UNIVERSIDADE DE LISBOA
Faculdade de Ciências
Departamento de Informática

ALGORITMOS DE DIFUSÃO CIENTES DA TOPOLOGIA EM REDES NÃO INFRAESTRUTURADAS

Diogo Moutinho Saraiva Lima

MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA
Especialização em Engenharia de Software

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA
Faculdade de Ciências
Departamento de Informática

ALGORITMOS DE DIFUSÃO CIENTES DA TOPOLOGIA EM REDES NÃO INFRAESTRUTURADAS

Diogo Moutinho Saraiva Lima

DISSERTAÇÃO

Projecto orientado pelo Prof. Doutor Hugo Alexandre Tavares Miranda

MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA
Especialização em Engenharia de Software

2012

Agradecimentos

Concluir esta dissertação e o respetivo mestrado não teria sido possível sem o precioso contributo de um conjunto de pessoas com quem tive a sorte de me cruzar e de instituições que me acolheram e que me permitiram atingir este ponto de viragem na minha vida. A todos deixo agora o meu profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Prof. Doutor Hugo Miranda pelas suas inspiradoras aulas lecionadas durante a licenciatura e o mestrado, que me fizerem enveredar por esta área de estudo e pela oportunidade concedida em poder prosseguir a minha formação nesta vertente. Enquanto orientador, a sua dedicação, inspiração e acompanhamento excederam largamente o âmbito da presente dissertação, representando um modelo a seguir durante todo o meu percurso pessoal e profissional.

À Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e a todo o seu Departamento de Informática agradeço a oportunidade única que me ofereceram, o ambiente fantástico encontrado desde o meu primeiro dia nesta instituição e pela possibilidade de crescer tanto a nível técnico como pessoal. Ao Laboratório de Sistemas Informáticos de Grande Escala (LaSIGE) agradeço as fantásticas condições de trabalho disponibilizadas e a todos os seus elementos que me acolheram sempre com grande companheirismo e disponibilidade.

Aos meus colegas e amigos de faculdade e do LaSIGE agradeço a camaradagem e amizade partilhada ao longo deste anos. Em particular, gostaria de agradecer ao Eduardo Duarte, Gonçalo Noronha, João Craveiro, Nuno Serafim, Tiago Antunes, e especialmente ao Rui Santos, todos os momentos passados em conjunto e pelo apoio e inspiração que sempre representaram ao longo desta caminhada.

Por fim, gostaria de expressar o maior dos "obrigados" aos meus pais e ao meu irmão Tiago pela dedicação, a preocupação e o acompanhamento ao longo de toda a minha formação académica. Aos meus grandes amigos de infância Henrique, Igor, José e à minha namorada Isabel agradeço a paciência, a disponibilidade e a presença em todos os momentos mais marcantes deste caminho. Sem vocês provavelmente não teria conseguido atingir este ponto, pelo que esta também é a vossa dissertação.

Este trabalho foi parcialmente suportado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do projeto PTDC/EIA-EIA/103751/2008 - PATI.

À Isabel, Henrique, Igor e José

Resumo

As redes não infraestruturadas são redes sem fios onde os participantes se movem e comunicam diretamente entre si. Estas são geralmente compostas por dispositivos com menores capacidades de energia e de poder computacional e estão sujeitas à falha e à movimentação de nós. A sua aplicabilidade tem vindo a crescer à medida que se percebe que estas podem ser uma boa solução em locais onde a instalação de infraestruturas centralizadas seria demasiado dispendiosa, ou em situações de catástrofes naturais.

A difusão representa a base para a comunicação entre os participantes e para o desenvolvimento de aplicações de mais alto nível em redes não infraestruturadas. Pelo que desenhar algoritmos de difusão para redes não infraestruturas representa uma tarefa desafiante, uma vez que estes devem ser simultaneamente eficientes e leves em termos de custos de operação. No entanto, os algoritmos de difusão tendem a negligenciar a importância da topologia de rede, o que pode resultar numa quebra de eficiência em topologias de rede não uniformes, especialmente naquelas onde a retransmissão de alguns nós é fundamental para assegurar a propagação de mensagens a outras regiões.

A presente dissertação apresenta um novo algoritmo de difusão que favorece as retransmissões desses nós que desempenham um papel chave. Tal como outras propostas, este algoritmo limita-se a usar a informação recolhida localmente por cada nó para decidir as retransmissões, evitando quaisquer troca de mensagens de controlo ou uso de outros mecanismos que permitam dar a conhecer aos nós a sua localização. Deste modo, através de uma melhor interpretação da informação disponibilizada pelas retransmissões dos vizinhos, o algoritmo tenta tornar a decisão de retransmissão mais informada. Os resultados das simulações mostram que, em comparação com outras abordagens, o algoritmo aumenta a taxa de entrega sem sacrificar o tempo de vida dos dispositivos com um aumento no número de retransmissões.

Palavras-chave: redes não infraestruturadas, algoritmos de difusão, topologias não uniformes.

Abstract

Mobile Ad hoc Networks are wireless networks defined by their lack of supporting infrastructures, where participants can move freely and communicate directly with each other. They are generally composed by devices with lower energy and computation capabilities, and are susceptible to node failure and movement. The interest on these networks has been increasing as they can be used in a widely number of scenarios, like in emergency situations, surveillance, or even in remote locations where it is too expensive to deploy supporting infrastructures.

Broadcasting represents the foundation for communication and higher level application development in ad hoc and sensor networks. Therefore, designing broadcasting protocols is a challenging task, as they have to be simultaneously efficient and lightweight. However, broadcast algorithms tend to overlook the importance of the network topology, what may result in efficiency loss in heterogeneous node topologies, specially those where the retransmission of a few nodes is fundamental to ensure the broadcast propagation to large regions of the network.

This report proposes a novel broadcasting algorithm that favours the retransmission of the key nodes. Like others approaches, the algorithm uses exclusively the information gathered locally at each node to decide to retransmit, avoiding any control message exchanges or the use of other mechanisms that allow nodes to know their location. Instead, novel interpretations of the information made available by other's retransmissions allow nodes to make more informed decisions. Simulation results show that, in comparison with other approaches, the algorithm increases the delivery ratio without sacrificing device's lifetime with an increase in the number of retransmissions.

Keywords: ad hoc and sensor networks; broadcast algorithms; heterogeneous topologies

Conteúdo

Lista de Figuras **xvi**

Lista de Tabelas **xix**

1 Introdução **1**
1.1 Motivação 2
1.2 Objetivos 3
1.3 Contribuições 4
1.4 Estrutura do documento 4

2 Trabalho relacionado **7**
2.1 Abordagem probabilista 8
2.1.1 *Smart Gossip* 9
2.2 Abordagem *counter-based* 10
2.2.1 *Hop count-aided broadcasting* (HCAB) 11
2.2.2 GOSSIP3(*p, k, m*) 12
2.3 Abordagem *distance-based* 13
2.3.1 *Power-Aware Message Propagation Algorithm* (PAMPA) 14
2.4 Abordagem *neighbor knowledge* 16
2.5 Discussão 18

3 Avaliações preliminares **23**
3.1 Criação de uma biblioteca de topologias não uniformes 23
3.2 Condições iniciais de teste 25
3.3 Métricas de avaliação 26
3.4 Resultados 27
3.4.1 Comparação de algoritmos nos cenários alvo 30

4 Desenho da solução **35**
4.1 Abordagem em duas fases de decisão 35
4.2 Abordagem em tempo de escuta dinâmico 37
4.3 Avaliação de abordagens sobre os cenários alvo 39

4.4 *Flow-Aware Broadcasting Approach* (FABA) 41

5 Avaliação da solução **45**
5.1 Análise de fiabilidade 46
5.2 Custo de operação 51
5.3 Análise de latência 53
5.4 Discussão 55

6 Conclusão **61**
6.1 Sumário dos resultados obtidos 61
6.2 Comentário crítico 62
6.3 Trabalho futuro 62

Bibliografia **68**

Lista de Figuras

1.1 D não retransmite devido ao fenómeno de *overcancellation* causado pelos nós A, B, e C. 3

2.1 D não retransmite devido ao fenómeno de *overcancellation* causado pelos nós A, B, e C. 8
2.2 Algoritmo PAMPA. 14
2.3 Algoritmo PAMPA-ATH/CP. 16

3.1 Exemplo de um caso de teste da topologia de rede "H", com largura de ponte de 40 metros. 25
3.2 Exemplo de um caso de teste da topologia de rede "U", com largura de ponte de 50 metros. 26
3.3 Nós em torno do nó 139 no caso de teste 4 do cenário de ponte com largura de 100m 33

4.1 Abordagem em duas fases de decisão. 38
4.2 Abordagem em tempo de escuta dinâmico. 39
4.3 Abordagem Flow-Aware Broadcasting Approach (FABA). 43

5.1 Taxas de entrega nos cenários de topologia "H". 47
5.2 Taxas de cobertura total nos cenários de topologia "H". 48
5.3 Taxas de entrega nos cenários de topologia "U". 49
5.4 Taxas de cobertura total nos cenários de topologia "U". 49
5.5 Taxas de entrega nos cenários de distribuição uniforme de nós. 51
5.6 Taxas de cobertura total nos cenários de distribuição uniforme de nós. . . 51
5.7 Taxas de retransmissão nos cenários de topologia "H". 53
5.8 Taxas de retransmissão nos cenários de topologia "U". 54
5.9 Taxas de retransmissão nos cenários de distribuição uniforme de nós. . . . 54
5.10 Latência média nos cenários de topologia "H". 55
5.11 Latência média nos cenários de topologia "U". 56
5.12 Latência média nos cenários de distribuição uniforme de nós. 56
5.13 Rácio de utilidade de retransmissão nos cenários de topologia "H". 58
5.14 Rácio de utilidade de retransmissão nos cenários de topologia "U". 59

5.15 Rácio de utilidade de retransmissão nos cenários de distribuição uniforme de nós. 59

Lista de Tabelas

2.1 Características e limitações dos algoritmos de difusão estudados em topologias de rede não uniformes. 19

3.1 Avaliação do algoritmo PAMPA sobre o cenário de largura de ponte de 100 metros da topologia "H". 29
3.2 Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA e PAMPA-ATH/CP nos cenários problemáticos. 30
3.3 Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA e PAMPA-ATH/CP nos cenários intermédios. 30
3.4 Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA e PAMPA-ATH/CP nos cenários "tubos de ensaio". 31

4.1 Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA, PAMPA-ATH-CP e as abordagens em duas fases de decisão e em tempo de escuta dinâmico nos cenários problemáticos. 40
4.2 Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA, PAMPA-ATH-CP e as abordagens em duas fases de decisão e em tempo de escuta dinâmico nos cenários intermédios. 41
4.3 Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA, PAMPA-ATH-CP as abordagens em duas fases de decisão e em tempo de escuta dinâmico nos cenários "tubos de ensaio". 41

Capítulo 1

Introdução

Durante os últimos anos, tem-se assistido a um aumento massivo no número de dispositivos móveis utilizados no nosso quotidiano. Estes dispositivos tornaram-se ubíquos e alteraram a nossa visão tradicional de sistemas centralizados, permanentemente ligados à corrente, para sistemas descentralizados conectados através de tecnologias wireless. Os tempos de vida destes dispositivos estão agora diretamente dependentes da capacidade das suas baterias, e os seus menores recursos computacionais trouxeram novos desafios em termos de desenvolvimento aplicacional e de desenho de protocolos de comunicação.

As redes não infraestruturadas, ou MANETs (do inglês *Mobile Ad hoc NETworks*), são redes sem fios exclusivamente compostas pelos dispositivos dos participantes, onde os nós comunicam diretamente entre si, sem a necessidade de recorrer a qualquer infraestrutura física de suporte. Estas têm vindo a ser cada vez mais usadas, devido a uma perceção crescente que constituem uma boa solução de aplicabilidade para um vasto conjunto de cenários, como em locais onde a instalação de infraestruturas centralizadas seria demasiado dispendiosa, em situações de crise ou catástrofes naturais para estabelecer a comunicação entre as diversas equipas de emergência atuantes, ou ainda para poder criar redes de sensores de monitorização ambiental em regiões geograficamente acidentadas [2].

A ausência de estruturas de suporte e de dispositivos fiáveis que assumam as funções de coordenação da rede faz com que, nas redes Ad hoc, todos os nós consigam comunicar com todos os outros. Esta comunicação pode ser direta se os nós que desejarem comunicar estiver dentro do raio de transmissão um do outro, ou então de forma indireta, através de vários saltos de transmissão, onde as mensagens enviadas pelo nó emissor são retransmitidas por diferentes nós intermediários até atingirem o seu recetor. Logo, se for necessário distribuir uma mensagem por todos os participantes, esta terá de ser sucessivamente difundida pelos nós da rede.

Contudo, a difusão contribui substancialmente para a degradação da qualidade de serviço da rede e para reduzir o tempo de vida dos dispositivos. Por estas razões, o desenvolvimento de algoritmos de difusão simultaneamente eficientes e eficazes é uma

questão que tem vindo a receber considerável atenção por parte da comunidade científica.

1.1 Motivação

Com o objetivo de tornar a comunicação em MANETs mais eficiente, a difusão de mensagens é uma questão que tem vindo a ser estudada e debatida pela comunidade científica. Idealmente, um algoritmo de difusão para redes não infraestruturadas eficaz deve exigir o mínimo de computação possível aos dispositivos, sem prejudicar a sua capacidade de entrega de mensagens a todos os participantes. A implementação mais simples do princípio de difusão consiste em definir que cada nó deve sempre retransmitir uma mensagem quando a ouve pela primeira vez. Esta solução é conhecida por *flooding*, mas não é praticável visto que leva a um grande desperdício de energia e de largura de banda para os participantes e contribui para o aumento do número de colisões de pacotes na rede. Nesse sentido, têm sido desenvolvidos e propostos diversos algoritmos de difusão que tentam melhorar o custo de difusão do *flooding*, reduzindo o número de retransmissões através de uma escolha de um subconjunto de nós retransmissores.

Estes algoritmos pressupõem que não são trocadas mensagens de controlo, o que iria simplesmente aumentar o custo da difusão, e baseiam-se na recolha de informação local como única fonte de decisão. A seleção dos nós retransmissores pode seguir uma diversidade de critérios, incluindo escolhas probabilistas, abordagens *counter-based* e *distance-based* que se baseiam no número de cópias recebidas ou na distância entre nós emissores e recetores, ou esquemas que resultam da combinação das diferentes soluções anteriores. Porém, o efeito da disposição geográfica dos nós pela rede é um aspeto que tem vindo a ser negligenciado na avaliação de desempenho destes algoritmos. Tipicamente, é assumida uma disposição uniforme dos nós sobre o espaço, mas sabe-se que esta disposição não representa alguns cenários realistas, como o posicionamento das equipas de emergência numa situação de crise, a disposição dum conjunto de mineiros dentro de uma mina, ou ainda a colocação de sensores de monitorização ambiental nas regiões com acidentes geográficos, como rios ou montanhas. Em tais cenários, diversas regiões da rede poderão apresentar densidades de nós muito díspares e algumas áreas poderão surgir como pontos de passagem fulcrais para que as mensagens possam ser entregues a todos os participantes. Por essa razão, não tendo em conta a topologia da rede, certas retransmissões chave poderão não ser garantidas, levando a uma queda substancial da eficiência dos algoritmos pois as mensagens poderão não ser propagadas para certas regiões da rede.

Um caso típico de uma rede não uniforme onde tal fenómeno poderá acontecer é o cenário de ponte, onde os nós criam uma topologia em forma de "H", dividida em três regiões: duas áreas de grande densidade, ligadas por uma estreita ponte ou túnel de nós. A Figura 1.1 retrata uma região da uma topologia em forma de "H", onde os quatro nós se encontram todos no raio de transmissão de cada um. Uma vez que o nó D está localizado

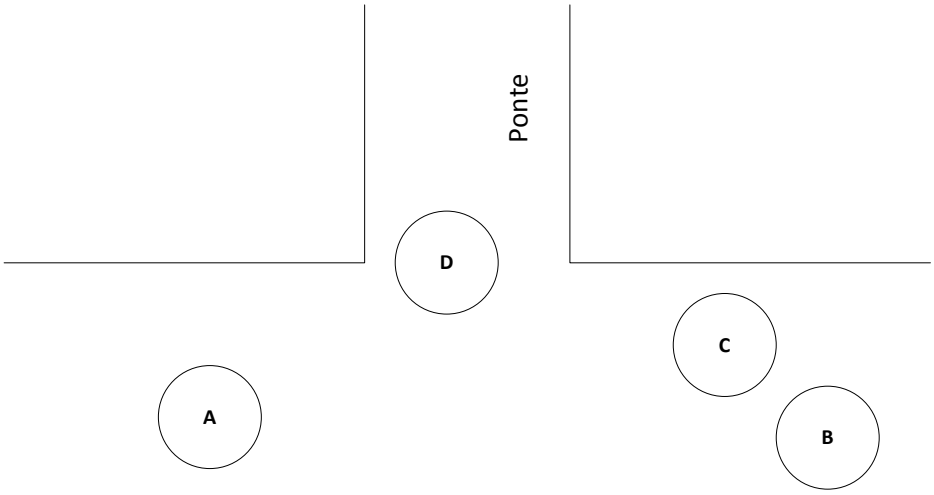

Figura 1.1: D não retransmite devido ao fenómeno de *overcancellation* causado pelos nós A, B, e C.

à entrada da ponte, a sua retransmissão é crítica para assegurar que qualquer mensagem difundida possa ser entregue aos participantes do outro lado da ponte.

A maioria dos algoritmos de difusão tende a ignorar o papel fundamental que o nó D desempenha para a propagação de mensagens nesta situação. Ao aplicar mecanismos padrão para reduzir o número de retransmissões redundantes, os algoritmos de difusão irão, por vezes, decidir que D não deve retransmitir, impedindo que a mensagem possa ser entregue à outra margem da ponte. Este fenómeno já foi referido como *overcancellation* [2] e demonstra claramente o efeito que a topologia de rede pode ter sobre a eficiência de um algoritmo de difusão.

1.2 Objetivos

Alguns resultados preliminares confirmam que a eficácia dos algoritmos de difusão de mensagens existentes para redes Ad hoc se degrada significativamente na presença de topologias de rede não uniformes. Ou seja, em cenários onde os nós não se encontram igualmente distribuídos por todo o espaço geográfico da rede. Logo, o objetivo da presente dissertação passa por encontrar um algoritmo de difusão para redes Ad hoc que possa funcionar corretamente em tais topologias.

1.3 Contribuições

As significativas quebras de eficiência, em topologias não uniformes, por parte dos algoritmos de difusão existentes são causadas por uma negligência sistemática da importância da topologia de rede na fase de avaliação de desempenho dos mesmos. Neste sentido, a presente dissertação propõe um novo algoritmo de difusão para redes Ad hoc, especificamente desenvolvido para não sofrer degradação de eficácia em topologias de rede não uniformes. Tal como as propostas anteriores, este algoritmo limita-se a usar a informação recolhida localmente por cada nó para decidir as retransmissões. No entanto, através de uma melhor interpretação da informação recolhida a partir das retransmissões dos vizinhos, tentamos tornar a decisão de retransmissão de cada nó mais informada, com o objetivo de atingir uma melhor fiabilidade para cenários de topologias de rede não uniformes que os algoritmos anteriores.

A presente dissertação vem deste modo contribuir para o estado da arte do estudo de algoritmos de difusão para redes não infraestruturadas, tendo os resultados obtidos sido aceites para publicação na *11th IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications (IUCC-2012)* [9].

1.4 Estrutura do documento

Este documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Trabalho relacionado. É apresentado um estudo sobre alguns dos algoritmos de difusão existentes para redes Ad hoc, e explicadas as razões que os levam a sofrer quebras substanciais de desempenho perante topologias de rede não uniformes.

- Capítulo 3 - Avaliações preliminares. As conclusões obtidas a partir do trabalho relacionado não são, no entanto, suficientemente satisfatórias para se poder desenvolver uma solução eficaz. Neste capítulo, é concretizada uma avaliação mais detalhada sobre o algoritmo considerado mais promissor no trabalho relacionado, e melhor compreendida a sua verdadeira adequação a topologias de rede não uniformes.

- Capítulo 4 - Desenho da solução. A partir dos resultados recolhidos nos capítulos 2 e 3, o capítulo 4 descreve a formulação de um conjunto de hipóteses que poderiam contribuir para a resolução do problema colocado na presente dissertação, e apresenta a consequente formulação da solução de algoritmo proposta.

- Capítulo 5 - Avaliação da solução. Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações de comparação entre o desempenho das diversas hipóteses consideradas e o consequente algoritmo de difusão desenvolvido.

- Capítulo 6 - Conclusão. O derradeiro capítulo desta dissertação encontra-se destinado ao levantamento das conclusões finais sobre a proposta apresentada, bem como à elaboração dum comentário crítico ao trabalho realizado e a uma discussão sobre o trabalho futuro que poderia ainda ser desenvolvido.

Capítulo 2

Trabalho relacionado

As redes Ad hoc são redes sem fios, caracterizadas por não contarem com qualquer infraestrutura de suporte, estando a cargo dos dispositivos dos participantes a responsabilidade de comunicarem diretamente entre si. Na base deste modelo de comunicação, e respetivo desenvolvimento aplicacional, encontra-se o princípio da difusão, onde se define que uma mensagem deve ser entregue a todos os participantes na rede. Contudo, a difusão em redes não infraestruturadas deve ser bem planeada e ponderada, pois pode ser penalizadora para os nós que as integram, se não for tido em conta o facto de se tratarem de dispositivos com menores capacidades de computação, energia e comunicação. A concretização mais simples de um algoritmo de difusão em MANETs (do inglês *Mobile Ad hoc NETworks*) é a solução de *flooding* (em português *inundação*), onde cada nó retransmite todas as mensagens quando recebidas pela primeira vez. Infelizmente, mesmo parecendo eficaz, o *flooding* não se apresenta como uma solução eficiente, uma vez que é demasiado dispendioso para os dispositivos em termos de consumo de energia. Por outro lado, forçar todos os participantes a retransmitir uma mesma mensagem só iria agravar a redundância na rede.

Perante as limitações do *flooding*, surgiu a necessidade de serem investigadas alternativas que oferecessem menos desperdícios de recursos, portanto soluções mais "leves", mas que mantivessem a mesma capacidade de distribuição de mensagens a todos os participantes da rede. Neste contexto, o atual paradigma de comunicação para redes não infraestruturadas centra-se na pesquisa de algoritmos de difusão que evitem que todos os participantes necessitem de retransmitir as mensagens recebidas, criando desta forma um subconjunto de nós retransmissores. Cabe aos nós decidirem localmente se devem ou não retransmitir uma dada mensagem, e a forma e correção com que é tomada essa decisão apresenta-se como o ponto fulcral de qualquer algoritmo, e o elemento chave que determinará a sua qualidade em termos de desempenho.

Existem diferentes abordagens que tentam tornar essa decisão de retransmissão o mais correta possível, havendo atualmente três abordagens fundamentais: as abordagens probabilista, *counter-based*, e *distance-based*; e algumas soluções provenientes da combinação

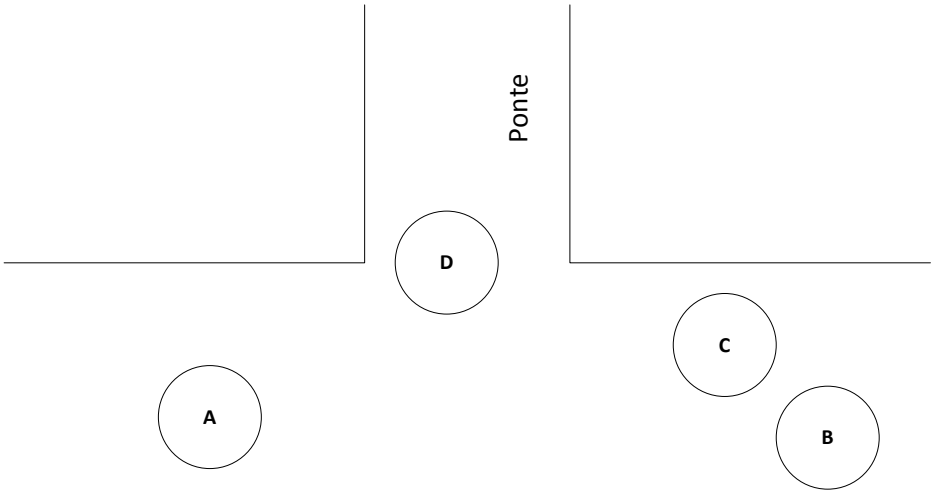

Figura 2.1: D não retransmite devido ao fenómeno de *overcancellation* causado pelos nós A, B, e C.

das abordagens anteriores. Neste capítulo serão estudadas mais aprofundadamente cada uma destas abordagens e alguns dos algoritmos que as concretizam, discutindo sempre os seus desempenhos no cenário particular das topologias de rede não uniformes. Nomeadamente, será estudado o comportamento que cada um destes algoritmos assumiria perante o cenário não uniforme introduzido na secção de motivação do capítulo anterior e novamente apresentado na figura 2.1. Um estudo mais detalhado sobre algoritmos de difusão para redes ad hoc pode ser encontrado em [4]. A Secção 2.4 deste capítulo aborda ainda assim uma aproximação para a difusão de mensagens em redes ad hoc que, ao recorrer à troca de mensagens de controlo entre os participantes da rede para decidir as retransmissões, não se enquadra diretamente no âmbito desta dissertação. No entanto, devido à sua popularidade e ao elevado número de trabalhos já realizados tendo por base esta abordagem, merece uma breve referência.

2.1 Abordagem probabilista

A abordagem probabilista baseia-se num único princípio, a decisão de retransmissão é tomada a partir de uma probabilidade p pré-definida, que varia no intervalo]0,1]. Na implementação mais simples desta abordagem, conhecida por GOSSIP1(p) [5], perante a receção de uma nova mensagem, cada nó toma a decisão de retransmitir ou não retransmitir a referida mensagem com probabilidade p. Sendo que, para p=1, esta abordagem

torna-se idêntica ao *flooding*, visto que todos os nós retransmitirão todas as mensagens recebidas. Porém, encontrar uma probabilidade p adequada a toda a rede é difícil pois esta depende da topologia da rede, mas ignora funções especiais que alguns nós possam desempenhar na mesma, como acontece com o nó D na Fig 2.1. Aumentar o valor de p parece ser uma solução simples para mitigar a ocorrência de tais situações. No entanto, tal contribuiria para o aumento do volume de retransmissões redundantes em toda a rede, além do facto que se manteria uma probalidade de 1-p de D não retransmitir uma dada mensagem. O que significa que se continuaria a ter um valor não nulo de mensagens entregues a apenas metade dos participantes.

Para fazer face a esta lacuna, a abordagem probabilista conheceu alguns melhoramentos, concretizados pela a aplicação de diferentes probabilidades de retransmissão numa mesma rede. Ou seja, a abordagem puramente probabilista foi transformada numa nova versão tendenciosa, onde o conceito fundamental passa agora por atribuir diferentes probabilidades de retransmissão a diferentes nós da rede, seguindo algum critério de decisão. Normalmente, o critério de decisão seguido tem, de algum modo, em consideração a topologia da rede e a informação que consegue recolher da mesma. Logo, qualquer algoritmo que implemente a abordagem probabilista tem de definir como irá atribuir as diferentes probabilidades de retransmissão aos nós da rede, e que critério seguirá. Apresentamos e estudamos de seguida a proposta de um algoritmo que implementa esta abordagem, o algoritmo *Smart Gossip*.

2.1.1 *Smart Gossip*

Para uma escolha acertada das diferentes probabilidades de retransmissão, um algoritmo deverá ter em conta a topologia da rede onde se encontra, e a ausência de informação sobre essa topologia pode resultar na atribuição de probabilidades de retransmissão desajustadas e prejudiciais à propagação de mensagens a todos os participantes. Por esta razão é fundamental recolher informação sobre a topologia de rede para perceber que probabilidades de retransmissão se adequam melhor a cada situação. Neste sentido, o algoritmo *Smart Gossip* [8] interpreta a topologia da rede como um conjunto de *dependências* entre os nós, onde um nó X depende de um subconjunto de vizinhos seus, definidos como *pais de X*, se necessita deles para poder receber uma nova mensagem. Similarmente, são considerados *filhos de X* os nós pertencendo ao subconjunto disjunto dos vizinhos de X que dependem deste para receberem novas mensagens. Por fim, poderão ainda existir nós vizinhos de X tais que nem X depende deles, nem eles dependem de X para conseguirem todos receber novas mensagens, formando-se assim o grupo de *irmãos de X*. O objetivo e a eficácia deste algoritmo passa então por conseguir identificar acertadamente os conjuntos de pais, filhos e irmãos de cada nó, e usar essa informação para selecionar adequadamente a percentagem de retransmissão específica a cada.

Para calcular a probabilidade de retransmissão de cada nó, o algoritmo *Smart Gos-*

sip inicia a sua execução estabelecendo as probabilidades de retransmissão de todos com o valor 1, como se de um *flooding* se tratasse. À medida que os nós vão tomando conhecimento das suas dependências, as suas probabilidades vão sendo refinadas. Após a primeira fase de descoberta das dependências de cada nó e dos conjuntos de pais, filhos e irmãos estarem definidos, cada nó calcula a probabilidade com que os seus pais devem retransmitir uma mensagem, e define essa probabilidade como a sua "probabilidade exigida". Por seu lado, os pais vão guardando as "probabilidades exigidas"dos seus filhos, definindo a sua probabilidade de retransmissão com o maior valor dessas probabilidades. Caso um nó não tenha nenhum filho na rede, então retransmite as mensagens com uma probabilidade baixa para simplesmente garantir que os seus pais continuam cientes da sua presença.

O ponto fundamental deste algoritmo é assim o modo como são calculadas as probabilidades exigidas de cada nó. Para tal, é usada a seguinte regra: do ponto de vista dos nós filhos, estes não necessitam que todos os seus pais retransmitam a mensagem. Na verdade, para um nó filho poder receber uma mensagem, necessita apenas que esta seja retransmitida por pelo menos um dos seus pais, podendo mesmo estarem diferentes pais a difundir diferentes mensagens. Por esta razão, a probabilidade exigida por um nó filho para conseguir receber uma mensagem é inversamente proporcional ao número de pais que possui.

Contudo, a interpretação que o algoritmo *Smart Gossip* faz da rede como sendo um conjunto de dependências entre nós representa simultaneamente a sua força e fraqueza. Na prática, o algoritmo define uma árvore de dependências com origem na fonte das mensagens. Tal organização lida bem com cenários onde as mensagens provêm maioritariamente de uma mesma fonte. No entanto, em cenários como o cenário de ponte considerado nesta dissertação, onde as mensagens podem surgir vindas de ambas as margens da ponte, este algoritmo não seria capaz de manter o seu desempenho visto que precisaria de estar constantemente a alterar as dependências entre nós, para ajustar as suas probabilidades de retransmissão para valores adequados à propagação de cada mensagem vinda de uma origem diferente.

2.2 Abordagem *counter-based*

A abordagem *counter-based* determina que a decisão de retransmissão deve ser tomada a partir do número de retransmissões que cada nó escuta. Na implementação apresentada em [13], por exemplo, os nós são previamente configurados com um limite de retransmissões máximo, denominado *th*. Ao receber uma mensagem pela primeira vez, cada nó define um tempo de espera aleatório. Uma vez expirado esse período, um nó irá retransmitir a mensagem se recebeu menos de *th* retransmissões. A abordagem *counter-based* baseia-se assim no princípio que um bom número de nós transmissores é suficiente para

poder difundir uma mensagem por toda a rede.

Esta solução não toma, no entanto, em consideração qualquer informação relativa à topologia da rede ou ao fluxo que a difusão de mensagens está a seguir. Como consequência, em cenários como o considerado na figura 2.1 este algoritmo perderia a sua eficiência. Para tal, suponhamos um valor de *th* = 2 e que, para uma mensagem retransmitida pelo nó A, os nós B e C obtém períodos de espera aleatórios mais pequenos que o do nó D. Como os dois primeiros nós teriam escutado menos de *th* retransmissões ao fim dos seus respetivos tempos de espera, ambos retransmitiriam a mensagem recebida. Deste modo, quando o tempo de espera atribuído a D finalmente expira, este último nó já recebeu mais de *th* retransmissões e portanto bloquearia a propagação da mensagem, fazendo com que metade da rede ficasse sem recebê-la.

Nas subsecções seguintes, estudamos duas propostas de algoritmos de difusão que seguem a abordagem *counter-based*, tentando melhorar o seu desempenho. A primeira proposta tenta fazê-lo através dum esforço adicional para recolher mais informação sobre a rede e assim corrigir o problema acima identificado para a implementação apresentada em [13]. Enquanto que a segunda proposta centra-se na conjunção de duas abordagens, onde as abordagens *counter-based* e probabilista são combinadas num só algoritmo para obter uma solução mais eficiente.

2.2.1 *Hop count-aided broadcasting* (HCAB)

Baseando-se na abordagem *counter-based*, o algoritmo HCAB [6] define um número máximo de retransmissões, denominado *HC*, que cada nó pode escutar para poder retransmitir uma mensagem. A este parâmetro, é ainda adicionado como critério de decisão de retransmissão, o número de saltos que cada mensagem já percorreu . O algoritmo funciona da seguinte forma: ao receber uma mensagem pela primeira vez, um nó regista o número de saltos já realizados por essa mensagem, conhecido através da inserção de um campo específico nos cabeçalhos dos pacotes enviados ou através da derivação da informação TTL presente nos mesmos cabeçalhos, e coloca esse valor numa variável HC_0. Entretanto, o nó define um tempo de espera aleatório onde fica à escuta de novas retransmissões da mesma mensagem. Durante esse período, para cada retransmissão recebida, o nó compara o número de saltos efetuados por essa retransmissão, denotado HC_x, com o valor de HC_0. Se, para alguma retransmissão recebida, esta verificar que $\mathrm{HC}_x > \mathrm{HC}_0$, o nó descarta a retransmissão dessa mensagem. Caso contrário, ao fim do tempo de adormecimento, o nó retransmite a mensagem.

Apesar de existir um esforço maior por parte do algoritmo HCAB em tentar perceber o fluxo de mensagens a circular na rede, através da observação do número de saltos realizados pelas retransmissões, tal não seria no entanto suficiente para resolver corretamente o problema levantado no cenário proposto na secção de motivação. Consideremos a Fig 2.1 como exemplo, supondo que o nó B recebeu uma nova mensagem e decidiu

retransmiti-la. Os outros três nós presentes no cenário iriam consequentemente receber a mensagem enviada por B, e definiriam os seus respetivos tempo de espera aleatórios à escuta de mais retransmissões. Deste forma, existe uma probabilidade igual de ser o período de adormecimento de A, C ou D o primeiro a esgotar-se. Por outro lado, como os nós se encontram todos no interior do raio de transmissão de cada um, bastaria o nó A ou o nó C terminarem os seus períodos de espera primeiro que o nó D para que este decida não retransmitir a mensagem e para que a propagação da mensagem seja interrompida antes de atingir a ponte.

2.2.2 GOSSIP3(*p, k, m*)

O algoritmo GOSSIP3(*p, k, m*) [5], por seu lado, conjuga a abordagem *counter-based* com a abordagem probabilista para obter um algoritmo mais eficiente. Baseando-se no algoritmo probabilista GOSSIP1(*p*), apresentado na secção anterior, o GOSSIP3 apresenta dois melhoramentos através da inserção dos parâmetros k e m no algoritmo. O primeiro prende-se com o facto do algoritmo GOSSIP1 poder terminar a difusão de uma mensagem se, em fases iniciais da sua propagação, existirem poucos nós e estes decidirem não retransmitir a mensagem. Neste sentido, o parâmetro k visa combater este risco, definindo o número de saltos desde a origem onde todos os nós devem retransmitir a mensagem com probabilidade 1, utilizando a probabilidade p a partir desse ponto. A abordagem *counter-based* surge depois neste algoritmo através do parâmetro m, que é considerado nas fases mais avançadas da propagação. Nestas fases, já vigora a probabilidade p como critério de decisão, e o parâmetro m é considerado de tal forma que: se um nó não tiver inicialmente retransmitido a mensagem pelo método probabilista, aguarda um período de tempo e retransmite se escutou menos de m cópias dessa mensagem.

A presença da abordagem *counter-based* no algoritmo GOSSIP3 permite que este possa responder adequadamente aos cenários onde a tomada de decisão probabilista não selecionou um número suficiente de retransmissores para assegurar a propagação de uma mensagem. No entanto, a adição deste parâmetro m não torna o algoritmo capaz de solucionar o problema identificado na Fig 2.1. Ao receber uma mensagem vinda de A, tanto B como C podem decidir retransmiti-la. Como consequência, a medida de recurso trazida pelo GOSSIP3 seria invalidada para o nó D, fazendo com que este dependesse exclusivamente da sua probabilidade original p para retransmitir a mensagem, e portanto continuaria a existir uma probabilidade 1 - p de uma mensagem não conseguir atravessar a ponte.

As soluções estudadas nas duas secções anteriores demonstram que utilizar qualquer métrica aleatória nos critérios de decisão de um algoritmo de difusão faz com que este não consiga garantir que sejam os nós mais indicados a retransmitir a fazê-lo. Perante topolo-

gias de rede não uniformes, estas decisões podem ter um impacto ainda mais significativo, uma vez que podem levar ao fim da disseminação de mensagens.

2.3 Abordagem *distance-based*

Com o objetivo de mitigar alguns dos problemas da abordagem anterior, como o facto de se selecionar um certo número de nós retransmissores não significar forçosamente que estes sejam os mais indicados para tal, a abordagem *distance-based* adota uma estratégia diferente. Em vez de considerar o número de retransmissões escutadas como critério principal para decidir quem deve retransmitir, a abordagem *distance-based* centra-se na distância entre emissor e recetor para tomar essa decisão. Essa distância pode ser calculada com precisão se os dispositivos tiverem conhecimento da sua localização precisa (por exemplo utilizando GPS) e a incluírem na retransmissão ou, de forma menos precisa, a partir da força de sinal com que uma mensagem é recebida. Se um nó receber uma mensagem com uma força de sinal mais fraca do que outra, então significa que esse nó se encontra mais longe do primeiro emissor do que do segundo.

O conceito base na génese desta abordagem reside na tentativa de definir como retransmissores os nós que consigam cobrir mais área adicional da rede. Tal aumentaria as probabilidades de se poder atingir novos participantes, assegurando assim a propagação de uma mensagem com o mínimo de retransmissões possível. Em [13] é apresentada uma implementação desta abordagem, operando da seguinte forma: a rede é previamente configurada com uma distância mínima limite, denotada d_t. Ao receber uma nova mensagem, um nó define um tempo de espera aleatório durante o qual fica a aguardar por mais retransmissões dessa mensagem. Se, para alguma retransmissão recebida durante esse período, a distância d entre o nó recetor e o nó emissor for tal que $d < d_t$, o nó recetor cancela imediatamente o seu tempo de espera e descarta o envio da mensagem. Caso contrário, ao fim do período de adormecimento estabelecido, o nó retransmite a mensagem em causa.

Para que esta abordagem possa funcionar corretamente, é fundamental uma definição acertada do limite de distâncias d_t. No entanto, em topologias de rede não uniformes, a densidade de nós apresenta variações de região para região (considere-se o número de nós presentes sobre a ponte em relação às suas margens, por exemplo). Em tais situações, um só limite de distâncias não será suficiente para assegurar um funcionamento eficiente por parte do algoritmo. No caso do cenário de ponte utilizado como referência nesta dissertação, a abordagem *distance-based* está mais propensa a travar a disseminação de mensagens a partir dos nós situados em cima da ponte, se não existir nenhum nó num intervalo de distâncias entre d_t e o raio de alcance do último nó retransmissor. Para além deste facto, esta abordagem possui ainda o mesmo problema identificado nas abordagens anteriores da utilização de critérios aleatórios no seu funcionamento. Recorrendo ao exemplo da Fig 2.1, este fenómeno ocorreria se uma mensagem originalmente transmi-

tida por B, fosse posteriormente retransmitida por A em primeiro lugar, levando o nó D a cancelar a sua retransmissão.

Na subsecção seguinte estudamos um algoritmo de difusão para redes não infraestruturadas que anula o uso de qualquer critério aleatório, através da combinação das abordagens *counter-based* e *distance-based* numa única solução.

2.3.1 *Power-Aware Message Propagation Algorithm* (PAMPA)

Combinando as duas abordagens acima referidas, o algoritmo PAMPA [11] opera da seguinte forma: ao receber uma mensagem pela primeira vez, um nó define um tempo de espera proporcional à força de sinal com que recebeu a mensagem. Uma vez expirado esse período, o nó decide retransmitir a mensagem se recebeu menos do que um número máximo pré-determinado de retransmissões. Deste modo, esta solução permite evitar todos os critérios aleatórios ou probabilísticos, e usa em alternativa uma estimação da distância entre emissor e recetor, obtida a partir da força de sinal captada pelo nó recetor, para determinar os períodos de escuta dos nós. Tal significa, que o algoritmo PAMPA dá oportunidade aos nós mais distantes de retransmitirem primeiro, tirando assim proveito do principio fundamental da abordagem *distanca-based* de tentar reduzir o volume de retransmissões necessárias para propagar uma mensagem por toda a rede. Por outro lado, o uso da abordagem *counter-based* na contagem do número de retransmissões recebidas permite evitar o envio de novas retransmissões redundantes em regiões da rede onde os nós já receberam diversas cópias da mesma mensagem. O algoritmo PAMPA é apresentado na fig. 2.2

ao receber(msg);
if $msg \notin mensagens$ **then**
  $mensagens \leftarrow mensagens \cup \{msg\}$;
  $contador_{msg} \leftarrow 0$;
  $DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI))$;
else
  $contador_{msg} \leftarrow contador_{msg} + 1$;
end if

ao expirar tempo(msg);
if $contador_{msg} < n$ **then**
  $Retransmitir(msg)$;
end if

Figura 2.2: Algoritmo PAMPA.

As avaliações apresentadas na proposta do algoritmo mostraram uma melhoria significativa nas taxas de entrega das mensagens, enquanto as taxas de retransmissão conseguiram inclusivamente ser reduzidas. No entanto, todas estas avaliações são concretizadas

através de um simulador. Com o intuito de confirmar estes resultados numa situação real, onde a propagação de mensagens pode sofrer falhas devido à convergência de mensagens sobre um mesmo nó ou onde podem ocorrer variações na medição da força de sinal das transmissões, o algoritmo PAMPA foi comparado com o algoritmo *Smart Gossip* e com a implementação de difusão por *flooding* numa situação real, sendo a concretização desta avaliação apresentada em [14].

Das duas experiências realizadas, a primeira consistia em testar o desempenho dos algoritmos considerados numa rede com 21 nós, onde o nó emissor de mensagens ia sendo alternado. A segunda, ao invés, visava avaliar a capacidade de cada algoritmo em adaptar-se a alterações na rede, concretizadas pela falha de nós a uma taxa exponencial. Esta última experiência é particularmente interessante pois este é um fenómeno característico das redes não infraestruturas, pelo que um bom algoritmo de difusão é aquele que tem a capacidade de responder adequadamente a tais situações, descobrindo novos caminhos de propagação para que possa manter o seu desempenho. Dos resultados obtidos, a primeira experiência revelou o PAMPA como sendo o algoritmo mais eficiente, apresentando a melhor taxa de entrega de mensagens, enquanto que a sua taxa de retransmissão foi a mais reduzida dos três algoritmos testados. O facto da taxa de entrega do algoritmo PAMPA ter sido inclusivamente mais elevada que a opção de *flooding*, comprovou que retransmitir mais não significa obrigatoriamente uma melhor fiabilidade. Na verdade, ao selecionar menos nós retransmissores, o algoritmo PAMPA consegue diminuir o tráfego na rede, permitindo que menos pacotes sejam corrompidos por outras mensagens a circular em simultâneo e que a taxa de erros na receção de mensagens por parte dos nós seja igualmente reduzida.

A segunda experiência, cujo o objetivo passava por testar a capacidade de resposta de cada algoritmo a alterações na rede, veio novamente demonstrar o PAMPA como sendo a melhor solução ao conseguir manter as suas taxas de entrega acima das restantes propostas. Estes resultados comprovam a maior capacidade de adaptação do algoritmo PAMPA face ao *Smart Gossip*. Tal é conseguido uma vez que, como o PAMPA não cria uma árvore de hierarquias entre os nós como acontece com o *Smart Gossip*, este não é obrigado a reconhecer e a ajustar-se a uma nova estrutura de rede sempre que sai ou entra um novo participante na mesma rede. Desse modo, como apenas depende das réplicas das mensagens recebidas para tomar a sua decisão de retransmissão, o PAMPA tem a capacidade de reagir mais rapidamente à perda de caminhos de propagação e encontra outras alternativas.

Apesar de se revelar uma solução mais eficiente, o algoritmo PAMPA não consegue, no entanto, lidar adequadamente com todas as situações, como acontece, por exemplo, em cenários de topologias de rede não uniformes. Mais concretamente, considerando a Fig 2.1, se uma nova mensagem for inicialmente retransmitida por A, os nós B e C serão segundo e terceiro a retransmitir, indicando implicitamente que a retransmissão do nó D

se torna desnecessária. Para solucionar este problema foi proposta em [2], uma família de variantes do algoritmo PAMPA. Destas, aquela que apresentou melhores resultados foi o algoritmo PAMPA-ATH/CP, apresentado na fig. 2.3. Esta solução, em vez de contar todas as retransmissões escutadas como a versão original do algoritmo PAMPA, conta apenas como retransmissões as cópias de uma mensagem que: $i)$ partilham o mesmo pai (ou seja, cópias que tenham sido enviadas por nós diferentes n_1 e n_2, mas onde n_1 e n_2 receberam previamente a mensagem de um mesmo nó n) ou; $ii)$ foram recebidas com uma força de sinal superior à da mensagem original. O algoritmo PAMPA-ATH/CP permitiu melhorar consideravelmente o desempenho do PAMPA, melhorando a percentagem de mensagens que conseguiram ser entregues a pelo menos 90% dos nós de 37% para 64%. No entanto, este algoritmo não anula o fenómeno de *overcancellation* identificado na Fig 2.1 onde o nó D continuará a considerar como retransmissões a cópias enviadas pelos nós B e C, uma vez que possuem o mesmo nó A como pai.

ao receber(msg);
if $msg \notin mensagens$ **then**
  $mensagens \leftarrow mensagens \cup \{msg\}$;
  $contador_{msg} \leftarrow 0$;
  $DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI))$;
  $pai_{msg} \leftarrow msg.emissor$;
  $sinal_{msg} \leftarrow msg.RSSI$;
else
  if $msg.emissor.pai = pai_{msg} \| msg.RSSI > sinal_{msg}$ **then**
    $contador_{msg} \leftarrow contador_{msg} + 1$;
  end if
end if

ao expirar tempo(msg);
if $contador_{msg} < n$ **then**
  $Retransmitir(msg)$;
end if

Figura 2.3: Algoritmo PAMPA-ATH/CP.

2.4 Abordagem *neighbor knowledge*

A inflexibilidade das abordagens anteriores em adaptarem os seus critérios de decisão de retransmissão a diferentes condições de propagação ou a falta de consideração da importância da topologia de rede nos seus desenhos, levam a que as suas implementações resultem em algoritmos incapazes de manterem a eficiência em cenários de topologias de rede não uniformes. A abordagem *neighbor knowledge* visa mitigar estas limitações a partir de um esquema adaptativo que permite identificar o número de vizinhos que cada

participante possui. Tendo o conhecimento desta informação, é posteriormente possível ajustar os valores utilizados pelos critérios de decisão de retransmissão dos algoritmos, e desse modo obter um desempenho ótimo dos mesmos em diferentes cenários de rede. No entanto, esta recolha de informação sobre os vizinhos de cada nó só é possível através de uma troca prévia de mensagens entre os participantes da rede. Estas mensagens, conhecidas como *hello messages* ou *hello packets*, são periodicamente enviadas por cada participante. Ao recebê-las, cada nó guarda o identificador do emissor da mensagem numa tabela de vizinhos mantida localmente e descarta a mensagem. Deste modo, diz-se que a abordagem *neighbor knowledge* permite dar a conhecer aos nós da rede os seus vizinhos a um salto de distância, pois essa é a distância máxima que as *hello messages* percorrem. No parágrafo seguinte, são referidas algumas propostas de algoritmos que implementam esta abordagem. No entanto, por introduzir um custo suplementar não negligenciável na disponibilidade de largura de banda da rede e nos tempos de vidas dos dispositivos na troca de mensagens prévia, os trabalhos seguidamente referidos para esta abordagem representam apenas um exemplo, sem constituírem uma verdadeira contribuição para a resolução da problemática colocada nesta dissertação.

Ao permitir o conhecimento dos vizinhos a uma salto de distância de cada participante, a abordagem *neighbor knowledge* foi conjugada com as abordagens probabilista, *counter-based* e *distance-based* no sentido de desenvolver soluções de algoritmos mais adaptáveis e capazes de operarem corretamente em condições de propagação mais adversas, como acontece em topologias de rede não uniformes. Em relação à abordagem probabilista, através de estudos desenvolvidos como em [1] e [7], foi possível utilizar a abordagem *neighbor knowledge* para calcular dinamicamente a probabilidade de retransmissão de cada nó, em função do número de vizinhos que dispunha, e desse modo conseguir reduzir a redundância de mensagens em regiões mais densas da rede e favorecer as retransmissões em regiões com maior dispersão de nós, através da atribuição de probabilidades mais altas nesses casos. Propostas como as apresentadas em [10] e [15] mostraram que a abordagem *neighbor knowledge* poderia ser igualmente combinada com a abordagem *counter-based*, no sentido de permitir tornar a definição do limite máximo de cópias escutadas antes de decidir retransmitir uma mensagem numa definição dinâmica e local para cada nó, dando assim a possibilidade a uma abordagem que anteriormente era completamente alheia à topologia de rede de transformar-se numa solução que tira partido de informações e se adapta à mesma para melhorar a sua eficiência. Seguindo a mesma ordem de ideias, trabalhos como o realizado em [12] onde a abordagem *neighbor knowledge* foi utilizada sobre a abordagem *distance-based*, permitiu obter uma solução de difusão mais eficiente, onde os nós são capaz de alterar a força de sinal com que retransmitem as mensagens, em função da distância a que se encontram dos seus vizinhos.

2.5 Discussão

Coordenar as decisões de retransmissão de um número de nós em proximidade não é uma tarefa trivial. Esta torna-se ainda mais complicada quando, devido às limitações de largura de banda e de consumo de energia, a troca de mensagens de coordenação tem de ser evitada. A maioria dos algoritmos estudados substitui a coordenação estrita entre nós pela aleatorização nas suas tomadas de decisão. Esta escolha pode ser explícita, como em algumas classes de algoritmos, por exemplo GOSSIP1 ou GOSSIP3, ou implícita como sucede nas abordagens *counter-based* e *distance-based*, onde a decisão de retransmissão dos algoritmos depende de um período de escuta aleatoriamente definido. As avaliações destes algoritmos demonstraram que o uso de aleatoriedade permite obter taxas de entrega elevadas em topologias de rede uniformes, onde não existem caminhos críticos de propagação, o que faz com que as mensagens acabem por ser entregues a todos os nós através de uma das diversas alternativas de propagação.

Em topologias de rede não uniformes, no entanto, é mais suscetível o aparecimento de caminhos críticos de disseminação, e estes necessitam de ser cobertos pelos algoritmos de difusão para que possam obter taxas de entrega aceitáveis. Porém, identificar estes caminhos não é fácil devido às restrições na troca de mensagens, à transitividade da rede uma vez que os nós se podem mover livremente ou desconectarem-se, ou ainda devido à ausência de mecanismos alternativos que permitam fornecer algum contexto aos nós, nomeadamente para que estes possam saber a sua localização relativamente a outros participantes. Por estas razões, ao usarem critérios de decisão aleatórios ou ao não se centrarem numa busca mais aprofundada sobre a presença de caminhos críticos na rede, os algoritmos estudados ao longo das secções anteriores deste capítulo tendem a sofrer quebras significativas de desempenho perante topologias de rede não uniformes. A tabela 2.1 resume os algoritmos revistos, descrevendo as suas principais características e limitações que os levam a não poderem ser considerados como soluções eficientes para o problema da difusão de mensagens em topologias de rede não uniformes.

Das diferentes propostas analisadas, o algoritmo PAMPA-ATH/CP é a solução mais orientada para topologias de rede não uniformes, abordando o problema da identificação de caminhos críticos de propagação através da redução do número de mensagens que cada nó conta para decidir não retransmitir. No entanto, tal significa igualmente um aumento no número de retransmissões necessárias ao funcionamento do algoritmo. Como demonstrado na secção anterior, este representa um passo no caminho de solucionar o problema da quebra de desempenho dos algoritmos de difusão em topologias de rede não uniformes. No entanto, não é um passo suficiente, sendo necessário encontrar outras alternativas mais fiáveis e mais eficientes. A restante secção focar-se-á em debater alguns aspetos que poderão vir a ser interessantes explorar, na tentativa de desenvolver um algoritmo verdadeiramente ciente do fluxo de mensagens e da topologia da rede, isto é, um algoritmo que consiga manter o seu desempenho em topologias de rede não uniformes.

Algoritmo	Características						Limitações			
	Probabilista	Conta retrans-missões	Contador de saltos	Regulação de topologia en-tre difusões	Uso da força de sinal	Redução nas retransmissões consideradas	Uso de aleato-riedade	Vulnerável ao movimento	Insensibilidade à topologia de rede	*Overcancellation*
GOSSIP1(p)	•						•		•	
Smart Gossip	•			•			•	•		
HCAB			•				•		•	
GOSSIP3(p, k, m)	•	•					•		•	
PAMPA		•			•					•
PAMPA ATH-CP		•			•	•				•

Tabela 2.1: Características e limitações dos algoritmos de difusão estudados em topologias de rede não uniformes.

O primeiro aspeto que poderá ser interessante explorar e que apenas o algoritmo PAMPA-ATH/CP aborda de forma ligeira é a descoberta de caminhos de propagação idênticos. No referido algoritmo, este mecanismo denomina-se *common parent*, mas limita-se a pesquisar caminhos idênticos com a um salto de distância, isto é, verificando simplesmente se o nó que enviou uma nova retransmissão da mensagem a recebeu de um mesmo nó n que nos tinha enviado a mensagem originalmente. No entanto, essa informação pode não ser suficiente. Em cenários como o cenário de ponte considerado nesta dissertação, por exemplo, o nó D à boca da ponte continuava sem retransmitir mensagens porque, para uma mensagem vinda de A, contava as cópias difundidas por B e C como retransmissões vindas do mesmo pai. Porém, uma abordagem interessante poderia consistir em alargar essa pesquisa dos caminhos percorridos pelas mensagens para dois ou três saltos de distância. Desse modo, se vários nós mais afastados da ponte estivessem a convergir todos em direção a A e este decidisse retransmitir, pela definição dos períodos de escuta, os nós B e C retransmitiriam antes de D. Logo, D ouviria três cópias da mesma mensagem com caminhos idênticos a dois e a três saltos de distância e assim poderia se aperceber que o fluxo da mensagem está a convergir para A e depois para si, logo deveria retransmitir a mensagem para que a sua propagação pudesse continuar.

Outro mecanismo que poderá ser estudado na perspetiva de tentar identificar o papel fundamental que o nó D desempenha na rede, embora esta solução possa não ser tão atrativa do ponto de vista de eficiência, é a análise da vista de um nó a partir da sua própria retransmissão. Esta poderá ser implementada da seguinte forma: ao receber uma mensagem pela primeira vez, um nó retransmite-a imediatamente e fica à escuta de novas retransmissões durante um período de tempo. Como o referido nó pode sempre saber a identificação do nó que lhe fez chegar a mensagem pela primeira vez, ao escutar outras

retransmissões causadas pela sua, o nó poderá saber quem se encontra dentro da sua vista. Se a mensagem não voltar a ser escutada por parte de qualquer outro nó exceto o emissor original, então significa que este nó se encontra numa região fronteira da rede, e portanto deve retransmitir a mensagem uma segunda vez para assegurar que algum novo nó a recebe.

Poderá ser igualmente útil retomar um critério que apenas um dos algoritmos anteriormente estudados tinha em consideração, mas que poderá contribuir para uma melhor perceção do fluxo de mensagens a circular na rede. Este critério consiste em analisar do números de saltos que as mensagens já realizaram para decidir a retransmissão de uma mensagem. Esta análise já foi previamente elaborada no algoritmo HCAB, no entanto esta informação acaba por não se profundamente aproveitada nesse algoritmo devido ao uso da aleatoriedade na definição de certas métricas, como na definição dos tempos de escuta dos nós, que pode não disponibilizar tempo suficiente para que um nó possa ouvir todas as retransmissões dos seus vizinhos. Deste modo, tentar aplicar a contagem de saltos efetuados pelas mensagens num algoritmo que seja mais determinista como o algoritmo PAMPA, poderá trazer benefícios.

Uma aproximação que nenhum dos algoritmos anteriores seguiu e que poderá ser uma mais-valia é a tentativa de perceção por parte dos nós da sua localização na rede, a partir da escuta de retransmissões. Esta abordagem foi inicialmente proposta em [3], no âmbito de um algoritmo ciente do contexto da rede, onde os nós dispunham de serviços subjacentes como sensores de GPS para ficarem a conhecer a sua localização geográfica. A ideia consistia em identificar um conjunto de seis vizinhos alvo, geograficamente colocados o mais próximo possível dos vértices de um hexágono em torno do nó emissor, assegurando que, para uma difusão desse nó central, as mensagens se espalhavam em todas as direções da rede com o mínimo de retransmissões. Tentando assim obter o melhor balanceamento possível entre fiabilidade e eficiência. No entanto, a presente dissertação foca-se em algoritmos livres de contexto, que se baseiam unicamente na recolha local de informação para a tomada de decisão de retransmissão. Deste modo poderia ser interessante explorar uma abordagem onde os nós pudessem obter mais informação sobre a topologia de rede circundante a partir do conceito de hexágono previamente apresentado. Isto porque, tal como acontece com a força de sinal, é igualmente possível, na receção de uma mensagem, identificar a direção que ela seguiu. Logo, se um nó recebesse retransmissões de uma mensagem oriundas de seis direções diferentes, tal que estas formassem um hexágono em torno do nó recetor, tal significaria que este se encontraria circundado de nós e portanto a sua retransmissão seria supérflua. Por outro lado, se um nó recebesse menos retransmissões com direções diferentes, então significaria que a sua retransmissão poderia trazer uma contribuição positiva para a rede. Deste modo, esta análise poderá ser muito importante para o estudo atual pois, em cenários de topologias de rede não uniformes como o apresentado na Fig 2.1, poderá contribuir para uma melhor identificação do

papel fundamental que o nó D à entrada da ponte desempenha, e assim favorecer a sua retransmissão.

Capítulo 3

Avaliações preliminares

O estudo anterior demonstrou que, ao não considerarem a importância da topologia de rede nas suas implementações, a maioria dos algoritmos de difusão estudados não consegue manter um desempenho aceitável em cenários de rede não uniformes. De entre as diversas soluções apresentadas, a que poderá, no entanto, revelar uma maior adequação a tais situações é o algoritmo PAMPA, ao abolir qualquer critério probabilístico ou aleatório do seu desenho e ao tentar recolher e aplicar mais informação sobre a rede na tomada de decisão de retransmissão. Porém os resultados obtidos em [11] e em [2] não são suficientemente esclarecedores para poder compreender extensivamente o comportamento do PAMPA em cenários de rede não uniformes. Deste modo, o presente capítulo expõe o trabalho desenvolvido no sentido de elaborar um estudo mais aprofundado sobre a real eficiência do algoritmo PAMPA em topologias de rede não uniformes. O seu objetivo era o de permitir criar um ponto de partida sólido para o posterior desenvolvimento de uma solução de algoritmo especialmente desenhada para este tipo de cenários, onde as condições de propagação são mais adversas. As secções 3.1, 3.2 e 3.3 destinam-se à descrição dos cenários onde o algoritmo foi testado, às condições iniciais de teste, e às métricas tidas em consideração na fase de avaliação, enquanto a secção 3.4 apresenta os resultados obtidos.

3.1 Criação de uma biblioteca de topologias não uniformes

Como base para a realização das avaliações preliminares, foi previamente criada uma biblioteca de topologias não uniformes. Esta serviria não só como plataforma de teste para o presente estudo preliminar sobre o algoritmo PAMPA, mas também para assegurar um ambiente de teste comum para poder comparar o desempenho dos diversos algoritmos na fase de avaliação da solução proposta. A biblioteca foi construída tendo em conta duas topologias principais: a topologia “H” e a topologia “U”, para as quais foram desenvolvidos diferentes cenários de concretização, tendo sido criados 40 casos de teste para cada um

desses cenários. Todos os casos de teste foram inicialmente configurados com 350 nós, espalhados aleatoriamente sobre um espaço de rede de 1000m x 1000m com o recurso à ferramenta de geração e análise de cenários de mobilidade *BonnMotion*.[1] Posteriormente, foi executada uma remoção manual dos nós colocados fora das áreas de implantação predefinidas. Esta remoção teve de ser feita após a colocação aleatória dos nós sobre o espaço de rede, visto ser não ser possível definir, nos parâmetros de operação da ferramenta *BonnMotion*, regiões ou coordenadas onde a colocação não deve ser permitida. Logo, esta apenas possibilita a criação de cenários de rede uniformemente distribuídos, pelo que a criação dos dois tipos de cenário de ponte considerados teve de ser manualmente conseguida numa segunda fase. Todos os casos de teste gerados foram ainda validados para garantir a ausência de quaisquer partições de rede. Assegurar esta condição era fundamental pois um dos aspetos mais importantes na avaliação de desempenho de qualquer algoritmo de difusão é perceber a sua capacidade em entregar as mensagens a todos os participantes. Se tal não fosse fisicamente possível, qualquer resultado obtido seria enviesado.

A primeira topologia tida como referência para a biblioteca construída foi a topologia "H". Esta representa o cenário de ponte, um caso típico de uma rede não uniforme já mencionado nos capítulos anteriores desta dissertação. Nesta topologia, a rede encontra-se dividida em três regiões: duas áreas de grande densidade, ligadas por uma estreita ponte ou túnel de nós situada a meio do espaço de rede. Para esta topologia foram criados quatro cenários de concretização com diferentes larguras de ponte, 40, 80, 100, e 200 metros. A Figura 3.1 apresenta um exemplo de um caso de teste para a topologia "H" com largura de ponte de 40 metros.

A segunda topologia considerada, a topologia "U", surge como uma derivação da primeira, onde a ponte que assegura a ligação entre as duas margens com grande densidade de nós se encontra na parte inferior do espaço de rede. Para esta topologia foram utilizados menos cenários, apenas três. A motivação em incluir estes cenários na biblioteca de topologias surgiu da necessidade de criar uma topologia de rede ainda mais adversa à propagação, que pudesse aprofundar as avaliações realizadas. Isto é, quando já tiver sido encontrada uma solução final de algoritmo para operar em redes não uniformes, esta topologia "U" permitirá levar a análise do seu desempenho mais além, e confirmar a sua verdadeira contribuição para resolver o problema da difusão em redes não uniformes. Os cenários desenvolvidos para esta topologia variaram a largura de ponte entre 50, 100 e 200 metros. Sendo que o cenário com a largura de ponte mais estreita estava inicialmente previsto para manter a conformidade com os cenários da topologia "H" de 40 metros, mas devido à dificuldade em obter o número desejado de casos de teste válidos, a largura foi estendida para 50 metros. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de um caso de teste da topologia "U" para o cenário de largura de ponte de 50 metros.

[1] http://net.cs.uni-bonn.de/wg/cs/applications/bonnmotion/

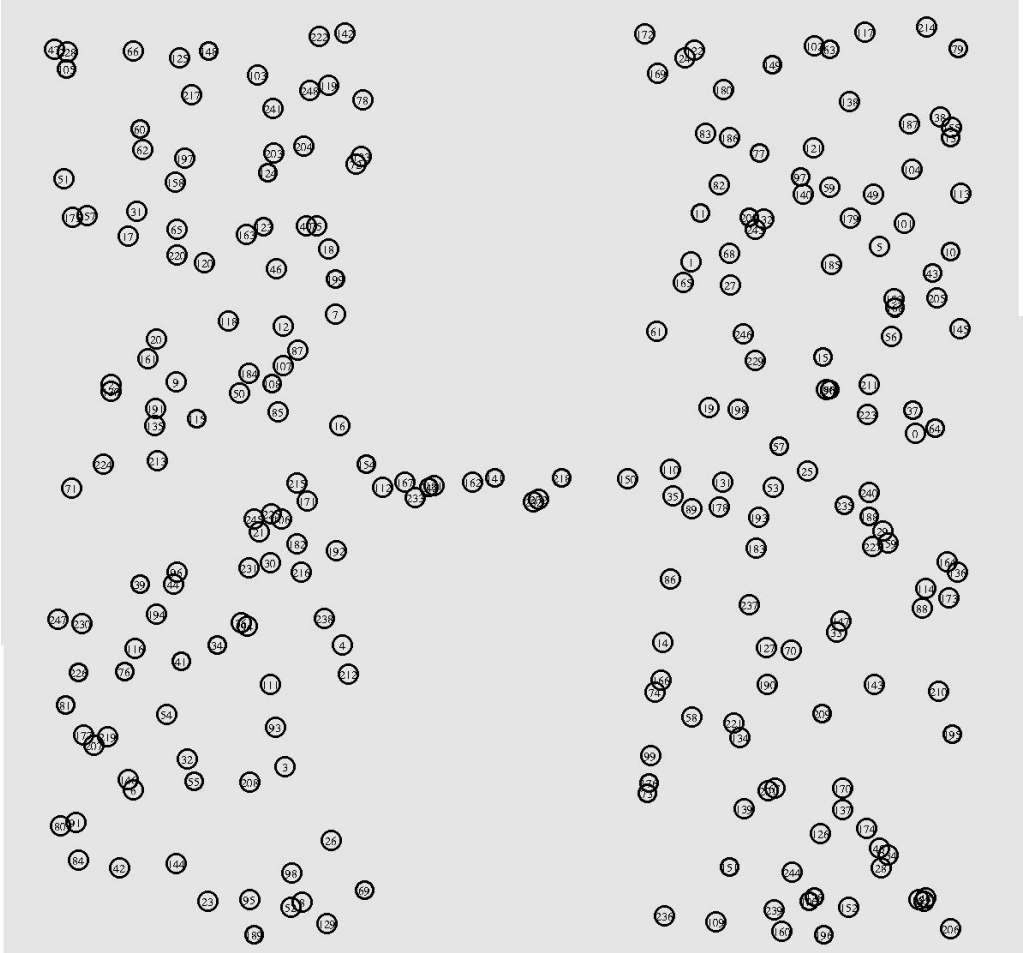

Figura 3.1: Exemplo de um caso de teste da topologia de rede “H”, com largura de ponte de 40 metros.

3.2 Condições iniciais de teste

O algoritmo PAMPA testado nesta avaliação preliminar foi implementado e simulado através do simulador *ns-2*[2], na versão 2.32. Os nós foram configurados com um raio de transmissão de 75 metros, usando uma camada MAC sem fios seguindo a norma 802.11. Como métricas de utilização do algoritmo PAMPA foi escolhido um limite máximo de duas retransmissões escutadas para que um nó pudesse retransmitir uma mensagem. Por seu lado, o parâmetro constante k a ser multiplicado ao indicador da força de sinal recebida (RSSI), que determina os períodos de espera dos nós, foi definido com o valor 300 x 10^6 para obter o melhor desempenho do algoritmo. Por fim, o algoritmo foi avaliado sobre os 40 casos de teste do cenário de 100 metros de largura de ponte da topologia “H”. Esta escolha deveu-se ao facto de, embora sendo um cenário onde a ponte é relativamente estreita, não é no entanto dos mais adversos para a propagação de mensagens, pelo que se considerou ser um ponto de partida interessante para testar a verdadeira adequação

[2]http://www.isi.edu/nsnam/ns/

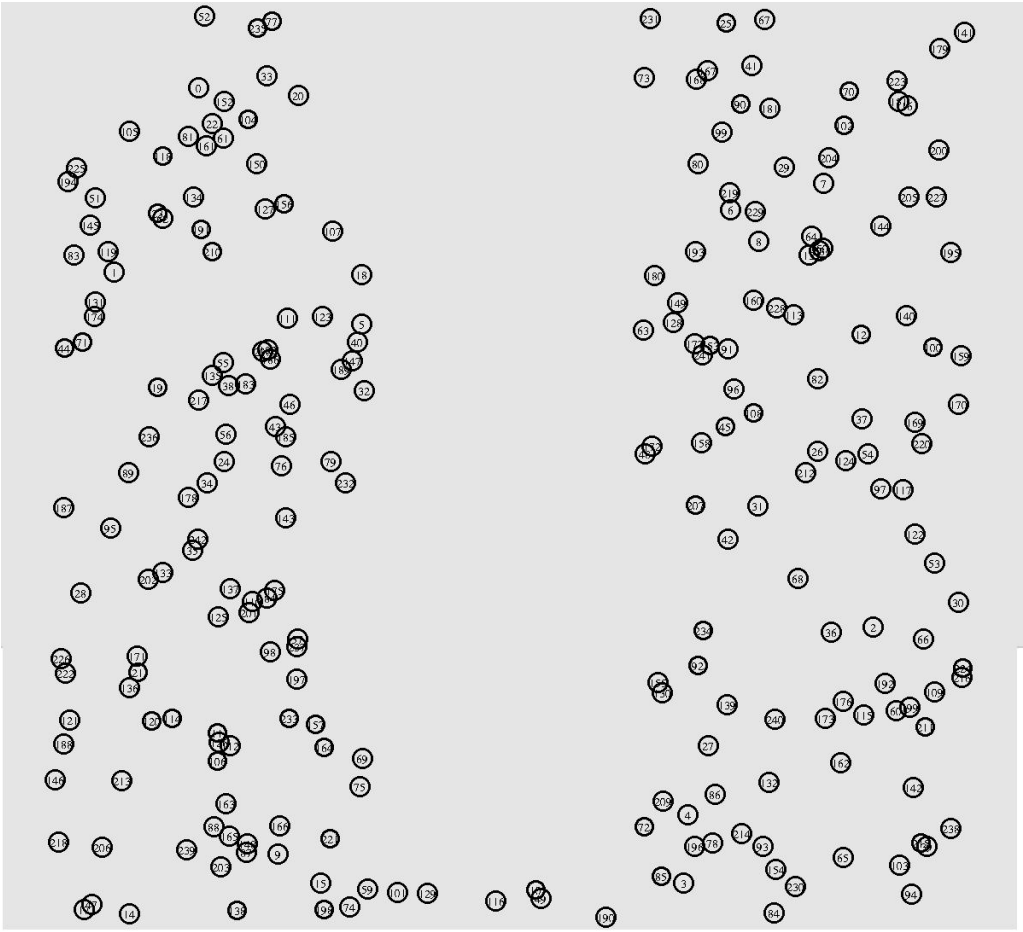

Figura 3.2: Exemplo de um caso de teste da topologia de rede “U”, com largura de ponte de 50 metros.

do algoritmo PAMPA a topologias de rede não uniformes. Cada simulação consistiu na difusão de uma nova mensagem por parte de cada nó participante, com um intervalo de 10 segundos entre difusões. Este período de espera foi criado de modo a evitar possíveis colisões de diferentes mensagens sobre os nós.

3.3 Métricas de avaliação

De modo a poder avaliar a qualidade do algoritmo testado, foram consideradas as seguintes métricas de avaliação:

Taxa de cobertura total é a percentagem de mensagens de uma simulação que conseguiram ser entregues a todos os nós;

Taxa de cobertura parcial é a percentagem de mensagens de uma simulação que foram entregues a menos de metade dos nós da rede;

Taxa de entrega é a percentagem média de nós que receberam cada mensagem de uma simulação;

Taxa de retransmissão é a percentagem média de nós que retransmitiram as mensagens.

Com exceção da segunda métrica de avaliação considerada, as restantes são frequentemente utilizadas na avaliação dos diferentes algoritmos de difusão propostos [2, 3, 8]. A novidade para este trabalho centra-se deste modo na utilização da segunda métrica de avaliação onde, através da observação da percentagem de mensagens que foram entregues a menos de 50% dos participantes, avaliamos os casos de teste pela negativa. Esta métrica poderá indicar-nos o volume de mensagens que não conseguiram atravessar a ponte para a margem contrária à origem da difusão ou cuja propagação foi bloqueada em fases iniciais da mesma.

3.4 Resultados

Os resultados obtidos para os 40 casos de teste avaliados são apresentados na tabela 3.1, sendo notória a acentuada disparidade de valores nas métricas consideradas ao longo das diversas simulações, suportada pelos elevados desvios padrão obtidos. Tal é primeiramente justificado por existir uma baixa densidade de nós nos casos de teste. Através da fórmula

$$\frac{(75m^2 \times \pi) \times 350\, nos}{1000m^2} \simeq 6\, nos$$

descobrimos que cada nó terá aproximadamente 6 vizinhos no espaço de rede considerado. Adicionalmente, como os nós são aleatoriamente distribuídos sobre esse espaço, e ainda são posteriormente removidos perto de uma centena de nós para poder construir o cenário de ponte desejado, torna-se frequente a ocorrência de situações onde alguns nós dispõem de um número muito menor de vizinhos. Tal pode suceder-se porque foi aleatoriamente atribuído a um nó um número de vizinhos abaixo da média ou porque, para o caso dos nós situados na fronteira da ponte, acabaram por perder vizinhos fruto da remoção manual de nós. Como consequência, as margens da ponte de alguns casos de teste começam a criar sub-regiões, onde um conjunto de nós apenas depende de um ou dois para poder receber ou transmitir mensagens aos restantes participantes fora desse aglomerado. Nessas situações, os casos de teste visados começam a criar cenários de ponte dentro do próprio cenário de ponte manualmente criado. Consequentemente, a obtenção de uma amplitude tão significativa de resultados e de desvios padrão tão elevados resulta da combinação de casos de teste onde este fenómeno surgiu com aqueles onde as margens apresentaram distribuições uniformes. Deste modo, com o objetivo de agrupar os casos de teste com resultados semelhantes para assim tornar a análise à avaliação realizada mais eficiente, procedeu-se a uma categorização dos casos de teste simulados, tendo sido definidos três tipos de cenários:

(A) - problemáticos: engloba o conjunto de simulações onde as taxas de cobertura parciais registaram valores abaixo dos 25%. Isto é, as simulações onde o número de mensagens que não conseguiram atravessar a ponte foi o mais elevado. Logo este será o conjunto de simulações de ação prioritária que a solução de algoritmo proposta deverá corrigir.

(B) - intermédios: engloba o conjunto de simulações que apresentaram uma fiabilidade elevada (taxas de entrega acima de 93%), mas onde as taxa de cobertura totais ficaram aquém do esperado, com valores inferiores a 20%. Ou seja, não tendo o algoritmo apresentado desempenhos tão penalizadores como na categoria anterior, estes casos de teste apresentam no entanto algum problema que leva à inibição de retransmissão por parte de alguns nós, fazendo com que as mensagens sejam entregues à maioria dos participantes da rede mas não à sua totalidade.

(C) - "tubos de ensaio": engloba o conjunto de simulações que apresentaram os melhores resultados. Mais precisamente, os casos de teste cujas taxas de entrega se mantiveram acima dos 90% e a maioria das mensagens foram entregues a todos os participantes. A motivação por detrás deste último tipo de cenário prendeu-se com a necessidade de encontrar um conjunto de casos de teste que pudessem servir como referência. Isto é, identificar as simulações onde o algoritmo PAMPA apresentou melhores desempenhos para assim poder confirmar, numa fase posterior de avaliação à solução final, se esta não criou qualquer efeito contra-producente sobre estes casos de teste.

A união dos três tipos de cenários definidos não engloba, no entanto, a totalidade dos 40 casos de teste simulados. Como observável a partir da tabela 3.1, estes representam apenas 13. A justificação por detrás desta categorização prendeu-se com a necessidade de agrupar os casos de teste com resultados semelhantes e cujos resultados permitissem, a partir de uma primeira análise, identificar alguns padrões de desempenho do algoritmo testado. Observando as tabelas 3.2, 3.3 e 3.4, é percetível a redução dos desvios padrões obtidos na execução do algoritmo PAMPA sobre os três tipos de cenários considerados em comparação com os recolhidos na simulação dos 40 casos de teste iniciais. Deste modo, foi possível perceber os casos onde mais mensagens não conseguiram atravessar a ponte, os casos onde as mensagens atingiram uma elevada percentagem de nós mas raramente a sua totalidade, e os casos onde algoritmo PAMPA conseguiu mostrar o melhor desempenho. Os restantes 27 casos de teste não abrangidos por esta categorização são aqueles cujos valores não se enquadravam nos critérios definidos e que necessitariam, portanto, de uma segunda análise mais aprofundada para perceber as razões dos seus desempenhos.

Caso de teste	Nº nós	Cobertura total	Cobertura parcial	Taxa de entrega	Taxa de re-transmissão	Categoria
1	267	1.12%	15.73%	62.64%	66.13%	
2	252	12.70%	7.14%	85.52%	69.39%	
3	258	0%	9.30%	84.22%	65.31%	
4	258	66.28%	5.04%	93.89%	66.26%	C
5	255	57.25%	4.31%	94.80%	69.90%	C
6	251	0%	45.82%	42.87%	67.91%	A
7	259	23.55%	11.58%	79.67%	68.71%	
8	261	0%	6.13%	86.22%	65.03%	
9	252	0.79%	7.54%	91.75%	71.60%	B
10	245	0%	19.59%	74.34%	67.58%	
11	256	0.39%	16.41%	82.06%	68.43%	
12	260	0%	19.23%	78.20%	67.39%	
13	259	0%	34.75%	53.93%	64.93%	A
14	251	0%	15.14%	73.35%	69.42%	
15	257	3.89%	4.28%	93.82%	65.02%	B
16	267	41.95%	19.48%	73.51%	66.76%	
17	260	0%	6.15%	92.27%	66.61%	B
18	238	0%	20.59%	81.09%	68.58%	
19	255	0%	10.20%	85.80%	68.36%	
20	255	0.39%	19.61%	74.86%	66.70%	
21	265	0%	16.60%	82.01%	64.44%	
22	263	6.08%	24.33%	82.45%	65.72%	
23	262	3.05%	3.05%	71.50%	66.97%	
24	251	0%	11.95%	73.99%	67.73%	
25	266	63.16%	24.81%	84.42%	67.78%	
26	259	0%	2.32%	93.51%	70.51%	B
27	271	0%	25.83%	76.43%	63.67%	A
28	256	0%	53.52%	61.34%	68.53%	A
29	264	0%	21.97%	71.28%	63.56%	
30	271	0%	5.90%	86.60%	67.03%	
31	255	0%	1.57%	79.31%	69.11%	
32	256	0%	28.52%	71.01%	70.09%	A
33	268	25.75%	10.07%	80.78%	66.83%	
34	253	0%	22.92%	79.04%	71.71%	
35	244	0%	24.18%	78.32%	69.29%	
36	262	8.02%	14.89%	83.37%	66.95%	
37	267	79.03%	1.50%	98.33%	65.62%	C
38	247	2.83%	46.15%	70.67%	70.27%	A
39	270	0%	9.63%	73.36%	65.23%	
40	264	48.11%	22.35%	86.23%	66.11%	
Média		11.11%	16.75%	79.22%	67.43%	
Desvio padrão		21.54%	12.25%	11.07%	2.04%	

Tabela 3.1: Avaliação do algoritmo PAMPA sobre o cenário de largura de ponte de 100 metros da topologia “H”.

3.4.1 Comparação de algoritmos nos cenários alvo

Como discutido no capítulo anterior, o algoritmo PAMPA não foi especificamente desenhado para operar eficientemente em topologias de rede não uniformes. Para fazer face a esta limitação, foi posteriormente desenvolvida uma família de variantes deste algoritmo que pudessem melhorar o seu desempenho em tais topologias, onde as condições de propagação de mensagens são mais adversas. Das diferentes soluções apresentadas, a que obteve melhores resultados no estudo anterior [2] foi a variante PAMPA-ATH/CP. Deste modo, e uma vez concluída a avaliação preliminar ao algoritmo PAMPA, considerou-se benéfico aprofundar a presente avaliação com um novo estudo, destinado a observar mais detalhadamente a verdadeira melhoria de desempenho trazida pela variante PAMPA-ATH/CP face ao algoritmo original. Por esta razão, foi concretizada uma nova avaliação de desempenho, utilizando as mesmas condições de teste que a anterior, mas testando desta vez o algoritmo PAMPA-ATH/CP. As tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 comparam os resultados obtidos pelo algoritmo PAMPA-ATH/CP sobre o conjunto reduzido de casos de teste com os desempenhos apresentados pelo algoritmo PAMPA original.

Cenários problemáticos	**PAMPA**		**PAMPA-ATH/CP**	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Taxa de cobertura total	0.5%	1.0%	34.64%	33.54%
Taxa de cobertura parcial	39.10%	10.08%	12.91%	12.96%
Taxa de entrega	62.71%	11.50%	82.91%	15.46%
Taxa de retransmissão	67.57%	2.48%	75.68%	2.73%

Tabela 3.2: Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA e PAMPA-ATH/CP nos cenários problemáticos.

Cenários intermédios	**PAMPA**		**PAMPA-ATH/CP**	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Taxa de cobertura total	1.17%	1.60%	31.87%	31.80%
Taxa de cobertura parcial	5.07%	1.97%	2.80%	2.48%
Taxa de entrega	92.84%	0.85%	96.10%	1.88%
Taxa de retransmissão	68.44%	2.71%	76.15%	2.02%

Tabela 3.3: Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA e PAMPA-ATH/CP nos cenários intermédios.

As tabelas mostram que, na maioria das simulações, a solução PAMPA-ATH/CP conseguiu obter melhores desempenhos que o algoritmo PAMPA original. No entanto, esta melhoria foi acompanhada por um crescimento bastante acentuado nas taxas de retransmissão, com um aumento médio de 8.5% face ao volume de retransmissões obtido na primeira avaliação. Tal indica que, embora retransmitindo mais e permitindo um desempenho melhor que o algoritmo PAMPA na globalidade dos casos de teste, esta poderá

Cenários "tubos de ensaio"	PAMPA		PAMPA-ATH/CP	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Taxa de cobertura total	67.52%	8.93%	61.38%	24.20%
Taxa de cobertura parcial	3.62%	1.53%	2.19%	0.82%
Taxa de entrega	95.67%	1.92%	97.29%	1.20%
Taxa de retransmissão	67.26%	1.89%	75.78%	1.71%

Tabela 3.4: Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA e PAMPA-ATH/CP nos cenários "tubos de ensaio".

não ser a solução mais adequada ao problema da quebra de eficiência do PAMPA perante topologias de rede não uniformes. Isto é, a versão PAMPA-ATH/CP poderá estar simplesmente a favorecer as retransmissões para que haja uma menor possibilidade da propagação de mensagens ser bloqueada, sem que esteja a tomar melhores decisões de retransmissãos.

Mesmo assim, surgiram alguns casos onde, embora aumentando a taxa de entrega, a variante PAMPA-ATH/CP apresentou contribuições muito pouco significativas face à sua versão original para o número de mensagens entregues a todos os nós. Aliás, a obtenção de desvios padrão quase idênticos à média em dois dos três cenários considerados, provam que esta variante apenas consegue melhorar a taxa de cobertura total do algoritmo PAMPA em metade dos casos de teste simulados. Nos restantes, a execução do algoritmo PAMPA-ATH/CP apresentou uma capacidade de propagar mensagens por todos os participantes idêntica ou até inferior à solução anterior. Este fenómeno ocorreu nos casos de teste "problemáticos" 6, 27 e 32, no caso de teste "intermédio" 9, e no "tubo de ensaio" 4. Este último foi o mais penalizado, apresentando uma quebra muito acentuada na taxa de cobertura de total. Dos 66% obtidos para a primeira avaliação, a taxa de cobertura total assegurada pela variante PAMPA-ATH/CP passou para os 29%. Isto é, as mensagens conseguiram atingir mais nós do que quando propagadas pelo algoritmo PAMPA na primeira avaliação, mas em contra partida o número de mensagens entregues a todos diminuiu.

Foi realizada uma análise mais detalhada sobre as causas que poderiam estar na origem do problema identificado nestes cinco casos de teste. Ao observar o caminho percorrido pelas mensagens no caso "tubo de ensaio" notou-se que o nó 139 (ver figura 3.3) apresentava uma taxa de entrega muito reduzida. Foi então descoberto um ponto de estrangulamento em torno deste nó. Nomeadamente, ao observar os caminhos percorridos pelas mensagens aquando da execução do algoritmo PAMPA original, as mensagens recebidas pelo nó 139 seguiam todas um único caminho de propagação: $31 \rightarrow 219 \rightarrow 139$. No entanto, com a execução da variante PAMPA-ATH/CP, mais caminhos de propagação foram criados e o nó 219 antecessor do nó 139 passou a receber mensagens vindas de três nós diferentes: 31, 214, 107. Infelizmente os dois novos nós que começaram a entregar mensagens ao nó 219, encontravam-se mais perto do mesmo que o emissor inicial 31.

Como referido anteriormente, descobrir novos caminhos de propagação é teoricamente positivo pois significa que, em princípio, existirá um risco menor da propagação de uma mensagem ser bloqueada. Porém, no caso concreto deste caso de teste, a existência de mais caminhos de propagação veio produzir o efeito contrário. Como as duas últimas cópias são recebidas com forças de sinal mais fortes que a mensagem original vinda do nó 31, pelo critérios de decisão utilizados pela variante PAMPA-ATH/CP, o nó 219 considera-as como retransmissões e decide não retransmitir a mensagem. Deste modo, tem-se o aparecimento de um novo caso do fenómeno de $overcancellation$ identificado no capítulo introdutório, desta vez reproduzido numa das margens da ponte. Adicionalmente, observou-se que o mesmo problema esteve igualmente na origem nas quebras de desempenho dos restantes casos de teste, onde a variante PAMPA-ATH/CP obteve um desempenho idêntico em termos de taxa de cobertura total que o algoritmo original PAMPA,

Este estudo veio comprovar que, embora favorecendo as retransmissões e aumentando as taxas de entrega, não é claro que a solução PAMPA-ATH/CP esteja a tomar melhores de decisões de retransmissão no sentido de resolver o problema da identificação do papel crucial que certos nós desempenham numa rede de topologia não uniforme.

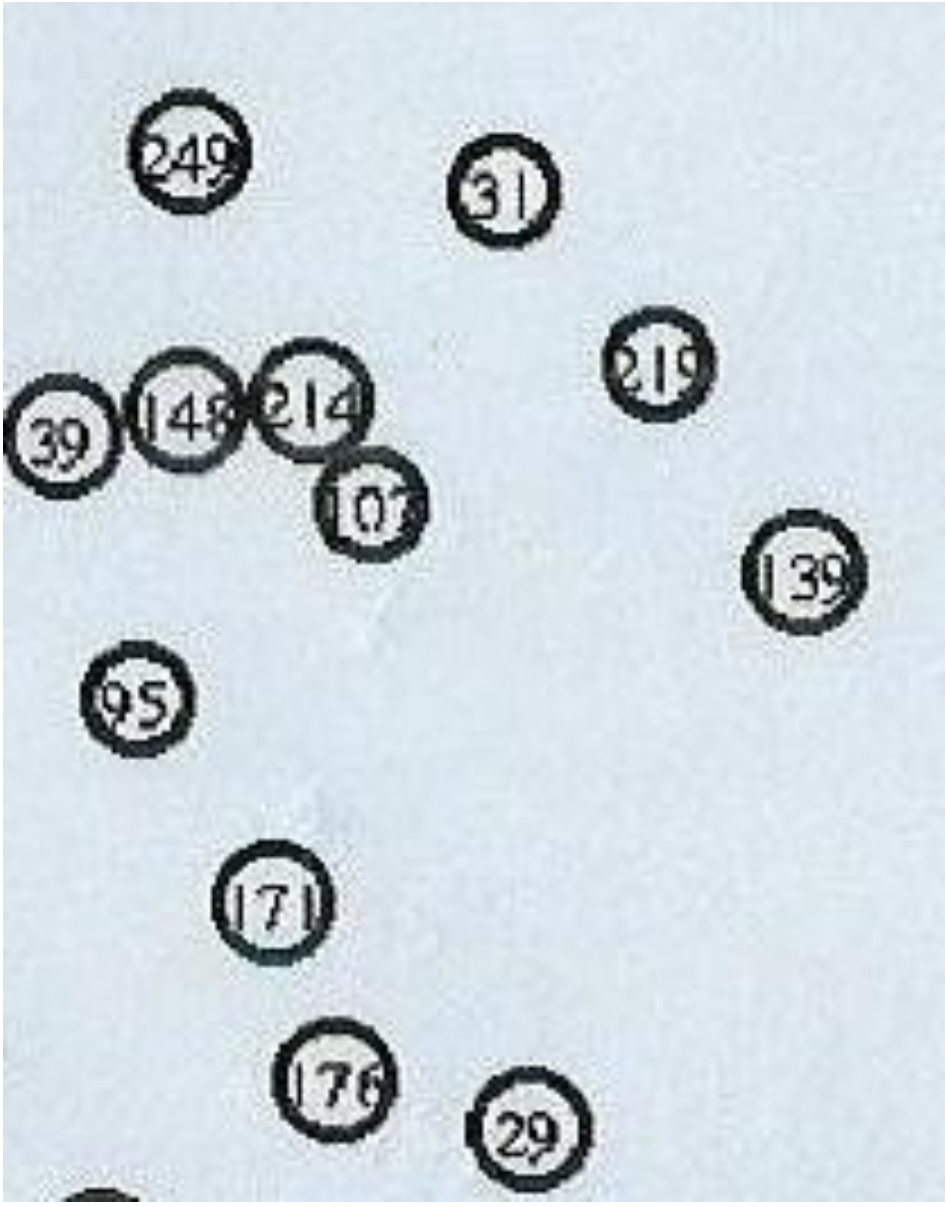

Figura 3.3: Nós em torno do nó 139 no caso de teste 4 do cenário de ponte com largura de 100m

Capítulo 4

Desenho da solução

O capítulo anterior comprovou que retransmitir mais não significa obrigatoriamente obter um melhor desempenho, e que para melhorar a taxa de entrega dos algoritmos de difusão em topologias de rede não uniformes é necessário estudar outras alternativas. Neste capítulo apresentamos duas abordagens complementares estudadas. A primeira baseia-se numa tentativa de estender a perceção de contexto dos nós, permitindo que estes possam observar o impacto das retransmissões dos vizinhos e possam reagir se for suspeita uma falha na propagação. A segunda abordagem visa melhorar os critérios de seleção do algoritmo PAMPA, na expectativa que dessa forma possa ser possível melhorar a propagação de mensagens através dos caminhos críticos da rede. Este capítulo começa por descrever ambas as abordagens propostas, explicando o seu racional e demonstrando como é que estas poderão contribuir para a resolução do problema identificado na secção de motivação do primeiro capítulo. Por fim, este capítulo encerra-se com a proposta duma abordagem que sobressai naturalmente da combinação das duas alternativas anteriormente descritas.

Todas as abordagens referidas neste capítulo partilham o mesmo conceito de "pai", inicialmente introduzido pelo algoritmo PAMPA-ATH/CP [2]. Sendo o pai de uma dada retransmissão enviada por um nó n, o nó de quem n recebeu a primeira cópia dessa mensagem.

4.1 Abordagem em duas fases de decisão

Os algoritmos que não usam mensagens de controlo, como os considerados na presente dissertação, apenas se podem basear na observação dos padrões de comunicação da rede para poderem melhorar as suas taxas de entrega. Isto é, em alguns casos, a identificação de comportamentos anormais só poderá ser possível após a ocorrência de algumas retransmissões das mensagens. Por esse motivo, os períodos de tempo entre a receção da primeira cópia de uma mensagem e a sua decisão de retransmissão tornam-se críticos. Foi previamente mencionado no capítulo 2 o problema do uso da aleatoriedade como um dos critérios principais para a definição destes tempos de espera. O algoritmo PAMPA dá um

passo em frente neste aspeto ao criar uma dependência entre o tempo de espero aplicado a cada nó e a distância a que este último se encontra da origem da primeira retransmissão. No entanto, como demonstrado a partir das avaliações preliminares, esta melhoria não é suficiente visto que os nós poderão ainda ser incapazes de identificar caminhos críticos de propagação.

O principal objetivo da abordagem em duas fases de decisão é o de estender o período de observação de alguns nós, que estarão encarregues de retransmitir uma mensagem se suspeitarem que as retransmissões anteriores não produziram o resultado esperado. A qualidade da difusão é avaliada através da contagem do número de pais distintos das retransmissões escutadas pelo nó. Intuitivamente, se uma retransmissão tiver um elevado número de pais diferentes, tal deve indicar que a propagação da mensagem seguiu em várias direções.

A abordagem em duas fases de decisão, apresentada na fig. 4.1, inspira-se no algoritmo GOSSIP3. Numa primeira fase, os nós seguem o critério de decisão padrão do algoritmo PAMPA. Deste modo, são favorecidas as retransmissões mais distantes, suscetíveis de serem mais eficientes por cobrirem uma área maior da rede. Os nós que não retransmitiram nesta primeira fase, entram numa segunda fase onde continuam a escutar a rede e definem um novo tempo de espera, com o mesmo valor definido para a primeira fase. Quando o segundo tempo de espera expira, os nós podem reconsiderar a sua decisão inicial de retransmissão. No entanto, em contraste com os algoritmos GOSSIP3 e PAMPA, uma retransmissão na segunda fase de decisão não é ditada pelo número de retransmissões escutadas, mas pelo números de pais diferentes escutados nessas retransmissões.

A abordagem em duas fases de decisão permite contornar os problemas de ambos os algoritmos PAMPA e PAMPA-ATH/CP no cenário de motivação apresentado no capítulo introdutório. Como visto anteriormente, estes dois algoritmos ou contam todas as mensagens recebidas como retransmissões, ou contam as mensagens que seguiram o mesmo caminho ou que foram retransmitidas por nós mais próximos do recetor. Em contra-ponto com esta última variante, a abordagem em duas fases de decisão adota a filosofia inversa e, caso o número de retransmissões recebidas numa primeira fase exceda o limite estipulado, serão favorecidas as retransmissões de mensagens que seguiram um mesmo caminho. A ideia na génese desta abordagem prende-se com o pressuposto de, se uma dada mensagem já foi várias vezes recebida, mas as suas retransmissões provêm todas de uma origem comum, então significa que apenas existe um único caminho de propagação. De tal modo que, mesmo se dando um segundo tempo de escuta, mais nenhum outro caminho de propagação foi descoberto através da observação de novos pais da mensagem, então isso significa que o nó recetor encontra-se num caminho crítico. Dado essa circunstância, este deve retransmitir a mensagem, pois a sua retransmissão não vai trazer redundância à rede, mas ao invés, vai contribuir para que a difusão da mensagem não seja

bloqueada. Aplicando esta ideia ao cenário de motivação apresentado no capítulo 1, o nó D começaria por escutar a mensagem vinda do nó A. Consequentemente, a abordagem em duas fases de decisão definiria A como o pai da mensagem recebida. Estando a uma distância maior de A, os nós B e C retransmitem primeiro que D. Este último, ao receber estas duas cópias, acrescentaria 2 ao número de retransmissões escutadas. No entanto, ao observar que os dois emissores (B e C) partilham o mesmo pai (o nó A), o número de pais distintos observados por D não seria alterado. Tal levaria a que, na primeira fase de decisão e segundo o critério do algoritmo PAMPA, a mensagem fosse descartada pelo facto de D ter recebido mais do que o limite máximo de retransmissões. No entanto, entrando na segunda fase de decisão, o número de pais distintos observados por D manteria o seu valor inicial 1, logo este seria forçado a retransmitir a mensagem.

Esta abordagem deve poder contribuir para a resolução do problema da quebra de eficiência dos algoritmos de difusão em topologias de rede não uniformes pois esforça-se em tentar perceber o papel fundamental que alguns nós desempenham perante este tipo de topologias. Se um nó suspeitar que a sua retransmissão não vai aumentar o nível de redundância, mas contrariamente trazer uma contribuição positiva por observar que em seu redor apenas existe um caminho de propagação, a sua retransmissão é favorecida. É expectável no entanto que esta abordagem faça aumentar o número de retransmissões exigidas pois oferece duas oportunidades aos nós de retransmitirem, e algumas retransmissões recebidas são ignoradas. Porém, estas são consideradas necessárias para que o desempenho possa ser melhorado neste tipo de cenários não uniformes.

4.2 Abordagem em tempo de escuta dinâmico

Enquanto a abordagem em duas fases de decisão oferece aos nós uma segunda oportunidade de retransmitirem, a abordagem em tempo de escuta dinâmico opta por estender em tempo de execução o período de espera originalmente definido. Espera-se desta forma que esta solução possa retardar a decisão dos nós que decidiriam erradamente retransmitir, aumentando assim as oportunidades de outros poderem retransmitir.

Esta abordagem executa a versão original do algoritmo PAMPA para determinar, de forma proporcional, o tempo de espera de cada nó em função da força de sinal com que a primeira retransmissão é recebida. No entanto, o período de espera passa a ser avaliado a cada nova retransmissão escutada. O novo período substitui o original sempre que seja superior.

A abordagem em tempo de escuta dinâmico, apresentada na fig. 4.2, adia a decisão de retransmissão dos nós que estejam em proximidade. Se um nó retransmitir na proximidade de outro, significa que a área de rede coberta pela retransmissão do segundo nó é quase idêntica à da retransmissão do seu vizinho anterior. Logo, quaisquer participantes que o segundo nó consiga atingir, é provável que o primeiro também o consiga, pelo

```
ao receber(msg);
if msg ∉ mensagens then
    primeiraFase = true;
    mensagens ← mensagens ∪ {msg};
    contador_msg ← 0;
    pais_msg ← pais_msg ∪ {msg.emissor};
    paisDistintos_msg ← 0;
    DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI));
else
    contador_msg ← contador_msg + 1;
    if msg.emissor.pai ∉ pais_msg then
        pais_msg ← pais_msg ∪ {msg.emissor.pai};
        paisDistintos_msg ← paisDistintos_msg + 1;
    end if
end if

ao expirar tempo(msg);
if primeiraFase then
    if contador_msg < n then
        Retransmitir(msg);
    else
        primeiraFase = false;
        DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI));
    end if
else
    if paisDistintos_msg < n then
        Retransmitir(msg);
    end if
end if
```

Figura 4.1: Abordagem em duas fases de decisão.

que a segunda retransmissão poderá não ser necessária. Ao permitir este adiamento, é expectável que a abordagem em tempo de dinâmico consiga reduzir o número de mensagens retransmitidas. No entanto, se mesmo após o aumento no tempo de escuta de um nó, este continuar com o número de retransmissões recebidas inalterado, então significa que a retransmissão do seu vizinho não conseguiu atingir novos participantes que pudessem assegurar a propagação da mensagem. Nessa situação, o nó cujo tempo de escuta foi aumentado deve retransmitir a mensagem pois é possível que só este consiga atingir outros participantes de modo a que a propagação não seja bloqueada, e portante significa que este se encontrava num caminho crítico da rede.

No caso da Figura 1.1, por exemplo, a retransmissão do nó C iria aumentar o período de espera do nó B, dando assim a oportunidade ao nó D de retransmitir sem que o limite máximo de retransmissões escutadas pelo nó D tivesse sido previamente atingido.

ao receber(msg);
if $msg \notin mensagens$ **then**
  $mensagens \leftarrow mensagens \cup \{msg\}$;
  $contador_{msg} \leftarrow 0$;
  $tempo_{msg} \leftarrow DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI))$;
else
  $contador_{msg} \leftarrow contador_{msg} + 1$;
  if $tempo_{msg} < DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI))$ **then**
    $tempo_{msg} \leftarrow DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI))$;
  end if
end if

ao expirar tempo(msg);
if $contador_{msg} < n$ **then**
  $Retransmitir(msg)$;
end if

Figura 4.2: Abordagem em tempo de escuta dinâmico.

4.3 Avaliação de abordagens sobre os cenários alvo

De modo a aferir as verdadeiras melhorias trazidas por estas duas novas abordagens face aos algoritmos previamente simulados, ambas foram testadas sobre o conjunto de cenários alvo, identificados no capítulo anterior. Os seus resultados foram posteriormente comparados com os desempenhos obtidos pelo algoritmo PAMPA original pois, como referido anteriormente, as melhorias trazidas pela versão PAMPA-ATH/CP não constituíam uma verdadeira solução ao problema colocado. Os resultados são apresentados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, respetivamente, e o aspeto mais apelativo que se pode observar é a franca melhoria que ambas as soluções oferecem face ao algoritmo PAMPA em termos de taxa de entrega. Sendo que na grande maioria das simulações da abordagem em duas fases de decisão, as taxas de entrega obtidas atingem valores próximos do ótimo, a rondar os 98% e 99%. Enquanto que os resultados da abordagem em tempo de escuta dinâmico não apresentam resultados tão bons, mas promovem na globalidade um desempenho melhor que o obtido para o algoritmo PAMPA.

A contrariar este último facto estão os três casos de teste considerados como cenários "tubos de ensaio", onde se assiste a uma ligeira descida das taxa de entrega do algoritmo PAMPA para a abordagem em tempo de escuta dinâmico. Após uma análise mais detalhada, identificou-se que estas quebras de desempenho se devem ao surgimento de casos pontuais onde dois nós se encontram tão próximos entre si, que retransmitem em intervalos de tempo muito próximos, fazendo com que a retransmissão de um não chegue suficientemente rápido ao outro para impedir a sua retransmissão. Como consequência, um terceiro nó que esteja no raio de transmissão de ambos, acabar por escutar duas retrans-

missões e decide não retransmitir. De modo a resolver esta situação, poder-se-ia ajustar o fator k a ser multiplicado ao indicador da força de sinal recebida (RSSI), que permite derivar os períodos de espera dos nós. No entanto, face a um número tão reduzido de mensagens onde este problema surge dentro de uma simulação, não se considerou necessário tal ajuste. Por outro lado, tal correção iria produzir um enviesamento de resultados ao criar uma versão do algoritmo PAMPA definida à medida. Deste modo, considerou-se este fenómeno uma característica intrínseca às simulações realizadas sem necessidade de medidas de correção.

Por outro lado, outro aspeto muito interessante relevado a partir destas simulações foi a variação da taxa de entrega. Enquanto a primeira abordagem atingiu, em muitos casos, desempenhos muito satisfatórios, a sua taxa de retransmissão sofreu um aumento de cerca de 10%, em média, face aos resultados obtidos pelo algoritmo PAMPA. Em valores absolutos, este valor representa um acréscimo de aproximadamente 25 nós que retransmitiram a mensagem. Este valor mantém-se, no entanto, dentro do aumento esperado visto a filosofia da abordagem em duas fases de decisão baseia-se no favorecimento das retransmissões. Em sentido inverso, mesmo não apresentando melhorias de desempenho tão acentuadas como as anteriores, a abordagem em tempo de escuta dinâmico reduziu a taxa de retransmissão para menos 2% de nós retransmissores que o algoritmo PAMPA. Neste sentido, considerou-se que uma possível solução para um algoritmo cujo desempenho não fosse prejudicado em topologias de rede não uniformes pudesse residir na combinação destas duas abordagens.

Cenários problemáticos	**PAMPA**		**PAMPA-ATH/CP**		**Duas fases**		**Tempo dinâmico**	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Taxa de cobertura total	0.5%	1.0%	34.64%	33.54%	53.69%	38.48%	12.68%	18.54%
Taxa de cobertura parcial	39.10%	10.08%	12.91%	12.96%	7.361%	6.83%	23.03%	18.34%
Taxa de entrega	62.71%	11.50%	82.91%	15.46%	90.36%	8.45%	81.36%	8.40%
Taxa de retransmissão	67.57%	2.48%	75.68%	2.73%	77.24%	1.97%	65.42%	1.68%

Tabela 4.1: Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA, PAMPA-ATH-CP e as abordagens em duas fases de decisão e em tempo de escuta dinâmico nos cenários problemáticos.

Cenários intermédios	PAMPA		PAMPA-ATH/CP		Duas fases		Tempo dinâmico	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Taxa de cobertura total	1.17%	1.60%	31.87%	31.80%	44.36%	37.68%	6.15%	3.48%
Taxa de cobertura parcial	5.07%	1.97%	2.80%	2.48%	0.97%	0.80%	1.75%	1.71%
Taxa de entrega	92.84%	0.85%	96.10%	1.88%	97.78%	1.10%	96.77%	1.16%
Taxa de retransmissão	68.44%	2.71%	76.15%	2.02%	76.37%	1.86%	64.58%	2.23%

Tabela 4.2: Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA, PAMPA-ATH-CP e as abordagens em duas fases de decisão e em tempo de escuta dinâmico nos cenários intermédios.

Cenários "tubos de ensaio"	PAMPA		PAMPA-ATH/CP		Duas fases		Tempo dinâmico	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Taxa de cobertura total	67.52%	8.93%	61.38%	24.20%	85.71%	13.75%	37.21%	31.90%
Taxa de cobertura parcial	3.62%	1.53%	2.19%	0.82%	1.56%	0.85%	5.55%	2.57%
Taxa de entrega	95.67%	1.92%	97.29%	1.20%	98.26%	1.07%	94.05%	1.84%
Taxa de retransmissão	67.26%	1.89%	75.78%	1.71%	75.35%	2.00%	63.61%	1.79%

Tabela 4.3: Comparação de desempenho entre os algoritmos PAMPA, PAMPA-ATH-CP as abordagens em duas fases de decisão e em tempo de escuta dinâmico nos cenários "tubos de ensaio".

4.4 *Flow-Aware Broadcasting Approach* (FABA)

Embora sigam filosofias opostas em relação ao número de retransmissões, as abordagens em duas fases de decisão e em tempo de escuta dinâmico são complementares. Como observado na secção anterior, a abordagem em duas fases de decisão considera aumentar o número de retransmissões, enquanto que a abordagem em tempo de escuta dinâmico pode inclusive levar à sua redução. A abordagem Flow-Aware Broadcasting Approach (FABA) combina as duas abordagens anteriores da forma apresenta na fig. 4.3.

Ao receber uma mensagem pela primeira vez, cada nó executa o algoritmo PAMPA original. Sempre que uma nova cópia da mensagem for recebida, o tempo de espera é dinamicamente alterado se o novo período calculado para a última retransmissão for su-

perior ao período corrente. Quando o tempo de espera expira, a mensagem é retransmitida se o nó recebeu menos do que um limite predeterminado de cópias da mensagem. Caso contrário, o nó recomeça o seu tempo de espera com o último valor e fica à escuta de mais retransmissões da mensagens uma segunda vez. Quando o segundo tempo de espera se completa, são usados os critérios do algoritmo PAMPA-ATH/CP para decidir se o nó deve ou não retransmitir a mensagem em causa.

A principal vantagem deste algoritmo é que combina o melhor de ambas as hipóteses numa única solução. Em relação à abordagem em duas fases de decisão, o FABA reutiliza a ideia de oferecer aos nós uma segunda oportunidade de retransmissão se estes não retransmitiram à primeira e se suspeitarem que as retransmissões anteriores não produziram o resultado esperado. Deste modo, o período crítico entre a receção da primeira cópia da mensagem e a tomada de decisão de retransmissão é alargada, permitindo aos nós que não retransmitiram numa primeira instância aumentar o seu período de observação e perceberem se, a sua retransmissão inicialmente considerada desnecessária, pode trazer uma contribuição positiva para a rede. Em relação à abordagem em tempo de escuta dinâmico, o algoritmo FABA inspira-se na definição de tempo de escuta dinâmico para a primeira fase de decisão para assegurar que os nós que decidem retransmitir nesse primeiro momento não o fazem erradamente, dando assim oportunidades a outros. Ou seja, o FABA tenta, numa fase inicial, reduzir o número de retransmissões falsas e, numa segunda fase, favorece o envio de retransmissões se suspeitar que as primeiras não foram suficientes para a assegurar a propagação de mensagens. Desta forma, o algoritmo FABA destaca-se por tentar recolher o máximo de informação possível que possa suportar a decisão tomada por cada nó. Em termos dos critérios de decisão aplicados em cada estágio, o algoritmo PAMPA foi escolhido para operar na primeira fase visto que anula qualquer tomada de decisão probabilista. Na segunda fase, é usada a versão ATH-CP do algoritmo PAMPA pois, uma vez que os nós já receberam mais cópias das mensagens, é necessária utilizar uma solução que possa favorecer as retransmissões e esta foi a que apresentou os melhores resultados de entre a família de protocolos proposta em [2].

```
ao receber(msg);
if msg ∉ mensagens then
    primeiraFase ← true;
    mensagens ← mensagens ∪ {msg};
    contador_msg ← 0;
    pai_msg ← msg.emissor;
    sinal_msg ← msg.RSSI;
    contadorATH-CP_msg ← 0;
    tempo_msg ← DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI));
else
    if primeiraFase then
        contador_msg ← contador_msg + 1;
        if tempo_msg < DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI)) then
            tempo_msg ← DefineTemporizador(msg, atraso(msg.RSSI));
        end if
    end if
    if msg.emissor.pai = pai_msg || msg.RSSI > sinal_msg then
        contadorATH-CP_msg ← contadorATH-CP_msg + 1;
    end if
end if

ao expirar tempo(msg);
if primeiraFase then
    if contador_msg < n then
        Retransmitir(msg);
    else
        primeiraFase ← false;
        RecomeçaTemporizador(msg, tempo_msg);
    end if
else
    if contadorATH-CP_msg < n then
        Retransmitir(msg);
    end if
end if
```

Figura 4.3: Abordagem Flow-Aware Broadcasting Approach (FABA).

Capítulo 5

Avaliação da solução

Após propor, no capítulo anterior, um conjunto de abordagens que pudessem ser utilizadas em topologias de rede não uniformes, o presente capítulo apresenta as suas avaliações de desempenho. Com estas tentaremos confirmar ou rejeitar a contribuição de cada uma das soluções desenhadas para a resolução do problema da quebra de eficiência sofrida pela maioria dos algoritmos de difusão perante tais topologias.

As avaliações centraram-se em comparar os desempenhos de diversos algoritmos em diferentes cenários de propagação de mensagens. Os algoritmos considerados foram as três abordagens propostas no capítulo anterior, juntamente com o algoritmo de referência PAMPA usado nesta dissertação e a sua variante PAMPA ATH-CP. Tal como sucedido com as avaliações preliminares descritas no capítulo 3, todos os presentes algoritmos foram implementados e simulados através do simulador *ns-2*, na versão 2.32, e os nós da rede foram configurados com uma camada MAC sem fios IEEE 802.11, tendo um raio de transmissão de 75 metros.

Os diferentes algoritmos foram posteriormente testados sobre três tipos de cenários de rede: as topologias de rede não uniformes "H" e "U" presentes na biblioteca previamente criada e descrita na Secção 3.1, e um cenário de topologia de rede uniforme. Sendo que este último corresponde à topologia de rede padrão onde os nós são uniformemente distribuídos pelo espaço, e representa o teste neutro desta avaliação para verificar se, mesmo sendo essencialmente destinado para operar em topologias de rede não uniformes, o algoritmo proposto nesta dissertação não adiciona qualquer efeito contraproducente em cenários uniformemente distribuídos.

As métricas utilizadas na presente avaliação para estudar o desempenho dos diferentes algoritmos sobre os cenários considerados, foram as mesmas que as consideradas nas avaliações preliminares e descritas na Secção 3.3: *taxa de cobertura total*, *taxa de cobertura parcial*, *taxa de entrega* e *taxa de retransmissão*. A estas, foram ainda adicionadas duas novas métricas: o *rácio de utilidade de retransmissão* que permite identificar o número médio de novos nós atingidos por cada retransmissão, e a *latência média* de difusão calculada a partir do tempo médio decorrido entre a primeira transmissão de uma

mensagem e a entrega dessa mensagem ao último participante que a recebeu. Todas estas métricas expressam a média obtida na simulação dos 40 casos de teste que compõem cada cenário. Todos os casos de teste usados durante a avaliação foram previamente verificados para garantir a ausência de partições. Por este motivo, as fiabilidades apresentadas e discutidas ao longo deste capítulo resultam exclusivamente da execução de cada algoritmo. Por outro lado, em todos os gráficos apresentados, os resultados das métricas consideradas encontram-se acompanhados por barras de erro verticais que mostram a distância entra as médias obtidas e os seus desvios padrão.

Tal como sucedido nas avaliações preliminares, as presentes simulações consistiram na difusão de uma mensagem por parte de cada participante, com um intervalo de 10 segundos entre difusões. O cenário de topologias de rede uniformes foi simulado com diferentes densidades de nós, obtidas através da configuração da potência de transmissão para que tenha um alcance de 75 e 250 metros, utilizando o modelo de propagação *two-ray ground*. Nesta última simulação, o parâmetro constante k que é multiplicado ao indicador da força de sinal recebida (RSSI) que permite derivar os períodos de escuta dos nós teve de ser adaptado de forma a podermos obter o melhor desempenho por parte do algoritmo PAMPA.

5.1 Análise de fiabilidade

As taxas de entrega dos diferentes protocolos para os cenários da topologia "H" são apresentados na Figura 5.1. As simulações comprovam que a variante ATH-CP melhora o desempenho do algoritmo PAMPA. Além do mais, o PAMPA exibiu consistentemente a pior taxa de entrega, confirmando que se trata do algoritmo menos preparado para operar em topologias de rede não uniformes. A abordagem em tempo de escuta dinâmico conseguiu aumentar a taxa de entrega em cerca de 10% face ao algoritmo PAMPA, e permaneceu perto dos resultados obtidos pela variante PAMPA ATH-CP. Tal demonstra que permitir o atraso da decisão de nós em proximidade é suficiente para permitir que outros possam fazê-lo. A abordagem em duas fases de decisão exibiu consistentemente a melhor taxa de entrega, com resultados perto dos 95% para todas as larguras de ponte testadas. Isto significa que oferecer aos nós uma segunda oportunidade para poderem retransmitir, e portanto poderem estender os seus tempos de observação se inicialmente suspeitaram que as suas retransmissões não iriam produzir o resultado esperado é mais eficiente para a propagação de mensagens que tomar essa decisão uma só vez. A abordagem em duas fases de decisão é igualmente o protocolo com o desempenho mais previsível, apresentando os desvios padrões mais baixos de todos os algoritmos.

Em contradição com as nossas expectativas iniciais, não foi o algoritmo FABA o que exibiu a melhor taxa de entrega. Uma vez que este combina as virtudes das duas abordagens em duas fases de decisão e com um tempo de escuta dinâmico, esperava-se que

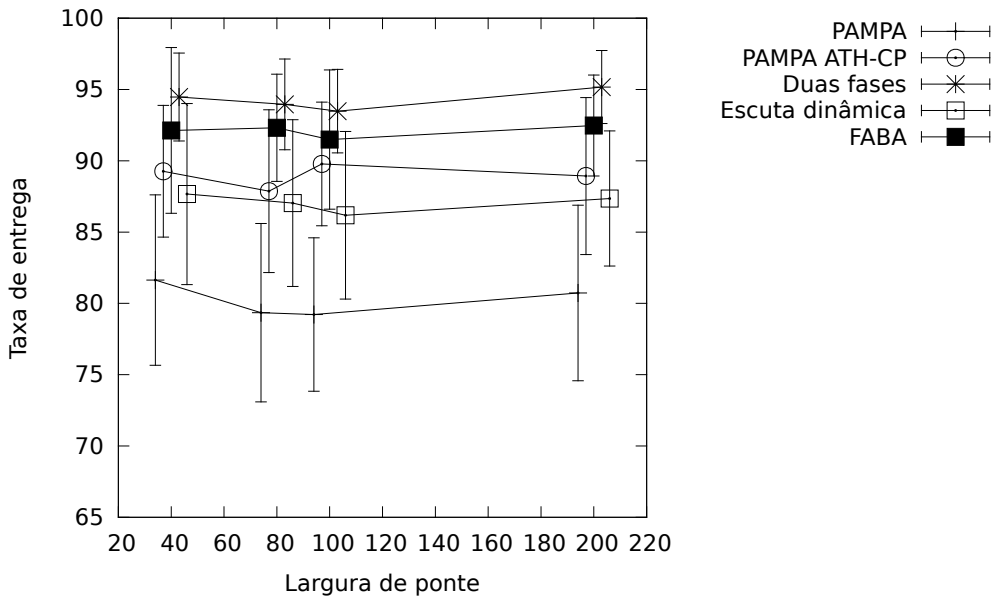

Figura 5.1: Taxas de entrega nos cenários de topologia "H".

este iria maximizasse a sua fiabilidade em relação às duas abordagens quando utilizadas em separado. No entanto, ficou apenas 3% abaixo da taxa de entrega obtida pela abordagem em duas fases de decisão, o que representa menos de uma dúzia de nós que não conseguiram receber a mensagem através deste algoritmo.

As taxas de cobertura total para os cenários da topologia de rede "H" são apresentadas na Figura 5.2 e confirmam as tendências identificadas a partir da análise anterior. O algoritmo PAMPA manteve-se como o pior protocolo, apresentando uma taxa de cobertura total perto dos 10%. As segunda e terceira piores soluções foram a abordagem em tempo de escuta dinâmico e a variante PAMPA ATH-CP, respetivamente. No entanto, os seus resultados conseguiram por vezes triplicar as taxas apresentadas pelo algoritmo PAMPA. Um aspeto interessante de se observar é o facto de duas abordagens conflituantes terem apresentado resultados comparáveis: a abordagem em tempo de escuta dinâmico tenta reduzir o volume de retransmissões, enquanto que a variante PAMPA ATH-CP as favorece, mas ambas apresentaram desempenhos semelhantes.

A abordagem em duas fases de decisão foi a solução que apresentou melhor desempenho, garantindo que metade das mensagens difundidas conseguem atingir todos os nós da rede. O algoritmo FABA é ainda assim capaz de superar este resultado para o cenário de largura de ponte mais estreita, mas de seguida cai em média 10% abaixo da abordagem em duas fases de decisão. De qualquer modo, a taxa de cobertura total obtida pelo algoritmo FABA encontra-se consistentemente acima dos 40%.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam as taxas de entrega e de cobertura total dos algoritmos simulados sobre os cenários de topologia de rede "U". Em geral, do ponto de vista da taxa de entrega, os algoritmos apresentam comportamentos semelhantes aos previa-

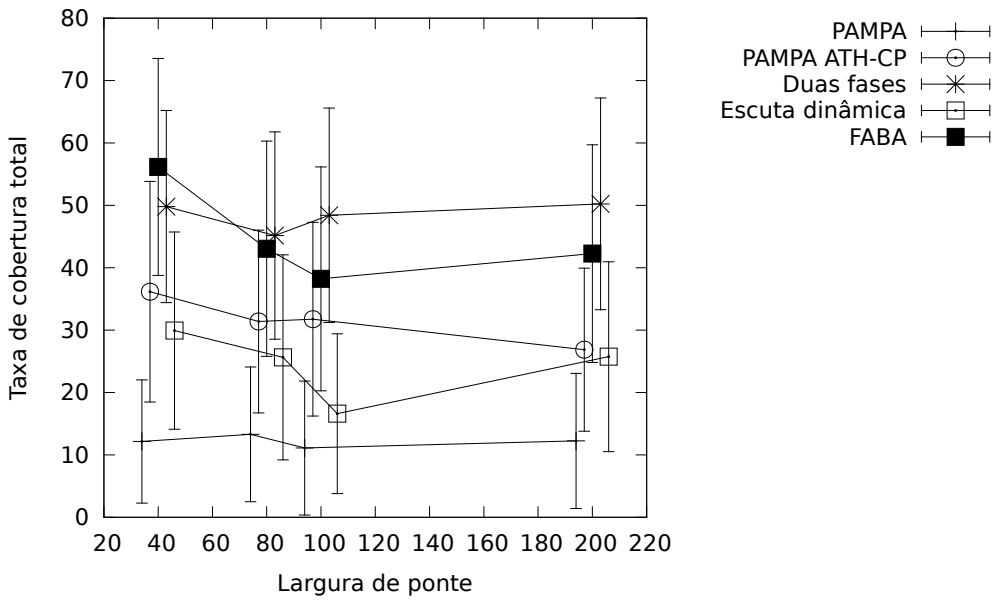

Figura 5.2: Taxas de cobertura total nos cenários de topologia “H”.

mente identificados para as topologias de rede “H”. No entanto, em termos de valores absolutos, as taxas de entrega dos algoritmos desceram em média cerca de 5% quando simulados neste segundo conjunto de cenários. O que já era esperado, visto tratar-se de uma situação de rede mais adversa à propagação de mensagens. Porém, o algoritmo FABA conseguiu ainda assim aproximar a sua fiabilidade da obtida pela abordagem em duas fases de decisão para o cenário com a largura de ponte mais estreita, tendo inclusivamente ultrapassado-a para os cenários com larguras de ponte mais amplos. Seguindo a mesma linha, a abordagem em tempo de escuta dinâmico foi igualmente capaz de reduzir a sua distância de fiabilidade para a variante PAMPA-ATH/CP. Deste modo, a abordagem em tempo de escuta dinâmico, mas principalmente o algoritmo FABA, mostraram ser as soluções que melhor resposta deram perante uma situação de rede mais adversa, confirmando as suas melhores apetências para lidarem eficientemente com topologias de rede não uniformes.

Do ponto de vista das taxas de cobertura total obtidas pelos algoritmos sobre os cenários de topologia “U”, foram igualmente obtidos desempenhos semelhantes aos das simulações para as topologias “H”. Surpreendentemente, a contrariar este facto, surgiu o algoritmo FABA. Após ter conseguido uma taxa de cobertura total acima do valor obtido pela abordagem em duas fases de decisão para o cenário com largura de ponte mais estreita da topologia “H”, e outro desempenho quase idêntico para outra largura de ponte. Esta solução apresentou agora um número de mensagens entregues a todos os nós consistentemente 10% abaixo do valor obtido pela abordagem em duas fases de decisão, aproximando-se inclusive mais da variante PAMPA ATH-CP do que da abordagem em duas fases de decisão. Tal é demais surpreendente porque, como observado na paragrafo

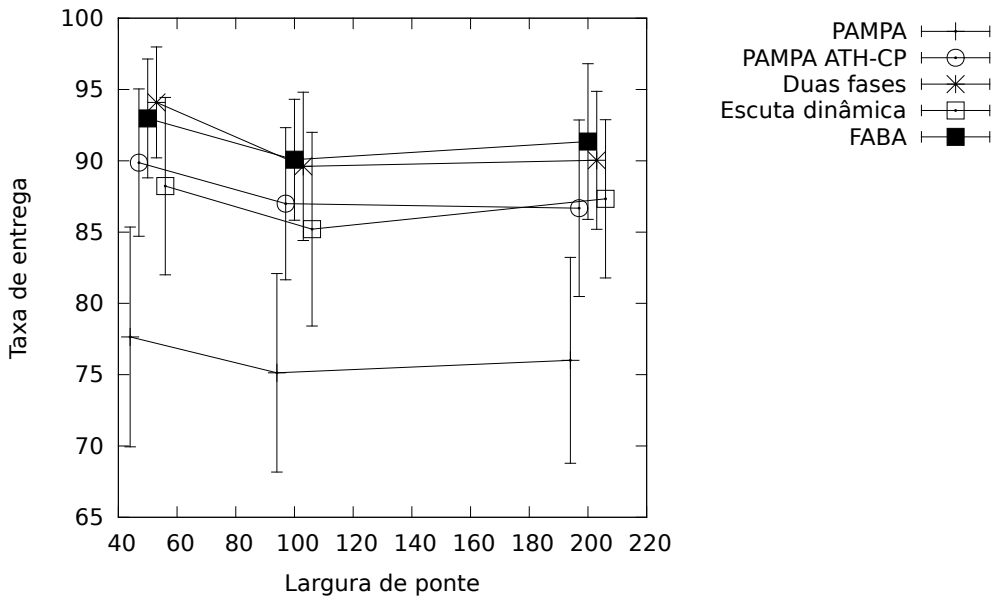

Figura 5.3: Taxas de entrega nos cenários de topologia “U”.

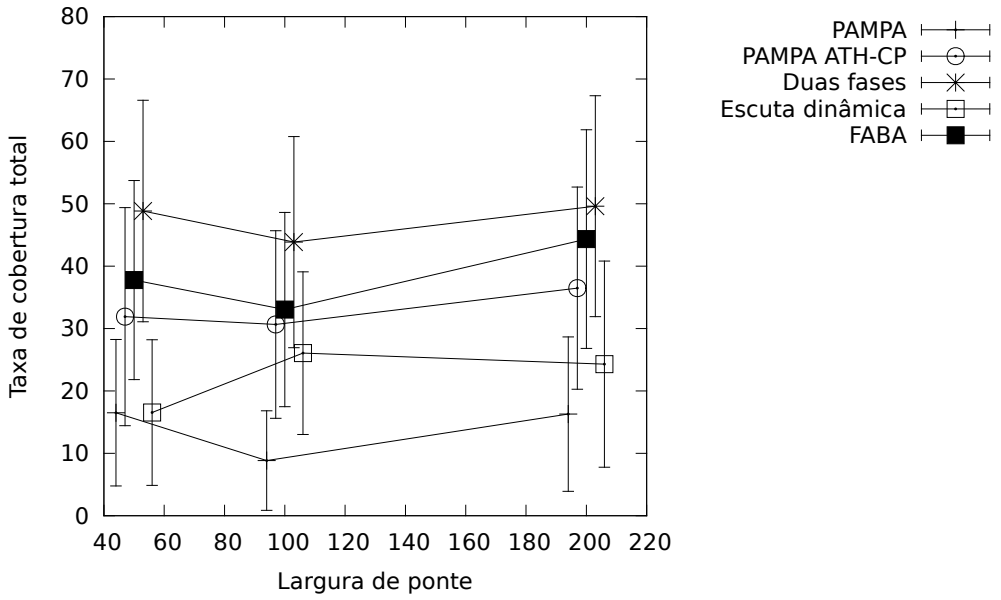

Figura 5.4: Taxas de cobertura total nos cenários de topologia “U”.

anterior, o algoritmo FABA conseguiu ultrapassar a taxa de entrega da abordagem em duas fases de decisão em 2 dos 3 três cenários de largura de ponte simulados. No entanto, uma taxa de cobertura total em torno dos 40% como a obtida pelo FABA permite, mesmo assim, melhorar o desempenho da variante PAMPA-ATH/CP e duplicar o desempenho da abordagem em tempo de escuta dinâmico, igualmente desenhada para operar em topologias de rede não uniformes.

Como referido anteriormente, o uso de uma topologia de rede uniformemente distribuída nesta avaliação tinha por objetivo confirmar que as soluções propostas não apresentariam qualquer efeito contraproducente perante condições de propagação mais favoráveis. Os resultados obtidos e apresentados na Figuras 5.5 e 5.6, demonstram que todos os algoritmos mantiveram ou melhoraram as fiabilidades anteriores. No entanto, subsistiu uma diferenciação nos valores obtidos pelos diferentes algoritmos quando o raio de transmissão dos nós foi configurado para 75 metros, sendo possível observar três níveis de desempenho. Num primeiro nível, tendo obtido taxas de entrega acima dos 90% e taxas de cobertura total acima dos 30%, encontramos a abordagem em duas fases de decisão e o algoritmo FABA. Mais uma vez, tal como identificado nos cenários não uniformes, estas duas soluções voltam a ser as que apresentam melhores desempenhos. Este comportamento já era esperado, visto tratarem-se de duas abordagens que favorecem as retransmissões, logo as mensagens poderão seguir um número maior de caminhos de propagação e assim atingir mais nós. Numa segunda categoria, com taxas de entrega abaixo dos 90% e taxas de cobertura total em torno de 20% encontramos a variante PAMPA ATH-CP e a abordagem em tempo de escuta dinâmico. Através da razão inversa à apresentada para os algoritmos do primeiro nível, é percetível que a abordagem em tempo de escuta dinâmico apresente um desempenho ligeiramente inferior aos anteriores por adotar uma filosofia contrária, tentando evitar o aumento do número de retransmissões. Logo menos caminhos de propagação estarão disponíveis para atingirem novos nós. Já a variante PAMPA ATH-CP, embora favorecendo as retransmissões, adota uma decisão de retransmissão menos informada que o algoritmo FABA ou a abordagem em duas fases de decisão. Logo, não se esforçando tanto quanto estes últimos para atingir uma decisão mais acertada, esta variante permite o aumento do número de retransmissões falsas, sem contribuição direta para a descoberta de novos caminhos de propagação que possam atingir mais nós da rede. Pelo que o seu desempenho não foi tão bom quanto os anteriores algoritmos, que também favorecem as retransmissões. Por fim, na última categoria, com uma taxa de entrega abaixo dos 85% e uma taxa de cobertura total de 10%, encontramos o algoritmo PAMPA. Por ser o único que não ignora nenhuma mensagem redundante como retransmissão, este é o algoritmo que menos caminhos de propagação irá utilizar, logo o número de nós suscetíveis de não receberem as mensagens aumenta face às restantes soluções, levando-o a que seja o algoritmo que apresenta pior desempenho.

Em relação ao cenário com o raio de transmissão dos nós configurado para 250 metros, todos os algoritmos apresentam resultados a rondar os 100% para ambas as métricas consideradas. Tal é no entanto normal visto que, para um raio de transmissão tão elevado para o espaço de rede de 1000m x 1000m utilizado, são apenas necessárias cerca de uma dezena de retransmissões, por parte de qualquer algoritmo, para que uma mensagem possa ser entregue a todos os participantes. Deste modo, logo em fase iniciais de propagação, todos os algoritmos obtêm uma fiabilidade ótima.

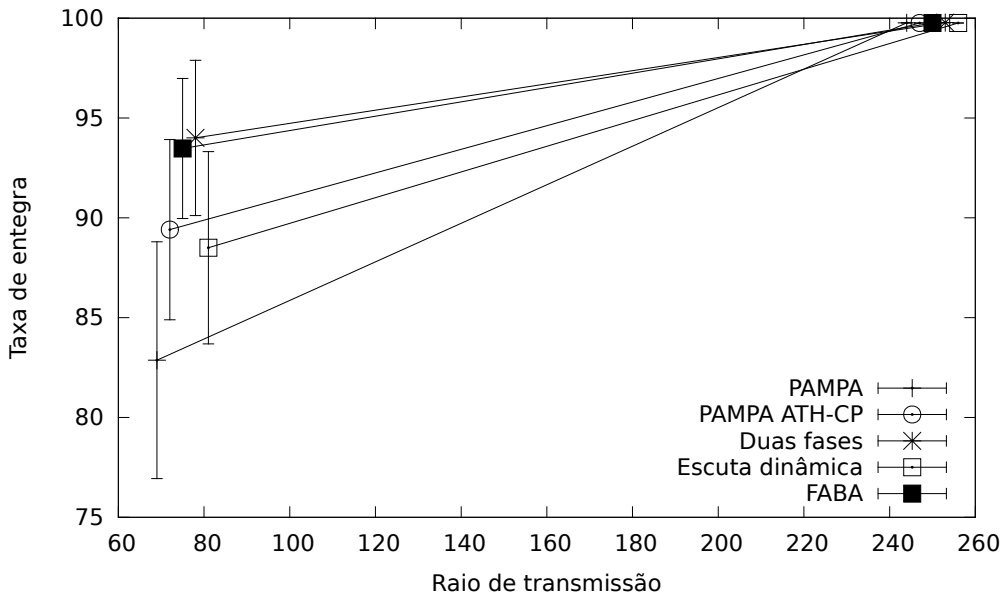

Figura 5.5: Taxas de entrega nos cenários de distribuição uniforme de nós.

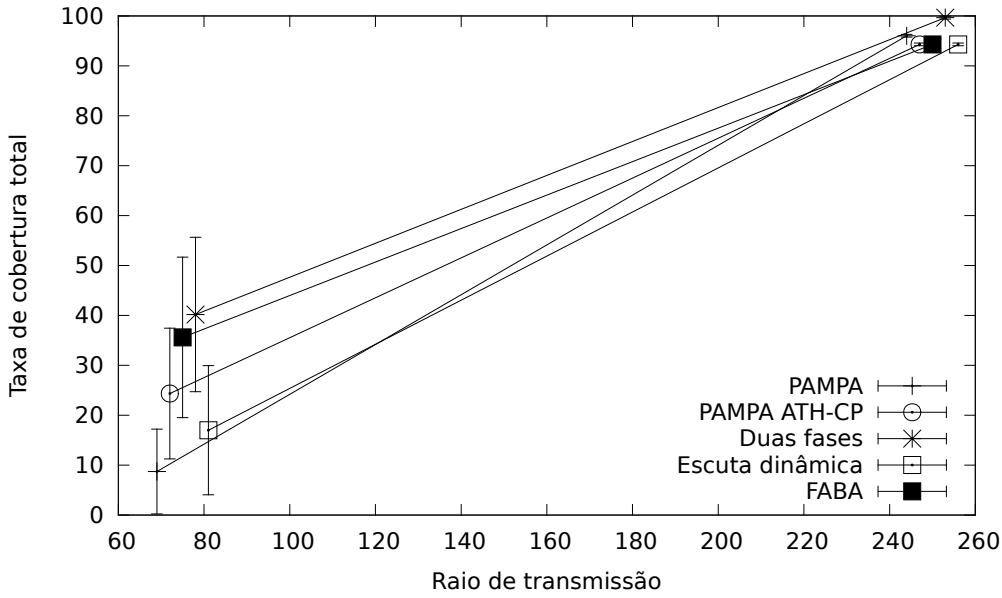

Figura 5.6: Taxas de cobertura total nos cenários de distribuição uniforme de nós.

5.2 Custo de operação

Um aspeto importante na análise das avaliações realizadas é o de verificar se os ganhos de fiabilidade demonstrados na secção anterior foram exclusivamente conseguidos através de um aumento no número de retransmissões. Em contraste com o algoritmo PAMPA, a maioria das restantes abordagens não considera algumas mensagens redundantes como retransmissões. Por esta razão, é expectável um ligeiro aumento no volume de retransmissões enviadas. No entanto, se os ganhos de fiabilidade identificados não puderem ser

mapeados num aumento das retransmissões, então tal significará que os algoritmos estão a tomar decisões de retransmissão mais acertadas.

As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram que a abordagem em tempo de escuta dinâmico é a solução com a menor taxa de retransmissão para os dois tipos de topologias não uniformes avaliadas. Este resultado veio de encontro ao esperado, pois a filosofia deste algoritmo consiste em atrasar a decisão de retransmissão dos nós que iriam retransmitir erradamente, dando essa oportunidade a outros, e assim conseguir reduzir o número de retransmissões desnecessárias. À medida que a abordagem em tempo de escuta dinâmico exibe consistentemente resultados de fiabilidade superiores ao algoritmo PAMPA, tendo necessitado de menos retransmissões, pode-se concluir que a seleção de nós através de um tempo de escuta dinâmico apresenta-se como um algoritmo mais sábio em relação à seleção de nós retransmissores.

Em sentido inverso, a variante PAMPA ATH-CP e a abordagem em duas fases de decisão mostraram ser as duas soluções mais dispendiosas, com um excesso médio de retransmissões 10% acima do valor obtido para a abordagem em tempo de escuta dinâmico. No caso da abordagem em duas fases de decisão, este aumento no número de mensagens enviadas pode ser compensado com os ganhos de fiabilidade observados. No entanto, a variante PAMPA ATH-CP apresenta um desempenho de fiabilidade comparável à da abordagem em tempo de escuta dinâmico. Neste sentido, é percetível que o algoritmo PAMPA ATH-CP não toma melhores decisões de retransmissão. Tal significa que o aumento de retransmissões por parte da abordagem em duas fases de decisão deve-se à expectativa que este poderá trazer uma contribuição significa à rede, e portanto é considerado necessário.

Por seu lado, o algoritmo FABA aparece como uma abordagem equilibrada, apresentando ganhos de fiabilidade e aumentos na taxa de retransmissão médios, com uma média de aproximadamente 75% de nós retransmissores.

Mais uma vez é importante avaliar esta métrica no cenário com uma distribuição uniforme de nós, para verificar que não são identificados quaisquer efeitos contraproducentes no funcionamento dos algoritmos. Como esperado, a Figura 5.9 mostra que todos os protocolos viram as suas taxas de retransmissão decrescerem à medida que o raio de transmissão dos nós aumenta. Tal é causado pelo facto de um aumento no raio de transmissão resultar num número maior de nós que conseguem receber cada retransmissão. Como consequência, existe uma proporção maior de retransmissões que se tornam redundantes e, por esse motivo, são evitadas pelos nós.

Neste sentido, era previsível que o algoritmo PAMPA fosse a solução com a descida mais acentuada na taxa de retransmissão, uma vez que é o único que considera todas as mensagens redundantes como retransmissões. Logo é a solução mais capacidade para evitar a redundância na rede, como os resultados obtidos acabam por confirmar. Reciprocamente, todos os restantes algoritmos são menos aptos a este tipo de cenários, obtendo reduções menos significativas nas suas taxas de retransmissão. Entre eles, a variante

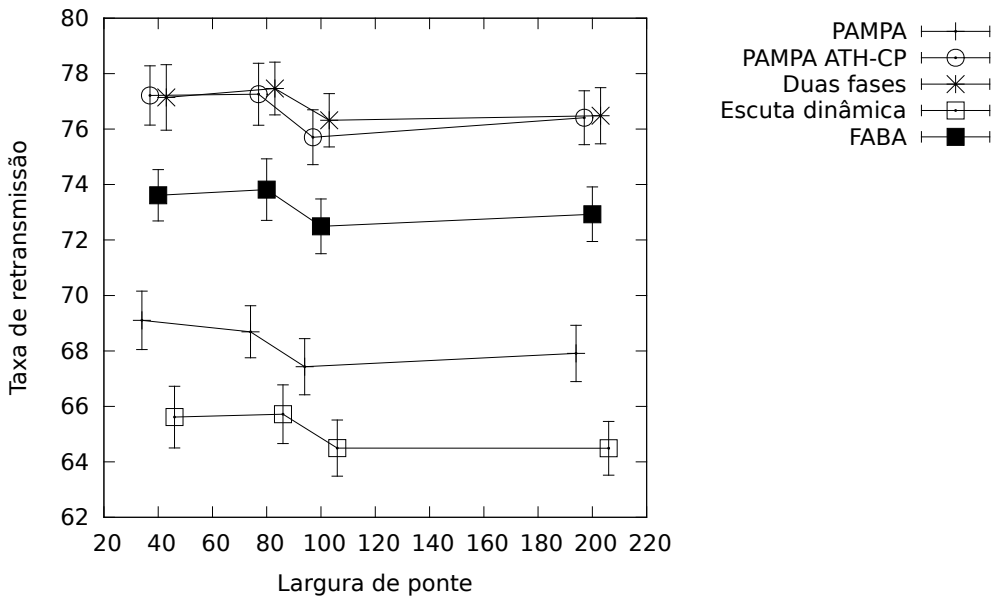

Figura 5.7: Taxas de retransmissão nos cenários de topologia "H".

PAMPA ATH-CP é claramente a solução mais dispendiosa, apresentando uma redução marginal na sua taxa de retransmissão. Esta situação deve-se ao facto desta variante ignorar a contabilização de algumas mensagens redundantes e portanto, mesmo perante uma rede com maior redundância, o mesmo número de nós são obrigados a retransmitir.

Os algoritmos propostos nesta dissertação situam-se entre estes dois extremos anteriores. Visto serem soluções principalmente concebidas para operarem em topologias de rede não uniformes, estas apresentam reduções de retransmissões menos significativas que o algoritmo PAMPA.

5.3 Análise de latência

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam as latências médias das mensagens para os diferentes cenários considerados. Tanto nos cenários de topologia "H" como "U" observa-se uma latência constante por parte dos algoritmos à medida que as larguras de ponte vão aumentando. Tal parece indicar que as mensagens necessitaram de realizar o mesmo número de saltos para serem difundidas. O que sugere que, independentemente da largura de ponte considerada, a dificuldade em encontrar caminhos de propagação foi a mesma. Pelo que larguras de ponte mais amplas não significaram condições de propagação mais favoráveis. No entanto, observa-se que latência média obtida pelos algoritmos centra-se em torno dos 5,5 segundos para os cenários de topologia "H", enquanto que a latência média obtida pelos cenários de topologia "U" mantém-se ligeiramente mais elevada, muito próximo dos 6,5 segundos. O que confirma que as condições de propagação mantém-se no entanto mais adversas quando a ponte de ligação entre as duas margens se encontra na parte infe-

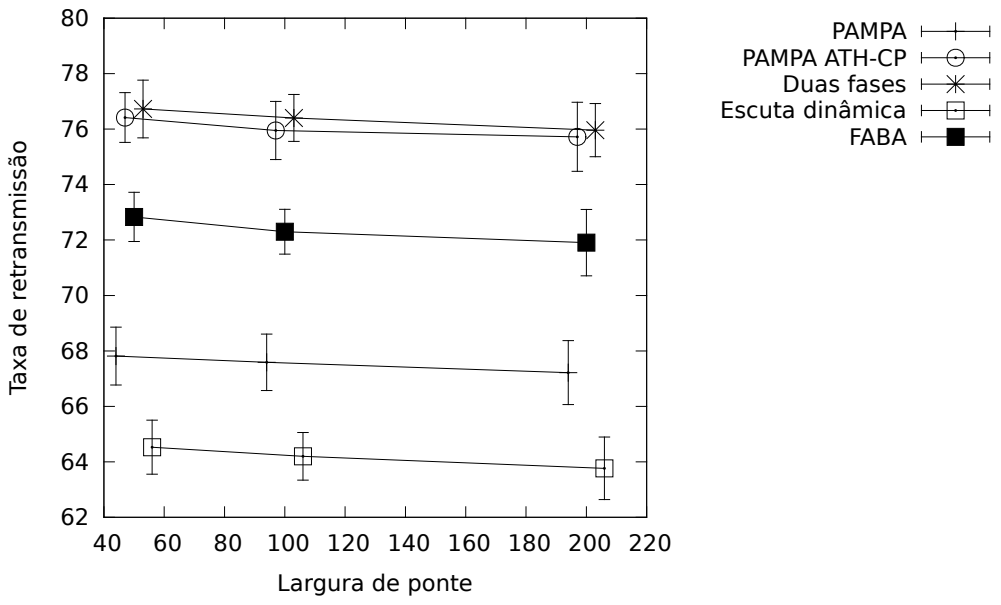

Figura 5.8: Taxas de retransmissão nos cenários de topologia "U".

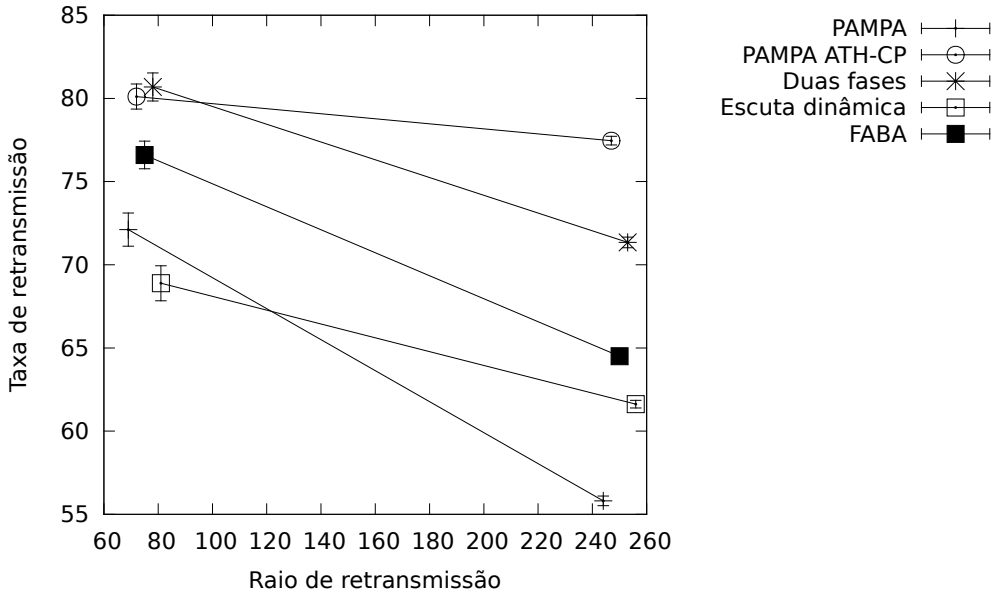

Figura 5.9: Taxas de retransmissão nos cenários de distribuição uniforme de nós.

rior do espaço de rede considerado. Por outro lado, em ambas as topologias, encontramos desempenhos muito semelhantes por parte de todos os algoritmos simulados, com uma variação média de 1 segundo entre as latências mais baixa e mais alta em todos os casos de teste, o que pode ser considerado um valor negligenciável.

Para poder melhorar estas latências, poder-se-ia reduzir o valor do parâmetro constante k do qual todos os algoritmos simulados dependem para definirem os períodos de espera dos nós. Desse modo, os nós começariam a retransmitir as mensagens mais ra-

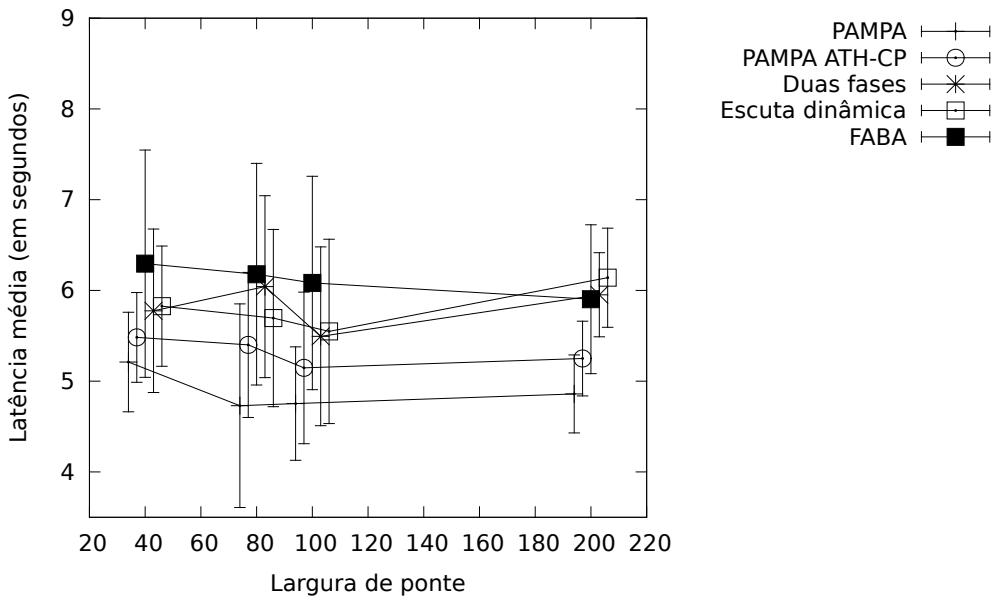

Figura 5.10: Latência média nos cenários de topologia "H".

pidamente, fazendo com que todos as recebessem mais cedo. No entanto, esta alteração iria igualmente provocar uma menor diferenciação entre os tempos de escuta dos nós consoante a sua distância do nó transmissor, o que resultaria num aumento do número de colisões de mensagens pois mais participantes iriam decidir retransmitir ao mesmo tempo.

Por fim, as latências obtidas no cenário de distribuição uniforme de nós confirmam os desempenhos ótimos identificados na Secção 5.1 por parte todos os algoritmos, quando o raio de transmissão dos nós se encontra configurado para 250 metros. Ao obter latências abaixo de 1 segundo, fica provado que as mensagens necessitaram de apenas uma ou duas retransmissões para poderem atingir todos os nós da rede. Visto que todos os algoritmos tendem a favorecer as retransmissões dos nós mais distantes, através de uma atribuição de um tempo de escuta menor, os novos nós que retransmitem conseguem atingir a quase totalidade da área de rede considerada. Deste modo, a latência encontrada para esta situação corresponde quase que diretamente à expiração do período de espera desses participantes mais distantes. Quando estes retransmitem conseguem atingir o último nó da rede a receber a mensagem, e portanto daí se explica a obtenção de uma latência tão reduzida.

5.4 Discussão

Das análises realizadas nas duas primeiras secções deste capítulo não fica claro qual a melhor solução de algoritmo para operar em redes não infraestruturas, entre as abordagens em duas fases de decisão e FABA. Sendo certo que a primeira abordagem atinge, globalmente, uma fiabilidade mais elevada que o algoritmo FABA, é igualmente verdade

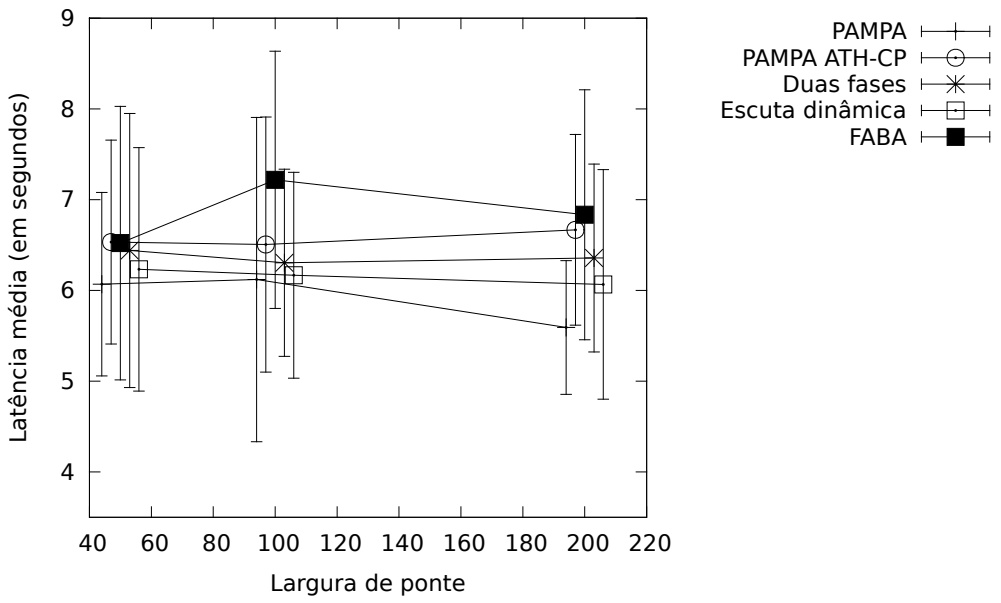

Figura 5.11: Latência média nos cenários de topologia "U".

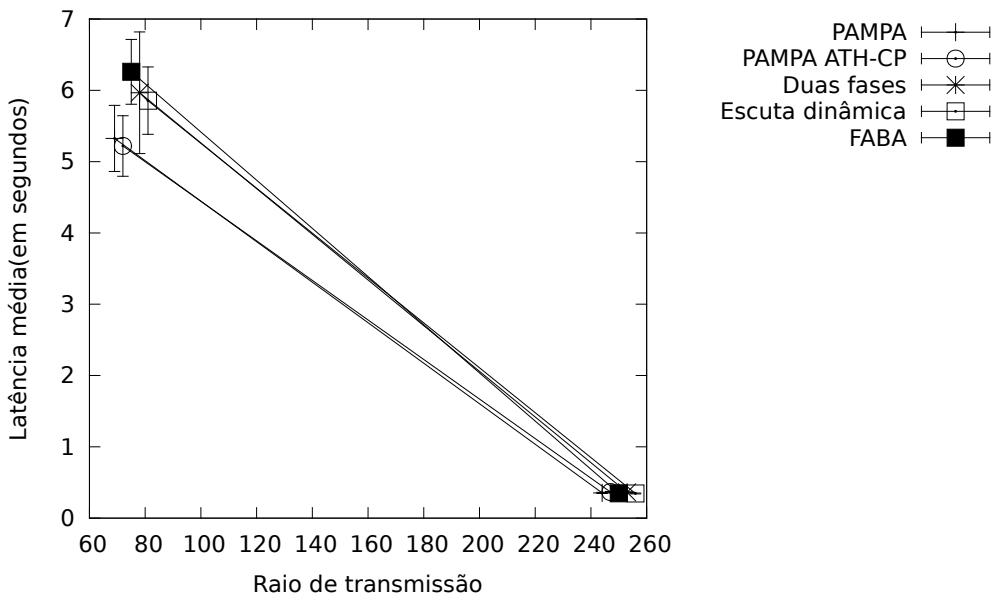

Figura 5.12: Latência média nos cenários de distribuição uniforme de nós.

que exige um custo de operação mais elevado. Em consequência, não fica claro qual a solução que aplica a tomada de decisão de retransmissão mais eficiente. Para ajudar a clarificar este aspeto, foi estudado um rácio de utilidade de retransmissão dos diversos algoritmos sobre os cenários considerados, obtido através da fórmula:

$$\frac{taxa\,de\,entrega}{taxa\,de\,retransmissao} = racio\,de\,utilidade\,de\,retransmissao$$

O rácio de utilidade de retransmissão permite saber qual o volume de retransmissões

redundantes enviadas para a rede. Isto é, a contribuição de cada retransmissão medida pelo número de novos nós que conseguiu atingir.

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 mostram os rácios obtidos pelos diferentes algoritmos nos três tipos de cenários simulados. Em relação às topologias de rede não uniformes "H" e "U", a abordagem em tempo de escuta dinâmica apresenta-se como a solução onde as retransmissões são mais eficientes. Desta forma, comprova-se que a sua filosofia inicial de tentar adiar a decisão de retransmissão dos nós que a iriam tomar erradamente produziu o efeito esperado, permitindo a redução substancialmente o número de retransmissões redundantes. O que faz com que esta abordagem seja a que tome as decisões de retransmissão mais acertadas.

No sentido oposto, com rácios de utilidade consistentemente inferiores a 1.2 para ambas as topologias de rede não uniformes, encontramos os algoritmos PAMPA e PAMPA ATH-CP como os que apresentaram o maior volume de retransmissões supérfluas. Em relação a esta última variante, este resultados vêm confirmar as suspeitas levantadas nas avaliações preliminares do Capítulo 3, onde se considerou que esta solução se limitava a favorecer as retransmissões para obter um aumento de desempenho, sem tomar melhores decisões.

A motivação principal desta análise prendia-se, no entanto, em poder identificar melhor qual a melhor solução de algoritmo entre a abordagem em duas fases de decisão e a abordagem FABA. Observando a três figuras apresentadas, observa-se que o algoritmo FABA conseguiu obter um rácio de utilidade de retransmissão mais elevado que a abordagem em duas fases de decisão em todas as simulações consideradas. Isto é, em qualquer um dos cenários colocados, o algoritmo FABA mostrou um número inferior de retransmissões redundantes, mostrando que a sua tomada de decisão de retransmissão é mais acertada. Deste modo, pode-se concluir que o algoritmo FABA é mais eficiente que a abordagem em duas fases de decisão.

Em relação ao cenário de distribuição uniforme de nós, era expectável encontrar, para o rácio de utilidade de retranmissão, um comportamento inverso ao obtido pelas taxas de retransmissão, discutidas na secção anterior. Isto é, observando uma descida no volume de retransmissões exigidas pelos algoritmos e um acréscimo nas taxas de entrega, à medida que o raio de transmissão dos nós aumenta, era esperado que os rácios de utilidades sofressem igualmente aumentos. Ou seja, como existem menos retransmissões na rede e mais nós que recebem as mensagens, tal significa que as retransmissões enviadas tornaram-se mais eficientes. Deste ponto de vista, o algoritmo que obteve melhores resultados foi o algoritmo PAMPA. Próximo dos valores obtidos pelos restantes no cenário de transmissão de 75m, é único que consegue colocar o seu rácio de utilidade acima de 1.7 para o cenário de transmissão de 250m. Este facto demonstra, mais uma vez, a capacidade deste algoritmo em responder corretamente à redundância na rede e comprova

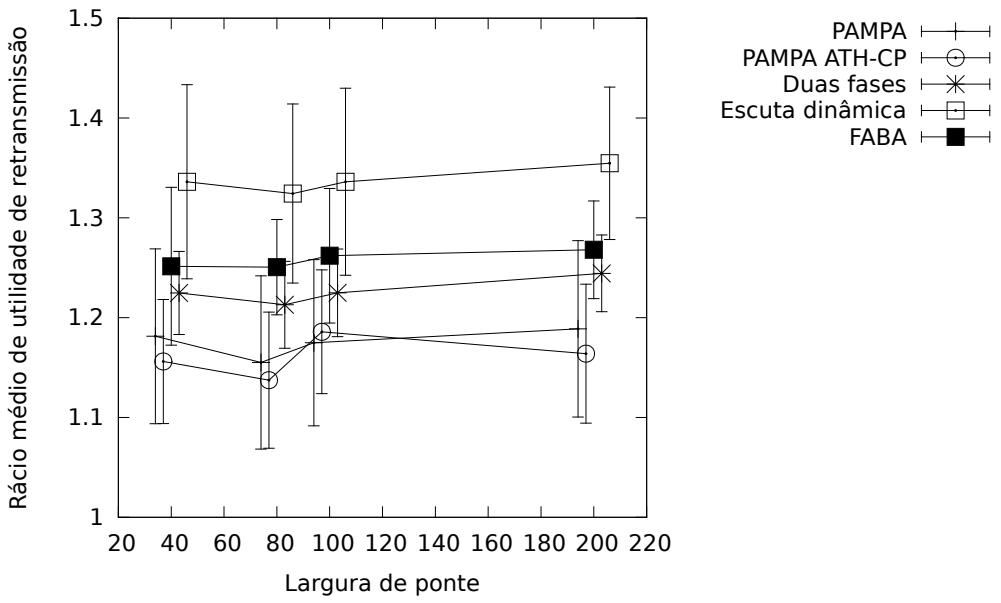

Figura 5.13: Rácio de utilidade de retransmissão nos cenários de topologia “H”.

a sua eficácia em cenários de rede uniformemente distribuídos. Das restante soluções, a que conseguiu obter o aumento mais acentuado no rácio de utilidade de retransmissão, à medida que o raio de transmissão dos nós cresce, foi a abordagem em tempo de escuta dinâmico. Mais uma vez, esta sai beneficiada do facto de adotar uma filosofia diferente dos restantes algoritmos, ao não favorecer o aumento das retransmissões. No extremo oposto, o algoritmo menos eficiente foi a variante PAMPA ATH-CP, confirmando-se mais uma vez como a solução mais dispendiosa em todos os cenários. Por fim, e como referido anteriormente, o algoritmo FABA mostrou um rácio de utilidade mais elevado para ambas as simulações que a abordagem em duas fases de decisão, mostrando ser a solução mais eficiente.

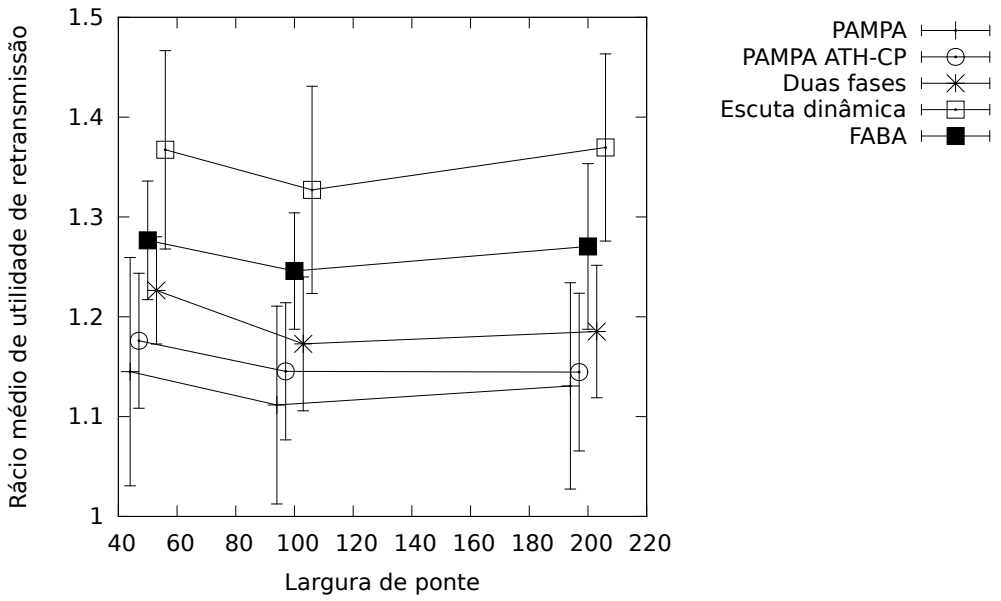

Figura 5.14: Rácio de utilidade de retransmissão nos cenários de topologia “U”.

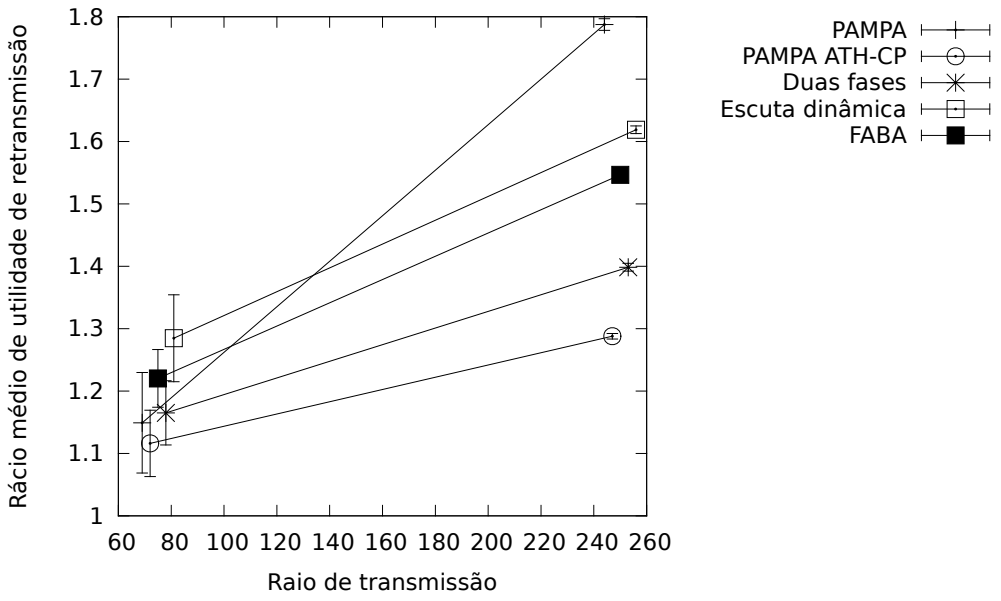

Figura 5.15: Rácio de utilidade de retransmissão nos cenários de distribuição uniforme de nós.

Capítulo 6

Conclusão

Em redes não infraestruturadas, a difusão representa a base para a comunicação entre os participantes e para o desenvolvimento de aplicações de mais alto nível. No entanto, a difusão pode ser uma operação dispendiosa cujo custo pode ser reduzido. Têm sido propostos uma variedade de algoritmos que tentam reduzir este custo. A dissertação apresentou alguns cenários que sugerem que estes algoritmos têm negligenciado a importância da topologia de rede nos seus desempenhos. Perante topologias de rede não uniformes, onde os nós não estão uniformemente distribuídos, estes protocolos tendem a sofrer quebras de eficiência significativas. Nesta dissertação foi proposto um conjunto de abordagens que pudessem evitar a perda de eficiência em topologias de redes não uniformes, e que levaram à concretização de um algoritmo de difusão especificamente desenhado para operar em tais condições de propagação de mensagens. Apesar das limitações na informação disponível aos nós, este algoritmo tentar recolher o máximo de informação possível dos padrões de comunicação da rede para que possam ser tomadas melhores decisões de retransmissão.

6.1 Sumário dos resultados obtidos

As simulações realizadas confirmaram que as soluções propostas são capazes de aumentar as taxas de entrega através de um aumento moderado no número de retransmissões. De entre estas, a abordagem em duas fases de decisão apresentou-se como a solução mais dispendiosa, mas este custo foi suportado por um grande aumento na fiabilidade. Isto sugere que esta abordagem favorece as retransmissões que consigam trazer uma contribuição mais significativa para a propagação de mensagens na rede.

A abordagem em tempo de escuta dinâmico aposta na filosofia contrária. Baseando-se no atraso da decisão de retransmissão por parte de alguns nós para favorecer outros, esta abordagem consegue reduzir o número de retransmissões desnecessárias, como comprova o seu rácio de utilidade de retransmissão estudado no capítulo anterior. Apresentando-se como a solução menos dispendiosa, esta não consegue, no entanto, obter taxas de

entrega tão elevadas quanto as do algoritmo anterior. De qualquer forma, a abordagem tempo de escuta dinâmico consegue ainda assim aumentar em 10% as taxas de entrega quando comparada com o algoritmo PAMPA, considerado como o algoritmo de referência por ser o único dos estudados no trabalho relacionado que conjuga uma atenuação da aleatoriedade no processo de decisão dos nós com o uso de alguma informação sobre a rede para a tomada de decisão de retransmissão dos nós. Deste modo, esta é a solução que melhor consegue cumprir com o objetivo de tornar as decisões de retransmissão o mais eficazes possível para que o seu desempenho não seja penalizado em topologias de redes não uniformes.

Entre estes dois extremos em termos de custo de operação surge a nossa proposta de algoritmo final, o algoritmo FABA. Surgindo como uma solução equilibrada, este algoritmo consegue atingir uma fiabilidade próxima da obtida pela abordagem em duas fases de decisão (que obteve o melhor desempenho de todos os algoritmos), enquanto o número de retransmissões necessárias para a sua execução permaneceu no entanto menor, devido à conjugação com a abordagem em tempo de escuta dinâmico.

6.2 Comentário crítico

Embora o desenvolvimento de algoritmos de difusão para redes não infraestruturadas seja uma área já amplamente debatida e alvo de diferentes propostas ao longo dos últimos anos, consideramos que a solução proposta nesta dissertação vem preencher uma lacuna até agora pouco estudada. O algoritmo desenvolvido permite assegurar um melhor desempenho de difusão em condições de propagação mais adversas, abrindo assim os cenários de aplicabilidade de redes não infraestruturas a um conjunto mais vasto de situações reais.

Este não consegue no entanto resolver inequivocamente o problema da difusão em topologias de redes não uniformes, tendo ficado alguns aspetos como uma taxa de cobertura total reduzida ainda por resolver para que esta possa ser a verdadeira solução para o problema colocado. Por outro lado, talvez a utilização de uma gama mais alargada de cenários e de casos de teste por cada cenário pudesse ter contribuído para a descoberta de uma solução ainda mais eficaz.

6.3 Trabalho futuro

Um dos aspetos que é sucessivamente apontado como um problema no estudo de algoritmos de difusão para redes não infraestruturadas é que estes são apenas simulados e testados em programas simuladores. Ora, em redes reais, a propagação de mensagens está sujeita a um conjunto de situações não trivialmente simuláveis em software como falhas causadas pela convergência de mensagens num mesmo nó, erros nos pacotes pela transmissão de outros, obstáculos na rede, ou alterações na propagação de sinal. Neste

sentido, de modo a poder verificar o verdadeiro ganho de desempenho do algoritmo proposto e a sua aplicabilidade em cenários reais, um possível passo para a continuação deste trabalho seria testar a solução apresentada numa rede real e expandir o leque de topologias não uniformes utilizadas.

Por outro lado, embora o algoritmo tenha permitido um aumento substancial na taxa de entrega com uma média acima de 90% dos nós a conseguirem receber as mensagens, as taxas de cobertura total não conseguiram ir além de um valor a rondar os 50%. Tal indica que as mensagens conseguem atingir a grande maioria dos participantes mas não a sua totalidade, ficando uma minoria de nós sem receber as mensagens. Uma solução possível para combater esta limitação poderia consistir em adicionar ao algoritmo um mecanismo de segurança baseado na abordagem puramente probabilista identificada em GOSSIP1 [5]. Através da atribuição de uma probabilidade baixa de modo a não prejudicar em demasia a taxa de retransmissão do algoritmo, esta solução poderia contribuir para aumentar as taxas de cobertura total, ao permitir que mais alguns nós da rede pudessem retransmitir e assim aumentar as hipóteses das mensagens conseguirem atingir a dezena de nós ignorados. No entanto, esta medida seria apenas uma medida de recurso, sendo necessário um estudo mais aprofundado sobre as causas e as possíveis solução para esta discrepância entre taxas de entrega e taxas de cobertura total.

Bibliografia

[1] H. AlHazza. Enhancing dynamic probabilistic broadcasting flooding scheme in manets. In *Proceedings of the IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering (CHUSER)*, pages 106 –110, December 2011.

[2] Carl Ellis, Hugo Miranda, and François Taïani. Count on me: lightweight ad-hoc broadcasting in heterogeneous topologies. In *Proceedings of the International Workshop on Middleware for Pervasive Mobile and Embedded Computing (M-PAC '09)*, pages 1–6, New York, NY, USA, November 30 2009. ACM.

[3] Benoît Garbinato, Adrian Holzer, and François Vessaz. Six-shot broadcast: A context-aware algorithm for efficient message diffusion in manets. In *Proceedings of the OTM 2008 Confederated International Conferences, CoopIS, DOA, GADA, IS, and ODBASE 2008. Part I on On the Move to Meaningful Internet Systems*, OTM '08, pages 625–638, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.

[4] Benoît Garbinato, Adrian Holzer, and François Vessaz. Context-aware broadcasting approaches in mobile ad hoc networks. *Computer Networks*, 54(7):1210–1228, 2010.

[5] Zygmunt J. Haas, Joseph Y. Halpern, and Li Li. Gossip-based ad hoc routing. In *Proceedings of the Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, volume 3, pages 1707–1716. IEEE, June 23–27 2002.

[6] Qing Huang, Yong Bai, and Lan Chen. Efficient lightweight broadcasting protocols for multi-hop ad hoc networks. In *Proceedings of the 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06)*, Helsinki, Finland, September 11–14 2006. University of Oulu, IEEE.

[7] M.B. Khalaf, A.Y. Al-Dubai, and W. Buchanan. A new adaptive broadcasting approach for mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 6th Conference on Wireless Advanced (WiAD)*, pages 1 –6, June 2010.

[8] Pradeep Kyasanur, Romit Roy Choudhury, and Indranil Gupta. Smart gossip: An adaptive gossip-based broadcasting service for sensor networks. In *Proceedings of*

the IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), pages 91–100, October 2006.

[9] Diogo Lima, Hugo Miranda. Flow-aware broadcasting algorithm. In *The 11th IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications (IUCC-2012)*, pages Artigo aceite, a aguardar publicação.

[10] M. Masadeh, S.F. Nimer, and A.Y. Al-Dubai. The effects of network density of a new counter-based broadcasting scheme in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Computer and Information Technology (CIT)*, pages 1462 –1467, July 2010.

[11] Hugo Miranda, Simone Leggio, Luís Rodrigues, and Kimmo Raatikainen. A power-aware broadcasting algorithm. In *Proceedings of The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06)*, Helsinki, Finland, September 11–14 2006. University of Oulu.

[12] Patricia Ruiz and Pascal Bouvry. Enhanced distance based broadcasting protocol with reduced energy consumption. In *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing and Simulation (HPCS)*, pages 249 –258, July 2010.

[13] Yu-Chee Tseng, Sze-Yao Ni, Yuh-Shyan Chen, and Jang-Ping Sheu. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *Wireless Networks*, 8(2/3):153–167, 2002.

[14] Christopher Winstanley. A smarter pampa? a real-life deployment to investigate pampa and smart gossip. a aguardar publicação.

[15] M.B. Yassein, A. Al-Dubai, M.O. Khaoua, and O.M. Al-jarrah. New adaptive counter based broadcast using neighborhood information in manets. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Parallel Distributed Processing (IPDPS)*, pages 1 –7, May 2009.