



Um estudo sobre a variação de métricas e cenários na otimização do protocolo de roteamento AODV em RSSF por meio de algoritmos multiobjetivo

Trabalho de Conclusão de Curso

Engenharia da Computação

Maria Gabriely Lima da Silva
Orientador: Prof. Sergio Campello Oliveira



**Universidade de Pernambuco
Escola Politécnica de Pernambuco
Graduação em Engenharia de Computação**

Maria Gabriely Lima da Silva

**Um estudo sobre a variação de
métricas e cenários na otimização do
protocolo de roteamento AODV em
RSSF por meio de algoritmos
multiobjetivo**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Computação pela Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco.

Recife, Maio de 2021.

Silva, Maria Gabriely Lima da

Um estudo sobre a variação de métricas e cenários na otimização do protocolo de roteamento AODV em RSSF por meio de algoritmos multiobjetivo / Maria Gabriely Lima da Silva. - Recife - PE, 2021.

xiii, 40 f. : il. ; 29 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2021

Orientador: Profº. Drº. Sergio Campello Oliveira.

Inclui referências

1. MANETs. 2. AODV. 3. Otimização multiobjetivo. I. Título. II. Oliveira, Sergio Campello. III. Universidade de Pernambuco.

MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

Avaliação Final (para o presidente da banca)*

No dia 11/5/2021, às 09h00min, reuniu-se para deliberar sobre a defesa da monografia de conclusão de curso do(a) discente **MARIA GABRIELY LIMA DA SILVA**, orientado(a) pelo(a) professor(a) **SÉRGIO CAMPELLO OLIVEIRA**, sob título Um estudo sobre a variação de métricas e cenários na otimização do protocolo de roteamento AODV em RSSF por meio de algoritmos multiobjetivo, a banca composta pelos professores:

CARMELO JOSE ALBANEZ BASTOS FILHO (PRESIDENTE)
SÉRGIO CAMPELLO OLIVEIRA (ORIENTADOR)

Após a apresentação da monografia e discussão entre os membros da Banca, a mesma foi considerada:

Aprovada Aprovada com Restrições* Reprovada

e foi-lhe atribuída nota: 10,0 (Dez)

*(Obrigatório o preenchimento do campo abaixo com comentários para o autor)

O(A) discente terá 07 dias para entrega da versão final da monografia a contar da data deste documento.


AVALIADOR 1: Prof (a) **CARMELO JOSE ALBANEZ BASTOS FILHO**


AVALIADOR 2: Prof (a) **SÉRGIO CAMPELLO OLIVEIRA**

AVALIADOR 3: Prof (a)

* Este documento deverá ser encadernado juntamente com a monografia em versão final.

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso à meus pais, que sempre acreditaram em mim e investiram na minha educação.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente, a Deus por ter me permitido chegar até aqui. Também agradeço ao meu orientador Sergio Campello por ter aceitado me orientar e por todo aprendizado valioso adquirido em disciplinas e outros projetos. Agradeço à minha família por todo apoio e paciência em todos os momentos. E a meus amigos da POLI Adonias Luna, Aryell Dias, Aldo Monteiro, Emerson Carneiro e Gabriel Oliveira por toda ajuda, apoio e companheirismo nesta incrível jornada.

Autorização de publicação de PFC

Eu, **Maria Gabriely Lima Da Silva** autor(a) do projeto de final de curso intitulado: **Um estudo sobre a variação de métricas e cenários na otimização do protocolo de roteamento AODV em RSSF por meio de algoritmos multiobjetivo**; autorizo a publicação de seu conteúdo na internet nos portais da Escola Politécnica de Pernambuco e Universidade de Pernambuco.

O conteúdo do projeto de final de curso é de responsabilidade do autor.

Maria Gabriely Lima da Silva

Maria Gabriely Lima Da Silva

Sergio Campello Oliveira

Orientador(a): **Sergio Campello Oliveira**

Coorientador(a):

Daniel Augusto Ribeiro Chaves

Prof, de TCC: **Daniel Augusto Ribeiro Chaves**

Data: 11/5/2021

Resumo

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) têm atraído considerável atenção devido a seu enorme potencial em diversos campos de aplicação, sendo esta uma tecnologia de baixo custo de monitoramento e controle. As redes ad hoc são exemplos de RSSF caracterizadas por não necessitarem de uma infraestrutura fixa, sendo formada por dispositivos estáticos ou móveis. Dentre as redes ad hoc com dispositivos móveis, um bom exemplo é a *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs). Devido a mobilidade dos dispositivos, a topologia das MANETs está em constante mudança. Estes dispositivos, também chamados de nós, podem se desviar de sua rota e acabar perdendo conectividade com a rede. Além disso, essas redes possuem uma fonte limitada de energia e a mobilidade dos nós faz com que essa energia se exaure mais rapidamente. Dessa forma, os protocolos de roteamento devem ser capazes de realizar o roteamento de forma eficiente, mesmo diante das frequentes mudanças na topologia da rede. Um protocolo de roteamento bastante utilizado em MANETs é o *Ad Hoc On Demand Vector Routing* (AODV), este protocolo possui mecanismos de reparo de rota que dependem da comunicação entre o nó que enviou o pacote e o nó anterior ao ponto de quebra (nó predecessor), e da comunicação entre o nó predecessor e o nó de destino dos pacotes de roteamento. Este trabalho traz a modelagem de uma rede MANET com o protocolo AODV padrão e AODV com algoritmos multiobjetivo, tendo como objetivo analisar o desempenho da rede em relação às métricas de redes de sensores sem fio *first node died* (FND), *half of nodes died* (HND), *last node died* (LND) e perda de conectividade do nó destino dos pacotes de transmissão. Essas métricas trazem a quantidade de pacotes de transmissão enviados até determinados nós perderem sua energia. Os resultados obtidos mostraram que o protocolo de roteamento com algoritmos multiobjetivo conseguiu melhores resultados que o protocolo AODV padrão, conseguindo maximizar o envio de pacotes até que determinada quantidade de nós da rede perdessem completamente sua energia.

Palavras-chave: MANETs; AODV; Otimização multiobjetivo.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) have attracted a considerable amount of attention due to their enormous potential in various fields, being a low-cost technology for monitoring and control. Ad hoc networks are examples of WSN characterized by not requiring a fixed infrastructure, being formed by static or mobile devices. Among the ad hoc networks with mobile devices, a good example is the Mobile Ad Hoc Networks (MANETs). Due to the mobility of the devices, the MANETs topology is constantly changing. These devices, also called nodes, can deviate from their route and end up losing connectivity to the network. In addition, these networks have a limited power supply, and the mobility of the nodes causes this power to be exhausted more quickly. Therefore, routing protocols must be able to perform routing efficiently, even in the face of frequent changes in network topology. One routing protocol widely used for MANETs is Ad Hoc On Demand Vector Routing (AODV), this protocol has route repairing mechanisms that depend on the communication between the node that sent the packet and the node prior to the breakpoint (predecessor node), and on the communication between the predecessor node and the routing packets destination node. This paper brings the modeling of a MANET network with the standard AODV protocol and AODV with multi-objective algorithms, aiming to analyze the network performance in relation to the metrics of wireless sensor networks first node died (FND), half of nodes died (HND), last node died (LND) and connectivity loss of the destination node of the transmission packets. These metrics bring the transmission sent packets amount until certain nodes lose their power. The results obtained showed that the routing protocol with multi-objective algorithms achieved better results than the standard AODV protocol, managing to maximize the packets delivery until a certain amount of nodes in the network completely lost their energy.

Keywords: MANETs; AODV; Multiobjective optimization.

Índice de Figuras

Figura 1: Configuração de rede MANET onde os nós vermelhos representam os nós fonte e alvo, o nó azul com X vermelho representa a quebra da rota e o marrom representa o nó predecessor a esta quebra.	5
Figura 2: Configuração de MANET com um reparo local, onde o nó verde representa a conexão que foi adicionada para reparar a rota.	6
Figura 3. Exemplo de Frente de Pareto (adaptada de [12]).	7
Figura 4. Representação gráfica do funcionamento do NSGA-II [11].	8
Figura 5. Exemplo de configuração de MANET (adaptado de [5]).	12
Figura 6 Exemplo de configuração de MANET depois da quebra de rota (adaptado de [5]).	13
Figura 7. Quantidade de pacotes enviados por quantidade de nós mortos no AODV Padrão e AODV+SMPSO.	19
Figura 8. Quantidade de pacotes enviados por quantidade de nós mortos no AODV Padrão e AODV+NSGAI.	19
Figura 9. Quantidade de nós mortos ao longo da simulação entre AODV Padrão e AODV+SMPSO.	20
Figura 10. Quantidade de nós mortos ao longo da simulação entre AODV Padrão e AODV+NSGAI.	21
Figura 11. Comparação da energia consumida ao longo da simulação entre AODV padrão e AODV+SMPSO.	22
Figura 12. Comparação da energia consumida ao longo da simulação entre AODV padrão e AODV+NSGAI.	22

Índice de Tabelas

Tabela 1. Valores ótimos de A, B, C e D encontrados por C. Santana [5].	13
Tabela 2. Resultados obtidos pelo AODV Padrão e AODV com algoritmos multiobjetivo.	14
Tabela 3. Configuração dos algoritmos multiobjetivo NSGAI e SMPSO.	17
Tabela 4. Quantidade de pacotes enviados nas métricas FND, HND, LSN e Perda de conectividade com o <i>sink node</i> (PCSN).	18

Índice de Siglas

AODV – *Ad hoc on Demand Vector Routing*

FND – *First node died*

HND – *Half of nodes died*

LND – *Last node died*

MANETs – *Mobile Ad Hoc Networks*

NS2 – *Network Simulator 2*

NSGA-II – *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*

PCSN – *Perda de conectividade com o sink node*

RERR – *Route Error packet*

RREP – *Route Reply packet*

RREQ – *Route Request packet*

RSSF – *Redes de Sensores sem fio*

SPEA – *Strength Pareto Evolutionary Algorithm*

SMPSO – *Speed-constrained Multiobjective PSO*

Sumário

Introdução	1
Otimização aplicada a redes de sensores sem fio	3
Mobile Ad Hoc Networks	3
Protocolos de roteamento para MANETs	4
Ad Hoc On-Demand Distance Vector	4
Otimização Multiobjetivo	6
Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	7
Speed-constrained Multiobjective PSO	9
AODV com conectividade e multiobjetivo	11
Proposta e Resultados	15
Conclusão e Trabalhos Futuros	23
Trabalhos futuros	24
Referências	25

Capítulo 1

Introdução

O interesse nas redes de sensores sem fio (RSSF) cresceu consideravelmente nos últimos anos. Parte desse crescimento deve-se à popularização de tecnologias como Internet das coisas [4], onde conectividade, sensibilidade, interação e energia são elementos dos sistemas de uma RSSF [1]. Dentre os sistemas de comunicação sem fio, as redes ad hoc são caracterizadas por não necessitarem de infraestrutura fixa, os nós da rede podendo ser estáticos ou móveis, são conectados de forma arbitrária.

Um exemplo de rede ad hoc é a *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs), esta rede é composta por nós móveis e a comunicação é realizada através de saltos entre os nós conectados. Por ser uma rede móvel a qualquer momento os nós podem se desviar de sua rota e perder conectividade com a rede. Além disso, o consumo de bateria é muito maior do que em uma rede com nós fixos, como possuem uma fonte limitada de energia, o consumo deve ser eficiente, para que a rede tenha longa vida útil [3]. Assim, o grande desafio a ser tratado pelos protocolos de roteamento dessas redes é fazer com que o processo de roteamento seja realizado de forma eficiente e precisa, mesmo diante de mudanças frequentes na topologia da rede.

Um protocolo MANET bastante utilizado é o protocolo reativo *Ad Hoc On Demand Vector Routing* (AODV). Este protocolo permite que os nós móveis respondam às quebras de conexão, a partir de mecanismos de reparo de rota, tendo como principal objetivo adaptar-se de forma rápida e dinâmica às mudanças de condições da rede [2].

O projeto desenvolvido por C. Santana [5] aprimorou o desempenho do protocolo AODV, tornando-o mais flexível conforme as necessidades enfrentadas pela rede, devido à perda de conectividade causada pela mobilidade dos nós. A solução proposta foi capaz de otimizar, a partir de algoritmos multiobjetivo bio-inspirados, o desempenho da rede em relação às métricas de comparação conflitantes predeterminadas.

Este trabalho visa implantar o protocolo proposto por C. Santana [5], modelando no protocolo a perda de conectividade causada pela falta de bateria nos nós. O desempenho da rede foi medido a partir das métricas de redes de sensores sem fio: first node died (FND), half of nodes died (HND), last node died (LND), perda de conectividade do nó destino dos pacotes de transmissão (*sink node*). Essas métricas servem para guiar o processo de otimização e geram resultados diferentes do que foi proposto por C. Santana [5].

Nas simulações realizadas os resultados obtidos demonstraram que o protocolo AODV adaptado com algoritmos multiobjetivo conseguiu maximizar o envio de pacotes em todas as métricas de redes de sensores que foram implementadas.

A estrutura deste trabalho está dividida em 4 capítulos. Sendo eles, o Capítulo 2 que descreve a fundamentação teórica e trabalho relacionado necessários para uma melhor compreensão deste trabalho, descrevendo tópicos relacionados às redes ad hoc móveis, protocolos de roteamento para MANETs e otimização multiobjetivo. O Capítulo 3 traz a metodologia proposta e os resultados e, por fim, o Capítulo 4 que traz as considerações finais e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Otimização aplicada a redes de sensores sem fio

Este capítulo traz a fundamentação teórica e trabalho relacionado necessários para uma melhor compreensão deste trabalho.

2.1 Mobile Ad Hoc Networks

Redes ad hoc sem fio são um conjunto de dois ou mais dispositivos (nós) com capacidade de se comunicar sem ajuda de uma infraestrutura pré-instalada. A comunicação e troca de informações da rede são realizadas através de saltos entre os nós conectados e essa conectividade pode variar com o tempo devido à mobilidade, saída e chegada dos nós na rede, assim, a topologia dessas redes é muito mais dinâmica e as mudanças são frequentemente imprevisíveis em comparação com as redes de natureza fixa existentes.

A energia utilizada pelos dispositivos móveis da rede é um recurso limitado, em que os nós obtêm sua energia de baterias, e dessa forma o consumo deve ser eficiente, para que a rede tenha uma longa vida útil.

A natureza dinâmica das redes MANETs, as mudanças rápidas e imprevisíveis na topologia, energia limitada da bateria e mobilidade dos nós levantam muitos desafios para projetar um protocolo de roteamento. Assim, uma série de desenvolvimentos recentes se concentram em fornecer uma solução ideal para protocolos de roteamento eficientes. No entanto, a maioria dessas soluções atinge um objetivo específico (por exemplo, minimizar o atraso na transmissão), enquanto compromete outros fatores (por exemplo, escalabilidade e confiabilidade da rota) [6]. Portanto, um protocolo de roteamento ideal que consiga lidar com o comportamento rigoroso do meio sem fio móvel, é sempre desejável [6].

As redes MANETs possuem diversas vantagens, incluindo facilidade e velocidade de implantação e menor dependência de uma infraestrutura fixa. Se

tornando assim, muito atraente por fornecer uma formação de rede instantânea sem a presença de estações base fixas e administração do sistema.

2.2 Protocolos de roteamento para MANETs

Os protocolos de roteamento MANETs podem ser classificados nas seguintes categorias: pró-ativos, reativos e híbridos. Nos protocolos pró-ativos, cada nó da rede possui uma ou mais tabelas que demonstram a estrutura completa da topologia, as informações dessas tabelas são atualizadas frequentemente conforme o status da rede muda. Devido a esta frequente atualização de informações o custo associado ao monitoramento será maior [7][9].

Já os protocolos reativos são caracterizados por um comportamento sob demanda, ou seja, sempre que um nó precisa enviar dados a um destino, o mecanismo de geração de rota criará uma rota com base na situação atual da rede, não existindo a necessidade de os nós manterem essas informações de roteamento [9]. Como a atualização das informações é menos frequente nesta categoria de protocolo, conseqüentemente o custo será menor pela redução do monitoramento.

Por fim, os protocolos híbridos são uma mistura das abordagens pró-ativa e reativa, onde a rede é dividida em grupos e cada grupo pode funcionar de maneira pró-ativa ou reativa [8].

2.2.1 *Ad Hoc On-Demand Distance Vector*

O AODV é um protocolo de roteamento reativo em que a rota é estabelecida apenas quando é exigida por um nó de origem para a transmissão de pacotes de dados. Ao exigir uma rota, um nó transmite para a rede um pacote de solicitação de rota (RREQ). A partir do caminho que este pacote percorre na rede, é iniciada a criação de uma tabela temporária com as informações para o caminho reverso do pacote. Ao atingir o nó destino, um pacote de resposta de rota (RREP) é enviado de volta pelo mesmo caminho que o pacote RREQ foi transmitido. Quando um caminho é interrompido entre os nós, o nó predecessor à quebra inicia o envio de pacotes de erro de rota (RERR) por toda rede para informar sobre a quebra de conectividade.

Além disso, este protocolo permite que os nós respondam a essas quebras de conexão a partir de mecanismos de reparo de rota, tendo como principal objetivo adaptar-se de forma rápida e dinâmica às mudanças de condições da rede [2]. São dois os mecanismos de reparo da rota: reparo local e reparo pela fonte.

No reparo pela fonte, o nó predecessor envia os pacotes RERR pela rede para que todos os nós que utilizem o nó que foi quebrado recebam a informação que esta rota está inacessível. Assim, esses nós atualizam suas tabelas temporárias e enviam os pacotes RREQ solicitando uma nova rota até o destino. Já no reparo local, o nó predecessor tenta encontrar uma rota até o destino enviando pacotes RREQ, caso consiga a rota é reparada. A escolha do mecanismo de reparo está relacionada ao número de saltos entre o nó predecessor e a fonte, e entre o nó predecessor e o alvo. Caso o número de saltos entre o nó predecessor e a fonte seja maior que o número de saltos entre o nó predecessor e o alvo, então é realizado um reparo local, caso contrário, é realizado um reparo de fonte.

Na Figura 1, o nó marcado com um X vermelho representa um nó com energia exaurida, tornando a rota utilizada um caminho inacessível. Nesta situação o nó predecessor decidirá se irá realizar um reparo local ou um reparo pela fonte.

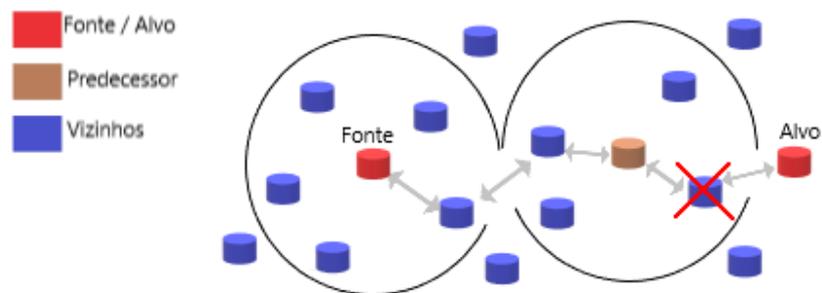


Figura 1: Configuração de rede MANET onde os nós vermelhos representam os nós fonte e alvo, o nó azul com X vermelho representa a quebra da rota e o marrom representa o nó predecessor a esta quebra.

Como o número de saltos entre o nó predecessor e o nó fonte é três, e o número de saltos entre o nó predecessor e o alvo é igual a um, um reparo local será escolhido. A Figura 2 mostra a rede com o reparo local realizado, onde foi

se dominam. Assim, o conjunto de Pareto ótimo é o conjunto das soluções não dominadas encontradas, e a representação dessas soluções é chamada de frente de Pareto.

A Figura 3 mostra um exemplo da frente de Pareto, nela as soluções em vermelho são dominadas e as verdes são as não dominadas. A solução C, por exemplo, é dominada pelas soluções A e B, enquanto A e B são incomparáveis entre si, pois não se dominam.

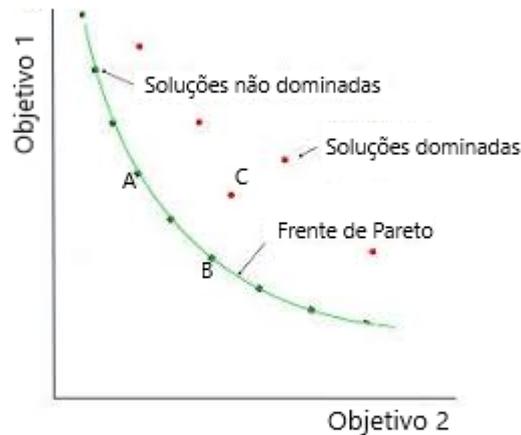


Figura 3: Exemplo de Frente de Pareto (adaptada de [12]).

2.3.1 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

O *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II) é um algoritmo evolucionário multiobjetivo que visa definir as fronteiras de Pareto a partir de dois procedimentos de ordenação: a ordenação da população em um ranking por não-dominância (*Fast Non-dominated Sorting Algorithm*) e a ordenação individual pela distância de multidão (*Crowding Distance Sorting*), realizando a busca por soluções bem distribuídas no espaço [10]. Como entrada o algoritmo recebe o tamanho da população, o número de gerações e as funções que serão otimizadas. Os indivíduos são ordenados com base em seu rank, e a geração da população filha é realizada a partir de cruzamento e mutação [11].

A cada geração do algoritmo, os indivíduos das populações pais e filhos são ordenados em um ranking de acordo com a dominância entre as soluções, definindo várias fronteiras. A primeira fronteira possui as soluções não dominadas de toda

população, a segunda fronteira possui as soluções não dominadas desconsiderando as soluções da primeira fronteira e assim por diante. Após a definição das fronteiras, é realizado um ordenamento pela distância de multidão em cada fronteira, que tem como objetivo assegurar a diversidade das soluções. Esse método calcula a distância entre as soluções vizinhas em uma mesma fronteira, estabelecendo uma ordem decrescente que privilegia as soluções mais espalhadas no espaço de busca.

Os dois procedimentos de ordenação têm como finalidade determinar quais indivíduos vão sobreviver para a próxima geração. O funcionamento do NSGA-II é representado na Figura 4, as populações pais e filhos são representadas por P_1 e Q_1 , respectivamente. Após a ordenação pela dominância as fronteiras F_1, F_2, \dots, F_n são determinadas. Por fim, após a ordenação pela distância a população P_{t+1} , soluções que serão utilizadas na próxima geração, é definida. E, dessa forma, o NSGA-II consegue gerar um conjunto de soluções espalhadas por todo o espaço de busca, formando a frente de Pareto.

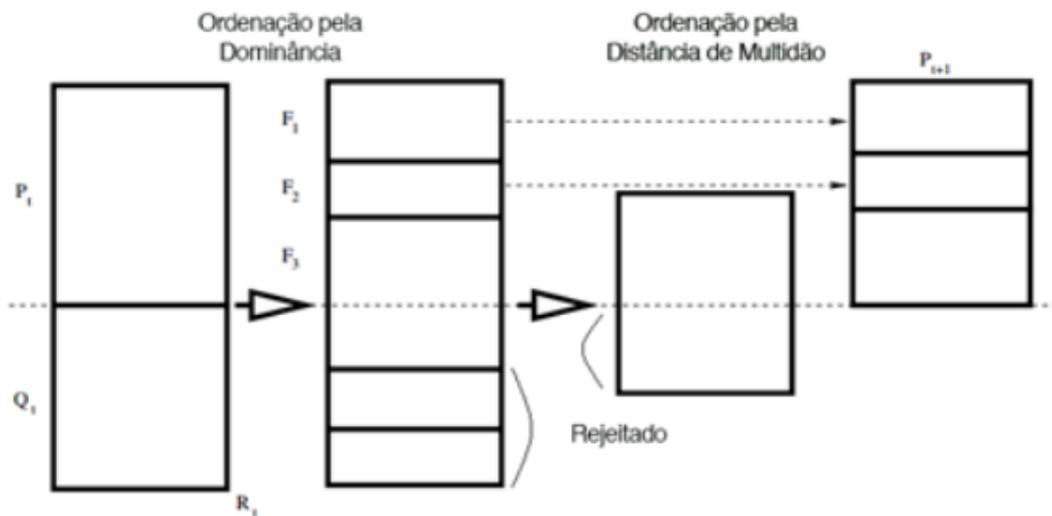


Figura 4: Representação gráfica do funcionamento do NSGA-II [11].

O Algoritmo 1 apresenta as etapas para realizar o NSGAI.

Algorithm 1: Pseudocódigo NSGA-II

Inicializar a posição de todas as partículas aleatoriamente usando uma distribuição uniforme;
 Inicializar a velocidade das partículas;
 Inicializar a melhor posição da partícula como o valor da posição inicial;
 Calcular o fitness de todo o enxame;
 Calcular as fronteiras F_k e realizar a ordenação pela distância de multidão;
 Atribuir a posição da partícula com o melhor fitness;
while Critério de para não é alcançado **do**
 Selecione o cromossomo pai da população usando torneio binário;
 Aplique o crossover com os pais, formando uma nova população;
 Aplique a mutação a cada cromossomo;
 Avalie os novos indivíduos;
 Combine a população atual com os novos indivíduos;
 Calcule todos F_k e ordene pela distância de multidão;
 Gere um a nova população com metade dos melhores indivíduos;
end
Result: Melhor Pareto encontrado

2.3.2 Speed-constrained Multiobjective PSO

Um dos algoritmos de otimização bio-inspirados para problemas de objetivo único mais famosos é o *Particle Swarm Optimization* (PSO) [15]. Este algoritmo é uma técnica de busca baseada no comportamento de pássaros, sendo o comportamento classificado em social e individual. A busca pela solução ótima é iniciada de forma aleatória e desordenada, porém percebe-se uma organização ao longo do tempo e um padrão de busca é apresentado. No momento da localização do objetivo todas as partículas se dirigem para a localização deste.

Na literatura, existem diversos algoritmos baseados no PSO modificados para otimização multiobjetivo como, por exemplo, o *Speed-constrained Multiobjective PSO* (SMPSO). No PSO cada possível solução é chamada de partícula e o conjunto dessas partículas é chamado de enxame. A cada geração a posição das partículas são atualizadas a partir de

$$\vec{X}_{i+1} = \vec{X}_i + \vec{V}_{i+1} \quad (1)$$

Onde V_{i+1} é a velocidade atualizada da partícula, que é dado por

$$\vec{V}_{i+1} = \omega \vec{V}_i + c_1 r_1 (\vec{P}_{best} - \vec{X}_i) + c_2 r_2 (\vec{G}_{best} - \vec{X}_i) \quad (2)$$

V_i e X_i são a velocidade atual e posição atual da partícula respectivamente, P_{best} é a melhor solução local encontrada por X_i , G_{best} é a melhor solução global, ω é o fator de inércia, r_1 e r_2 são valores aleatórios entre 0 e 1, e C_1 e C_2 são parâmetros específicos que controlam o efeito das melhores partículas pessoais e globais. O tempo é considerado unitário.

O algoritmo SMPSO é baseado em uma versão do PSO com coeficiente de restrição para limitar a velocidade das partículas, e este coeficiente é dado por

$$\chi = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (3)$$

Onde,

$$\varphi = \begin{cases} C_1 + C_2 & \text{if } C_1 + C_2 > 4 \\ 1 & \text{if } C_1 + C_2 \leq 4 \end{cases} \quad (4)$$

Com esse coeficiente a fórmula da velocidade fica da seguinte forma

$$\vec{V}_{i+1} = \chi(\omega \vec{V}_i + c_1 r_1 (\vec{P}_{best} - \vec{X}_i) + c_2 r_2 (\vec{G}_{best} - \vec{X}_i)) \quad (5)$$

Após o cálculo da velocidade, o SMPSO limita a velocidade V_i de cada partícula i [16], a partir de

$$\vec{V}_i = \begin{cases} \delta, \text{ se } \vec{V}_i > \delta \\ -\delta, \text{ se } \vec{V}_i \leq -\delta \\ \vec{V}_i, \text{ caso contrario} \end{cases} \quad (6)$$

Onde delta é dado por

$$\delta = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \quad (7)$$

Um passo bastante importante neste algoritmo é a atualização dos líderes locais e global. A melhor solução local (P_{best}) é atualizada a partir da dominância de Pareto, comparando a solução atual com o P_{best} . Caso a solução atual seja não

dominada pela melhor solução local, então esta passa a ser o Pbest. Caso a solução atual seja dominada pelo Pbest, nada acontece e, por fim, caso elas sejam incomparáveis então a solução atual se torna o Pbest. Já o líder social (Gbest) é atualizado usando um arquivo externo que contém todas as soluções não dominadas encontradas. As soluções são comparadas entre si utilizando a técnica *crowding distance*, estabelecendo uma ordem decrescente que privilegia as soluções mais espalhadas no espaço de busca, a solução mais privilegiada é selecionada como o novo líder global. Ao final do algoritmo, é retornado o arquivo com as melhores soluções não dominadas encontradas.

O Algoritmo 2 apresenta as etapas para realizar o SMPSO.

Algorithm 2: Pseudocódigo SMPSO

```
Inicializar a posição de todas as partículas aleatoriamente usando uma distribuição uniforme;
Inicializar a velocidade das partículas;
Inicializar a melhor posição da partícula como o valor da posição inicial;
Calcular o fitness de todo o enxame;
Inicializar o arquivo com as soluções não-dominadas;
Atribuir a posição da partícula com o melhor fitness;
while Critério de para não é alcançado do
  for cada partícula do enxame do
    Atualize a velocidade da partícula de acordo com a Equação 5;
    Atualize a posição da partícula de acordo com a Equação 1;
    Aplique o operador de mutação/turbulência;
    Atualize o fitness da partícula;
    if  $f(x_i) < pbest_i$  then
      | Atualize a melhor posição conhecida pela partícula;
    end
    if  $f(x_p) < gbest$  then
      | Atualize a melhor posição conhecida pelo enxame;
    end
  end
end
Result: Arquivo com as melhores soluções não-dominadas
```

2.4 AODV com conectividade e multiobjetivo

Em 2018, C. Santana [5] propôs uma versão do AODV que modifica o mecanismo de decisão de reparo de rota, introduzindo o conceito de conectividade e quatro parâmetros denominados de A, B, C e D. O conceito de conectividade se refere à quantidade de nós vizinhos a um determinado nó, a utilização dessa

abordagem se justifica pela probabilidade de nós mais conectados conseguirem encontrar rotas viáveis mais rápido do que nós menos conectados.

Já os parâmetros A, B, C e D atuam como pesos para cada termo envolvido no mecanismo de decisão de reparo de rota. O parâmetro A representa o peso associado ao número de saltos entre o nó que enviará o pacote (fonte) e o nó predecessor, e o parâmetro B representa o peso associado à conectividade da fonte. De modo semelhante, o parâmetro C representa o peso associado ao número de saltos entre o nó predecessor e o destino, e o parâmetro D está associado à conectividade do nó predecessor.

Em seu trabalho, C. Santana modelou a rede MANET com 30 conexões, conectando cada nó fonte a um nó alvo, ou seja, esta rede possui mais de um nó destino. A Figura 5 exemplifica uma configuração de uma rede MANET. Nela o nó fonte e o nó destino são representados na cor vermelha, o nó predecessor na cor marrom, os outros nós da rede na cor azul e uma rota entre a fonte e alvo representada pelas setas. A conectividade dos nós é determinada pela quantidade de nós dentro de seu raio de alcance pré-determinado, assim neste exemplo a fonte possui uma conectividade de 5 e o nó predecessor uma conectividade de 4. O número de saltos entre a fonte e o nó predecessor é 3 e o número de saltos entre o nó predecessor e o nó alvo é 2.

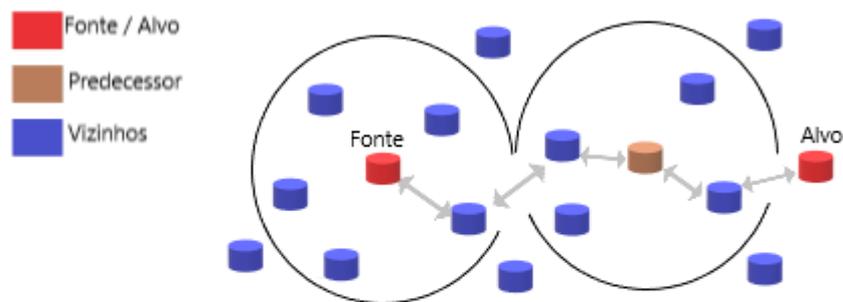


Figura 5: Exemplo de configuração de MANET (adaptado de [5]).

Na Figura 6 é possível ver que um nó entre o predecessor e o alvo perdeu a conectividade quebrando a rota. Assim como no protocolo padrão AODV, o nó predecessor decidirá se fará um reparo local ou da fonte, porém considerando, além do número de saltos, a conectividade e os quatro pesos associados a cada termo do mecanismo de decisão de reparo de rota.

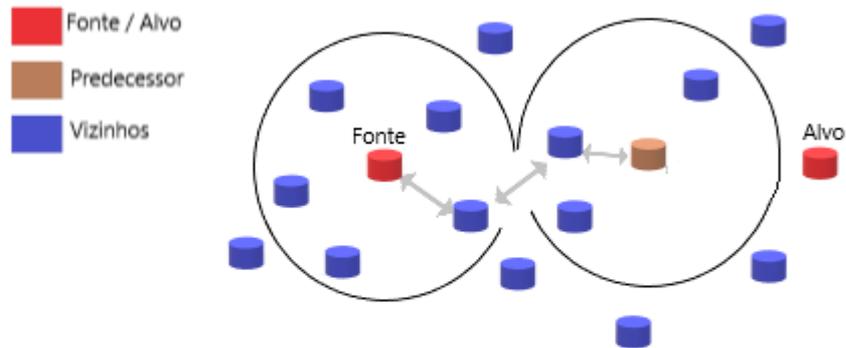


Figura 6: Exemplo de configuração de MANET depois da quebra de rota (adaptado de [5]).

Os melhores valores para os parâmetros A, B, C e D são encontrados a partir de um otimizador. Em seu trabalho, C. Santana [5] utilizou otimizadores multiobjetivo bioinspirados, pois permite encontrar os melhores valores dos parâmetros que otimizam o desempenho da rede em mais de uma métrica conflitante. Os algoritmos multiobjetivo utilizados foram o SMPSO, SPEA2 e NSGA-II. A Tabela 1 mostra os valores ótimos encontrados pelos algoritmos multiobjetivo para cada um dos parâmetros. Os valores encontrados demonstram que os 3 algoritmos implementados encontraram a mesma melhor solução para cada um dos quatro parâmetros. Além disso, os pesos relacionados à conectividade possuem valores menores ou igual ao termo relacionado ao número de saltos, indicando que a conectividade não tem a importância esperada.

Tabela 1: Valores ótimos de A, B, C e D encontrados por C. Santana [5].

Algoritmo	A	B	C	D
NSGA-II	0,3782	-0,5895	-0,1362	-0,1362

SMPSO	0,3782	-0,5895	-0,1362	-0,1362
SPEA2	0,3782	-0,5895	-0,1362	-0,1362

As métricas utilizadas para avaliar o desempenho do protocolo foram:

- Atraso médio da rota (Delay): razão entre o tempo médio que leva para os pacotes de dados chegarem ao nó de destino e o número de conexões ativas na rede.
- Taxa de perda de pacotes (PLR): mede a quantidade de pacotes de dados que não foram entregues ao destino.
- Consumo de energia (EC): mede a energia média gasta pela rede do início ao final da simulação.
- Carga de rota normalizada (NRL): razão entre o número de pacotes de roteamento e o número de pacotes de dados.

A Tabela 2 traz a comparação dos resultados das métricas no AODV Padrão e AODV com algoritmos multiobjetivo. Mostrando que o AODV com algoritmos multiobjetivo se mostrou mais eficiente que o AODV para todas as métricas analisadas.

Tabela 2: Resultados obtidos pelo AODV Padrão e AODV com algoritmos multiobjetivo.

Algoritmo	NRL	Delay	PLR	EC
AODV	6,7417	2,9684	0,4962	1,9801
AODV+NSGA-II	3,5185	1,4720	0,3001	1,9653
AODV+SMPSO	3,1211	1,2889	0,2667	1,9630
AODV+SPEA2	2,2500	0,8633	0,2058	1,9660

Capítulo 3

Proposta e Resultados

Neste trabalho, foi utilizada a versão do AODV desenvolvida por C. Santana [5], nesta versão é utilizado o conceito de conectividade por distância e os parâmetros A, B, C e D que atuam como pesos para cada termo envolvido no mecanismo de decisão de reparo de rota. O protocolo passou a modelar a perda de conectividade causada também pela falta de bateria nos nós. A queda de carga na bateria acontece devido ao envio e recebimento de pacotes e pela mobilidade dos nós da rede. Assim, para o decaimento da energia foi utilizado os seguintes parâmetros: $rPower=0.4$, $sPower=0.9$ e $mPower=0.6$, que representam respectivamente o peso associado a energia gasta ao receber pacotes, o peso associado a energia gasta ao enviar pacotes e o peso associado a energia gasta devido à movimentação. Cada nó da rede possui um máximo de energia, caso o nó envie um pacote então sua energia será subtraída de um determinado valor multiplicado pelo peso $sPower$, e assim respectivamente para os demais fatores de decaimento.

Para medir o desempenho do protocolo na rede MANET, ao invés de utilizar as métricas Delay, EC, PLR e NRL, foi utilizado as seguintes métricas de redes de sensores sem fio:

- FND: quantidade de pacotes de transmissão enviados até o primeiro nó da rede esgotar sua energia [1].
- HND: quantidade de pacotes de transmissão enviados até metade dos nós da rede esgotarem sua energia [1].
- LND: quantidade de pacotes de transmissão enviados até o último nó esgotar sua energia [1], sem considerar o sink node.

- Perda de conectividade com o *sink node*: quantidade de pacotes de transmissão enviados até todos os nós vizinhos ao *sink node* esgotarem sua energia [1].

A vida útil da rede é definida como a rodada em que a energia dos nós é exaurida. A partir das métricas de redes de sensores, é possível saber se o protocolo de roteamento conseguiu balancear bem a energia, ou seja, maximizando o envio de pacotes e minimizando o consumo de energia. A métrica FND informa a perda de um único nó da rede, porém isso representa o momento exato em que a rede começou a perder sua eficiência. A partir dessa métrica podemos determinar se uma rota estava sendo privilegiada, acarretando na sobrecarga e morte de um determinado nó. Além disso, caso este primeiro nó demore muito a morrer, pode significar que a rede estava balanceada, e a partir desse momento os nós começarão a morrer mais rápido.

Em relação a métrica HND, caso esta ocorra muito longe da FND, significa que uma rota estava sendo privilegiada e sobrecarregou um determinado nó, caso não seja muito distante da FND significa um bom balanceamento da energia e com isso uma melhora da rede como um todo. A métrica LND representa o momento em que a rede perde sua energia por completo, sem considerar o *sink node*. Dessa forma, a perda de conectividade com o *sink node* pode ocorrer antes da métrica LND, isso significa que existem pacotes que estão sendo enviados, porém não chegam ao seu destino final pois este já não possui conectividade com a rede.

A plataforma utilizada para simular a rede foi a *Network Simulator 2 (NS2)* [17], por ser uma ferramenta robusta e que permite a implementação de diversos protocolos de roteamento para MANETs. Neste projeto a rede foi modelada com 60 nós em uma área de 1500 por 300 metros, porém introduzindo à rede o *sink node*, sendo este o único nó destino de todos os pacotes, diferente da rede modelada por C. Santana que possuía vários nós destinos. Além disso, foi definido um total de 30 conexões entre os nós, onde para cada nó fonte existe um nó destino, sendo este o *sink node*. Também é necessário determinar as posições dos nós na rede, onde a

posição do *sink node* foi definida como sendo $x = 900$ e $y = 150$, por ser uma posição central com alta conectividade para receber os pacotes, enquanto os outros nós foram distribuídos de maneira esparsa no tamanho de área determinada.

O *sink node*, assim como os outros nós, possui bateria, existindo a possibilidade dele morrer antes dos outros nós e a rede parar de funcionar. Para evitar isso, o *sink node* foi modelado para ser um nó fixo, além de não gerar pacotes, apenas receber. Dessa forma, ao longo das simulações foi percebido, pelo fato dele não gerar pacotes e não possuir mobilidade, que ele sempre foi o último nó a perder sua bateria. Porém a perda de conectividade do nó *sink* não coincidiu com o final da rede, ou seja, ainda tinha nós ativos enviando pacotes que não atingiam o destino final, pois este já havia perdido a conectividade com a rede.

As métricas de redes de sensores sem fio implementadas contam a quantidade de pacotes enviados até o primeiro nó perder sua energia, até 30 nós perderem sua energia, até o *sink node* perder conexão com seus vizinhos, e até 59 nós perderem sua energia. Os algoritmos multiobjetivo utilizados foram o SMPSO por ser adequado para problemas de otimização com variáveis contínuas, e o NSGAI por ser muito utilizado nesse tipo de aplicação em engenharia e servindo como base de comparação. As configurações dos algoritmos multiobjetivo foram definidas com base no trabalho de C. Santana [5], com critério de parada igual a 20000 iterações. A Tabela 3 mostra os valores dos parâmetros para cada algoritmo.

Tabela 3: Configuração dos algoritmos multiobjetivo NSGAI e SMPSO.

Algoritmo	Tamanho da população	Tamanho do arquivo	Mutação	Seleção dos pais	Crossover
NSGAI	100	-	Polinomial	Torneios binários	Binário
SMPSO	100	100	-	Polinomial	-

A Tabela 4 mostra a quantidade de pacotes enviados, em relação a cada uma das métricas implementadas, na simulação em que os algoritmos convergem por volta da iteração 14000. É possível notar que a rede com o protocolo AODV multiobjetivo conseguiu enviar mais pacotes que o AODV Padrão. Os resultados utilizando o SMPSO foram os melhores em todas as métricas. Já com o algoritmo NSGAII os resultados ficaram bem próximos do AODV padrão, porém com valores ainda melhores, com exceção da métrica HND.

Tabela 4: Quantidade de pacotes enviados nas métricas FND, HND, LND e Perda de conectividade com o *sink node* (PCSN).

	FND	HND	LND	PCSN
AODV Padrão	1548	4418	5620	5530
AODV + NSGA-II	1618	4230	5789	5690
AODV + SMPSO	1813	5104	5920	5845

A partir do momento que os nós começam a morrer, a rede tende a realizar um reparo local, porém com o aumento dos nós mortos a rede muda seu comportamento e começa a optar por um reparo de fonte. Avaliando a métrica FND, os primeiros nós a morrerem nas simulações estavam próximos ao *sink node* e suas mortes foram mais devido a transmissão de pacotes, como estavam mais próximos do alvo o reparo local de rota se mostrou mais vantajoso.

Com o aumento da morte dos nós a rede começou a mudar seu comportamento, ao ter metade dos nós mortos o reparo de rota da fonte passou a ser sempre escolhido se mostrando ser mais vantajoso para a rede. Neste momento da simulação a causa da morte dos nós se mostrou equilibrada entre a mobilidade e transmissão de pacotes. Nas simulações a perda de conectividade do *sink node* aconteceu antes da perda total da rede, apesar de ainda ter nós com bateria medindo e transmitindo dados, esses dados se tornaram incólumes pois não atingiram o nó final, uma vez que este já perdeu sua conectividade.

A Figura 7 traz a evolução das métricas ao longo da simulação, comparando seus resultados no AODV Padrão e AODV + SMPSO. A Figura 8 traz a mesma evolução porém comparando o protocolo AODV padrão com AODV+NSGAII.

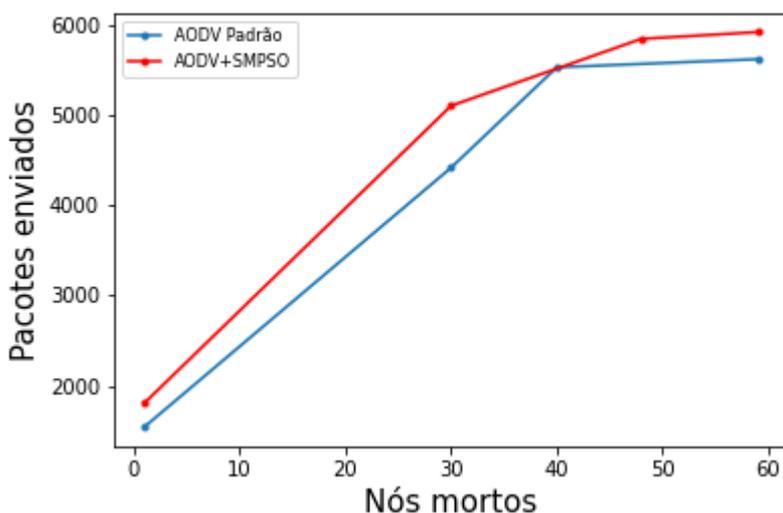


Figura 7: Quantidade de pacotes enviados pela quantidade de nós mortos no AODV Padrão e AODV+SMPSO.

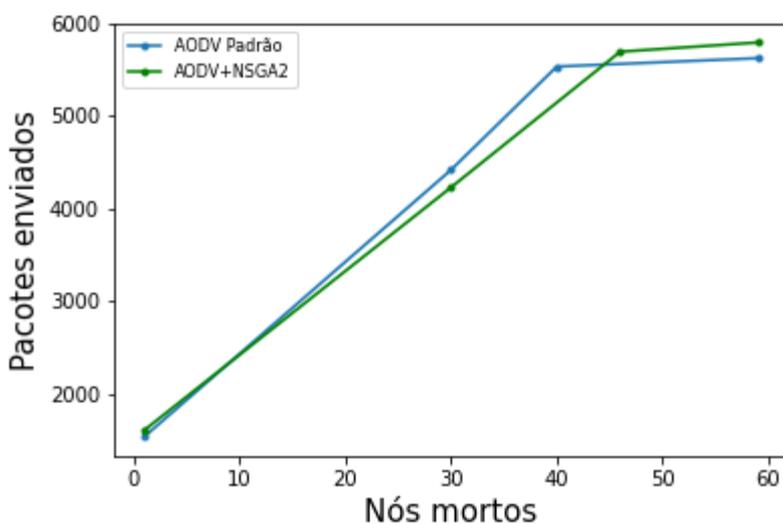


Figura 8: Quantidade de pacotes enviados por quantidade de nós mortos no AODV Padrão e AODV+NSGAII.

Na Figura 9, é possível analisar a quantidade de nós mortos ao longo do tempo da simulação. O AODV+SMPSO (vermelho) demorou mais tempo a começar a perder os nós, assim como também demorou mais tempo para perder todos os nós. Obtendo assim um desempenho melhor em toda execução. O tempo máximo da simulação foi definido como sendo 900 segundos, mas é possível notar que a partir do tempo 600 segundos os nós já estavam sem energia.

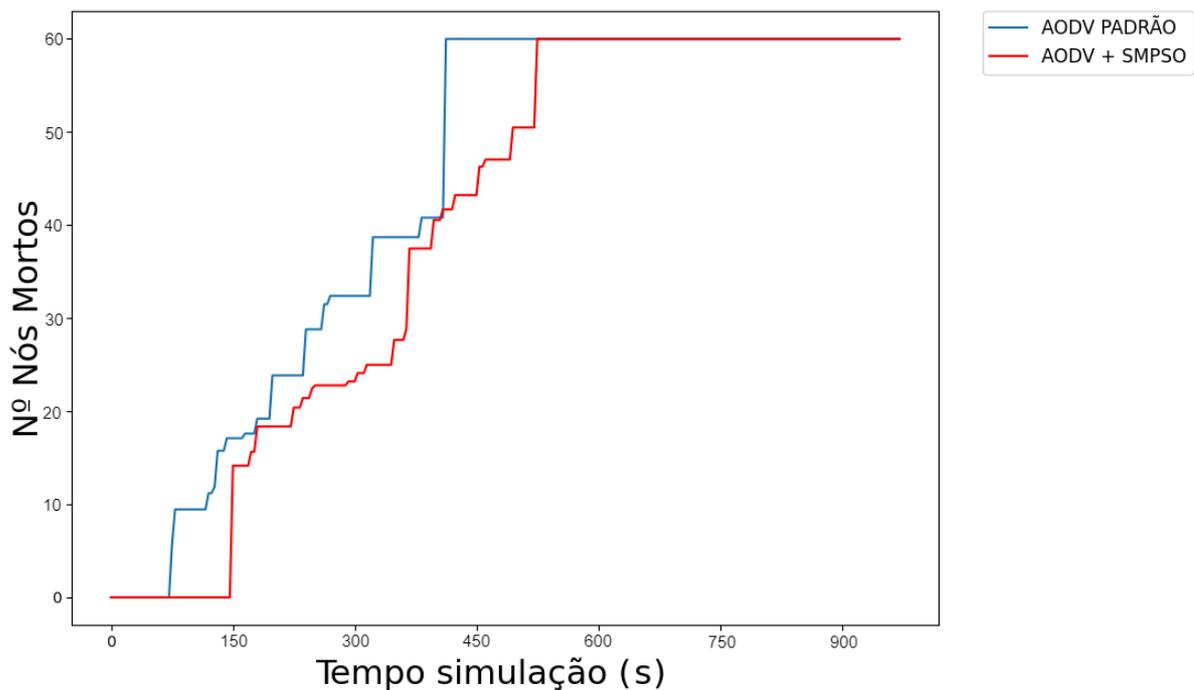


Figura 9: Quantidade de nós mortos ao longo da simulação entre AODV Padrão e AODV+SMPSO.

A Figura 10 tem a mesma lógica da figura anterior, porém comparando o AODV padrão com o AODV + NSGAI. Dessa vez os resultados ficaram mais próximos, porém ainda melhores na maior parte da execução, com exceção da quantidade de nós próximo ao tempo de 200 segundos, onde o AODV+NSGAI possuía mais nós mortos.

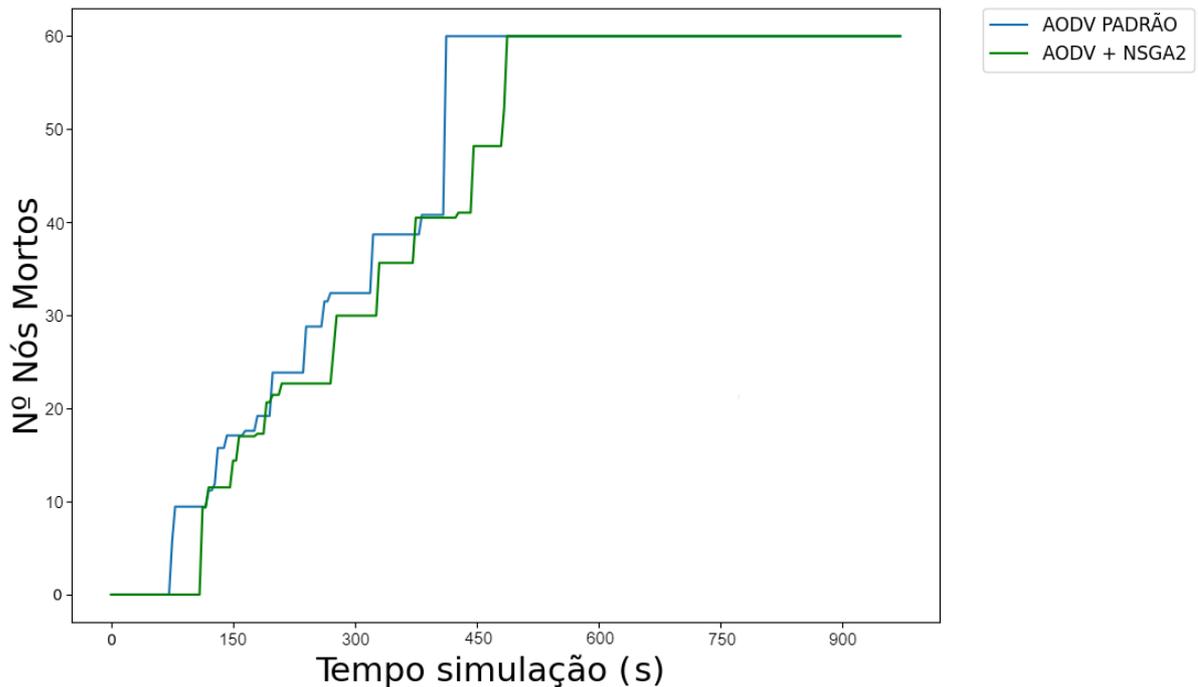


Figura 10: Quantidade de nós mortos ao longo da simulação entre AODV Padrão e AODV+NSGAII.

Também foi realizada uma análise em relação a energia consumida pela rede ao longo da simulação. A Figura 11 mostra a comparação desse consumo utilizando o AODV padrão e o AODV+SMPSO, e a Figura 12 o consumo utilizando o AODV padrão e o AODV+NSGAII. Os resultados do SMPSO novamente foram os melhores durante toda a simulação, assim como também do NSGAII porém, com valores de consumo muito próximos ao da rede com AODV padrão. Além disso, é possível observar um comportamento exponencial no decaimento da energia, esse comportamento provavelmente deve-se ao motivo de quando os nós começam a morrer, a retransmissão dos pacotes começam a se concentrar em uma menor quantidade de nós, então esses nós passam a ser mais demandados e suas energias caem mais rápido.

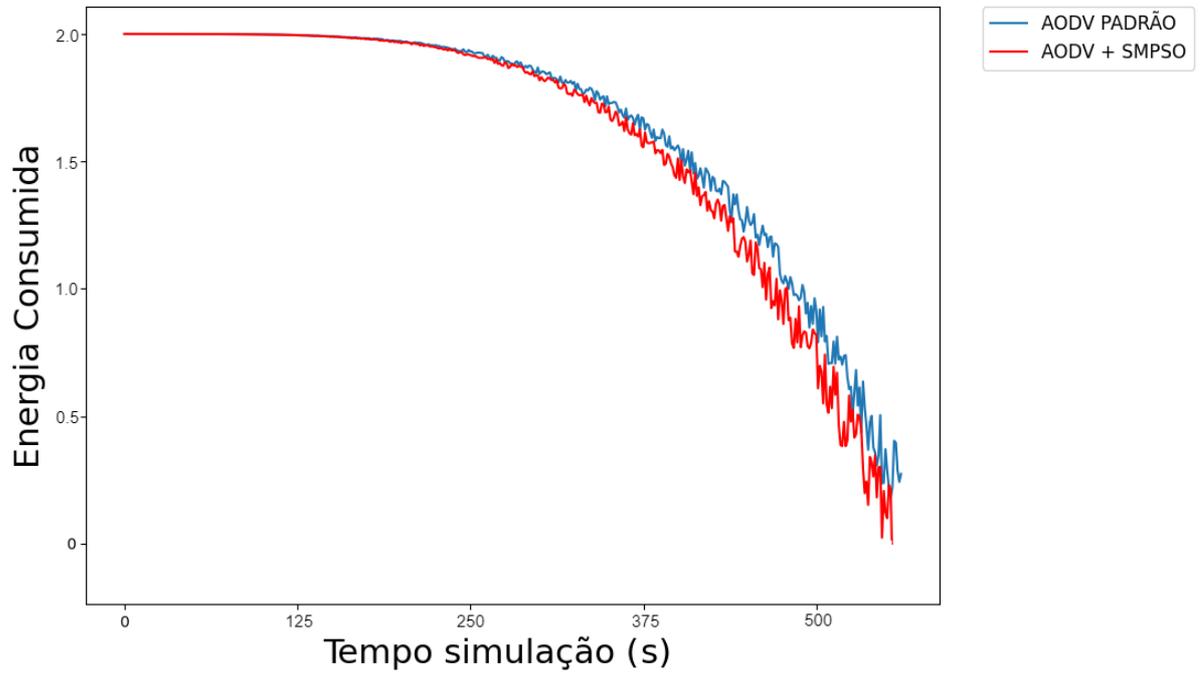


Figura 11: Comparação da energia consumida ao longo da simulação entre AODV padrão e AODV+SMPSO.

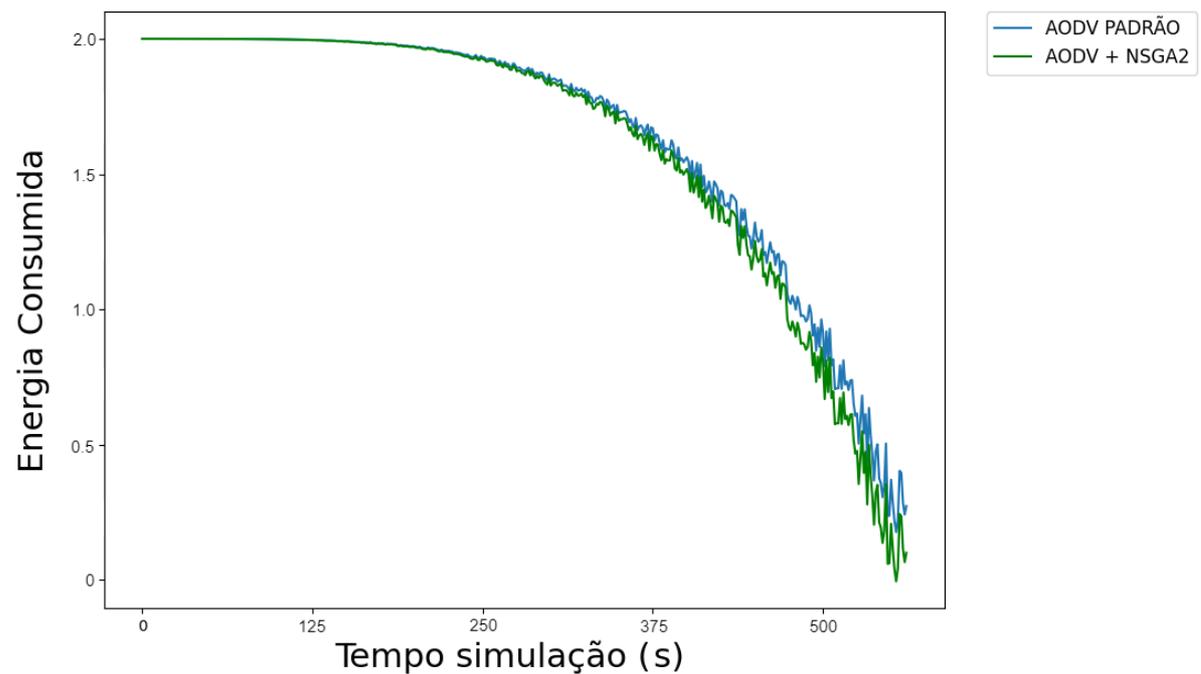


Figura 12: Comparação da energia consumida ao longo da simulação entre AODV padrão e AODV+NSGAI.

Capítulo 4

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma análise comparativa entre o protocolo de roteamento AODV padrão e o AODV com algoritmos multiobjetivo em uma rede MANET incorporando a abordagem de perda de conectividade causada pela falta de bateria. O protocolo deve ser capaz de maximizar o envio de pacotes e minimizar a energia consumida pelos nós. Assim, para medir o desempenho da rede as métricas de redes de sensores sem fio FND, HND, LND e Perda de conectividade com o *sink node* foram implementadas e, a partir delas, foi possível definir se o protocolo conseguiu otimizar os objetivos conflitantes.

A rede foi modelada no *Network Simulator 2*, com 60 nós em uma área de 1500 por 300, esses valores conseguem produzir uma rede bem esparsa e com alta conectividade. Foi introduzido à rede um *sink node*, com finalidade de receber todos os pacotes enviados pela rede, além de ser fundamental para o cálculo de uma das métricas. Ao longo das simulações percebeu-se que, pelo fato dele não gerar pacotes e não se mover, sempre foi o último nó a perder sua bateria. Porém, a perda de conectividade do nó sink ainda não coincidiu com o final da rede, implicando em nós ativos transmitindo pacotes que não conseguiram chegar ao destino final, pois este já perdeu a conectividade com a rede.

Os resultados do experimento demonstraram que o AODV com algoritmos multiobjetivo superou os resultados do AODV padrão em todas as métricas implementadas. A rede apresentou um comportamento de optar pelo reparo de fonte, na maior parte do tempo das simulações, apenas optando por um reparo local no início da simulação. Esse resultado indica que os algoritmos descobriram que o reparo de fonte é mais lucrativo que um reparo local.

A energia consumida da rede usando o protocolo AODV + SMP SO apresentou o melhor resultado, assim como a quantidade de pacotes enviados. Já o protocolo AODV + NSGAII apresentou resultados um pouco melhores do que o

AODV padrão. A partir das métricas de redes de sensores, foi possível observar que o protocolo com os algoritmos multiobjetivo conseguiu enviar mais pacotes até que determinada quantidade de nós da rede estivessem mortos.

1.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros sugerimos:

- Implementar outros protocolos de roteamento e comparar os resultados;
- Simular outros cenários na rede, variando a quantidade de nós, energia dos nós, tamanho da área, decaimento da energia ao receber e enviar pacotes;
- Prever variações na mobilidade da rede para estimar como as métricas se comportam, por exemplo, fazendo restrições na mobilidade da rede para ser semelhante a uma rede veicular que possui rotas mais ou menos fixas;
- Alterar a posição do *sink node* em relação a rede para definir como a rede se comporta quando o *sink node* está no meio dela ou na borda dela;
- Modelar o *sink node* como um nó móvel, e definir mais de um *sink node* na rede para que os pacotes possam ir para o nó sink mais próximo ou para o que ainda tem conectividade;
- Simular cenários em que os nós são inicializados com baterias diferentes, imaginando eficiências diferentes;
- Adicionar um peso nos algoritmos de otimização para alterar a rota sempre que a bateria de um nó da rota ficar crítica.
- Realizar a otimização com as oito métricas juntas e analisar as mudanças nos resultados.

Referências

- [1] J. Anzola, J. Pascual, G. Tarazona e R. G. Crespo, **A Clustering WSN Routing Protocol Based on k-d Tree Algorithm**, *Sensors*, pp.1-26, 2018.
- [2] N. C. V. N. Pereira e R. M. de Moraes, **A comparative analysis of aodv route recovery mechanisms in wireless ad hoc networks**, em *IEEE Latin-American Conference on Communications (LatinCom)*, Maio 2009, pp. 1–6.
- [3] A. K. Sharma, D.K Chauhan e A. Mishra, **A Study of Energy Optimization for MANET**, em *IEEE International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, Março 2019, pp. 1-4.
- [4] P. Asghari, A. M. Rahmani, and H. H. S. Javadi, **Internet of things applications: A systematic review**, *Comput. Netw.*, vol. 148, pp. 241–261, January 2019.
- [5] SANTANA, Clodomir. **Bio-Inspired Multi-Objective Algorithms Applied in the Optimization of the AODV Routing Protocol**. 2019. 126 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas, Escola Politécnica de Pernambuco - UPE, Recife.
- [6] L. Jonathan, M. Jaime, O. Jesus. **Mobile ad hoc networks : current status and future trends**, CRC Press, 2016.
- [7] S. Tyagi e R. Chauhan, **Performance analysis of proactive and reactive routing protocols for ad hoc networks**, *International Journal of Computer Applications*, vol. 1, no . 14, pp. 27–30, 2010.
- [8] K. Pandey e A. Swaroop, **A comprehensive performance analysis of proactive, reactive and hybrid manets routing protocols**, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, vol. 8, no . 6, pp. 432–441, 2011.

- [9] Y. Bai, Y. Mai e N. Wang, **Performance Comparison and Evaluation of the Proactive and Reactive Routing Protocols for MANETs**, em IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS), Abril 2017, pp. 1-5.
- [10] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal e T. Meyarivan. **A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2):182–197, 2002.
- [11] JAKUBOVSKI, Helson. **Incorporando preferências do usuário em uma abordagem de teste de linha de produto de software baseada em otimização multiobjetivo**. 2018. 111 f. Dissertação de Mestrado em Informática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [12] M. Orenia, L. Karen, C. Tayme e R. Alejandro. **Performance metrics to evaluated multiobjectives fuzzy predicates**, IV Conferencia internacional en ciencias computacionales e informatica (CICCI), 2018, pp. 3.
- [13] A. J. Nebro, J. J. Durillo, J. Garcia-Nieto, C. C. Coello, F. Luna, e E. Alba, **Smpso: A new pso-based metaheuristic for multi-objective optimization**, in Computational intelligence in multi-criteria decision-making, 2009. mcdm'09. ieeesymposium on. IEEE, 2009, pp. 1-8.
- [14] M. Reyes-Sierra e C. C. Coello, **Multi-objective particle swarm optimizers: A survey of the state-of-the-art**, International journal of computational intelligence research, vol. 2, nº. 3, pp. 287–308, 2006.
- [15] J. Kennedy e R. Eberhart, **Particle swarm optimization**, in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, Nov 1995, pp. 1942–1948 vol.4.
- [16] F. Elliackin, **Algoritmo Baseado em Enxame de Partículas para Otimização de Problemas com Muitos Objetivos**. 2013. 144f . Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação, Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife.

- [17] T. Issariyakul e E. Hossain, **Introduction to network simulator 2 (ns2)**, in *Introduction to Network Simulator NS2*. Springer, 2012, pp. 21–40.