

Uma abordagem baseada em Sistemas *Fuzzy* e Algoritmos de Colônia de Formigas para classificação de rotas em RSSF

José V. V. Sobral
and Ricardo A. L. Rabêlo
Departamento de Computação
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina, Piauí, Brasil
Email: victormld@gmail.com,
ricardor_usp@ieee.org

Rodrigo S. Baluz
and Harilton S. Araújo
and Raimir Holanda Filho
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)
Fortaleza, Ceará, Brasil
Email: rodrigobaluz@edu.unifor.br,
hariltonaraujo@gmail.com, raimir@unifor.br

Abstract—Wireless Sensor Network (WSN) is a special kind of ad-hoc network that presents serious restrictions of storage, processing and energy. The components of that kind of network are generally equipped with a battery of low capacity and the data transmission being the action responsible for the high-energy consumption of battery. That kind of network is generally used to monitor hard access areas. This makes impractical or extremely costly the replacement of sensors without energy. Aiming to reduce the energy consumption of sensors nodes, new technics are emerging in order to optimize the process of selection and use of routes. This paper presents a hybrid approach to reduce the energy consumption of sensors nodes by using a set of Computational Intelligence algorithms. In order to validate our approach, we performed a simulation, collecting the following metrics: number of received messages, average cost per message, packet loss rate, life time of first node. The fulfilled evaluation shows that our approach has great results compared with other ones existent in the state of the art.

Keywords—Redes de Sensores Sem Fio, Otimização, Sistemas Fuzzy, Algoritmos de Colônia de Formigas, Roteamento

I. INTRODUÇÃO

Uma rede de sensores sem fio pode ser definida como um conjunto de nós sensores que têm a função de captar as ações do meio em que estão inseridos e, por meio de comunicação sem fio, podem transmitir informações para outros nós da rede [1]. As redes de sensores possuem limitações que a tornam bastante diferentes das redes tradicionais. As principais restrições das redes de sensores sem fio (RSSF) estão ligadas ao baixo poder de processamento e memória, e a uma quantidade limitada de energia. Os nós de uma RSSF não necessariamente precisam ser todos iguais, ou executar as mesmas funções.

As RSSF podem ser usadas para monitorar espécies de animais, controlar e captar informações de ambientes que sejam de difícil acesso ou perigosos, tais como o fundo do oceano, vizinhanças de atividades vulcânicas, florestas, territórios inimigos, áreas de desastres e campos de atividade nuclear.

Na maioria das vezes, as RSSF são implantadas em locais de difícil acesso ou que não permitem a presença humana constantemente [2]. Com isso, torna-se inviável a substituição

de baterias ou nós inteiros após o término do seu tempo de vida. Para aumentar o tempo de vida de uma RSSF, é necessário reduzir a utilização de bateria.

A comunicação em RSSF consome mais energia do que o processamento e o sensoriamento realizado pelos nós da rede. Segundo [3] um dos principais desafios na área de RSSF é a redução do consumo de energia nos nós sensores já que, na maioria dos casos, esses nós estão localizados em locais de difícil acesso, o que torna inviável a substituição das baterias que o alimentam. A influência do consumo de energia em RSSF também é apresentada em [4], na qual evidencia-se que o evento que gera o maior consumo de energia em um nó sensor é a transmissão de dados.

Essa característica requer a implementação de políticas de roteamento que possibilitem que os nós sensores se comuniquem de forma eficiente e eficaz com o mínimo de consumo de energia. Para isso, os protocolos de roteamento devem trabalhar com informações concernentes à qualidade das rotas, baseadas nas métricas relevantes da rede, como o nível de energia dos nós sensores componentes da rede.

Assim, os protocolos de roteamento para as RSSF devem ter características de autoconfiguração que permitam descobrir qual é o melhor caminho para a transferência de informações, considerando a garantia de entrega e o nível de energia, entre os nós que compõem a rede. Caso um nó sensor venha a falhar devido a falta de energia, terá que ser feito um novo roteamento para que a informação a ser coletada possa alcançar o nó destino. A comunicação entre os nós sensores da rede deve ser feita de maneira que seja otimizado o consumo de energia, visando aumentar o tempo de vida útil da rede.

A proposta descrita neste trabalho tem como objetivo propor a utilização de um Sistema de Inferência *Fuzzy* [5] capaz de auxiliar um protocolo de roteamento na escolha de uma rota para comunicação entre dois nós quaisquer durante o funcionamento da rede. O sistema *fuzzy* proposto utiliza como entrada para o processo de inferência, o número de saltos e o menor nível de energia entre os nós que compõem a rota. A partir dos valores quantitativos das entradas, o sistema *fuzzy* estima um valor quantitativo associado à qualidade de

cada rota, de forma a auxiliar o protocolo de roteamento na seleção das várias rotas factíveis. Portanto, com base na qualidade da rota, o protocolo de roteamento deverá definir qual caminho a ser utilizado para o envio dos dados coletados com o objetivo de aumentar o tempo de vida da rede. Para otimizar o funcionamento do Sistema de Inferência *Fuzzy*, foi utilizado um algoritmo de Otimização por Colônia de Formigas [6] responsável por definir a melhor formação da base de regras do Sistema *Fuzzy*.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Uma abordagem que utiliza sistemas de inferência *fuzzy* em RSSF é apresentada em [7]. Em seu trabalho, os autores utilizam um sistema de inferência *fuzzy* composto por seis variáveis de entrada que definiam a qualidade de um link entre dois nós. Para avaliar a abordagem proposta, foram realizadas simulações que comparavam a avaliação de links feita pelo sistema de inferência a uma avaliação *crisp*, que definia a qualidade do link, baseada na porcentagem de energia residual dos nós. Os resultados mostram a superioridade do sistema inferência se comparada à avaliação *crisp*.

Na proposta apresentada em [8], os autores utilizam um sistema híbrido *Fuzzy-Genético* para seleção de rotas entre múltiplos nós sensores e múltiplos nós sorvedouros. O sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani foi utilizado para determinar o nó sorvedouro mais adequado para o roteamento, através da consideração de algumas características da rede de sensores, tais como energia e número de saltos. Algoritmos genéticos são empregados para o ajuste dos parâmetros do sistema de inferência *fuzzy*. A abordagem *Fuzzy-Genético* proposta, foi comparada com o protocolo *Directed Diffusion* em sua forma tradicional. O processo de inferência foi feito nos nós sensores, e gastos de energia com este processamento não foram considerados no trabalho. Outro aspecto importante, é que mesmo aumentando o tempo de vida da rede, as simulações não apresentam nenhuma métrica quanto a eficiência e robustez da rede, como número de mensagens transmitidas e taxa de perda de pacotes.

Nossa abordagem diferencia-se dos trabalhos relacionados ao aplicar um modelo híbrido *Fuzzy-ACO* em protocolos de roteamento que mantêm múltiplos caminhos entre os nós sensores e o nó sorvedouro. Isso faz de nossa proposta uma solução adaptativa para os protocolos de roteamento multicaminho. A seção a seguir descreve o funcionamento do sistema de inferência *fuzzy* classificador de rotas proposto neste trabalho.

III. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA

Segundo [9], diversas técnicas de inteligência computacional (IC) têm sido utilizadas para resolver os problemas das RSSF. Os paradigmas de IC vêm sendo utilizados com sucesso para solucionar desafios tais como agregação e fusão de dados, roteamento ciente de energia, agendamento de tarefas, segurança e cobertura e conectividade.

A proposta deste trabalho consiste em utilizar técnicas de IC para a solução dos problemas de roteamento existente nas RSSF. Para tal, faz-se uso de um sistema de inferência *fuzzy* classificador de rotas que, junto a um protocolo de roteamento, pode ser capaz de aumentar o tempo de vida da rede e a qualidade dos serviços prestados por esta.

A. Sistema de Inferência *Fuzzy* classificador de rotas

A proposta descrita neste trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de inferência *fuzzy* capaz de auxiliar os protocolos de roteamento no momento da seleção de rotas.

A seleção das rotas ocorre no momento em que um nó precisa enviar uma determinada mensagem de dados para outro nó. Neste momento, o nó remetente da mensagem busca em sua tabela de roteamento um nó vizinho que foi melhor qualificado pelo sistema classificador de rotas.

O sistema de inferência *fuzzy* que classifica as rotas proposto neste trabalho funciona de forma diferente nos protocolos de roteamento em que foi testado. O sistema classificador de rotas foi testado em dois protocolos bastante referenciados na literatura, os protocolos *Directed Diffusion* [10] e *Ad hoc on-demand multipath distance vector* (AOMDV) [11]. Para melhor entendimento, o algoritmo a seguir expõe o momento em que o sistema classificador de rotas é utilizado para determinar a qualidade de cada uma das suas rotas para o nó sorvedouro no protocolo *Directed Diffusion*:

- 1) O nó sorvedouro gera a mensagem M contendo um interesse a ser consultado na rede, de acordo com as especificidades requeridas na consulta;
- 2) Determinado nó sensor A recebe a mensagem M por *broadcast* e verifica os seguintes campos da mensagem:
 - energia: este campo é utilizado para armazenar o menor nível de energia associado a um nó sensor de uma rota específica;
 - numero_Saltos: distância percorrida em saltos do sorvedouro que originou a mensagem até o no sensor atual;
- 3) O nó sensor A calcula a qualidade da rota. Neste momento o nó sensor utiliza as informações de energia e numero_Saltos como entrada no sistema de inferência *fuzzy* para receber como saída a qualidade da rota percorrida pela mensagem M;
- 4) O nó sensor A verifica o seu nível de energia e compara-o ao valor do campo energia na mensagem M. Se a energia do nó sensor for menor que a energia contida em M, o nó sensor atualiza o campo energia de M com o valor do seu nível de energia. Caso não seja, o campo energia de M não é alterado;
- 5) O nó sensor A incrementa o campo numero_Saltos da mensagem M;
- 6) O nó sensor A retransmite a mensagem M.

No protocolo AOMDV a utilização do sistema classificador de rotas ocorre no momento em que um nó sensor recebe uma mensagem de RREP. O algoritmo a seguir descreve este processo:

- 1) Nó sensor A recebe mensagem de Route Reply (RREP) M;
- 2) Nó A utiliza os campos de energia e numero_Saltos da mensagem M para definir a qualidade da rota contida na mensagem M através do sistema classificador de rotas.
- 3) Se nó A já possui rota para o nó que gerou a mensagem M, a qualidade da rota é atualizada na tabela de roteamento, senão, é criada uma nova entrada

na tabela de roteamento contendo o nó destino e a qualidade da rota para o respectivo nó.

- 4) Nó A verificar se seu nível de energia é menor que o campo energia da mensagem M, caso positivo, o campo energia da mensagem M recebe o nível de energia atual do nó A, senão, o campo não é alterado.
- 5) Nó A incrementa o campo numero_Saltos da mensagem M.
- 6) Nó A retransmite a mensagem M para seus vizinhos.

É importante observar que, no protocolo AOMDV, a classificação de rotas ocorre em dois momentos: na criação de novas rotas, quando se recebe uma mensagem de RREP, e quando os nós sensores trocam mensagens HELLO e respondem uns aos outros com mensagem RREP reduzidas.

Realizada a classificação das rotas, os protocolos de roteamento utilizam a informação da qualidade de cada rota para selecionar a melhor rota a ser seguida por uma determinada mensagem de dados.

Após a realização de alguns testes no sistema classificador de rotas, observou-se que era necessário uma otimização na base de regras do sistema de inferência *fuzzy* para que as classificações pudessem ser mais precisas. A sessão a seguir descreve como ocorre o processo de otimização da base de regras do sistema *fuzzy* através da utilização de algoritmos de otimização por colônia de formigas.

B. Algoritmo ACO Ajustando a Base de Dados do Sistema de Inferência Fuzzy

Na proposta de otimização da abordagem apresentada neste trabalho, um algoritmo de otimização por colônia de formigas foi usado para ajustar de forma otimizada a base de regras do sistema de inferência *fuzzy*. Desta forma, o caminho a ser percorrido por uma formiga artificial é considerado como uma combinação de termos primários para a variável linguística de saída (qualidade da rota) para todas as regras da base de regras.

Portanto, para cada regra, os valores N_{pt} linguísticos estão disponíveis para ser selecionado, onde N_{pt} é o número de termos primários para a variável linguística de saída. Durante o caminho, a formiga tem de escolher um termo primário para cada regra de um total de opções N_{pt} . Desta forma, a especificação completa da base de regra do sistema de inferência *fuzzy* é toda dada pelo caminho de uma formiga.

Supondo-se que N_r seja o número de regras linguísticas presentes na base de regras, existindo $N_r^{N_{pt}}$ combinações associadas a variável linguística de saída. Como a base de regra diz respeito ao mapeamento de valores de entrada para o valor de saída, um ajuste ideal da base de regra aumenta os resultados produzidos pelo sistema de inferência *fuzzy*. Para o propósito deste trabalho, o resultado produzido pelo sistema de inferência *fuzzy* é o grau de qualidade das rotas (qualidade rota).

Quanto melhor o resultado produzido pelo sistema *fuzzy*, maior é o tempo de vida da RSSF. A meta do trabalho é encontrar uma boa combinação que maximiza o desempenho do sistema de inferência *fuzzy* para classificar as rotas em RSSF. Portanto, após a fase de treinamento (aprendizagem) via algoritmo ACO, o sistema de inferência *fuzzy* é perfeitamente ajustado e está pronto para ser incorporado em um

nó sorvedouro de uma Rede de Sensores Sem Fio real, para classificar as rotas associadas a si mesmo. A qualidade da rota é utilizada pelo protocolo de roteamento para selecionar um caminho específico para enviar uma mensagem.

O sistema de inferência *fuzzy* proposto possui duas variáveis de entrada: o nível de energia mais baixo dentre os nós que compõem a rota e o número de saltos necessários para o envio da mensagem para o nó sorvedouro. A definição dos valores *fuzzy* para cada variável de entrada foi feita previamente, com base nos conhecimentos de especialistas. Cinco termos primários foram definidos para a variável relacionada com o nível de energia, e três termos primários foram definidos para a variável associada ao número de saltos. Dessa forma, a base de regras contém quinze regras. A variável de saída, que determina o grau de qualidade da rota tem cinco termos primários.

Portanto, para cada regra, cinco opções estão disponíveis para o valor linguístico. Dentre as 15^5 (759.375) combinações, as formigas artificiais têm que encontrar uma configuração boa para as regras linguísticas. Além do uso de feromônio artificial para ajudar na escolha de um caminho especificado pelas formigas, o algoritmo Ant System incorpora uma função heurística. A inclusão de uma informação heurística, normalmente, resulta em melhores soluções, mas requer informações especializadas relacionadas ao problema a ser resolvido. O problema de designar a informação heurística é resolvido, usando o conhecimento prévio do especialista. Portanto, a experiência acumulada dos especialistas é utilizada para ajudar o processo de tomada de decisão das formigas.

Os principais aspectos envolvidos com a otimização da base de regras *fuzzy* são:

- *A inicialização dos parâmetros*: nesta etapa, os parâmetros do algoritmo ACO são inicializados. O número de formigas, a taxa de evaporação, os parâmetros que controlam a importância das informações do feromônio versus informações heurísticas.
- *Posição inicial das formigas*: todas as formigas são colocadas no início do nó que pode assemelhar-se ao formigueiro.
- *Seleção do termo primário para cada regra*: as formigas executam uma tomada de decisão probabilística sobre que nó deve ser visitado. O processo de tomada de decisão é baseado na informação do feromônio e da função heurística. O termo primário representado através do nó selecionado pela formiga é inserido no valor linguístico da regra associada. Desta forma, a escolha do termo primário representa o processo de construção de uma solução que é equivalente a determinar o termo principal de cada regra.
- *Avaliação das soluções construídas (produzindo caminhos)*: após as formigas terminarem o processo de construção da solução, é necessário medir as soluções obtidas. A avaliação das soluções produzidas é utilizada para determinar a qualidade das soluções no que diz respeito ao problema a ser otimizado. Desta forma, é possível indicar qual o melhor ajuste da formiga para a base de regra. Para avaliar a solução produzida por uma formiga específica, a base de regras

obtida é introduzida no sistema de inferência *fuzzy* e uma simulação na rede é realizada. O tempo de vida da rede é usado como o valor de medição da qualidade do sistema de inferência *fuzzy*, porque este valor representa o nível de energia dos nós sensores. Portanto, quanto maior o tempo de vida da rede, melhor é a base de regras obtida.

- *Atualização da concentração de feromônio*: no último estágio, as formigas depositam seu próprio feromônio. O feromônio depositado é proporcional ao tempo de vida da rede. Por conseguinte, o valor mais elevado de feromônio depositado é obtido pelo sistema de inferência *fuzzy* que melhor classifica as rotas e, deste modo, prolonga o tempo de vida da rede.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de verificar a aplicabilidade da abordagem proposta, foi utilizado o simulador Sinalgo [12]. A solução proposta é avaliada junto aos protocolos *Directed Diffusion* e AOMDV. Comparou-se três cenários de simulação: protocolos em suas formas tradicionais; protocolo com o sistema de inferência *fuzzy* classificador de rotas incorporado; protocolo com o sistema de inferência *fuzzy* classificador de rotas incorporado mas com a base de regras *fuzzy* ajustada automaticamente por meio do algoritmo ACO.

O cenário de simulação foi definido com uma rede contendo 100 nós sensores organizados em forma de grid 10 X 10 e 1 nó sorvedouro localizado no centro da rede. A energia inicial de cada nó sensor foi de 1.0 Joules.. O modelo de dissipação de energia utilizado foi o proposto em [13].

Foram consideradas quatro métricas para avaliar a abordagem proposta: número de mensagens entregues ao nó sorvedouro, custo médio por mensagens, taxa de perda de pacotes e tempo de vida do primeiro nó sensor. O número de mensagens entregues ao nó sorvedouro corresponde à quantidade de mensagens recebidas para um determinado tempo de simulação, medido em rounds (escala de tempo do simulador). O número de mensagens é muito importante porque mede a quantidade de dados recolhidos que o nó sorvedouro pode receber. O custo médio para cada mensagem recebida pelo nó sorvedouro é calculado com base no número de mensagens entregues ao nó sorvedouro e na energia gasta pela rede em um determinado momento. A taxa de perda de pacotes mede a percentagem de pacotes perdidos durante a vida útil da rede. O tempo de vida do primeiro nó sensor é definido como o período em que o primeiro nó sensor morre devido ao esgotamento da bateria. O tempo de vida do nó sensor mede a capacidade da política de encaminhamento com recursos limitados em uma RSSF especialmente o poder limitado das baterias.

As Figuras 1 e 2 mostram que o uso da abordagem proposta neste trabalho (FUZZY_ACO), quanto ao número de mensagens recebidas pelo nó sorvedouro em relação ao tempo, é maior em ambos os protocolos avaliados. Deste modo, o método proposto é capaz de aumentar o número de mensagens para um mesmo tempo de simulação. Isto significa que um número mais elevado de mensagens é capaz de ser transmitido, o que maximiza os benefícios dos recursos limitados dos nós sensores. A abordagem proposta atinge uma maior quantidade de mensagens entregues ao nó sorvedouro durante a simulação

e requer uma menor quantidade de tempo para receber um determinado número de mensagens.

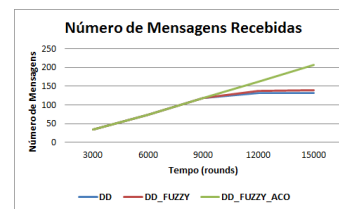


Figura 1. Número de Mensagem Recebidas - DD

Observamos que o custo médio para envio das mensagens é menor se comparado com os demais cenários, isto pode ser observado nos gráficos das Figuras 3 e 4. Por conseguinte, um menor custo para a comunicação de mensagens é feita utilizando a abordagem proposta. Isto implica que um nível mais elevado de energia estará disponível, o que resulta em um maior tempo de vida para a rede de sensores sem fio.

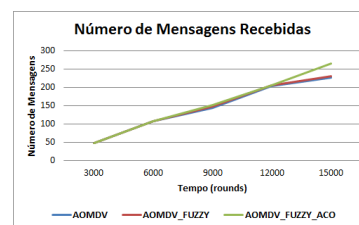


Figura 2. Número de Mensagem Recebidas - AOMDV

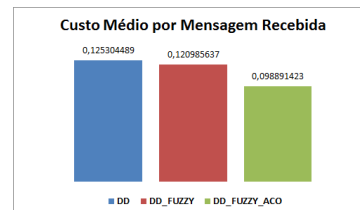


Figura 3. Custo Médio por Mensagem Recebida (Joules) - DD

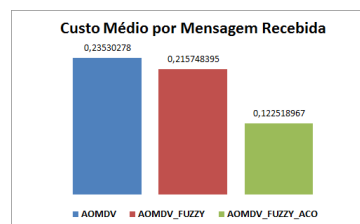


Figura 4. Custo Médio por Mensagem Recebida (Joules) - AOMDV

As Figuras 5 e 6 mostram a taxa de perda de pacotes da rede durante o tempo de execução da simulação. A abordagem proposta foi capaz de reduzir o número de pacotes perdidos, através da escolha das rotas, considerando o número de saltos e o nível de energia dos nós sensores associado ao percurso. Se os dados coletados por nós sensores são perdidos durante o encaminhamento da origem para o destino (nó sorvedouro), uma retransmissão é necessária. No entanto, uma retransmissão usa a largura de banda limitada disponível, consome energia

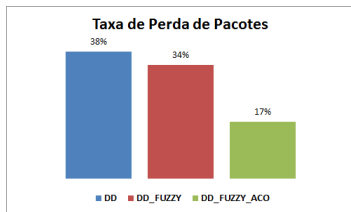


Figura 5. Taxa de Perda de Pacotes (%) - DD

extra e implica em atraso adicional para a rede, o que degrada o desempenho da rede e a qualidade do serviço.

Para a avaliação da métrica de vida do primeiro nó, as Figuras 7 e 8 ilustram os resultados para os cenários de simulação. Pode ser visto que a abordagem proposta é capaz de aumentar o tempo de vida do primeiro nó da rede. Esta métrica é extremamente importante, pois através dela podemos medir o tempo que a rede funciona com suas configurações iniciais de topologia. A partir do momento em que perde o seu primeiro nó sensor ela passa a funcionar fora de seus padrões normais. O aumento do tempo de vida do primeiro nó da rede, através da utilização da proposta descrita neste trabalho, é possível devido a constante avaliação da qualidade de cada uma das rotas. A qualidade da rota é sempre ajustada às condições de rede que mudam constantemente.

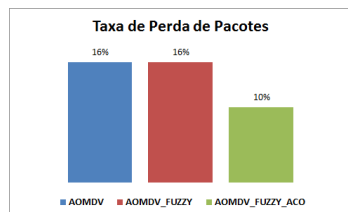


Figura 6. Taxa de Perda de Pacotes (%) - AOMDV

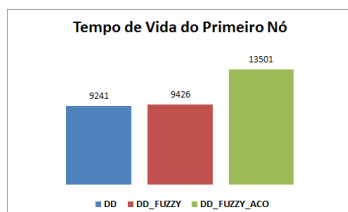


Figura 7. Tempo de Vida do Primeiro Nó (Rounds) - DD

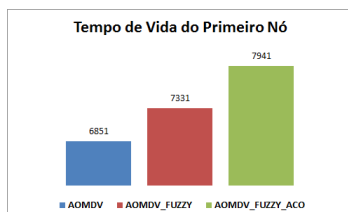


Figura 8. Tempo de Vida do Primeiro Nó (Rounds) - AOMDV

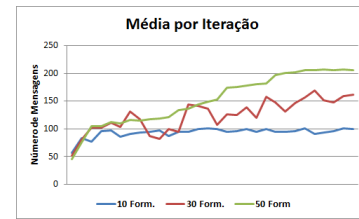


Figura 9. Média das Soluções Encontradas em cada iteração - DD

A. Análise dos Parâmetros do Algoritmo Ant System em Face a Qualidade dos Resultados Obtidos

O algoritmo ACO (Ant System) tem um conjunto de parâmetros que influenciam o desempenho do algoritmo na resolução de um problema específico. Nesta subseção, a influência do número de formigas e analisada em relação à qualidade das soluções encontradas. É importante observar que para cada um dos protocolos em que a proposta descrita neste trabalho foi aplicada são necessárias varias execuções do algoritmo de otimização.

Um aspecto importante sobre o número de formigas é a complexidade computacional. Utilizando um maior número de formigas, mais caminhos (soluções) devem ser construídos, mais soluções devem ser avaliadas, e mais depósitos de feromônios têm de ser calculados. Portanto, quanto mais formigas são utilizadas, maior a carga computacional necessária. No entanto, os algoritmos ACO são técnicas de busca baseadas em populações. Dessa forma, estes algoritmos evoluem uma população de soluções candidatas que permite o compartilhamento de informações relacionadas ao espaço de busca, de modo a melhorar a convergência e a qualidade das soluções. O comportamento cooperativo de múltiplas formigas é um importante ponto de algoritmos ACO (incluindo Ant System).

Desta forma, a capacidade de exploração do algoritmo e a quantidade de informação sobre o espaço de busca é uma função do número de formigas artificiais disponíveis. As Figuras 9 e 10 mostram a média dos valores da função de avaliação relacionada com as soluções criadas pelas formigas. É importante mencionar que, neste cenário, as informações de feromônio e função heurística, utilizadas foram ($\alpha=1$ e $\beta=1$). Visamos avaliar neste cenário a estabilidade e qualidade das soluções encontradas, com o intuito de determinar um número adequado de formigas para a obtermos uma solução satisfatória. Essa informação é importante devido ao aumento da carga computacional à medida que utilizamos mais formigas. Observamos que a partir de um certo número de iterações a solução proposta pela nossa abordagem atinge um comportamento estável, otimizando os recursos da rede. Para todos os protocolos avaliados observamos que nossa abordagem atinge uma maior qualidade, entregando um número maior de mensagens.

Nas Figura 11 e 12 são expostos os desvios-padrão associados a função de avaliação para todas as formigas artificiais. Estes gráficos mostram o quanto de variação ou "dispersão" existe em relação à média das avaliações relativas aos caminhos construídos pelas formigas, ou seja, a definição da base de regras *fuzzy*. Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média, indicando uma estabilidade

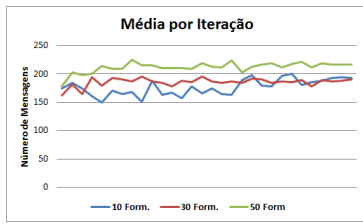


Figura 10. Média das Soluções Encontradas em cada iteração - AOMDV

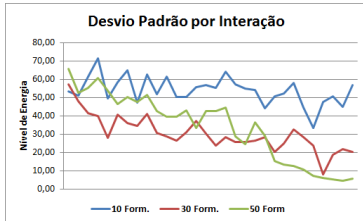


Figura 11. Desvio-padrão das Soluções Encontradas em cada iteração - DD

do algoritmo. Observamos que nossa abordagem proposta converge para um menor desvio-padrão, o que determina que as formigas caminham por uma mesma rota e, com isso, o depósito de feromônio torna-se uniforme. Ainda, observamos que para 50 formigas obtivemos um comportamento mais estável.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho propõe um sistema de inferência *fuzzy* para ajudar os protocolos *Directed Diffusion* e *Ad-hoc On-Demand Multipath Distance Vector* a selecionar uma rota para a comunicação entre os nós da rede. O sistema *fuzzy* proposto estima um valor quantitativo associado com a qualidade de cada rota, deste modo auxilia o protocolo de roteamento na seleção de uma rota entre as várias existentes. Portanto, baseado na qualidade da rota, o protocolo de roteamento pode definir qual rota a ser usada para enviar os dados coletados com o objetivo de otimizar a taxa de perda de pacotes, o tempo necessário para enviar um determinando número de mensagens, o custo energético médio para envio das mensagens e o tempo de vida do primeiro nó sensor, que é definido o período em que o primeiro nó sensor morre devido ao esgotamento da bateria. Devido a sua alta complexidade, o ajuste do sistema de inferência *fuzzy* classificador de rotas é realizado automaticamente pelo Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO). O ACO é usado para ajustar a base de regras do sistema de inferência *fuzzy*. A base de regras guarda as estratégia de ação/controle implementadas no sistema *fuzzy*, e

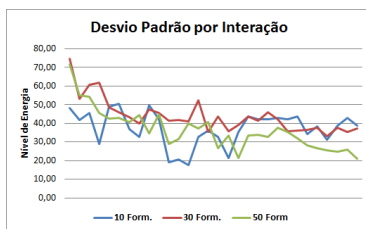


Figura 12. Desvio-padrão das Soluções Encontradas em cada iteração - AOMDV

por isso, um ajuste ótimo da base de regras deve resultar em uma estratégia eficiente para lidar com os limitados recursos das RSSF.

Os resultados mostram que a abordagem *fuzzy* usando o algoritmo ACO, para todas as métricas, é mais eficiente do que os outros, mostrando resultados positivos com relação a quantidade de mensagem recebidas pelo nó sorvedouro, custo médio por mensagem, taxa de perda de pacotes e o tempo de vida do primeiro. Portanto a inclusão de um sistema de inferência *fuzzy* é capaz de melhorar o uso dos limitados recursos computacionais associados a uma rede de sensores sem fio. Embora o uso de um sistema de inferência *fuzzy* ajustado por tentativa e erro faça um bom uso das informações para classificar rotas, este tipo de ajuste não é tão poderoso como o ajuste automático obtido pelo ACO. O ACO é capaz de explorar o espaço de busca e identificar boas regiões a serem exploradas, de modo a otimizar os benefícios do uso de um sistema de inferência *fuzzy* para ajudar os protocolos de roteamento. Como trabalhos futuros, os autores estão aplicando o algoritmo ACO para ajuste simultâneo da base de dados e da base de regras do sistema de inferência *fuzzy*.

REFERÊNCIAS

- [1] A. A. Loureiro, J. M. S. Nogueira, L. B. Ruiz, R. A. de Freitas Mini, E. F. Nakamura, and C. M. S. Figueiredo, "Redes de sensores sem fio," in *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 2003, pp. 179–226.
- [2] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, "Wireless sensor networks for habitat monitoring," in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*. ACM, 2002, pp. 88–97.
- [3] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *Communications magazine, IEEE*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, 2002.
- [4] N. A. Pantazis and D. D. Vergados, "A survey on power control issues in wireless sensor networks," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 9, no. 4, pp. 86–107, 2007.
- [5] L. A. Zadeh, "Toward a theory of fuzzy systems," 1969.
- [6] M. Dorigo and G. Di Caro, "Ant colony optimization: a new metaheuristic," in *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*, vol. 2. IEEE, 1999.
- [7] T. Haider and M. Yusuf, "A fuzzy approach to energy optimized routing for wireless sensor networks," *The International Arab Journal of Information Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 179–188, 2009.
- [8] R. A. Rabelo, M. V. de S. Lemos, L. B. Leal, R. H. Filho, and F. A. Borges, "An integration of fuzzy inference systems and genetic algorithms for wireless sensor networks," *International Journal of Hybrid Intelligent Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 61–74, 2012.
- [9] R. V. Kulkarni, A. Forster, and G. K. Venayagamoorthy, "Computational intelligence in wireless sensor networks: A survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 13, no. 1, pp. 68–96, 2011.
- [10] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," in *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2000, pp. 56–67.
- [11] M. K. Marina and S. R. Das, "On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks," in *Network Protocols, 2001. Ninth International Conference on*. IEEE, 2001, pp. 14–23.
- [12] D. C. Group, "Sinalgo," 2008, [Online; accessed 15-May-2010]. [Online]. Available: <http://disco.ethz.ch/projects/sinalgo/>
- [13] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan *et al.*, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, 2002.