem o protocolo HyphaNet são capazes de manter o sistema funcionando de modo eficaz, na construção e manutenção de rotas, na reparação de falhas de conexão e divulgação de erros de conectividade, e estão descritas no Quadro 4. Os formatos das mensagens estão descritos no Apêndice A.

Quadro 4 – Tipos de mensagens HyphaNet.

Tipo	Mensagem HyphaNet	Descrição
0	HELLO	<i>Hello</i> . Divulgação periódica de informações entre nós vizinhos.
1	RREQUEST	<i>Route Request</i> . Descoberta de rota a partir do nó de origem.
2	RREPLY	<i>Route Reply</i> . Confirmação de descoberta de rota, gerada pelo nó de destino.
3	RERROR	<i>Route Error</i> . Mensagem de erro gerada pelo nó que identifica uma falha de enlace após tentativa frustrada de reparação.
4	RREPAIR-REQ	<i>Route Repair Request</i> . Solicitação de reparo de rota iniciada pelo nó que identifica falha de enlace.
5	RREPAIR-REP	<i>Route Repair Reply</i> . Confirmação de reparação de um enlace com falha.
6	HYPHA-ACK	<i>Hypha acknowledgment</i> . Confirmação da entrega de dados e distribuição de biomassa móvel.

Fonte: Autoria própria.

4.3 MECANISMO DE DESCOBERTA DE ROTAS

O mecanismo de descoberta de rotas no HyphaNet é reativo. O nó de origem s inicia o processo de descoberta quando possui dados para envio e não possui rota disponível para o destino d . Isto pode acontecer se o destino for previamente desconhecido para o nó de origem ou se uma rota válida para o destino expirar ou se está marcada como inválida. Neste processo, a origem envia um pacote de controle do tipo *solicitação de rota (RREQUEST)*, em difusão, pela rede até encontrar o destino. Uma vez encontrado, o destino envia um pacote de controle do tipo *confirmação de rota (RREPLY)* à origem, em *unicast*, para confirmar pelo menos uma rota

funcional entre os terminais de origem e destino. Durante os procedimentos de descoberta, os nós intermediários que recebem RREQUESTs gravam as rotas para o nó de origem enquanto os nós intermediários que recebem RREPLYs gravam as rotas para o nó de destino.

Depois de estabelecidas as rotas, pode acontecer que algumas sejam mais utilizadas que outras, por serem mais atraentes no processo de seleção. Desta forma, apenas as rotas que recebem tráfego de dados são atualizadas e permanecem ativas, as demais, após um período de tempo, são automaticamente deletadas por um mecanismo de reciclagem periódico que detecta rotas inativas.

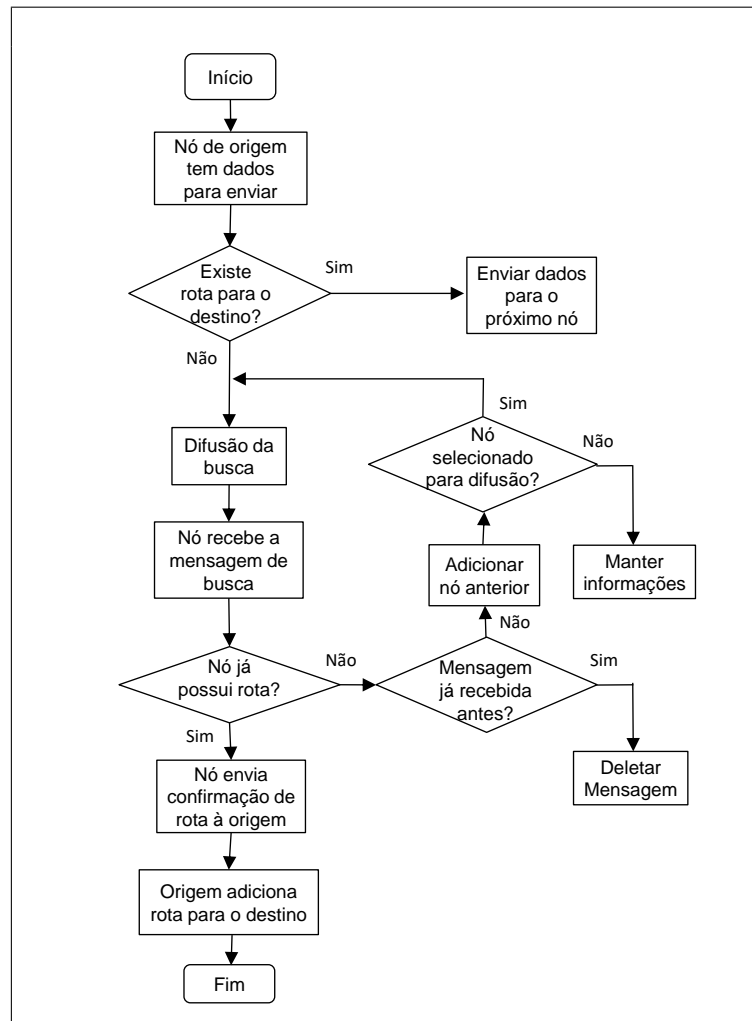
Em uma analogia com as redes de fungos, um esporo ao germinar inicia sua busca por alimentos criando uma rede de hifas, com pontos de ramificação e eventuais anastomoses, com a estratégia de cobrir a maior área possível e atingir as fontes de nutrientes. Enquanto se estendem, a partir da origem, as hifas formam uma trilha orgânica com seu próprio material vivo para operar como caminho bidirecional no transporte de nutrientes. As formações que obtêm sucesso nesta busca se fortificam e se tornam parte da estrutura que perdura no micélio. Entretanto, as partes sem função são reabsorvidas pelo restante do micélio e desaparecem.

Na Fig. 15 tem-se um fluxograma representativo da fase de descoberta de rotas.

4.3.1 Mensagens de Solicitação de Rota

A mensagem de solicitação de rota (RREQUEST) tem a função de descoberta de rotas entre origem e destino na ausência de informações de rotas disponíveis na tabela de rotas. Uma RREQUEST é gerada pelo nó de origem e seus campos de informação são preenchidos e enviada por difusão pela rede, saltando de nó em nó até atingirem o objetivo. O campo "número de sequência" (*SN*) identifica o par origem-destino e permanece sempre o mesmo em todos os nós intermediários até o destino e serve para identificar uma entrada específica na tabela de rotas com um conjunto específico de dados: número de saltos, origem, destino, nó anterior. Cada nó que recebe uma RREQUEST, após processá-la, aprende uma rota reversa em direção à origem criando sua própria entrada na tabela de rotas, em seguida incrementa o número de saltos (*nSaltos*) e define o identificador do caminho (*idCaminho*), depois a retransmite para frente aos seus vizinhos. Desta forma, quando a RREQUEST chegar ao destino, um caminho de retorno estará pronto para direcionar uma mensagem RREPLY. Neste processo geralmente resulta o caminho mais curto descoberto, mas não necessariamente é o caminho mais curto da rede.

Figura 15 – Fluxograma da fase de busca de rotas.



Fonte: Autoria própria.

Toda mensagem RREQUEST lançada na rede aguarda um tempo limite T_{RR} para receber a respectiva RREPLY com a confirmação da nova rota descoberta, caso contrário uma nova RREQUEST será gerada com novo número de sequência e enviada na rede. Pode ocorrer a ausência da mensagem RREPLY por diversos motivos, por exemplo: falhas de enlaces devido ao movimento dos nós durante o retorno da mensagem, atraso ou falha de processamento nos nós. O parâmetro NUM_{RR} limita o número tentativas em que a origem retransmite a mensagem RREQUEST por limite de tempo esgotado.

Novas mensagens RREQUEST também podem ser geradas pela origem na presença de mensagens RERROR. Isso pode ocorrer enquanto uma RREQUEST trafega na rede e acontece falhas de enlace que tornam inacessível o caminho até o destino, neste caso o nó que não consegue encaminhar a solicitação envia uma RERROR para a origem.

Para dar suporte a diversas rotas (*multipath*), a origem opera com múltiplas sessões de gerenciamento de mensagens RREQUEST. O parâmetro NUM_{SES} define o número de sessões. As sessões são iniciadas pela origem e tem uma identificação única e incorpora todos os eventos de envio e recebimento das mensagens de controle, principalmente a função de controlar o envio das RREQUESTs e o recebimento das RREPLYs dentro dos limites de tentativas NUM_{RR} e dos limites de tempos T_{RR} . Cada sessão permite o rastreamento de informações de descoberta de rotas a partir do número de sequência SN armazenado nos nós nas rotas percorridas pelas mensagens de controle. Nas sessões de descoberta de rotas, o protocolo HyphaNet tem a rotina de testar os nós da vizinhança antes de enviar uma nova mensagem para saber se eles já receberam alguma solicitação anterior vinculados àquela rota em questão, ou seja, se há algum SN armazenado indicando que este nó já foi utilizado naquela rota, assim as mensagens RREQUESTs são incentivadas a evitar rotas já utilizadas em favor de áreas distintas da topologia afim de se obter diferentes rotas alternativas para o tráfego de dados.

4.3.1.1 Controle das Mensagens de Solicitação de Rota

Na Sec. 2.2, tem-se diversos exemplos de protocolos para MANETs, muitos deles executam o processo de descoberta de rotas utilizando a difusão de mensagens pela rede, por exemplo, AODV e AntHocNet, entre outros. O método da difusão em si gera um alto *overhead*, o que não é desejável porque reduz o desempenho do sistema, principalmente em situações onde a rede tem recursos escassos de banda e energia. Para tanto, o HyphaNet adota um método para redução da difusão de pacotes RREQUEST semelhante ao apresentado em Correia e Vazão (2010). Neste método, a cada passo no processo de busca, somente um nó é selecionado como propagador, ao contrário do tradicional processo em que todos os nós, automaticamente, retransmitem uma mensagem de difusão recebida. O processo de seleção do nó propagador é executado por qualquer nó que deseja enviar um pacote RREQUEST, que deve antes selecionar qual dos seus vizinhos irá propagar o RREQUEST novamente e indicá-lo no cabeçalho da mensagem, no campo "Endereço do Próximo Nó". A seleção do nó propagador baseia-se na Eq. 17,

$$P_{i,n} = \frac{1}{1+c}, \quad \forall n \in N_i, \quad (17)$$

onde $P_{i,n}$ é a probabilidade do nó i selecionar o nó n ; N_i é o conjunto de adjacências de i e a variável c é o número de vezes em que o nó n foi anteriormente utilizado.

A variável c indica a contagem de mensagens RREQUESTs anteriores recebidas para o destino pretendido, isto incentiva as buscas de caminhos não repetidos coerente com o conceito de *multipath*. O valor de c deve estar disponível nas entradas das tabelas de roteamento vinculadas aos SNs armazenados pelas passagens das RREQUESTs. Dentre os nós que recebem a difusão de uma RREQUEST, um deles saberá que é o nó propagador selecionado se seu endereço coincidir com o endereço do campo "Endereço do Próximo Nó" no cabeçalho da mensagem recebida. Na sequência, somente um dos vizinhos efetuará a próxima difusão, evitando a multiplicação de pacotes de controle na rede.

4.3.1.2 Construção de Rotas entre Origem e Destino

No processo de descoberta de rotas, ocorre a construção de caminhos de ida e volta entre origem e destino. Durante este processo, a mensagem de controle deixa armazenado o respectivo número de sequência SN na tabela rotas que representa uma assinatura de rota vinculado a um par origem-destino, identificando como único cada procedimento de busca. Esta característica torna possível o rastreamento e a comparação dos números de sequência em diversas sessões de busca por toda a rede, permitindo que diversas ações sejam executadas para evitar problemas de roteamento, por exemplo, sobreposições de rotas, rotas inválidas, laços de retorno. Considerando-se a fase de descoberta de rotas, um nó n deve executar os seguintes procedimentos quando receber uma mensagem RREQUEST:

1. confirmar ou adicionar o nó anterior como parte da sua vizinhança;
2. criar ou atualizar sua tabela de rotas com uma rota para a origem da RREQUEST, copiando para a tabela o número de saltos até este ponto, registrado no campo "nSaltos";
3. verificar se já possui uma entrada na sua tabela de rotas com uma assinatura de rota para o par origem-destino. Podem ocorrer as seguintes situações:
 - a) Em caso positivo, comparar os SNs para verificar se ocorreu a formação de laços de retorno. Se os SNs forem semelhantes, o último é descartado silenciosamente, se forem diferentes verificar se o SN na tabela, vinculado ao destino, está com estado "confirmado", neste caso pode ocorrer duas situações:

- i. se confirmado, o nó n interpreta que já existe uma rota viável a partir deste ponto e envia uma mensagem RREPLY para a origem, com o SN mais atual, validando a rota em cada nó no caminho de retorno. No pacote RREPLY, o campo "nSaltos" é preenchido com o valor " $Saltos + 1$ " copiado da rota do nó n até o destino. O campo "nSaltos" vai sendo incrementado a cada salto no caminho de retorno até chegar à origem;
 - ii. se não confirmado, o nó n envia a mensagem RREQUEST para adiante após incrementar o número de saltos ($nSaltos = nSaltos + 1$), o campo $idCaminho = endereço\ atual + 1$ e $TTL = 32$;
- b) Em caso negativo, o nó n adiciona o SN à sua lista de número de sequência, vinculando-o à assinatura da rota origem-destino e continua enviando a mensagem RREQUEST para adiante, no procedimento normal até atingir o destino;

4.3.2 Mensagens de Confirmação de Rota

Um nó n gera uma Mensagem de Confirmação de Rota (RREPLY) nas seguintes situações:

1. é em si o destino;
2. se tem uma rota ativa para o destino. O número de sequência na entrada da tabela de rota vinculado ao destino é válido.

Uma mensagem RREPLY é *unicast* para o próximo salto em direção ao originador do RREQUEST e seus campos de informação são preenchidos. O processamento é um pouco diferente, dependendo se o nó é o destino solicitado ou se é um nó intermediário.

Quando a Confirmação de Rota é gerada pelo destino, os campos do "Número de Sequência" e "nSaltos" da RREQUEST são copiados para a RREPLY. Tem-se os valores, $idCaminho = endereço\ local + 1$ e $TTL = 32$. O restante dos campos de endereço são conhecidos e preenchidos de forma direta.

Quando a Confirmação de Rota é gerada por um nó intermediário, o "Número de Sequência" da RREQUEST é copiado para o campo "Número de Sequência" na RREPLY e preenchido o campo $nSaltos = distância + 1$, onde distância é a quantidade de saltos deste nó até

o destino, indicado na tabela de roteamento. O $TTL = 32$ e o $idCaminho = endereço\ local + 1$. O restante dos campos de endereço são conhecidos e preenchidos de forma direta.

Considerando-se um nó n qualquer, quando receber uma mensagem RREPLY, deve executar os seguintes procedimentos:

1. confirmar ou adicionar o nó anterior como parte da sua vizinhança;
2. criar ou atualizar uma rota para a origem da RREPLY, atualizando o número de saltos na tabela de roteamento;
3. verificar se a tabela de rotas contém uma assinatura de rota para o par origem-destino da "antiga" RREQUEST. Neste caso podem ocorrer as seguintes situações:
 - a) Em caso positivo, verificar se a SN já registrou uma mensagem RREPLY com a mesma sequência. Então, duas situações podem ocorrer:
 - i. se confirmado, o nó n interpreta que a confirmação ocorreu e descarta a RREPLY;
 - ii. se não confirmado, o nó n continua a enviar a mensagem RREPLY, assim sucessivamente até atingir o originador;
 - b) Em caso negativo, o nó n adiciona o SN à sua lista de número de sequência, vinculando a assinatura da rota origem-destino e registro da mensagem RREPLY. Na sequência, o nó envia a RREPLY para adiante, no procedimento normal até atingir o originador.

4.4 MECANISMO DE SELEÇÃO DE ROTAS

O mecanismo de seleção de rotas é vital para o roteamento de dados e tem a função de selecionar a rota para o destino usando informações atualizadas de atratividade nas tabelas de roteamento. Neste modelo, a atratividade G_i é uma informação local do nó i compartilhada para todos os nós da sua vizinhança. Neste sentido, em qualquer agrupamento de nós, a expectativa é que cada nó i enxergue a informação G_j em sua tabela de rotas, referente à qualquer nó j na sua vizinhança. Para formar o conceito de atratividade, o HyphaNet considera dois aspectos:

1. Quantidade de biomassa imóvel: representa uma medida de sucesso do fluxo de dados em alcançar o destino por uma rota;

2. Espaço disponível dos *buffers*: representa a qualidade da rota utilizando uma medida baseada no armazenamento de carga nos nós do caminho. Zhai *et al.* (2004) e Zhao *et al.* (2011) demonstram o impacto no desempenho da rede em função da ocupação dos nós. O desempenho de um nó cai à medida que aumenta o número de pacotes a serem processados e transmitidos, a ponto de entrar em colapso quando próximo do congestionamento.

Ao considerar redes sem fio, no HyphaNet, os conceitos de capacidade e tráfego (presentes no FUNNet) são substituídos pelos conceitos de armazenamento e carga. Seja B_j o tamanho do *buffer* da interface de rede (MAC) e L_j a ocupação do buffer, associado ao nó j , então, $ABS_j = 1 - \frac{L_j}{B_j}$ é o espaço disponível no *buffer*.

Assim, a atratividade do nó j é dada pela Eq. 18, onde I_j é a biomassa imóvel, μ e Ω são parâmetros específicos do HyphaNet. Esta equação favorece a melhor rota sem incorrer em problemas de inconsistência de unidades.

$$G_j = (I_j)^\mu \cdot (ABS_j)^\Omega. \quad (18)$$

Assim, a probabilidade, $P_{i,n}^d$, do nó i escolher um determinado nó n como próximo salto para o destino d , é dada pela Eq. 19:

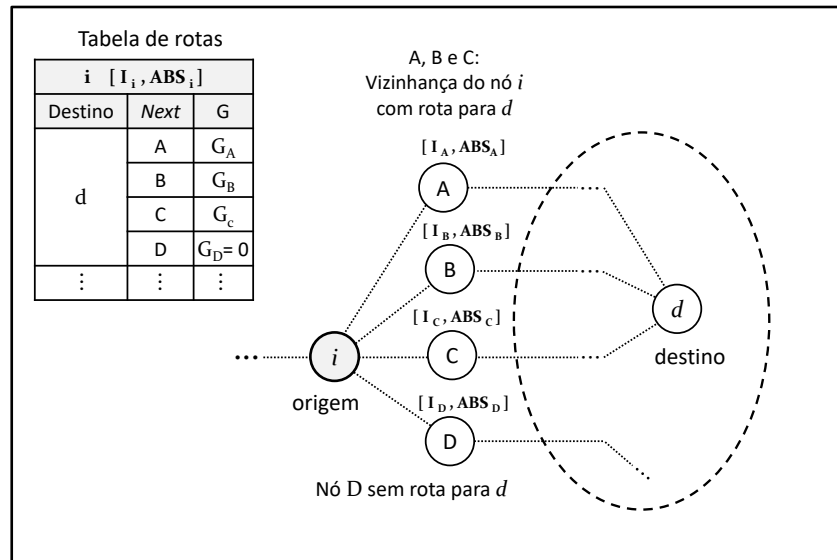
$$P_{i,n}^d = \frac{G_n}{\sum_{j \in N_i^d} G_j}, \quad \forall n \in N_i^d, \quad (19)$$

onde: N_i^d é o conjunto de nós vizinhos que tem rota para d .

A Fig. 16 representa a perspectiva do nó i no momento do processo de seleção de rota com os componentes para o cálculo das probabilidades de roteamento. Estão representados o nó i e sua tabela de rotas, bem como a parte da topologia da rede que representa a vizinhança do nó i que participa da estimativa de $P_{i,n}^d$. Cada uma das entradas da tabela possui um valor de atratividade G_j , por exemplo, G_A , G_B , e assim por diante. Os nós A , B e C representam N_i^d , ou seja, formam a vizinhança de i e possuem rota para d . Embora o nó D seja adjacente ao nó i , neste exemplo a atratividade G_D pode ser nula ou não constar na tabela, pois o enlace associado não possui rota para d .

Pode-se observar que as informações que compõem a atratividade de tráfego estão presentes nos nós e na sua relação com a topologia da rede e não diretamente nas tabelas de

Figura 16 – Exemplo de uma topologia com a perspectiva do nó i no momento do processo de seleção de rota, mostrando as informações da atratividade dos nós vizinhos.



Fonte: Autoria própria.

roteamento, como acontece nos protocolos clássicos que escolhem a rota com foco no enlace de dados de acordo com as informações de rota. Durante o tráfego de dados pela rede, as reconfigurações e o uso dinâmico das rotas, fazem com que a atratividade de cada nó seja dinâmica também. Desta forma, a atratividade de um nó não depende somente do volume de tráfego sobre sua rota, mas de como todo o sistema utiliza os recursos de todos os nós. Esta característica é inspirada nas redes de fungos, onde as hifas e ramificações mais utilizadas também tendem a atrair mais fluxo de biomassa móvel e, por consequência, a ganhar mais biomassa imóvel.

Da mesma forma, no HyphaNet os nós mais utilizados tendem a atrair mais fluxo de dados, porém os nós também reagem ao controle da variável ABS que tem a função de produzir um equilíbrio no excesso de tráfego.

As Eqs. 20a a 20f mostram o protocolo utilizado pelo HyphaNet para atualização do roteamento, onde: M_k é a biomassa móvel e I_k a biomassa imóvel associadas a todo nó k pertencente ao caminho para o destino d . O parâmetro α representa a taxa de conversão de biomassa móvel em imóvel e β a taxa de biomassa imóvel resultante após a ação local de processos de degradação que causa perda de biomassa, ou seja, para $\beta = 0,95$ implica que 5% de I_k será convertido em matéria orgânica para o meio. Além das perdas locais, o micélio, por inteiro, sofre a ação da degradação ao longo do tempo. De modo que as partes sem reforço

são sistematicamente convertidas em matéria orgânica para o meio em torno do micélio. Da mesma forma, no HyphaNet todos os nós que não recebem fluxo de biomassa sofrem decaimento temporal no nível de I_k . Na Sec. 5.1, os coeficientes T_D e I_D são utilizados nas simulações para representar a taxa e o intervalo de degradação, respectivamente.

O protocolo é executado somente quando o pacote de dados é entregue com sucesso no destino. Um nó n de origem quando gera um pacote dados a ser enviado por uma rota até o destino, gera também uma quantidade de biomassa móvel E fictícia que será distribuída a todos os nós ao longo do caminho. Essa quantidade de biomassa móvel distribuída depende da função Λ (Eq. 20a), que provê a qualidade do roteamento considerando a distância R (em saltos) e a ocupação dos *buffers* da rota entre a origem e o destino, onde N corresponde ao conjunto de nós nesta rota. Desta forma, cada nó k recebe uma fração $E\Lambda$ que incrementa a sua biomassa móvel, conforme a Eq. 20b. A Eq. 20c calcula o valor de λ que representa a quantidade de biomassa móvel convertida em imóvel que será utilizada na Eq. 20e para incrementar a biomassa imóvel (ver detalhes na Sec. 4.4.1). A Eq. 20g representa o controle de biomassa imóvel evitando que se ultrapasse o limite máximo I_M e a quantidades ϵ é um parâmetro de controle.

$$\Lambda = \frac{1}{R^2} \sum_{j \in N} ABS_j, \quad (20a)$$

$$M_k = M_k + E\Lambda, \quad (20b)$$

$$\lambda = \alpha M_k, \quad (20c)$$

$$M_k = M_k - \lambda, \quad se \ M_k > \lambda, \quad (20d)$$

$$I_k = I_k + \lambda, \quad (20e)$$

$$I_k = \beta I_k, \quad (20f)$$

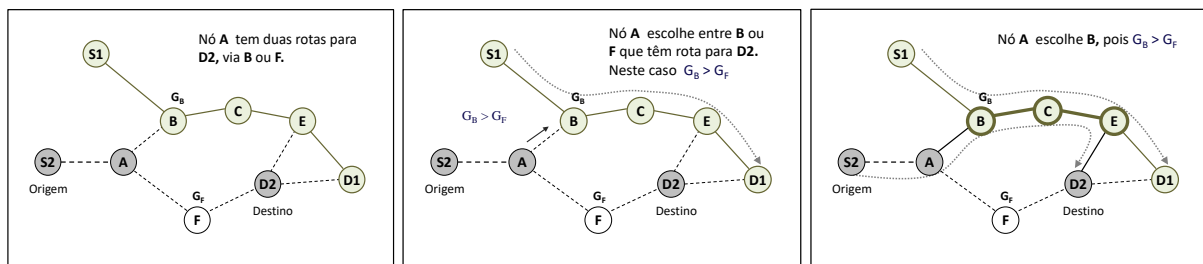
$$I_k = I_M, \quad se \ I_k > \epsilon. \quad (20g)$$

Assim, de acordo com o tráfego de dados, o sistema faz a conversão de biomassa móvel em imóvel, de modo semelhante aos fungos, produzindo aumento da atratividade dos nós em rotas ativas. Este processo de acumular e converter biomassa móvel em imóvel resulta em uma

otimização de rotas por conversão de biomassa móvel, visto que, as rotas mais curtas e menos ocupadas acumulam mais biomassa imóvel ao longo do tempo.

A Fig. 17 exemplifica a influência da rota S_1-D_1 na atratividade da rota S_2-D_2 , independentes entre si. Na Fig. 17a, a origem S_2 poderia construir o caminho $S_2-A-F-D_2$, que seria a opção mais curta possível, no entanto, com o tráfego sobre o caminho $S_1-B-C-E-D_1$ gerando a atratividade G_B , o fluxo é atraído para B , na região mais utilizada da rede. Na prática isso pode significar mais confiabilidade de tráfego para redes *ad hoc*, visto que rotas atrativas implicam em caminhos testados e mais robustos para o tráfego. Entretanto, isso não implica que o protocolo não possa implementar rotinas de otimização de rotas e equilibrar atratividade com distâncias mais curtas.

Figura 17 – Exemplo da influência da atratividade no roteamento no HyphaNet.



- (a) A origem S_2 seleciona uma rota para D_2 passando pelo nó A. Há tráfego no caminho $S_1-B-C-E-D_1$.
 (b) O nó A seleciona o nó B devido à atratividade gerada pelo tráfego no caminho $S_1-B-C-E-D_1$.
 (c) A origem S_2 estabelece uma rota para D_2 compartilhando o caminho mais atrativo.

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros α e β são fundamentais no desempenho do protocolo. Se α é pequeno e β é elevado, a massa imóvel convergirá lentamente e as rotas podem se tornar mais instáveis. Por outro lado, se α é elevado e β é pequeno, as rotas podem não reagir às variações topológicas. Um estudo analítico de convergência do protocolo (que não é possível no FUNNet original) encontra-se no Apêndice B. Prova-se que α e β devem ser menores que a unidade.

4.4.1 A conversão de biomassa móvel em imóvel

Considerando-se que a concentração de biomassa imóvel é chave no roteamento do HyphaNet, buscou-se uma releitura do modelo de crescimento de fungos de Falconer *et al.* (2005). Nesta releitura considera-se apenas a influência da biomassa imóvel não isolada, devido à natureza transitória da topologia das MANETs. A biomassa imóvel isolada será ignorada, e

a taxa de difusão será considerada constante e homogênea para todas as rotas. Desta forma, a partir da Eq. 14b, tem-se:

$$\frac{\partial b_n}{\partial t} = (\alpha_n \pi^\theta - \rho_n \pi) b_n. \quad (21)$$

Considerando-se as proposições sobre concentração de biomassa e fluxo de dados nas redes de fungos e comunicação, respectivamente, estabeleceu-se uma correlação entre a concentração de biomassa móvel e o coeficiente de tráfego, conforme:

$$\pi = \left(\frac{n}{b_n} \right) \Rightarrow \left(\frac{M + T}{I} \right). \quad (22)$$

Sabendo-se que a taxa de produção de biomassa imóvel não isolada é proporcional à expressão da Eq. 21, considerando λ a biomassa imóvel gerada, e substituindo a Eq. 22 em Eq. 21, pode-se escrever:

$$\lambda = \left(\alpha_n \left(\frac{M + T}{I} \right)^\theta - \rho_n \left(\frac{M + T}{I} \right) \right) b_n. \quad (23)$$

No HyphaNet, para evitar não linearidade na convergência do protocolo, o parâmetro de sensibilidade θ é considerado 1. Desta forma é possível simplificar os termos b_n com I que possuem a mesma grandeza e significado físico, eliminando-se T (uma vez que se considera que a conversão de biomassa não é influenciada por tráfego) e agrupando α_n e ρ_n em uma única constante α , encontra-se:

$$\lambda = \alpha M, \quad (24)$$

que representa o fator de conversão de biomassa móvel em biomassa imóvel.

4.5 MENSAGENS *HELLO*

As mensagens *Hello* são utilizadas pelos nós para divulgar informações de conectividade e roteamento entre vizinhos. As mensagens auxiliam a manter a lista de adjacência N_i , de qualquer nó i , para minimizar os efeitos das variações na topologia da MANET. Outra função

importante do *Hello* é divulgar os valores de biomassa imóvel (*I*) e ocupação dos *buffers* (*ABS*) para manter as tabelas de roteamento atualizadas. Desta forma, um nó pode saber se uma rota está rompida, no caso de um endereço de vizinho desaparecer da lista de adjacências, e também manter o cálculo da atratividade dos vizinhos atualizado. O *Hello* é gerado e divulgado por todos os nós da rede periodicamente de acordo com o intervalo I_{HELLO} , em milissegundos. As mensagens são transmitidas com $TTL = 1$ e número de sequência igual a zero para serem reconhecidas pela recepção. Considerando-se um nó que recebe uma mensagem *Hello*, as seguintes ações são executadas:

1. o nó adiciona o "Endereço de Origem" na sua lista de vizinhos, caso ainda não o conheça, e atualiza a tabela de roteamento com número de saltos igual a um ;
2. o nó atualiza os valores de *I* e *ABS* vinculados aos vizinhos na lista de adjacências. Desta forma, é possível consultar a atratividade de cada vizinho, previamente calculada e de forma imediata, para seleção de rotas, no momento do encaminhamento de pacotes de dados.

4.6 MECANISMOS DE RECUPERAÇÃO DE FALHAS

Os mecanismos de recuperação de falhas no HyphaNet são responsáveis por informar e corrigir falhas devido a mobilidade da rede.

4.6.1 Mecanismo de Reparo de Rota

O HyphaNet possui um mecanismo de reparo de rota para diminuir os efeitos de quebras de conectividade em função da mobilidade da rede. Este mecanismo faz uso das mensagens de solicitação de reparo de rota RREPAIR-REQ e confirmação de reparo de rota RREPAIR-REP. O procedimento de reparo é iniciado pelo nó que não encontra meios de transmitir os pacotes para frente, seja por ausência de rota ou porque detecta uma falha de enlace. Caso o nó seja a origem, o procedimento de descoberta de rotas será iniciado. Caso seja um nó intermediário que detectou o problema, é o procedimento de reparo de rota que será iniciado com objetivo de descobrir um caminho alternativo até o outro lado do enlace com falha.

O procedimento de reparo utiliza a difusão da mensagem RREPAIR-REQ, com um valor TTL limitado em dois saltos, suficiente para encontrar a falha nas proximidades da detecção.

O cabeçalho da mensagem é preenchido com os endereços de origem, destino, número de saltos registrados entre o nó que detectou a falha até a origem e os saltos até o destino. O SN é copiado para o campo "Número de Sequência". Quando o RREPAIR-REQ atingir um nó que saiba como encaminhar o tráfego para o nó de destino, uma mensagem RREPAIR-REP, em *unicast*, retorna ao nó originador do reparo informando a nova rota.

O procedimento de reparo tem de obedecer o limite de tempo de reparo T_{REP} , se falhar, uma mensagem de erro será enviada ao nó de origem e um novo procedimento de descoberta de rota será iniciado.

4.6.2 Mensagem de Erro de Rota

As mensagens de erro de rota (RERROR) são utilizadas para informar a origem e os nós formadores do caminho que a rota com assinatura SN específica está com falha. Desta forma, as informações nas tabelas de roteamento podem ser deletadas e a origem pode iniciar um novo procedimento de descoberta de rotas. A mensagem de RERROR é gerada pelo nó que detecta a falha de roteamento, depois que a tentativa de reparação não teve sucesso. O SN é copiado para o campo "Número de Sequência", o $TTL = 2nSaltos$, onde $nSaltos$ é o número de saltos até a origem.

4.6.3 Manutenção da Conectividade Local

O HyphaNet permite que um nó utilize um ou mais mecanismos de notificação da camada de enlace do IEEE 802.11 disponíveis para determinar a conectividade entre nós vizinhos. Cada vez que um pacote é transmitido para um próximo salto ativo, a ausência de uma mensagem ACK (*acknowledgment*) na camada de enlace ou falha em obter um CTS (*clear to send*) após o envio do RTS (*request to send*), mesmo após o número máximo de tentativas de retransmissão, indica uma falha de enlace. Neste caso, o HyphaNet executa o procedimento de reparação de rotas baseado em notificações vindas da camada de enlace.

4.7 MENSAGENS HYPHA ACKNOWLEDGMENT

No HyphaNet, todos os pacotes de dados que alcançam o destino com sucesso devem ser confirmados à origem com a mensagem do tipo HYPHA-ACK, além disso, esta mensagem de

confirmação deve retornar pelo mesmo caminho percorrido pelo pacote de dados recém chegado. Esta exigência faz parte do mecanismo de atualização e reforço de rotas do protocolo HyphaNet, como será visto nas seções seguintes. Desta forma, para que o retorno aconteça, no cabeçalho do pacote de dados é enviado, adicionalmente, o SN e outras informações que tornam possível o retorno da HYPHA-ACK. O Apêndice A mostra o formato do subcabeçalho e o significado dos seus campos.

Uma vez que a atualização das rotas é feita pelo tráfego de dados e não por agentes de controle especializados, pode ocorrer demora no ciclo de ida do pacote de dados e retorno da confirmação, assim, os nós do caminho podem ficar momentaneamente sem atualização da atratividade. Isto pode ser um problema em casos de alto tráfego e múltiplas rotas, pois o mecanismo de seleção fica sem informação para decidir a escolha da rota. Para aliviar este problema, o pacote de dados executa uma pré-atualização da biomassa imóvel em cada nó durante sua viagem, mas, neste caso, o cálculo da biomassa móvel é baseado apenas na relação entre a biomassa gerada na origem e a distância até o destino, conforme as Eqs. 25a a 25f:

$$M_k = M_k + \frac{E}{R^2}, \quad (25a)$$

$$\lambda = \alpha M_k, \quad (25b)$$

$$M_k = M_k - \lambda, \quad se \ M_k > \lambda, \quad (25c)$$

$$I_k = I_k + \lambda, \quad (25d)$$

$$I_k = \beta I_k, \quad (25e)$$

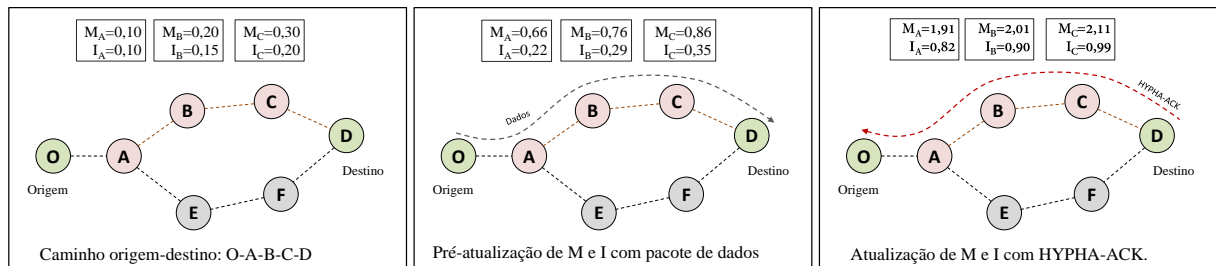
$$I_k = I_M, \quad se \ I_k > \epsilon, \quad (25f)$$

A Fig. 18 mostra um exemplo da pré-atualização executada pelo pacote de dados com valores de biomassas fictícios.

Na Fig 18a são apresentadas as biomassas móvel e imóvel iniciais dos nós no caminho entre origem e destino. Na Fig 18b o pacotes de dados executa as pre-atualizações levando-se em conta a biomassa gerada e a distância entre origem e destino obtida previamente na fase de busca de rotas, assumindo-se $\alpha = 0,2$, $\beta = 0,95$, $E = 5,0$ e $h = 3$ saltos. Finalmente na Fig 18c

ocorre a atualização pela mensagem HYPH-ACK levando-se em conta os saltos e as informações dos buffers no caminho percorrido, conforme as Eqs. 20a a 20f.

Figura 18 – Exemplo da pré-atualização das biomassas móvel e imóvel. (a) Valores das biomassas no caminho $O-A-B-C-D$ antes da pré-atualização; (b) Valores após a pré-atualização com o pacote de dados; (c) Atualização das biomassas pela mensagem HYPH-ACK.



(a) Antes da pré-atualização.

(b) Após a pré-atualização.

(c) Após a atualização.

Fonte: Autoria própria.

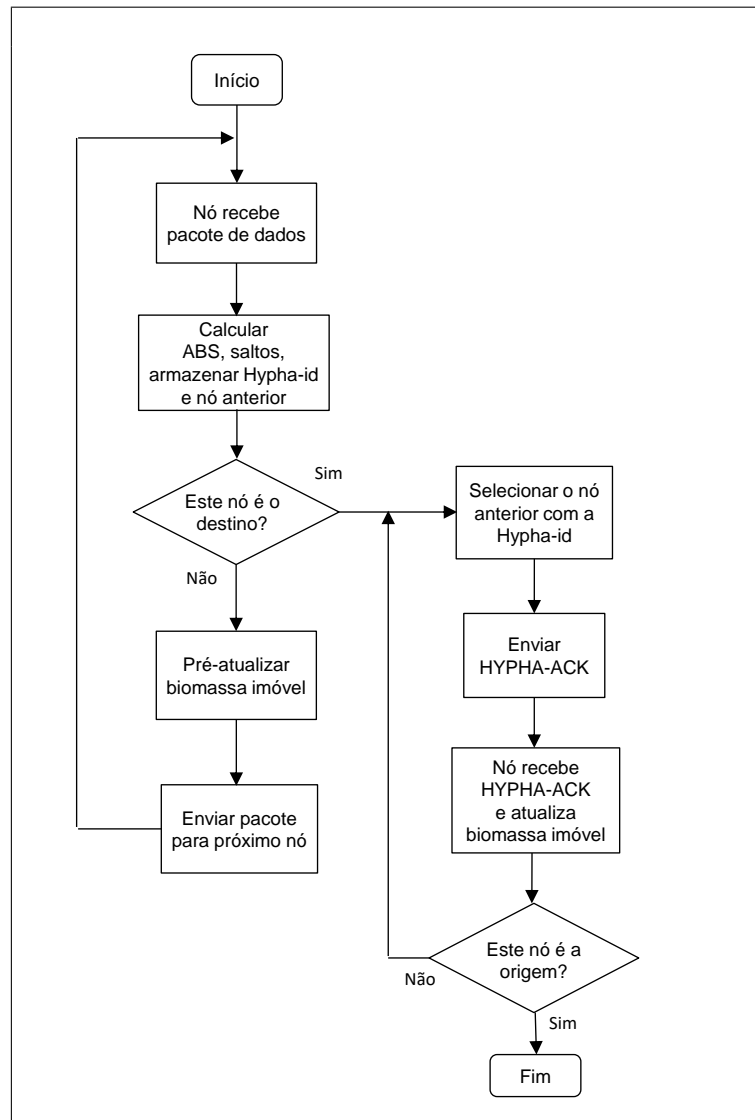
Na Fig. 19 tem-se um fluxograma representativo da fase de confirmação de entrega dos dados e envio da mensagem HYPHA-ACK. No fluxograma observa-se que o pacote de dados, enquanto viaja pela rede, executa as seguintes funções em cada nó:

1. Contar o número de saltos;
2. Computar a ocupação dos *buffers* na variável ABS;
3. Armazenar a identificação da Hypha (Hypha-id) associada ao par origem-destino do pacote de dados;
4. Armazenar o endereço do nó anterior vinculando-o à Hypha-id;
5. Pré atualizar a massa imóvel no nó atual.

Assim, ao alcançar o destino e de posse do número de saltos e ABS, a mensagem HYPHA-ACK consegue retornar pelo caminho inverso localizando, a cada passo, o nó anterior que possui a Hypha-id.

Na Fig. 20 tem-se um exemplo do fluxo de mensagens do HyphaNet envolvendo duas sessões de busca de rotas (RREQUEST 1 e 2). A primeira busca constrói o caminho $A-C-D-E$, a segunda o caminho $A-B-D-E$. Observa-se que a sessão 2 não precisou chegar ao destino E para construir a rota desejada, pois encontrou informações de rota no nó

Figura 19 – Fluxograma do envio da mensagem HYPHA-ACK.



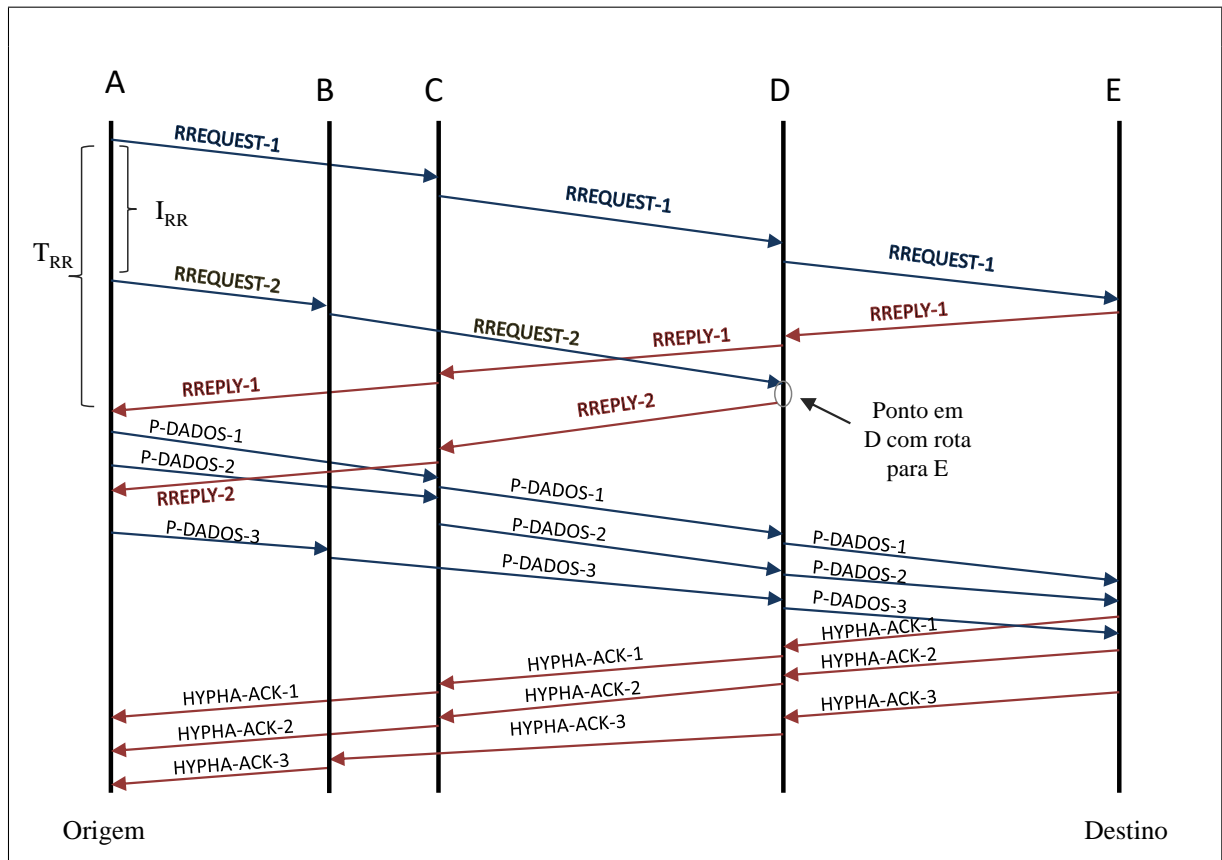
Fonte: Autoria própria.

D, previamente construídas pela sessão 1. Os pacotes de dados 1 e 2 seguem pelo caminho 1, enquanto que o pacote de dados 3 pelo caminho 2, assim como a confirmação HYPHA-ACK retorna pelos caminhos respectivos. Desta forma, mostra-se um exemplo de funcionamento das mensagens em um cenário *multipath*.

4.8 COMPARAÇÃO ENTRE HYPHANET E O MODELO ACO

Por ser um algoritmo bioinspirado, algumas das características funcionais do HyphaNet podem ser comparadas às do algoritmo ACO, pois têm funções comuns nas redes de comunicação.

Figura 20 – Diagrama de fluxo de mensagens no HyphaNet.



Fonte: Autoria própria.

A principal comparação entre HyphaNet e ACO é o processo de roteamento, envolvendo as informações de rotas, a estrutura da tabela de roteamento e a heurística de seleção de rotas. O Quadro 5 mostra um resumo comparativo conceitual entre ACO e HyphaNet.

Quadro 5 – Comparação do processo de roteamento entre ACO e HyphaNet.

ACO	HyphaNet
Roteamento baseado em informações de feromônio nas tabelas de roteamento	Roteamento baseado em informações de atratividade dos nós, proporcional à concentração de biomassa imóvel
As características do enlace predominam na definição do caminho	Caminho é predominantemente definido pelas atratividade dos nós
Rotas com maior concentração de feromônio são mais confiáveis e têm preferência	Rotas com maior concentração de massa imóvel são mais atrativas e têm preferência
Rotas com maior capacidade de tráfego atraem maior número de formigas e, portanto, mais feromônio	Rotas com maior capacidade de tráfego atraem mais fluxo de massa móvel e, portanto, mais geração de massa imóvel
Evaporação. O feromônio evapora e desaparece nas rotas ociosas, por não haver formigas depositando feromônio	Degradação. Em rotas ociosas não há conversão de massa móvel em imóvel e a massa imóvel é absorvida até desaparecer
Convergência natural para a rota ótima pela distribuição de feromônio acarretar maior concentração em curtas distâncias	Convergência natural para a rota ótima pela distribuição de massa móvel ser fracionada em cada um dos saltos na rota
Na seleção de rotas, a heurística utiliza informações de feromônios diretamente da tabela de roteamento do nó local	A heurística utiliza informações de atratividade calculada com valores de <i>I</i> e <i>ABS</i> dos nós vizinhos
Informações de feromônios de uma determinada rota não influenciam rotas adjacentes	A atratividade dos nós é compartilhada entre vizinhos e pode influenciar rotas adjacentes

Fonte: Autoria própria.

5 SIMULAÇÃO E ANÁLISE

As seções que se seguem mostram as simulações do modelo HyphaNet proposto e estão organizadas da seguinte maneira: primeiramente, estão mostrados os resultados das simulações em uma topologia fixa para demonstrar a funcionalidade do modelo e sua eficácia no processo de convergência, posteriormente, é feita uma análise de sensibilidade do modelo em relação aos parâmetros do HyphaNet (α , β , μ e Ω), bem como a obtenção dos valores ótimos de funcionamento em um cenário de uma MANET com 100 nós. Na sequência foram realizadas simulações para cinco cenários diferentes para mostrar o comportamento do modelo com tráfego CBR/UDP e FTP/TCP para diferentes parâmetros de tráfego. A estratégia utilizada para avaliar o modelo será a comparação dos resultados com os protocolos SARA e AODV. Particularmente, porque o SARA é um protocolo bioinspirado com o melhor desempenho observado de acordo com a literatura e a partir de experimentos práticos realizados pelo próprio autor deste trabalho. O AODV, por sua vez, é um protocolo bem conhecido e possui elevado desempenho nos cenários considerados. Embora este trabalho apresente a descrição de diversos protocolos bioinspirados, não serão realizadas comparações com outros protocolos baseados em ACO ou em colônia de abelhas, em razão da indisponibilidade dos códigos para o simulador NS-2.35.

5.1 SIMULAÇÃO DO HYPHANET

Para simulação do HyphaNet, o software utilizado foi o NS-2.35, um simulador de eventos discretos de código aberto amplamente utilizado no meio acadêmico para pesquisa em redes de computadores (NS-2, 2014). A tecnologia de redes utilizada no enlace e meio físico é o IEEE 802.11b (DCF) ajustado para taxa de transmissão de 11 Mbps, taxa básica de controle de quadros de 2 Mbps e alcance de 250 metros. Para assegurar a confiabilidade das estimativas obtidas nas simulações, os resultados finais são apresentados por seus valores médios com as barras representando os intervalos de confiança de 95 %.

5.1.1 Modelo de mobilidade

As simulações utilizam o modelo de mobilidade RWP (*Random WayPoint*) para simular o movimento de usuários móveis. O software utilizado para gerar o RWP foi o *setdest*, disponível

no NS-2.35. De acordo com Camp *et al.* (2002) é um dos modelos de mobilidade mais populares para avaliar protocolos de roteamento em redes móveis *ad hoc*. Em todos os casos os nós da rede são, inicialmente, colocados aleatoriamente na área da simulação (área de $1000 \times 1000 \text{ m}^2$), em seguida cada nó se move independente e aleatoriamente de acordo com o modelo RWP, com velocidade definida por uma distribuição uniforme contínua com intervalo $[V_{min}, V_{max}]$, além de um período de pausa de movimentos estabelecido pelo usuário. No RWP, cada nó inicia em uma posição aleatória e, também de forma aleatória, escolhe um destino e uma velocidade dentro o intervalo definido, em seguida o nó inicia o movimento até alcançar o destino, uma vez no destino o nó cumpre o período de pausa antes de reiniciar novo processo de escolha de uma nova velocidade e um novo destino.

5.1.2 Modelo de tráfego

Para geração do tráfego, foi utilizado o software *cbrgen*, outra ferramenta fornecida pelo NS-2.35 para geração de tráfego, que permite selecionar diversos parâmetros de tráfego, por exemplo, tamanho do pacote de dados (em bytes), a taxa de envio (em pacotes por segundo), tipo de protocolo de transporte, TCP (em que é automaticamente criada uma aplicação FTP) ou CBR (aplicação com taxa de bits constante sobre UDP), início e fim das transmissões, entre outros. Para evitar que as fontes iniciem a transmissão simultaneamente, cada uma delas é ativada aleatoriamente segundo uma distribuição uniforme contínua com intervalo entre zero e 36 s. Uma vez iniciada a transmissão, as fontes permanecem ativas até ao final da simulação. Esse cuidado concede ao simulador um período de "aquecimento" (*warm-up*) importante antes do regime intenso de operação. Entretanto, o período de 36 s faz parte do tempo total de simulação em todos os experimentos.

5.1.3 Parâmetros de configuração

O SARA utiliza os parâmetros de configurações do protocolo obtidas de Correia e Vazão (2010). O AODV utiliza os parâmetros fornecidos no NS-2.35. No Quadro 6 estão representados os parâmetros principais utilizados para configuração mínima do simulador NS-2.35 para todos os cenários. É utilizado o padrão IEEE 802.11b de 11 Mbps que, embora obsoleto, é o padrão com maior velocidade disponível no simulador NS-2.35. O modelo de propagação de rádio utilizado é o Two-Ray Ground, por fornecer previsões mais precisas a longa distância do que o

modelo de espaço livre (RAPPAPORT, 1996). A potência dos rádios estão configuradas para garantir um alcance máximo de 200 ou 250 m, conforme a simulação. Os principais parâmetros para a simulação do HyphaNet estão mostrados no Quadro 7. Os valores dos parâmetros da simulação foram obtidos por teste preliminares e foram adotados aqueles que apresentaram os melhores resultados, conforme a Sec. 5.4.1 adiante.

Quadro 6 – Parâmetros utilizados para configuração mínima do simulador NS-2.35.

Parâmetro	Valor do parâmetro	Descrição
Padrão WLAN	IEEE 802.11b	Padrão de rede sem fio
Canal	Channel/WirelessChannel	Tipo de canal de transmissão
Antena	Antenna/OmniAntenna	Antena para trans. em todas as direções
Propagação	Propagation/TwoRayGround	Modelo de propagação de rádio
Interface	Phy/WirelessPhy	Interface física (rádio)
MAC	Mac/802.11	Padrão da camada MAC (wireless)
Tipo de fila	Queue/DropTail/PriQueue	Tipo do gerenciador de fila
Tamanho da fila	50 pacotes	Capacidade de pacotes na fila
CSThresh_	0,69717 nW (-61,57 dBm)	Sensibilidade <i>Carrie Sense</i> para 200 m
CSThresh_	0,36526 nW (-64,38 dBm)	Sensibilidade <i>Carrie Sense</i> para 250 m
RXThresh_	0,69717 nW (-61,57 dBm)	Sensibilidade da recepção para 200 m
RXThresh_	0,36526 nW (-64,38 dBm)	Sensibilidade da recepção para 250 m
dataRate_	11 Mbps	Taxa de transmissão de dados (MAC)
basicRate_	2 Mbps	Taxa de controle de quadros (MAC)
freq_	2,4 GHz	Frequência de transmissão
Pt_	0,2818385 W (24,5 dBm)	Potência do transmissor

Fonte: Autoria própria.

5.2 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Ao analisar os protocolos, as seguintes métricas de desempenho foram consideradas:

1. Taxa de transferência: a taxa de transferência ou vazão (do inglês, *throughput*), significa a quantidade média de dados recebidos pelos nós de destino por unidade de tempo e expresso em kilobits por segundo (kbps);
2. Taxa de entrega de pacotes: a taxa de entrega de pacotes (do inglês *packet delivery rate* - PDR), é a razão entre o número total de pacotes de dados recebidos pelos nós de destino e o número total de pacotes de dados gerados ou enviados pelos nós de origem na rede;

3. Atraso de ponta a ponta médio: o atraso de ponta a ponta médio (do inglês *delay*), define o tempo médio (em milissegundos) necessário para que todos os pacotes de dados viajem de nós de origem para nós de destino na rede. O atraso considerado representa o conjunto de fatores responsáveis pelo retardo dos pacotes enquanto transita pela rede. Os mais importantes deles são o "atraso de processamento nodal", o "atraso de fila", o "atraso de transmissão" e o "atraso de propagação", juntos eles acumulam para formar o "atraso total";
4. Sobrecarga de roteamento: sobrecarga ou excesso (do inglês *overhead*) representa o excesso de dados transmitidos utilizados para controle. É a relação entre a quantidade de bits de controle com o total de bits transmitidos e expressa uma medida de eficiência do sistema.

Quadro 7 – Parâmetros de configuração do HyphaNet utilizados nas simulações.

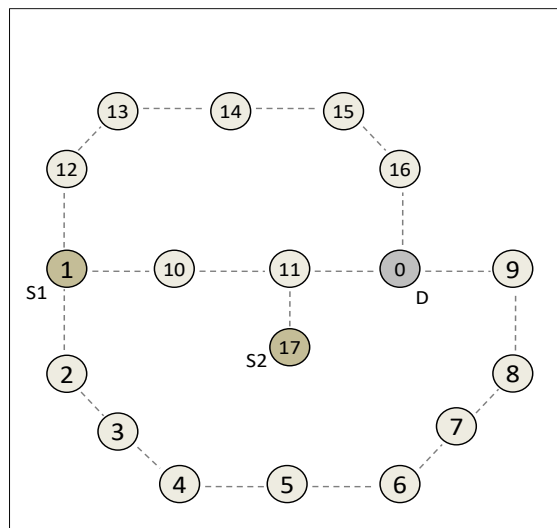
Descrição	Parâmetro
Número de sessões de descoberta de rotas	$NUN_{SES} = 2$
Número de tentativas de envio de RREQUEST	$NUM_{RR} = 9$
Intervalo entre mensagens de RREQUEST	$I_{RR} = 500 \text{ ms}$
Tempo limite de confirmação de RREQUEST	$T_{RR} = 1000 \text{ ms}$
Tempo limite de reparação de rota	$T_{REP} = 200 \text{ ms}$
Intervalo entre mensagens de Hello	$I_{HELLO} = 3000 \text{ ms}$
Taxa de conversão de massa móvel em massa imóvel	$\alpha = 0,1$
Taxa de massa imóvel após degradação local	$\beta = 0,95$
Sensibilidade para biomassa imóvel	$\mu = 2,0$
Sensibilidade para ocupação de <i>buffers</i>	$\Omega = 1,0$
Limite máximo de massa imóvel	$\epsilon = 30$
Massa móvel inicial	$MMI = 0,1$
Massa imóvel inicial	$MII = 0,1$
Massa imóvel máxima	$I_M = 20$
Taxa de degradação de massa imóvel global	$T_D = 0,95$
Intervalo de degradação de massa imóvel global	$I_D = 0,5 \text{ s}$

Fonte: Autoria própria.

5.3 TESTE DE CONVERGÊNCIA EM UM TOPOLOGIA FIXA

O objetivo desta seção é testar o HyphaNet em relação à convergência de rotas e sua resposta à ocupação de buffers. Neste experimento é utilizada uma topologia fixa com 17 nós, mostrada na Fig. 21, e duas fontes de dados, S_1 e S_2 e um único destino D , que são os nós 1, 17 e 0, respectivamente. O alcance do rádio foi configurado para o máximo de 200 m. O HyphaNet foi configurado com os parâmetros presentes no Quadro 7. O tráfego é CBR/UDP com pacotes de 512 bytes a uma taxa de pacotes/s. As simulações foram executadas com 120 rodadas e duração de 180 s cada uma, obtendo-se a média com intervalo de confiança de 95 %.

Figura 21 – Topologia fixa com 17 nós para testar a convergência do HyphaNet.

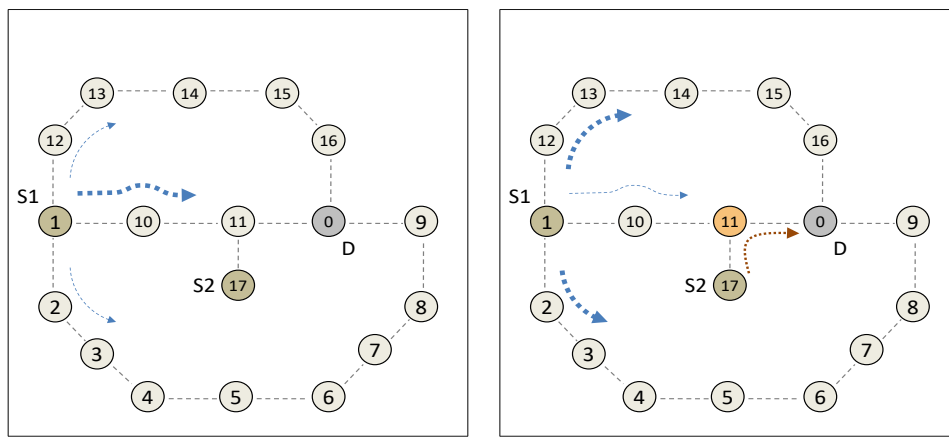


Fonte: Autoria própria.

O teste é dividido em cinco intervalos de tempo. A fonte S_1 , de forma ininterrupta, envia dados ao destino D durante os cinco períodos e a fonte S_2 envia somente nos intervalos 2 e 4. Ao iniciar o funcionamento, haverá tráfego apenas entre S_1-D , e o protocolo, por ser *multipath*, irá construir as três rotas possíveis entre origem e destino, que são: Rota 1 (1-12-13-14-15-16-0), Rota 2 (1-10-11-0) e Rota 3 (1-2-3-4-5-6-7-8-9-0). Após algumas iterações, o algoritmo convergirá para a rota mais conveniente, de acordo com a sensibilidade definida pelos parâmetros μ e Ω . A convergência é resultado do processo de otimização obtido pelo equilíbrio entre a distribuição de biomassa imóvel e a ocupação dos *buffers* no caminho percorrido pelo tráfego de dados. Neste cenário a Rota 2 é a mais curta e será escolhida se prevalecer o critério da biomassa imóvel. A Fig. 22a representa o tráfego entre S_1-D com a fonte S_2 inativa, ou seja, é o caso da

escolha da rota mais curta, no qual a grande massa de dados utiliza a Rota 2 e eventualmente algum tráfego pode circular pelas Rotas 1 e 3, seguramente mais longas, devido ao processo estocástico na seleção de rotas. Na sequência, a Fig. 22b mostra o caso em que a fonte S_2 é ativada e passa a compartilhar os *buffers* do nó 11 comum aos dois fluxos. Devido à sensibilidade do algoritmo ao estado dos *buffers*, a ocupação dos *buffers* no nó 11 produzirá uma resposta de atualização das tabelas de roteamento no trecho S_1-D , cuja intensidade dependerá do grau de ocupação produzida pelo novo fluxo resultante. Desta forma, uma fração do fluxo da fonte S_1 é desviado pelos caminhos alternativos compostos pelas Rotas 1 e 3.

Figura 22 – Influência da ocupação dos "buffers" na seleção de rotas.



(a) Tráfego nos intervalos 1, 3 e 5.

(b) Tráfego nos intervalos 2 e 4.

Fonte: Autoria própria.

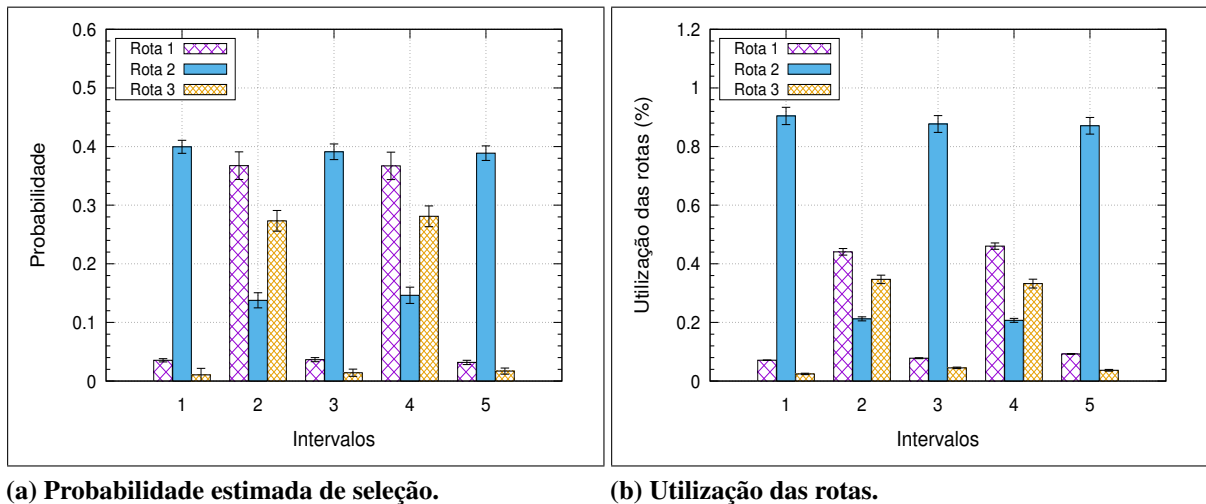
As Figs. 23a e 23b mostram os gráficos da probabilidade média e da utilização das rotas nos intervalos 1 a 5, de acordo com a fonte S_2 ativada ou desativada. Nos intervalos 1, 3 e 5, S_2 está desativada e os gráficos mostram que os componentes da Rota 2 devem registrar maiores probabilidades médias de seleção e, conseqüentemente, maiores taxas de utilização. Em contrapartida, com S_2 ativada nos intervalos 2 e 4, observa-se uma redistribuição dos valores de probabilidade e utilização das rotas, significando a redistribuição do fluxo de dados.

O gráfico da Fig. 23a representa a probabilidade estimada vista pelo fonte S_1 no momento do cálculo da probabilidade, nesta topologia significa a atratividade que a fonte vê nos nós 12 (Rota 1), 10 (Rota 2) e 2 (Rota 3). Observa-se que a Rota 2 obteve preferência de seleção com apenas uma fonte ativada. Após a ativação da segunda fonte houve uma distribuição da preferência entre as três rotas com um leve favorecimento da Rota 1, por ser mais curta que a Rota 3. Observa-se também que a somatória das probabilidades estimadas não totaliza 100 %, em razão

das rotas, invariavelmente, possuem probabilidade zero, ou quase zero, quando não utilizadas, principalmente após a convergência para uma rota atraente, simulando o comportamento fungal.

A Fig. 23b mostra o gráfico da utilização das rotas. Este valor representa o número de vezes em que a rota foi selecionada pela origem S_1 , em relação ao total de pacotes de dados transmitidos. O resultado mostra que a Rota 2 foi a mais utilizada nos intervalos 1, 3 e 5, seguindo a lógica da probabilidade e houve uma distribuição da utilização nos outros intervalos. Observa-se, neste caso, que a somatória das utilizações totaliza 100 %. Portanto, os valores de probabilidade média e utilização na Rota 2 mostram que houve convergência para a melhor rota nos casos em que não há indícios de ocupação dos *buffers*.

Figura 23 – Gráficos da probabilidade de seleção e da utilização das rotas¹.



Fonte: Autoria própria.

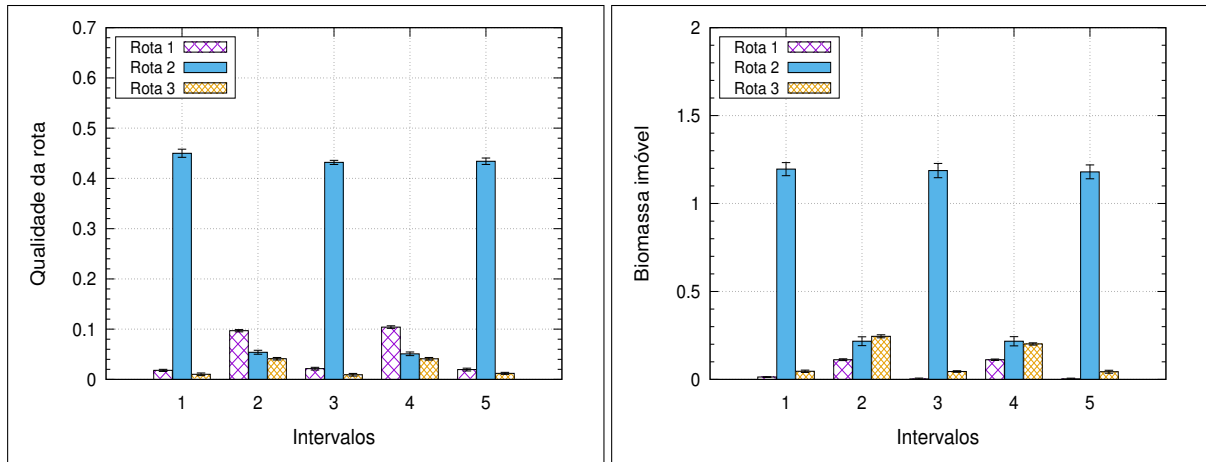
A Fig. 24a mostra o gráfico da qualidade das rotas (Λ), fornecida pela relação entre a disponibilidade dos *buffers* e a quantidade de saltos na rota, durante a simulação nos intervalos 1 a 5. Esta informação de qualidade é gerada no caminho entre origem e destino e atualizada pela mensagem HYPHA-ACK em todos os nós da rota. O valor mostrado no gráfico é aquele constante nos nós vizinhos (2, 10 e 12) visto pela fonte de dados. O Λ é utilizado na Eq. 20b para atualização da biomassa móvel. O gráfico mostra que a Rota 2 apresenta o melhor valor nos intervalos com uma fonte de dados e com a entrada da fonte S_2 reduz a qualidade ficando menos atrativa que a Rota 1 e praticamente se igualando à Rota 3.

A Fig. 24b mostra o gráfico do nível de biomassa imóvel visto pelo nó de origem. Esta informação é utilizada no cálculo da probabilidade de seleção de rotas. Observa-se que os níveis

¹ A barra de erro é o intervalo de confiança a 95 %.

de biomassa caem quando a qualidade das rotas caem, nos intervalos 2 e 4, uma vez que o volume de tráfego também diminui.

Figura 24 – Gráficos da qualidade da rota e do nível de biomassa imóvel.



(a) Qualidade da rota.

(b) Nível de biomassa imóvel.

Fonte: Autoria própria.

5.4 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS EM TOPOLOGIA MÓVEL

Este experimento tem o objetivo de comparar o desempenho do HyphaNet para variações dos parâmetros α , β , μ e Ω . O cenário tem área de $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ com 100 nós. O alcance do rádio está configurado para 250 m. O modelo de tráfego considera simulações com 10 fontes de tráfego CBR/UDP enviando pacotes de 512 bytes. O RWP fornece a mobilidade com velocidades no intervalo $[1, 20] \text{ m/s}$ e cinco períodos de pausa com os valores: 0, 15, 30, 60, 120 e 240 s. Para cada pausa foram executadas 120 rodadas de 180 s. Nesta simulação, optou-se pela avaliação do desempenho do protocolo em relação aos períodos de pausa para avaliar o impacto da mobilidade sobre os parâmetros. Os modelos de mobilidade e tráfego são distintos para cada rodada. Os parâmetros HyphaNet utilizados neste cenário estão representados no Quadro 7.

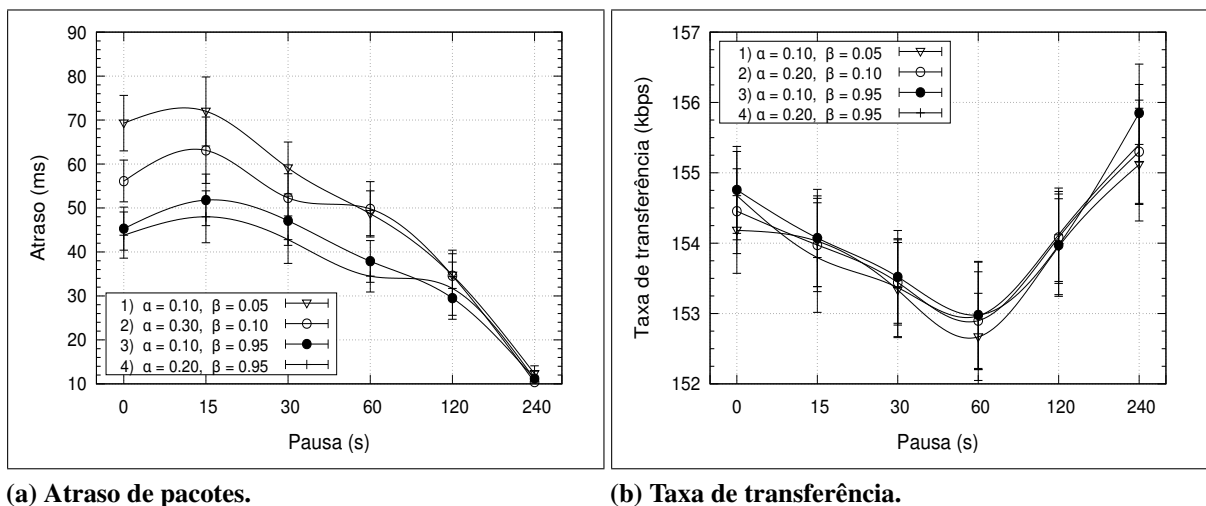
5.4.1 Teste de desempenho com os parâmetros α, β

Este teste foi executado com a variação de α e β e os parâmetros $\mu = 2$ e $\Omega = 1$. A relação entre α e β influencia na conversão da biomassa móvel/imóvel e degradação da biomassa

imóvel, respectivamente. As Figs. 25a e 25b mostram os gráficos do desempenho, atraso e a taxa de transferência, em relação aos períodos de pausa.

Os resultados mostram que há uma variação significativa dos resultados do atraso com a variação dos parâmetros, principalmente para os casos de maior mobilidade ou pausas menores. Observa-se que quanto maior a relação α/β melhor o desempenho do protocolo. No gráfico temos os extremos onde $\alpha = 0,20$ e $\beta = 0,95$ apresenta o melhor resultado, aproximadamente 55 % mais favorável no atraso, enquanto $\alpha = 0,10$ e $\beta = 0,05$ o pior. Isso acontece porque o protocolo tem convergência mais rápida quando a conversão de biomassa é mais significativa que a taxa de degradação. Entretanto, para os valores α e β considerados o impacto sobre a taxa de transferência é pouco significativo.

Figura 25 – Gráficos do desempenho² em função dos parâmetros α e β .



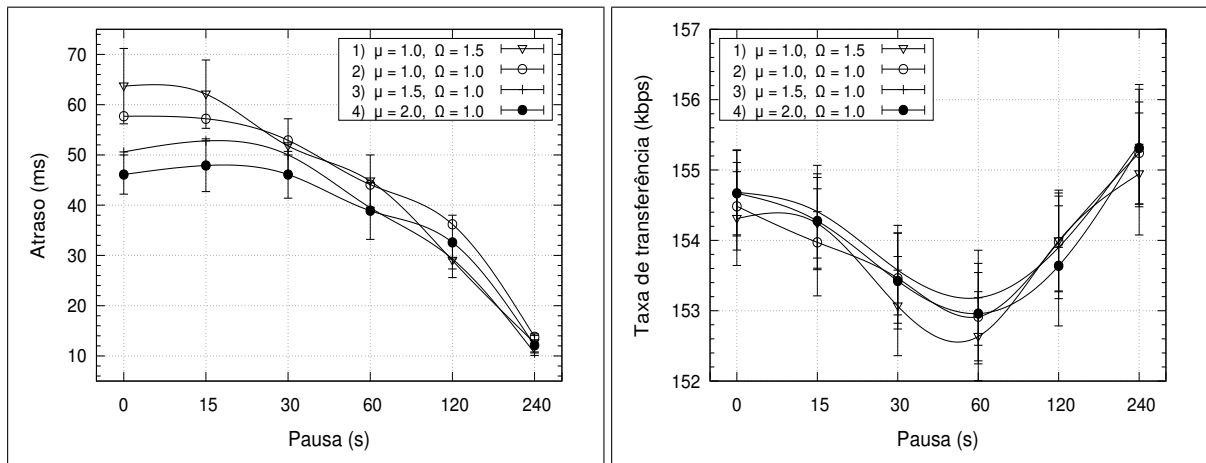
Fonte: Autoria própria.

5.4.2 Teste de desempenho com os parâmetros μ, Ω

Este teste foi executado com a variação de μ e Ω e os parâmetros $\alpha = 0,1$ e $\beta = 0,95$. Os parâmetros μ e Ω regulam a sensibilidade do protocolo no processo de seleção de rotas. Ou seja, o critério de seleção de rotas pode pender para rotas mais curtas (caso do μ maior) ou para rotas de maior qualidade (caso do Ω maior). Os parâmetros HyphaNet utilizados neste cenário estão representados no Quadro 7. As Figs. 26a e 26b mostram os gráficos do desempenho em relação ao atraso e a taxa de transferência.

² Uma longa combinação de alfa e beta foi considerada, e os gráficos mostram apenas os casos mais significativos.

Figura 26 – Gráficos do desempenho em função dos parâmetros μ e Ω .



(a) Atraso de pacotes.

(b) Taxa de transferência.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que não há impacto significativo na taxa de transferência. O atraso mostra diferenças relevantes nos valores quando se altera a relação entre μ/Ω . No cenário testado o melhor desempenho ocorreu para o protocolo sensível às rotas mais curtas. No gráfico, o conjunto $\mu = 2,0$ e $\Omega = 1,0$ apresenta o melhor valor, aproximadamente 45 % mais favorável no atraso, isso acontece porque o protocolo prioriza rotas mais curtas (com maior nível de biomassa imóvel). Por outro lado, para $\mu = 1,0$ e $\Omega = 1,5$ o desempenho piora (em situação de maior mobilidade), possivelmente por evitar rotas com buffers ocupados e forçar o tráfego para caminhos mais longos.

5.5 AVALIAÇÃO DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Este experimento tem o objetivo de comparar o desempenho do HyphaNet para variações dos parâmetros de tráfego em cenário com mobilidade. Nos cenários a rede possui uma topologia com 100 nós sobre uma área de $1000 \times 1000 \text{ m}^2$, obtendo a densidade de um nó a cada 10000 m^2 . O alcance do rádio está configurado para 250 m.

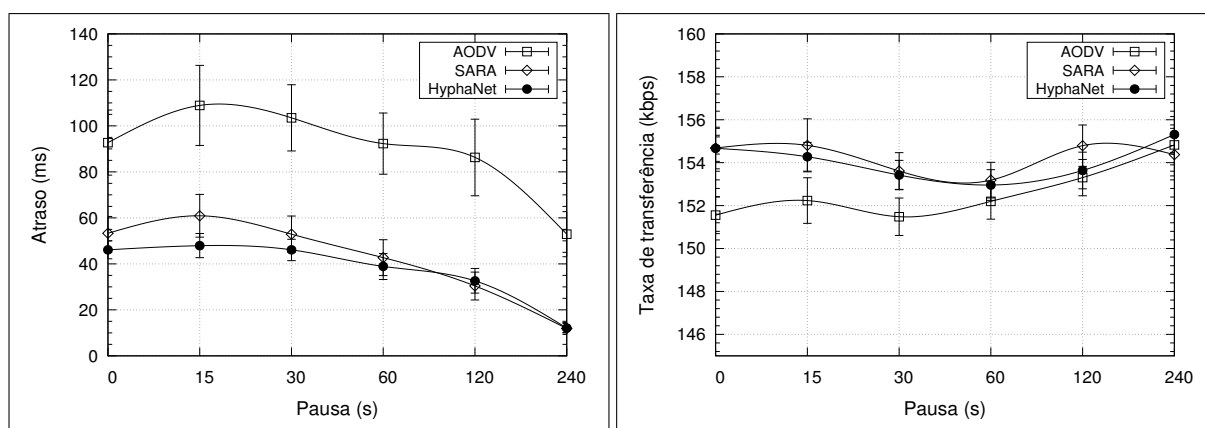
5.5.1 Cenário 1

O cenário 1 consiste em uma rede com 10 fontes de tráfego CBR/UDP transmitindo com pacotes de 512 bytes e taxa de envio de quatro pacotes/s. O RWP fornece a mobilidade com velocidades no intervalo $[1, 20] \text{ m/s}$. Os tempos de pausa são: 0, 15, 30, 60, 120 e 240 s. Para

cada pausa foram executadas 120 rodadas de 180 s. Os modelos de mobilidade e tráfego foram gerados distintamente para cada rodada. Os parâmetros HyphaNet utilizados neste cenário estão representados no Quadro 7. As Figs. 27 a 28 mostram os gráficos comparativos de desempenho do cenário 1, considerando as métricas: Atraso, Taxa de transferência, Taxa de entrega e *Overhead*, entre os protocolos AODV, SARA e HyphaNet.

O cenário 1 apresenta condições de baixo tráfego. O HyphaNet apresenta resultados superiores ao AODV e sensivelmente próximos do SARA. Apenas no *overhead* o HyphaNet é menos promissor que o AODV, devido, principalmente, ao excesso de mensagens HYPHA-ACK de controle utilizadas para atualizar a rota. O HyphaNet apresenta valores de atraso sensivelmente melhores que o SARA para as pausas 0, 15 e 30 s. Em relação ao desempenho das taxas de entrega e taxas de transferência de dados não observa-se diferenças significativas entre o HyphaNet e SARA. Na métrica do *overhead*, o HyphaNet tem desempenho ligeiramente superior ao SARA.

Figura 27 – Gráficos comparativos³ do atraso e taxa de transferência (*throughput*).



(a) Atraso.

(b) Taxa de transferência.

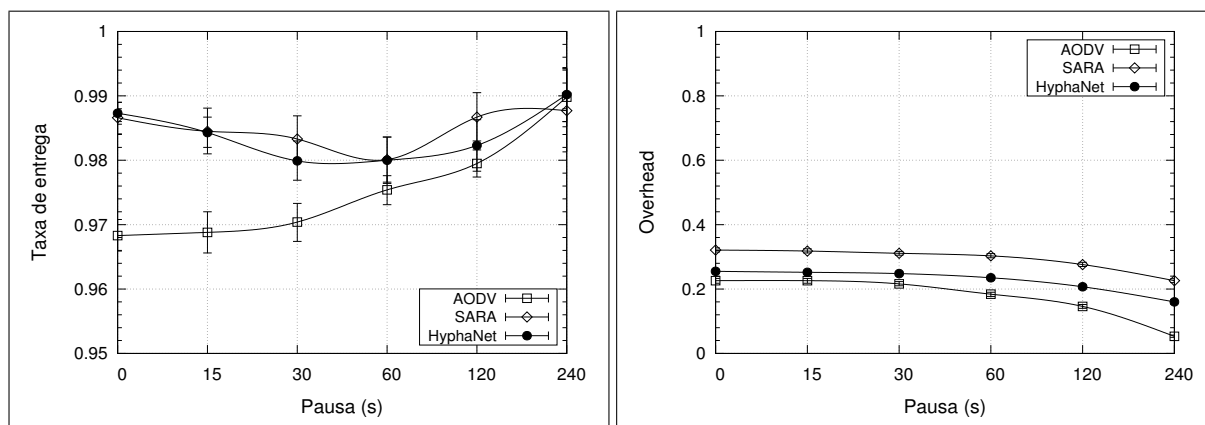
Fonte: Autoria própria.

5.5.2 Cenário 2

O cenário 2 tem o objetivo de comparar o desempenho do HyphaNet para diferentes quantidades de fontes de tráfego enviando dados simultaneamente. O modelo de tráfego considera simulações com 10, 20 e 30 fontes de tráfego CBR/UDP enviando pacotes de 512 bytes a uma taxa de quatro pacotes/s. O RWP fornece a mobilidade com velocidades no intervalo [1, 20] m/s.

³ A barra de erro é o intervalo de confiança a 95 %.

Figura 28 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (*delivery*) e (*overhead*).



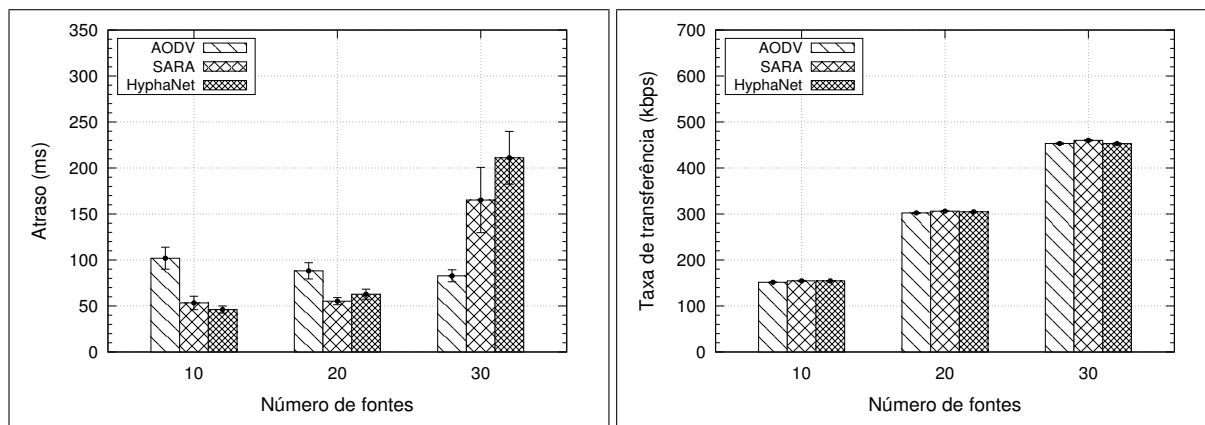
(a) Taxa de entrega.

(b) Overhead.

Fonte: Autoria própria.

Os tempos de pausa são: 0, 15, 30, 60, 120 e 240 s. Para cada pausa foram executadas 120 rodadas de 180 s. Os modelos de mobilidade e tráfego são distintos para cada rodada. Os parâmetros HyphaNet utilizados neste cenário estão representados no Quadro 7. As Figs. 29 e 30 mostram os gráficos comparativos de desempenho considerando todas as métricas.

Figura 29 – Gráficos comparativos do atraso e taxa de transferência (*throughput*).



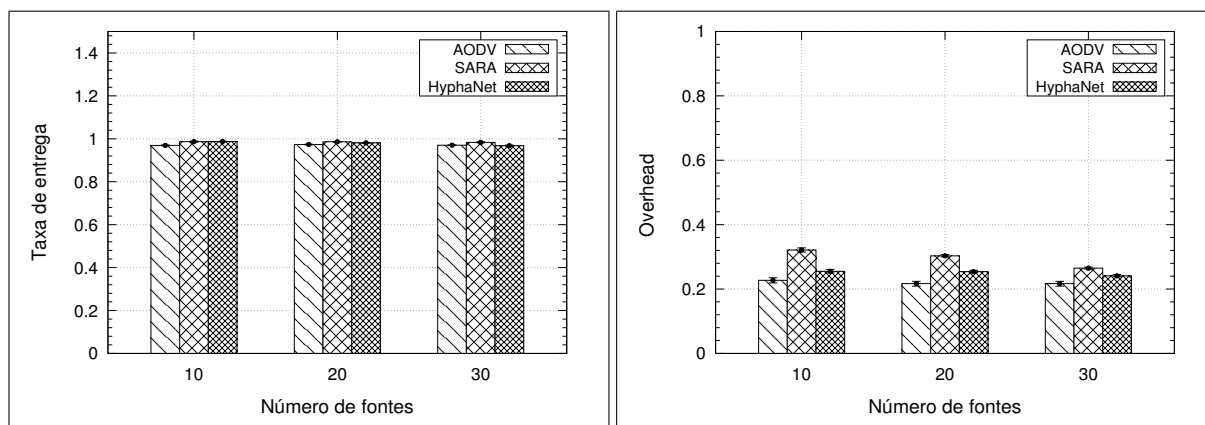
(a) Atraso.

(b) Taxa de transferência.

Fonte: Autoria própria.

Neste cenário, o desempenho é avaliado com diferentes fontes enviando dados. Nos algoritmos bioinspirados, HyphaNet e SARA, a tendência é aumento do atraso com a quantidade de fontes, devido ao aumento do processamento de pacotes nos nós causado pelo aumento do volume de pacotes de dados somados aos pacotes de controle. Lembrando que no SARA o feromônio é atualizado pelo próprio tráfego e, desse modo, para cada pacote de dados há um

Figura 30 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (*delivery*) e da perda de pacotes nas filas (*dropped*).



(a) Taxa de entrega.

(b) Overhead.

Fonte: Autoria própria.

respectivo pacote de retorno para controle que deve ser processado e ocupar espaço de *buffer* nos nós da rota. Do mesmo modo, o HyphaNet atualiza a massa imóvel com um pacote de controle (do tipo HyphaACK) retornando pelo mesmo caminho realizado por cada pacote de dados, causando um contra-fluxo de pacotes que consome recursos dos nós na rota. O AODV, por sua vez, melhora o desempenho com aumento de fontes, isso pode ser explicado porque o AODV lida melhor com a média dos envios com poucos pacotes de controle. O restante das métricas, a taxa de transferência e de entrega, acompanham de forma linear o aumento do tráfego causado pelas fontes. Na comparação entre os três algoritmos, observa-se que o HyphaNet apresenta valores de atraso melhores que o AODV e semelhantes ao SARA, exceto na situação para 30 fontes onde supera a todos, quanto ao *overhead* é ligeiramente mais alto que o AODV e melhor que o SARA em todos os casos.

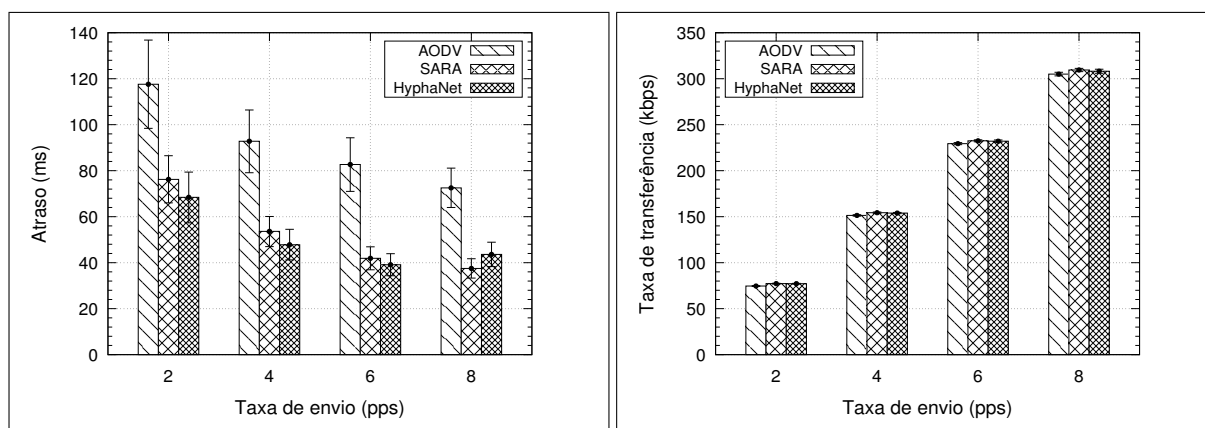
5.5.3 Cenário 3

O cenário 3 tem o objetivo de comparar o desempenho do HyphaNet para diferentes taxas de envio de pacotes. O modelo considera simulações com 10 fontes de tráfego CBR/UDP enviando pacotes de 512 bytes com taxas de 1, 2, 4 e 8 pacotes/s. O RWP fornece a mobilidade com velocidades no intervalo [1, 20] m/s. Os tempos de pausa são: 0, 15, 30, 60, 120 e 240 s. Para cada pausa foram executadas 120 rodadas de 180 s. Os modelos de mobilidade e tráfego são distintos para cada rodada. Os parâmetros HyphaNet utilizados neste cenário estão representados

no Quadro 7. As Figs. 31 e 32 mostram os gráficos comparativos de desempenho considerando todas as métricas.

Neste cenário, a variação da taxa de transmissão provoca o aumento do volume de pacotes na rede e mostra a capacidade de resposta dos protocolos de roteamento. Com aumento das taxas de envio, observa-se que os atrasos dos pacotes tendem a diminuir, na média, devido à melhor utilização das rotas quando estabelecidas. Entretanto, o HyphaNet tende a aumentar o atraso a partir da taxa de oito pacotes/s, isto se deve principalmente às mensagens de retorno HyphaACK no contra-fluxo que concorrem pelos recursos dos nós na rota utilizada. O *overhead* no HyphaNet permaneceu melhor se comparado com o SARA, mesmo com aumento das taxas de envio. Nos três protocolos o *overhead* diminuiu devido ao aumento do volume de dados em relação às mensagens de controle. Em todas as variações de taxas não houve degradação do desempenho das taxas de transferência e entrega de dados, que apresentaram valores semelhantes para os três protocolos.

Figura 31 – Gráficos comparativos do atraso e taxa de transferência (*throughput*).



(a) Atraso.

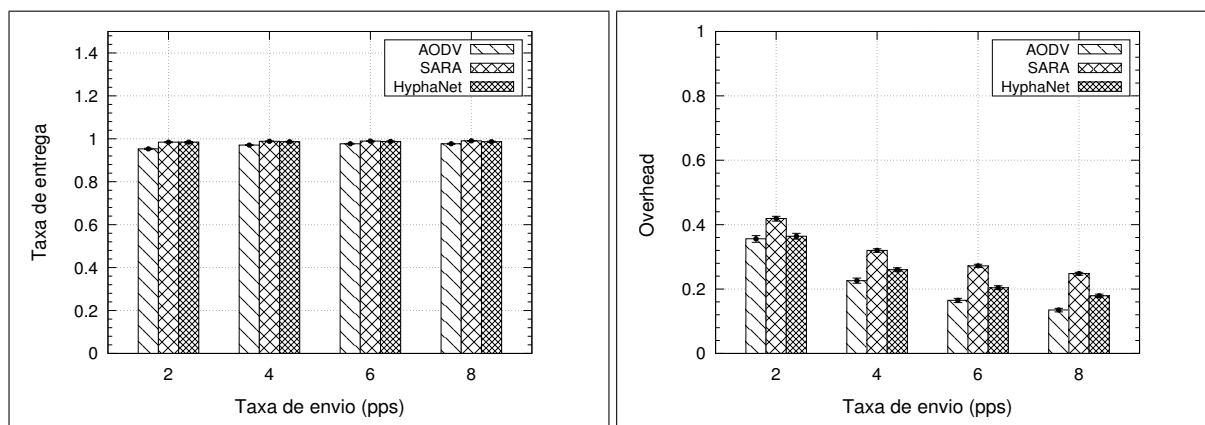
(b) Taxa de transferência.

Fonte: Autoria própria.

5.5.4 Cenário 4

O cenário 4 tem o objetivo de comparar o desempenho do HyphaNet para diferentes tamanhos de pacotes. O modelo de tráfego considera simulações com 10 fontes de tráfego CBR/UDP enviando pacotes de 64, 512 e 1024 bytes com taxa de 4 pacotes/s. O RWP fornece a mobilidade com velocidades no intervalo $[1, 20]$ m/s. Os tempos de pausa são: 0, 15, 30, 60, 120

Figura 32 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (*delivery*) e *Overhead*.



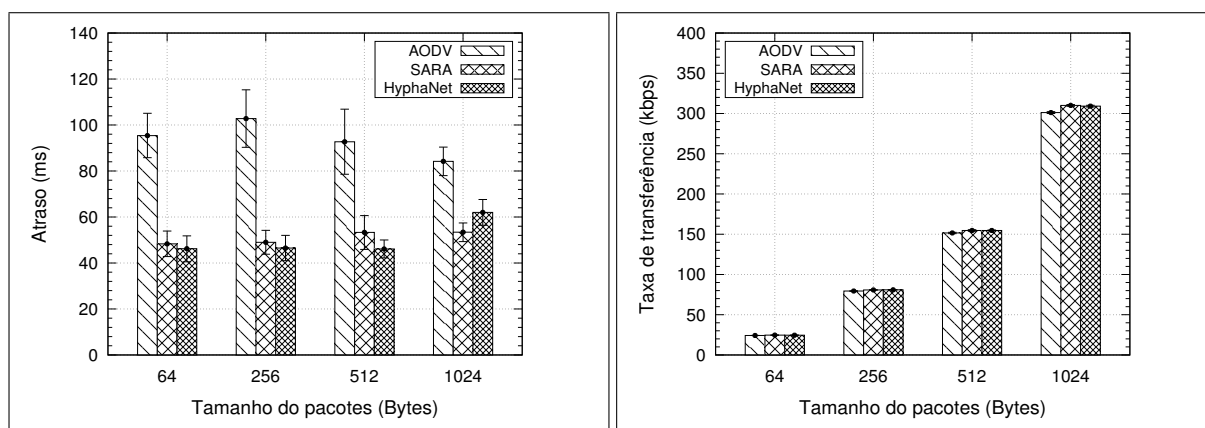
(a) Taxa de entrega.

(b) Overhead.

Fonte: Autoria própria.

e 240 s. Para cada pausa foram executadas 120 rodadas de 180 s. Os modelos de mobilidade e tráfego são distintos para cada rodada. Os parâmetros HyphaNet utilizados neste cenário estão representados no Quadro 7. As Figs. 33 e 34 mostram os gráficos comparativos de desempenho para todas as métricas com a variação do tamanho do pacote de dados.

Figura 33 – Gráficos comparativos do atraso e taxa de transferência (*throughput*).



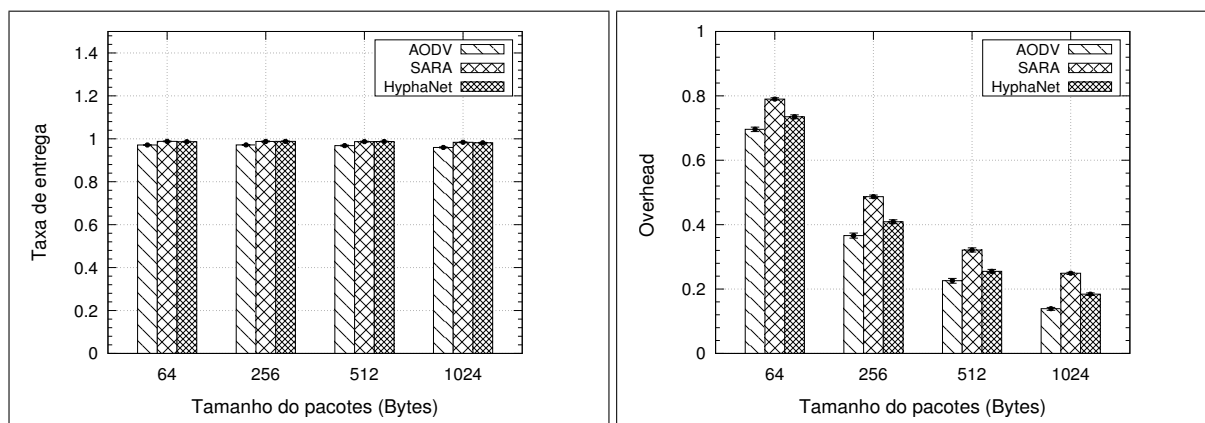
(a) Atraso.

(b) Taxa de transferência.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se neste cenário que não há impacto significativo no desempenho do HyphaNet em relação às taxas de transferência e entrega de dados à medida que o pacote aumenta. O atraso do HyphaNet é melhor em todos os casos, exceto para pacotes de 1024 bytes em que o valor é sensivelmente maior que o SARA. Os resultados mostram que pacotes menores que 1024 bytes não influenciam significativamente o atraso dos pacotes no HyphaNet.

Figura 34 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (*delivery*) e do (*overhead*).



(a) Taxa de entrega.

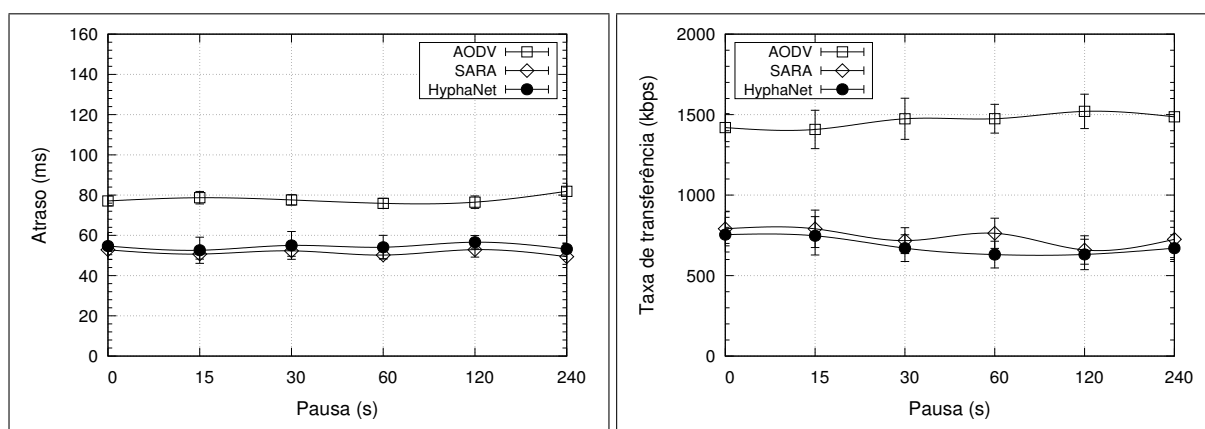
(b) *Overhead*.

Fonte: Autoria própria.

5.5.5 Cenário 5

O cenário 5 tem o objetivo de comparar o desempenho do HyphaNet para tráfego com o protocolo TCP. O modelo de tráfego considera simulações com 10 fontes de tráfego FTP/TCP enviando pacotes de 512 bytes. O RWP fornece a mobilidade com velocidades no intervalo [1, 20] m/s. Os tempos de pausa são: 0, 15, 30, 60, 120 e 240 s. Para cada pausa foram executadas 120 rodadas de 180 s. Os modelos de mobilidade e tráfego são distintos para cada rodada. Os parâmetros HyphaNet utilizados neste cenário estão representados no Quadro 7. As Figs. 35 e 36 mostram os gráficos comparativos de desempenho.

Figura 35 – Gráficos comparativos do atraso e taxa de entrega (*delivery*).

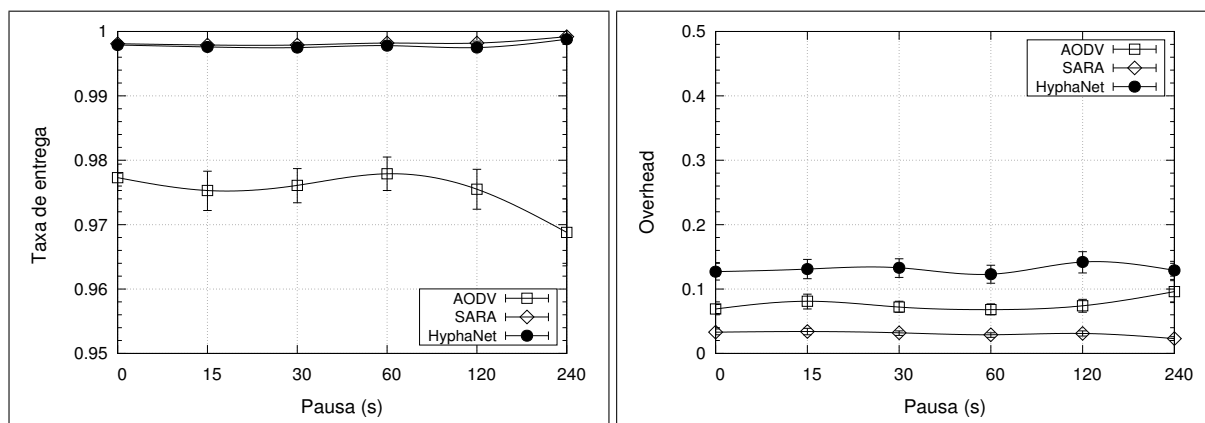


(a) Atraso.

(b) Taxa de transferência.

Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Gráficos comparativos da taxa de entrega (*delivery*) e do (*overhead*).



(a) Taxa de entrega.

(b) *Overhead*.

Fonte: Autoria própria.

Neste cenário com tráfego TCP observa-se que o HyphaNet e SARA são muito semelhantes, o atraso e taxa de entrega são melhores que o AODV. A taxa de transferência do AODV é significativamente melhor para o esse tipo de tráfego, devido à menor quantidade de mensagens de controle. O *overhead* do HyphaNet é o maior entre todos devido ao peso da mensagem HYPHA-ACK presente em todos pacotes de dados enviados. No tráfego TCP, o SARA reduz significativamente o *overhead* e supera o HyphaNet, o que não acontece nas simulações com tráfego CBR/UDP, isso ocorre porque o SARA aproveita a mensagem ACK-TCP para reforçar a rota com feromônio, desta forma elimina o peso de mensagens de retorno associadas ao tráfego de dados.

6 CONCLUSÃO

Esta tese teve como objetivo propor, testar e comparar um novo algoritmo para MANETs bioinspirado em redes de fungos. A partir de pesquisas bibliográficas da área biológica foi possível obter uma visão acadêmica do domínio existencial destes seres vivos e, conseqüentemente, uma interpretação correta dos modelos matemáticos que representam o seu comportamento na busca pela sobrevivência e, a partir daí, lançar idéias para propor um protocolo bioinspirado.

A ideia de se utilizar fungos como inspiração veio da convicção de que estes seres desenvolveram aptidão para sobrevivência em ambientes com escassez de recursos, e com uma atenta observação seria possível extrair e levar essas características para a área de redes MANETs. Tendo-se em vista que o maior problema das redes móveis *ad hoc* é garantir performance de operação com baixo consumo de recursos (banda de transmissão, segurança, entre outros), o HyphaNet foi implementado com o objetivo de propor soluções para estes problemas.

A estratégia do HyphaNet em imitar o comportamento das redes de fungos, principalmente em relação ao seu mecanismo de transporte de nutrientes, mostrou-se promissora. Da mesma maneira, à semelhança das redes *ad hoc* móveis, as redes de fungos são dinâmicas e dependentes da autoconfiguração para se adaptar ao ambiente de mudanças. Essas características tornam as redes fungais resilientes e inspiram o HyphaNet a possuir estas funcionalidades.

A literatura mostra diversas propostas de solução para os problemas em redes móveis *ad hoc*, desde os protocolos clássicos com estratégia "vetor-distância" (por exemplo, AODV e DSDV), aqueles baseados em "estado de enlace" (por exemplo, OSPF e OLSR), dos tipos reativos, proativos ou híbridos, até os algoritmos bioinspirados em colônia de insetos sociais (ACO, ABC, entre outros). Todas as propostas trazem melhorias e até inovações em alguns casos, por exemplo, o conceito de zonas e a implementação do ACO foram inovações nesta área. Mas, ainda há deficiências que se evidenciam à medida que crescem as demandas modernas por serviços em redes de dados, principalmente nos aspectos do *overhead* e QoS (*Quality of Service*).

Por ser um algoritmo bioinspirado, algumas das características funcionais do HyphaNet podem ser comparadas às do algoritmo ACO, pois têm funções comuns nas redes de comunicação. A principal semelhança entre HyphaNet e ACO é o processo de roteamento, envolvendo as informações de rotas, a estrutura da tabela de roteamento e a heurística de seleção de rotas.

Entretanto, a principal diferença é o conceito de atratividade, dependente do nível de biomassa imóvel nos nós e da qualidade da rota, e cujo valor é compartilhado para toda a rede.

No HyphaNet, o critério de seleção de rotas baseado na atratividade é função de dois fatores, um específico da abordagem por fungos (biomassa imóvel), e um que pode ser escolhido livremente pelo projetista. No presente trabalho foi escolhido o "espaço disponível em buffer", representado pela variável ABS, entretanto, outros "indicadores de qualidade" podem também ser considerados, por exemplo, nível de bateria, nível de sinal de rádio, entre outros.

Após o desenvolvimento, o HyphaNet foi testado com simulações no NS-2.35, e os resultados foram comparados com os protocolos AODV e SARA nas mesmas configurações e cenários. O HyphaNet mostra bom desempenho nas métricas consideradas: atraso dos pacotes *delay*, taxa de transferência de dados, taxa de entrega, sobrecarga de roteamento (*overhead*). Assim como, possui funcionalidades importantes de recuperação de falhas e redução do *overhead* por difusão que auxiliam na operação do sistema.

Uma análise da escalabilidade do HyphaNet mostra que o protocolo é escalável, pois o tamanho necessário da tabela de roteamento em cada nó cresce como $O(\log N)$, onde N é o número de nós na rede. Escalabilidade é a possibilidade de expansão do tamanho da rede, de modo que a complexidade do sistema aumente de forma uniforme. Assim, é possível que a capacidade da infraestrutura se adapte à demanda crescente de tráfego.

Considerando-se uma revisão dos resultados obtidos nas simulações, O HyphaNet obteve melhores resultados em comparação ao AODV em situações de baixo tráfego, exceto o *overhead* que apresentou um valor sensivelmente maior, devido à presença das mensagens HYPHA-ACK proporcionais ao tráfego de dados. Na comparações diretas com o SARA, o HyphaNet igualou-se em performance na maioria dos casos e, em alguns cenários, conseguiu superá-lo no atraso de pacotes e *overhead*, às exceções dos cenários de relativo alto tráfego. As simulações com 8 pacotes/s foram utilizadas para representar situações de alto tráfego, que são importantes para analisar a resposta do algoritmo diante de uma rede estressada, e o Hyphanet apresentou maior atraso em relação ao SARA, mas *overhead* menor. Comparando-se o HyphaNet sob o estresse de 30 fontes nota-se que obteve a pior resposta entre os demais protocolos. No caso com pacotes de 1024 bytes, o HyphaNet mostrou o atraso sensivelmente maior que o SARA e o *overhead* melhor.

No teste de convergência, com auxílio de uma topologia fixa, os resultados mostram que os valores de probabilidade estimada e utilização das rotas são superiores nos caminhos mais

curtos e com *buffers* menos utilizados e, portanto, mostrando que há convergência do algoritmo para a melhor rota da rede.

Nas simulações com tráfego TCP, o HyphaNet mostrou-se semelhante ao SARA e superior em desempenho quanto ao atraso e taxa de entrega. Entretanto, apresentou *overhead* e taxa de transferência com desempenho inferior ao AODV e SARA. Isso pode ser explicado porque o TCP controla automaticamente o tráfego e encontrou o equilíbrio com baixo *delay*, mas penalizando a taxa de transferência. O *overhead* apresentou altos valores neste cenário, devido às mensagens HYPHA-ACK que acompanham o aumento do fluxo de pacote de dados.

Portanto, o HyphaNet pode ser recomendado para redes com 100 nós ou maior, aplicações sobre protocolos de transporte UDP e TCP em cenários de baixo tráfego. As condições mais favoráveis de operação indicam o limite de 20 % dos nós operando como fonte de dados, transmitindo simultaneamente pacotes de até 1024 bytes com taxas de até 8 pacotes/s.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Esta tese iniciou pesquisas de como o comportamento das redes de fungos poderia ser aplicado para desenvolver protocolos bioinspirados para MANETs. Muito embora se tenha obtido resultados promissores, há necessidade da continuação de pesquisas no sentido de otimização do protocolo e melhoria dos indicadores de desempenho. Dessa forma, tem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

1. Introduzir mecanismos de otimização para diminuir o *delay* e *overhead*, por exemplo reduzir a quantidade de mensagens HYPHA-ACK que, atualmente, é diretamente proporcional ao tráfego e causa impacto direto no desempenho do protocolo, principalmente nos cenários de alto tráfego. Neste casos as mensagens HYPHA-ACK poderiam ser controladas por temporizadores nas rotas ativas juntamente com os eventos de entrega de pacotes de dados no nó de destino.
2. Melhorar o desempenho para tráfego TCP. Uma proposta é inserir um mecanismo para rotear as mensagens ACK-TCP para retornarem pelo mesmo caminho dos pacotes de dados e, assim, poderiam substituir as HYPHA-ACK. Isso evitaria que as mensagens ACK-TCP e HYPHA-ACK concorram entre si e ocupem recursos na rota ativa entre origem-destino.
3. Inserção de agentes de controle para atualização de rotas e diminuir a dependência das mensagens de retorno HYPHA-ACK.

4. Simular e analisar outros cenários de diversos tamanhos, número de nós e de fontes, e tipos de tráfego (por exemplo, tráfego em rajadas).
5. Substituir o ABS (espaço disponível no buffer) por outros indicadores de qualidade de enlace, ou estado de nó, de acordo com a rede considerada. Por exemplo, em redes de sensores sem fio, o nível de carga das baterias é um fator relevante. Nas redes veiculares, entretanto, o sentido de movimentação dos nós pode ser crucial para o desempenho.

REFERÊNCIAS

ALBAYRAK, Z.; ZENGIN, A. Bee-MANET: A New Swarm-based Routing Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. **Electronics and Electrical Engineering**, Publishing House Technologija, v. 20, n. 3, mar 2014.

ALSLAIM, Mona N.; ALAQEL, Haifaa A.; ZAGHLOUL, Soha S. A comparative study of MANET routing protocols. *In: The Third International Conference on e-Technologies and Networks for Development (ICeND2014)*. Beirute: IEEE, 2014. DOI:10.1109/icend.2014.6991375.

ANNAMALAI, Palaniappan. **Comparative Performance Study of Standardized Ad-Hoc Routing Protocols and OSPF-MCDS**. 2005. Dissertação (Mestrado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005. Acesso em: 10/01/2019.

AQUINO, Guilherme Pedro. Perspectivas para o 5G. **ResearchGate**, 2015.

ASENOVA, Elitsa; FU, Eileen; JR, Dan Nicolau; LIN, Hsin-Yu; NICOLAU, Dan. Space searching algorithms used by fungi. **EAI Endorsed Transactions on Collaborative Computing**, ACM, v. 2, n. 9, 5 2016.

ASENOVA, Elitsa; LIN, Hsin-Yu; FU, Eileen; Nicolau Jr., Dan V.; NICOLAU, Dan V. Optimal Fungal Space Searching Algorithms. **IEEE TRANSACTIONS ON NANOBIOSCIENCE, VOL. 15, NO. 7, OCTOBER 2016**, 2016.

AYARI, Mouna; KAMOUN, Farouk; PUJOLLE, Guy. Towards Autonomous Mobile Ad Hoc Networks: A Distributed Policy-Based Management Approach. *In: 2008 The Fourth International Conference on Wireless and Mobile Communications*. Atenas: IEEE, 2008.

BARTINICKI-GARCIA, S.; HERGERT, F.; GIERZ, G. Computer simulation of fungal morphogenesis and the mathematical basis for hyphal (tip) growth. **Protoplasma**, p. ., 1989.

BHATTACHARYYA, Siddhartha; DUTTA, Paramartha. **Handbook of Research on Swarm Intelligence in Engineering**. Hershey: IGI Global, 2015. DOI: 10.4018/978-1-4666-8291-7. 743 p.

BOSWELL, G.; DAVIDSON, Fordyce. Growth and Function of Fungal Mycelia in Heterogeneous Environments. **Bulletin of Mathematical Biology**, Springer Nature, v. 65, n. 3, may 2003.

BRABAZON, Anthony; MCGARRAGHY, Seán. **Foraging-Inspired Optimisation Algorithms**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2018.

BROCH, Josh; MALTZ, David A.; JOHNSON, David B.; HU, Yih-Chun; JETCHEVA, Jorjeta. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. *In: Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking - MobiCom 98*. Dallas: ACM Press, 1998. p. 85–97.

CAIRNEY, John W. G. Basidiomycete mycelia in forest soils: dimensions, dynamics and roles in nutrient distribution. **Mycological Research**, Elsevier BV, v. 109, n. 1, jan 2005.

CAMP, Tracy; BOLENG, Jeff; DAVIES, Vanessa. A survey of mobility models for ad hoc network research. **Wireless Communications and Mobile Computing**, Wiley, v. 2, n. 5, p. 483–502, 2002.

CARO, Gianni A. Di; DORIGO, Marco. **AntNet: A Mobile Agents Approach to Adaptive Routing**. Bruxelas, 1999.

CARO, Gianni Di; DUCATELLE, Frederick; GAMBARDELLA, Luca Maria. AntHocNet: An Ant-Based Hybrid Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks. *In: Lecture Notes in Computer Science*. Berlim: Springer, 2004.

CARO, Gianni Di; DUCATELLE, Frederick; GAMBARDELLA, Luca Maria. AntHocNet: an adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks. **European Transactions on Telecommunications**, Wiley, v. 16, n. 5, p. 443–455, 2005.

CLAUSEN, T.; JACQUET, P. **Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)**. [S.l.]: The Internet Society, 2003.

CORADIN, Juliana Hey. **Mathematical modeling of the growth of filamentous fungi on moist and nutritious surfaces in contact with air**. 2010. Dissertação (Mestrado) — UFPR, 2010.

CORREIA, Fernando; VAZÃO, Teresa. Simple Ant Routing Algorithm. **Ad Hoc Networks**, Elsevier, v. 8, n. 8, p. 810–823, nov. 2010.

CORSON, S.; MACKER, J. **Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations**. Estados Unidos, 1999. DOI:10.17487/RFC2501.

DAVIDSON, F. A. Modelling the Qualitative Response of Fungal Mycelia to Heterogeneous Environments. **Journal of Theoretical Biology**, Elsevier BV, v. 195, n. 3, dec 1998.

DORIGO, Marco; STÜTZLE, Thomas. **Ant Colony Optimization**. Cambridge, MA: MIT University Press Group Ltd, 2004.

DUCATELLE, Frederick. **Adaptive Routing in Ad Hoc Wireless Multi-hop Networks**. 2007. Tese (Doutorado) — Faculty of Informatics of the University of Lugano, Switzerland, 2007.

DUCATELLE, Frederick; CARO, Gianni A. Di; GAMBARDELLA, Luca Maria. An Analysis of the Different Components of the AntHocNet Routing Algorithm. *In: Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*. Berlin: Springer, 2006.

DUCATELLE, Frederick; CARO, Gianni Di; GAMBARDELLA, Lucia Maria. Using Ant Agents to Combine Reactive and Proactive Strategies for Routing in Mobile Ad-Hoc Networks. **International Journal of Computational Intelligence and Applications**, World Scientific Pub Co Pte Lt, v. 05, n. 02, p. 169–184, jun 2005.

ESPÓSITO, Elisa. **Fungos: Uma Introducao a Biologia, Bioquimica e Biotecnologia**. 2. ed. Caxias do Sul: EDUCS, 2010.

FALCONER, R. E.; BOWN, J. L.; WHITE, N. A.; CRAWFORD, J. W. Biomass recycling and the origin of phenotype in fungal mycelia. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, The Royal Society, v. 272, n. 1573, aug 2005.

FLEMING, Nic. **Plants talk to each other using an internet of fungus**. 2014. BBC Earth. Disponível em: <http://www.bbc.com/earth/story/20141111-plants-have-a-hidden-internet>.

GIAGKOS, Alexandros; WILSON, Myra S. BeeIP: Bee-Inspired Protocol for Routing in Mobile Ad-Hoc Networks. *In: From Animals to Animats 11*. Berlin: Springer, 2010.

HAAS, Zygmunt J.; PEARLMAN, Marc R.; SAMAR, Prince. **The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks**. [S.l.]: IETF Internet Draft, 2002.

HANSON, Kristi L.; NICOLAU, Dan V.; FILIPPONI, Luisa; WANG, Lisen; LEE, Abraham P.; NICOLAU, Dan V. Fungi Use Efficient Algorithms for the Exploration of Microfluidic Networks. **Small**, Wiley, v. 2, n. 10, aug 2006.

HAO, Xu; FALCONER, Ruth; BRADLEY, David; CRAWFORD, John. FUNNet - A Novel Biologically-Inspired Routing Algorithm Based on Fungi. *In: 2009 Second International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service*. [S.l.]: IEEE, 2009.

HEATON, Luke; OBARA, Boguslaw; GRAU, Vincente; JONES, Nick; NAKAGAKI, Toshiyuki; BODDY, Lynne; FRICKER, Mark D. Analysis of fungal networks. **Elsevier and British Mycological Society**, 2012.

HELD, Marie; EDWARDS, Clive; NICOLAU, Dan V. Probing the growth dynamics of *Neurospora crassa* with microfluidic structures. **Fungal Biology**, Elsevier BV, v. 115, n. 6, jun 2011.

HEYLIGHEN, Francis. Stigmergy as a universal coordination mechanism I: Definition and components. **Cognitive Systems Research**, Elsevier BV, v. 38, jun 2016.

IEEE-802.11. IEEE Std 802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. **IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)**, p. 1–3534, 2016.

JOHNSON, David B.; MALTZ, David A.; HU, Yih-Chun. **The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4**. RFC: 4728: IETF Internet Draft, 2007.

KARABOGA, Dervis; BASTURK, Bahriye. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. **Journal of Global Optimization**, v. 39, p. 459–471, 2007.

LINDAHL, BJÖRN D.; OLSSON, STEFAN. Fungal translocation - creating and responding to environmental heterogeneity. **Mycologist**, Elsevier BV, v. 18, n. 2, may 2004.

LORAWAN. **LoRaWAN. What is it? A technical overview of LoRa and LoRaWAN**. [S.l.], 2015.

LUKE, Sean. **Essentials of Metaheuristics (Second Edition)**. [S.l.]: Lulu, 2013. Online Version 2.2. ISBN 978-1-300-54962-8. Acesso em: 01/03/2019.

MESKKAUSKAS, Audrius; MCNULTY, Liam J.; MOORE, David. Concerted regulation of all hyphal tips generates fungal fruit body structures: experiments with computer visualizations produced by a new mathematical model of hyphal growth. **Mycological Research**, Elsevier BV, v. 108, n. 4, apr 2004.

MOORE, David; MESKAUSKAS, Audrius. **The Algorithmic Fungus**. [S.l.]: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. 386 p. Online Version. ISBN 978-1545439258. Acesso em: 09/07/2020.

MUELLER, Stephen; TSANG, Rose P.; GHOSAL, Dipak. Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Issues and Challenges. *In: Performance Tools and Applications to Networked Systems*. Orlando: Springer Berlin Heidelberg, 2004. DOI:10.1007/978-3-540-24663-3_1.

MURTHY, C. Siva Ram; MANOJ, B. S. **Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols**. Nova Jersey: Prentice Hall, 2004. 857 p.

NAKAGAKI, Toshiyuki; YAMADA, Hiroyasu; TÓTH, Ágota. Maze-solving by an amoeboid organism. **Nature**, Springer Nature America, Inc, v. 407, n. 6803, sep 2000. Doi:10.1038/35035159.

NASKI, Sampo. **Performance of Ad Hoc Routing Protocols: Characteristics and Comparison**. 2004.

NS-2. **The Network Simulator - ns-2**. 2014. Information Sciences Institute (ISI).

OLSSON, Stefan. Mycelial density profiles of fungi on heterogeneous media and their interpretation in terms of nutrient reallocation patterns. **Mycological Research**, Elsevier BV, v. 99, n. 2, feb 1995.

OLSSON, Stefan. Colonial Growth of Fungi. *In: **Biology of the Fungal Cell***. Berlim: Springer, 2001.

PARK, Vincent D.; CORSON, M. Scott. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. *In: **Proceedings of the INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Driving the Information Revolution***. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1997. (INFOCOM '97).

PEARLMAN, Marc R.; HAAS, Zygmunt J. Determining the Optimal Configuration for the Zone Routing Protocol. **IEEE JOURNAL**, v. 17, n. 8, ago. 1999.

PERKINS, C.; BELDING-ROYER, E.; DAS, S. **RFC 3561: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing**. [S.l.]: IETF. Network Working Group. Request for Comments: 3561, 2003.

PERKINS, Charles E.; BHAGWAT, Pravin. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers. *In: **Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications - SIGCOMM 94***. [S.l.]: ACM Press, 1994.

PIXABAY. **Stunning Free Images**. 2018. Disponível em: <https://pixabay.com/>. Acesso em: 01/04/2018.

RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless communications: Principles and practice**. [S.l.]: Prentice Hall, 1996. ISBN 0133755363.

RAVEN, Peter H. **Biologia Vegetal**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014.

Reynaga-Peña, Cristina G.; GIERZ, Gerhard; BARTNICKI-GARCIA, Salomon. Analysis of the role of the Spitzenkörper in fungal morphogenesis by computer simulation of apical branching in *Aspergillus niger*. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA**, v. 94, ago. 1997.

SAIGUSA, Tetsu; TERO, Atsushi; NAKAGAKI, Toshiyuki; KURAMOTO, Yoshiki. Amoebae Anticipate Periodic Events. **Physical Review Letters**, American Physical Society (APS), v. 100, n. 1, jan 2008.

SARKAR, Dipika; CHOUDHURY, Swagata; MAJUMDER, Abhishek. Enhanced-Ant-AODV for optimal route selection in mobile ad-hoc network. **Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences**, Elsevier BV, aug 2018.

TERO, A.; TAKAGI, S.; SAIGUSA, T.; ITO, K.; BEBBER, D. P.; FRICKER, M. D.; YUMIKI, K.; KOBAYASHI, R.; NAKAGAKI, T. Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 327, n. 5964, jan 2010. Doi: 10.1126/science.1177894.

THERAULAZ, Guy; BONABEAU, Eric. A Brief History of Stigmergy. **Artificial Life**, MIT Press - Journals, v. 5, n. 2, apr 1999.

TOH, Chai-Keong. Associativity-Based Routing For Ad-Hoc Mobile Networks. **Wireless Personal Communications**, Springer Nature, v. 4, n. 2, 1997.

WANG, Jianping. **HOPNET: A Hybrid routing algorithm for ant colony Optimization Mobile ad hoc NETWORK**. 2007. Tese (Doutorado) — The University of Manitoba Winnipeg, 2007.

WATTERS, Michael K.; VIRAG, Aleksandra; HAYNES, Jennifer; GRIFFITHS, Anthony J. F. Branch initiation in *Neurospora* is influenced by events at the previous branch. **Mycological Research**, Elsevier BV, v. 104, n. 7, jul 2000.

WEDDE, Horst F.; FAROOQ, Muddassar; PANNENBAECKER, Thorsten; VOGEL, Bjoern; MUELLER, Christian; METH, Johannes; JERUSCHKAT, Rene. BeeAdHoc: an energy efficient routing algorithm for mobile ad hoc networks inspired by bee behavior. *In: Proceedings of the 2005, Genetic and Evolutionary Computation Conference - GECCO 05*. Washington DC: ACM Press, 2005. p. 153–160. DOI: 10.1145/1068009.1068034.

WHITESIDES, George M. The origins and the future of microfluidics. **Nature**, Springer Nature, v. 442, n. 7101, jul 2006.

WHITTAKER, Robert Harding. New concepts of kingdoms of organisms. **Science** **163**, 1969. ISS 3863.

WOESE, C. R.; KANDLER, O.; WHEELIS, M. L. Towards a natural system of organisms: proposal for the domains archaea, bacteria, and eucarya. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 87, n. 12, p. 4576–4579, jun 1990.

YANG, Xin She. Firefly Algorithm, Levy Flights and Global Optimization. **Department of Engineering, University of Cambridge**, 2010. ArXiv:1003.1464v1.

YANG, Xin She. **Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms**. 2. ed. Frome: Luniver Press, 2010. 160 p.

YONG, Ed. The Wood Wide Web. **The Atlantic (magazine)**, abr. 2016. Boston, 2016. Disponível em: <https://www.theatlantic.com/science/archive/2016/04/the-wood-wide-web/478224/>. Acesso em: 01/09/2018.

ZHAI, Hongqiang; KWON, Younggoo; FANG, Yuguang. Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs. **Wireless Communications and Mobile Computing**, Wiley, v. 4, n. 8, p. 917–931, 2004.

ZHAO, Liang; AL-DUBAI, Ahmed Y.; MIN, Geyong. An efficient neighbourhood load routing metric for wireless mesh networks. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Elsevier BV, v. 19, n. 6, p. 1415–1426, jun 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A – FORMATO DAS MENSAGENS DO HYPHANET

Neste apêndice estão representadas as estruturas das mensagens do protocolo HyphaNet e do subcaçalho de dados.

Na Fig. 37 está representado o formato das mensagens de HELLO. O significado dos campos de informação estão explicitados a seguir:

Figura 37 – Formato da mensagem HELLO para divulgação de informações entre nós vizinhos.

Octeto 1								Octeto 2								Octeto 3								Octeto 4							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo 0								TTL								Tamanho															
Massa Imóvel (I)								ABS																							
Número de Sequência																															
Endereço de Origem																															
Endereço de Destino																															

Fonte: Autoria própria.

1. **Tipo:** 0;
2. **TTL:** tempo de vida (em saltos) máximo da mensagem, valor fixo em 1;
3. **Tamanho:** 2 octetos. Este campo é utilizado para informar a camada IP o tamanho da ocupação do datagrama IP;
4. **Massa Imóvel (I):** massa imóvel do nó atual;
5. **ABS:** Espaço disponível no *buffer* do nó atual;
6. **Número de Sequência:** identificador da mensagem, valor fixo em 0;
7. **Endereço de Origem:** endereço do nó que envia o *Hello*;
8. **Endereço de Destino:** endereço em formato de difusão; Obs: os campos reservados têm valor zero e não são detectados na recepção.

O formato da Fig. 38 representa as mensagens RREQUEST e RREPLY e o conteúdo dos campos de informação.

Primeiramente, para o tipo RREQUEST, os campos possuem os seguintes valores:

1. **Tipo:** 1;
2. **Tamanho:** 32 octetos;

Figura 38 – Formato das mensagens *Route Request (RREQUEST)* e *Route Reply (RREPLY)* nos procedimentos de descoberta e confirmação de rota.

Octeto 1								Octeto 2								Octeto 3								Octeto 4							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipos 1 e 2								Reservado								Tamanho															
ID caminho								Reservado								TTL															
Reservado								Reservado								nSaltos															
Número de Sequência																															
Endereço de Origem																															
Endereço de Destino																															
Endereço do Nó Anterior																															
Endereço do Próximo Nó																															

Fonte: Autoria própria.

3. **idCaminho**: identificador do caminho;
4. **TTL**: valor 32. O tempo de vida (em saltos);
5. **nSaltos**: contagem de saltos a partir da origem até o destino. A cada nó a contagem é incrementada de um;
6. **Número de Sequência**: identificador da mensagem gerado na origem;
7. **Endereço de Origem**: endereço do nó de origem da mensagem RREQUEST;
8. **Endereço de Destino**: endereço do nó de destino;
9. **Endereço do Nó Anterior**: endereço do último nó intermediário que reenviou a mensagem;
10. **Endereço do Próximo Nó**: endereço em formato de difusão.

Obs: os campos reservados têm valor zero e não são detectados na recepção.

Em seguida, para o tipo RREPLY, tem-se os seguintes valores:

1. **Tipo**: 2;
2. **Tamanho**: 32 octetos;
3. **idCaminho**: identificador do caminho;
4. **TTL**: valor 32;
5. **nSaltos**: contagem de saltos armazenada pela RREQUEST;
6. **Número de Sequência**: identificador da mensagem original gerado na origem;
7. **Endereço de Origem**: endereço do nó de origem da mensagem RREPLY;
8. **Endereço de Destino**: endereço do nó de destino, que anteriormente gerou RREQUEST;
9. **Endereço do Nó Anterior**: endereço do último nó intermediário que reenviou a mensagem RREPLY;

10. **Endereço do Próximo Nó:** endereço em formato *unicast* do próximo nó a receber a mensagem RREPLY;

Obs: os campos reservados têm valor zero e não são detectados na recepção.

A Fig. 39 representa a mensagem RERROR com seus respectivos campos de informação.

Figura 39 – Formato da mensagem *Route Error* (RERROR) no procedimento de indicação de falha de enlace.

Octeto 1								Octeto 2								Octeto 3								Octeto 4							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo 3								Reservado								Tamanho															
idCaminho								Reservado								TTL															
Número de Sequência																															
Endereço de Origem																															
Endereço de Destino																															
Endereço do Nó Anterior																															
Endereço do Próximo Nó																															

Fonte: Autoria própria.

Na mensagem do tipo RERROR, os campos são preenchidos com os seguintes valores:

1. **Tipo:** 3;
2. **Tamanho:** 28 octetos;
3. **idCaminho:** valor ajustado em 0;
4. **TTL:** $2x(\text{número de saltos até a origem})$;
5. **Número de Sequência:** identificador da mensagem original gerado na origem;
6. **Endereço de Origem:** endereço do nó que detecta a falha de conexão;
7. **Endereço de Destino:** endereço do nó de origem original que agora é o destino da mensagem de erro;
8. **Endereço do Nó Anterior:** endereço do último nó intermediário antes do nó que detecta a falha de conexão;
9. **Endereço do Próximo Nó:** endereço do próximo nó na rota para o nó de destino da mensagem de erro.

Obs: os campos reservados têm valor zero e não são detectados na recepção.

A Fig. 40 representa o formato das mensagens RREPAIR-REQ e RREPAIR-REP com seus respectivos campos de informação.

Figura 40 – Formato da mensagem *Route Repair Request (RREPAIR-REQ)* e *Route Repair Reply (RREPAIR-REP)* nos procedimentos de reparo de falha de enlace.

Octeto 1								Octeto 2								Octeto 3								Octeto 4							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo 4 e 5								Reservado								Tamanho															
idCaminho								Reservado								TTL															
Reservado								dSaltos								nSaltos															
Número de Sequência																															
Endereço de Origem																															
Endereço de Destino																															
Endereço do Nó Anterior																															
Endereço do Próximo Nó																															

Fonte: Autoria própria.

O tipo RREPAIR-REQ possui os os campos preenchidos com os seguintes valores:

1. **Tipo:** 4;
2. **Tamanho:** 32 octetos;
3. **idCaminho:** identificador do caminho;
4. **TTL:** valor 2;
5. **nSaltos:** contagem de saltos a partir do nó que detecta a falha até o destino. A contagem não inicia-se do zero, mas continua a partir do valor de saltos presente no nó atual. Este valor indica a distância do nó atual até a origem;
6. **dSaltos:** número de saltos que registra a distância entre o nó que detecta a falha até o destino;
7. **Número de Sequência:** identificador da mensagem gerado na origem;
8. **Endereço de Origem:** endereço do nó de origem;
9. **Endereço de Destino:** endereço do nó de destino;
10. **Endereço do Nó Anterior:** endereço do último nó intermediário que reenviou a mensagem;
11. **Endereço do Próximo Nó:** endereço do próximo nó.

Obs: os campos reservados têm valor zero e não são detectados na recepção.

Em seguida, para o tipo RREPAIR-REP, tem-se os seguintes valores:

1. **Tipo:** 5;
2. **idCaminho:** identificador do caminho;
3. **TTL:** valor 32;

4. **nSaltos**: número de saltos realizados entre o nó de destino e o nó de origem;
5. **dSaltos**: reservado;
6. **Número de Sequência**: identificador da mensagem gerado na origem;
7. **Endereço de Origem**: endereço do nó de origem;
8. **Endereço de Destino**: endereço do nó de destino;
9. **Endereço do Nó Anterior**: endereço do último nó intermediário que reenviou a mensagem;
10. **Endereço do Próximo Nó**: endereço do próximo nó.

Obs: os campos reservados têm valor zero e não são detectados na recepção.

A Fig. 41 representa a mensagem HYPHA-ACK com seus respectivos campos de informação.

Figura 41 – Formato da mensagem *Data Acknowledgment* (HYPHA-ACK) no procedimento de confirmação de entrega de dados e distribuição de massa móvel fictícia.

Octeto 1								Octeto 2								Octeto 3								Octeto 4							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo 6								Reservado								Tamanho															
idCaminho								Reservado								TTL															
Número de Sequência																															
Endereço de Origem																															
Endereço de Destino																															
Endereço do Nó Anterior																															
Endereço do Próximo Nó																															

Fonte: Autoria própria.

Na mensagem do tipo HYPHA-ACK, os campos são preenchidos com os seguintes valores:

1. **Tipo**: 6;
2. **Tamanho**: 28 octetos;
3. **idCaminho**: valor inicia em 0 e incrementa a cada nova mensagem;
4. **TTL**: $2x(\text{número de saltos até a origem})$. O tempo de vida (em saltos);
5. **Número de Sequência**: identificador da rota original trazido pelo subcabeçalho do pacote recém-chegado;
6. **Endereço de Origem**: endereço do nó que envia a HYPHA-ACK.
7. **Endereço de Destino**: endereço do nó de origem original que agora é o destino da mensagem;

8. **Endereço do Nó Anterior:** endereço do último nó intermediário;
9. **Endereço do Próximo Nó:** endereço do próximo nó na rota para o nó de origem.

Obs: os campos reservados têm valor zero e não são detectados na recepção.

A Fig. 42 mostra o formato do subcabeçalho e o significado dos seus campos.

Figura 42 – Formato do subcabeçalho de dados.

Octeto 1								Octeto 2								Octeto 3								Octeto 4							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo 7								Reservado								Tamanho															
Número de Sequência																															

Fonte: Autoria própria.

Onde os campos possuem as seguintes descrições:

1. **Tipo:** 7;
2. **Tamanho:** 12 octetos + tamanho do quadro de transporte (TCP/UDP);
3. **Número de Sequência:** identificador da rota. É o mesmo número de sequência gerado durante a fase de busca de rotas e fica armazenado na tabela de roteamento para identificação única de rota entre pares origem-destino . Este valor é registrado no cabeçalho após a seleção do próximo nó.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA

A ação do HyphaNet ao longo do tempo permite estabelecer que as atualizações das massas móvel e imóvel ocorrem, respectivamente, de acordo com as seguintes equações:

$$M^{(n)} = (1 - \alpha) \cdot M^{(n-1)} + E \cdot \Lambda^{(n)}, \quad n \geq 1. \quad (26)$$

$$I^{(n)} = \beta \cdot (I^{(n-1)} + \alpha \cdot M^{(n-1)}), \quad n \geq 1. \quad (27)$$

Pode-se observar que a Eq. 26 corresponde a uma forma de média móvel exponencial (EMA) da função Λ . Por sua vez, a Eq. 27 é uma forma de EMA para a biomassa móvel (resultando em uma EMA dupla da função Λ).

Aplicando o raciocínio recursivo na Eq. 26 obtém-se:

$$M^{(n)} = (1 - \alpha)^n \cdot M^{(0)} + E \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (1 - \alpha)^i \cdot \Lambda^{(n-i)}, \quad n \geq 1. \quad (28)$$

Realizando procedimento idêntico para a Eq. 27 encontra-se:

$$I^{(n)} = \beta^n \cdot (I^{(0)} + \alpha M^{(0)}) + \alpha \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \beta^j M^{(n-j)}, \quad n \geq 1. \quad (29)$$

onde $M^{(0)}$ e $I^{(0)}$ são os valores iniciais da massa móvel e da massa imóvel, respectivamente.

Substituindo a Eq. 28 em 29 obtém-se:

$$I^{(n)} = \beta^n \cdot (I^{(0)} + \alpha M^{(0)}) + \alpha (1 - \alpha)^n \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\beta}{1 - \alpha} \right)^j M^{(0)} + \alpha E \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-j-1} (1 - \alpha)^i \beta^j \Lambda^{(n-j-i)}, \quad n \geq 1. \quad (30)$$

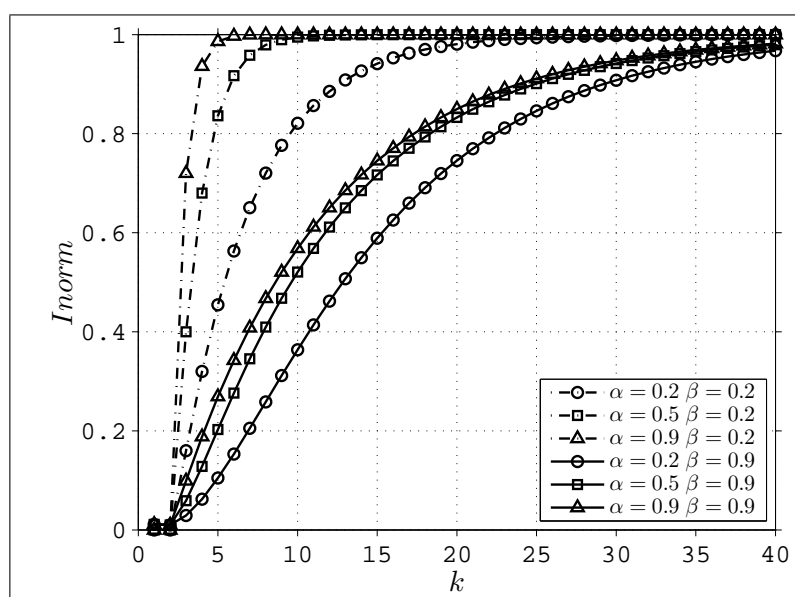
Para avaliar a convergência do sistema, pode-se determinar a resposta ao degrau fazendo $\Lambda^{(n)} = \Lambda_p \cdot H(n)$, onde Λ_p é o valor da função objetivo associada ao nó p em questão e $H(n)$ é a função Heaviside. Quando $\alpha < 1$ e $\beta < 1$, independentemente dos valores de $M^{(0)}$ e $I^{(0)}$, a massa imóvel converge para:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} I^{(n)} = \frac{\beta \cdot E \cdot \Lambda_p}{1 - \beta}. \quad (31)$$

Considerando, um conjunto de rotas entre origem s e destino d , onde a rota cujo próximo salto p é a mais favorável, ou seja, $\Lambda_p < \Lambda_q, \forall p \neq q$, conclui-se que o protocolo atua corretamente, pois $I_p^{(n)} > I_q^{(n)}, n \rightarrow \infty$, resultando em $P_{s,p}^d > P_{s,q}^d$.

Os parâmetros α e β são fundamentais no desempenho do protocolo. A Figura 43 apresenta o comportamento da massa imóvel (normalizada) para um conjunto de valores de α e β (onde $I_{norm} = \frac{1-\beta}{\beta} \cdot I$ e $E \cdot \Lambda_p = 1$), considerando $M^{(0)} = I^{(0)} = 0$. Se α é pequeno e β é elevado, a massa imóvel convergirá lentamente e as rotas podem se tornar mais instáveis. Por outro lado, se α é elevado e β é pequeno, as rotas podem não reagir a variações topológicas.

Figura 43 – Convergência vs. Número de iterações.



Fonte: Autoria própria.