

Uma Proposta de Roteamento Oportunístico Energeticamente Eficiente para Redes de Sensores sem Fio

Gunnar Ramos Fermينو, Renato Mariz de Moraes

Resumo—Protocolos de roteamento podem se tornar os vilões do desperdício de energia em redes de sensores sem fio (RSSFs). A quantidade de pacotes de controle enviados e a ausência de balanceamento de carga entre rotas podem drenar a energia de nós próximos à estação base (BS). Este trabalho propõe uma técnica, para seleção do próximo salto na rota, que considera o balanceamento do consumo energético, a qualidade de transmissão e a tolerância à falhas. Para isso, são consideradas a energia residual, a intensidade do sinal recebido e o grau de conectividade dos vizinhos em até dois saltos.

Palavras-Chave—Eficiência energética, protocolo de roteamento, redes de sensores sem fio, RSSF.

Abstract—Routing protocols can become the villains of wasting energy in wireless sensor networks (RSSFs). The number of control packets sent and the lack of load balancing between routes can drain energy from nodes nearest the base station (BS). This work proposes a technique for selecting the next hop on the route, which considers the balance of energy consumption, transmission quality, and fault tolerance. For this, are considered the residual energy, the intensity of the received signal and the degree of connectivity of the neighbors in up to two hops away.

Keywords—Energy efficiency, routing protocol, wireless sensor networks, WSNs.

I. INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio (RSSFs) são formadas por dezenas ou até milhares de nós sensores com configurações homogêneas ou heterogêneas. Esses nós são distribuídos na área a ser monitorada de maneira planejada ou aleatória e se comunicam utilizando ondas de rádio. Os nós de uma RSSF possuem pouca memória, baixa capacidade de processamento, reduzida potência de transmissão, limitada largura de banda e, como são alimentados por pequenas baterias, sofrem grande restrição de consumo de energia [1].

A comunicação em RSSF, geralmente, segue o padrão muitos-para-um, conhecido na literatura como roteamento *convergecast*. Nesse padrão, muitos nós enviam dados para um único destino, conhecido como nó sorvedouro (*sink*), coletor ou estação base (BS, do inglês *base station*) [2], [3].

A eficiência energética é um dos principais problemas de pesquisa em RSSFs, pois a reposição de baterias em nós sensores, em muitos cenários, além de inviável pode ser impossível. Nesse contexto, o rádio transmissor é o principal consumidor de energia em um nó sensor devido ao envio

e recepção de pacotes e o processo de escuta ociosa (*idle listening*) [1].

Aumentar o tempo de vida das RSSFs é o objetivo do uso eficiente da energia. Nesse contexto, nós mais próximos da BS tendem a ter suas baterias depletadas mais rapidamente do que os demais. Isso porque, eles participam de muitas rotas, pois repassam os pacotes à BS, e precisam estar acordados por muito mais tempo. Quando a energia desses nós acaba, toda a rede pode vir a parar de funcionar. Isso é conhecido como o problema do ponto quente (*hot-spot problem*) e resolvê-lo é uma das questões-chaves em RSSFs [4], [5], [6].

Os protocolos de roteamento podem se tornar um dos vilões do desperdício de energia. Seja por não fazerem a distribuição inteligente do tráfego, de maneira a balancear o consumo energético, causando o problema do ponto quente, ou por demandarem o envio de grande quantidade de dados de controle, necessários à manutenção de rotas [5].

Este trabalho propõe um novo critério para seleção do próximo salto, ou seja, o nó retransmissor de pacotes de dados, em direção à BS, o que visa garantir o balanceamento do consumo energético dos nós retransmissores. Nesta proposta é selecionado, como retransmissor (ou próximo salto), o vizinho que apresentar a melhor relação entre energia residual, grau de conectividade e a intensidade do sinal recebido (RSSI, do inglês *received signal strength indicator*). Com isso propõe-se balancear o consumo energético, selecionar rotas tolerantes a falhas e que tenham boa qualidade do sinal de rádio.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção II são apresentados os trabalhos relacionados. Na Seção III as notações e premissas são detalhadas. Na Seção IV é descrito o protocolo proposto. E, por fim, na Seção V são apresentadas as considerações finais.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Nos últimos anos a maioria dos trabalhos que propõem protocolos, técnicas e algoritmos relacionados às RSSFs têm levado em consideração a eficiência energética. Os protocolos de controle de acesso ao meio (MAC), por exemplo, têm lançado mão da estratégia que cria ciclos de trabalho, conhecida como *duty cycle* [2]. Esta consiste em desligar ou alternar o estado do rádio transmissor para baixa potência quando não há dados a serem transmitidos ou recebidos.

Outros protocolos MAC, energeticamente eficientes, ajustam a potência de transmissão para o mínimo necessário para alcançar o nó receptor. Em [7], a ideia é minimizar a potência

da transmissão com base em informações da distância em relação à BS e no nível de energia dos nós sensores.

Já os protocolos de roteamento energeticamente eficientes têm utilizado, principalmente, da criação de grupos (*cluster*) de nós sensores, técnica conhecida por criar RSSFs hierárquicas [8]. Nesta, para cada grupo de nós é atribuído ou eleito um cabeça de grupo (do inglês, *cluster head* (CH)). Um CH é o responsável por receber pacotes de dados dos membros do grupo e fazer a fusão ou agregação dos dados, a fim de remover pacotes que carregam dados redundantes vindos de uma mesma região e assim reduzir a quantidade de dados enviados para a BS [9]. O primeiro dos protocolos hierárquicos para RSSFs foi o LEACH [10].

O roteamento oportunístico (RO) é outra técnica utilizada para aumentar o desempenho das redes sem fio. No RO, o roteamento é feito de maneira dinâmica e salto-a-salto, de forma que, cada nó intermediário decide quem será o retransmissor dos seus dados. Para isso, cria um *ranking* dos possíveis retransmissores, com base em um ou mais critérios. O nó melhor ranqueado é o escolhido, mas caso este venha a falhar o próximo da lista assume essa posição [11].

Em RSSFs, o RO visa, principalmente, aumentar o tempo de vida da rede por meio da redução ou balanceamento do consumo energético. Para isso, o principal critério avaliado é a energia residual dos possíveis retransmissores [3], [12], [13]. No entanto, outros critérios têm sido utilizados para esse fim tais como: a distância entre os nós, que possibilita controlar a potência do sinal transmitido [14]; o indicador da intensidade do sinal recebido (RSSI), que permite evitar canais com baixa qualidade do sinal [15]; e o grau de conectividade dos vizinhos, que permite selecionar rotas mais tolerantes a falhas [16].

No melhor do nosso conhecimento, não foi encontrado um trabalho que faz roteamento oportunístico e salto-a-salto, utilizando o grau de conectividade, o RSSI e a energia residual, dos vizinhos a até 2 saltos, como critério para seleção do próximo salto em direção à BS como proposto neste trabalho.

III. NOTAÇÃO E PREMISSAS

A técnica de seleção de rotas proposta, considera RSSFs organizadas em níveis de forma que os nós localizados à mesma distância da BS, em número de saltos, pertencem ao mesmo nível. Os nós possuem configuração de *hardware* e *software* homogênea, contam com apenas um rádio transmissor e podem atuar como roteadores.

A RSSF é composta por um conjunto de n nós sensores e uma BS. Cada nó possui um identificador (ID) único e um relógio local para medir os intervalos de tempo. Assume-se, ainda, que a rede é organizada em forma de um grafo não dirigido $G = (V, E)$, em que, V denota um conjunto de vértices $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ que representam os nós da rede. Já E são as arestas que interconectam o subconjunto de pares de vértices de V , não ordenados, de forma que $E \supseteq \{(u, v) \mid u, v \in V\}$ e na rede em questão representam os enlaces de comunicação sem fio entre nós.

Quando o sinal de rádio de um nó u , denominado transmissor, alcança e pode ser recebido por um nó v denominado

receptor, diz-se haver um enlace de comunicação, denotado $E(u, v)$. A distância do nó u , em relação à BS, é definida como d_u , a qual é dada em número de saltos h , tal que $d_u = h$. A distância do nó, em relação à BS, é calculado no início da formação da rede através da troca de pacotes de controle (PC).

Todos os receptores do sinal de rádio do nó u são chamados de vizinhos a 1 salto de u denotado por N_u , tal que $N_u = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$ contendo m nós. O conjunto de vizinhos a 2 saltos de u , que são os vizinhos a 1 salto de um nó $v \in N_u$, é denotado por N_v , tal que $N_v = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_p\}$ contendo p nós.

Por fim, assume-se que cada nó da rede dispõe de duas tabelas com dados de vizinhos localizados a 1 e a 2 saltos. A técnica para seleção proposta é executada em cada nó a partir dos dados da energia residual, do grau de conectividade e do RSSI. Os custos para construção dessas tabelas são ignorados, mas em trabalhos futuros, pretende-se implementar um protocolo MAC *cross-layer* que, utilizando-se de técnicas de predição [17], possa manter essas tabelas atualizadas enviando um número reduzido de pacotes de controle pela rede com a finalidade de aplicação em redes fixas ou móveis.

IV. ESPECIFICAÇÃO DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO

Para que um dado nó $u \mid d_u = h$ selecione o próximo salto em direção à BS, este calcula a prioridade de retransmissão (P) para cada nó $v' \in N_u$, localizado a 1 salto mais próximo da BS do que o nó u , isto é $d_{v'} = h - 1$. O nó v' que apresentar o maior valor para P é escolhido como retransmissor de dados de u .

A Fig. 1 ilustra uma RSSF com um nó u que deve calcular o próximo salto em direção à BS. O conjunto de nós v' , possíveis retransmissores de u , é denominado de R_u (elipse vermelha na Fig. 1), de forma que $\exists E(u, R_u) \mid (R_u \subseteq N_u), (d_{v'} = h - 1)$. Já o conjunto de nós w' , possíveis retransmissores de um nó v' , é denominado $R_{v'}$ (elipse verde na Fig. 1) de forma que $\exists E(v', R_{v'}) \mid (R_{v'} \subseteq N_{v'}), (v' \in R_u), (d_{w'} = h - 2)$. O conjunto de todos os nós no nível $h - 2$, possíveis retransmissores de todos os nós de R_u , é nomeado $RT_{v'}$ (elipse azul na Fig. 1), tal que $\exists E(R_u, RT_{v'}) \mid (R_{v'} \subseteq RT_{v'}), (d_{w'} = h - 2)$.

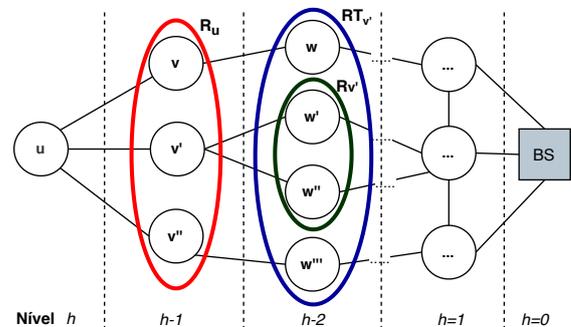


Fig. 1. Conjunto de possíveis retransmissores do nó u localizados a 1 e 2 saltos de u .

O nó v' que apresentar o maior valor para P , escolhido como retransmissor de u , é chamado de v_{winner} , tal que $v_{winner} \in R_u$. Isso significa que o nó vencedor apresentou

a melhor relação entre reserva de energia, indicador da intensidade do sinal recebido (RSSI) e grau de conectividade entre todos os nós de R_u .

O cálculo de P é executado por um dado nó u , apenas, quando há dados a serem enviados à BS. A partir desse cálculo, o nó v_{winner} é escolhido, de maneira oportunística e distribuída, para ser o retransmissor das mensagens enviadas por u . O protocolo de roteamento do nó u recalcula P antes de transmitir um pacote, se for verificado que houve mudanças nas tabelas de vizinhos desse nó.

A energia residual de um dado nó v' é denotada por $E_{v'}$. No cálculo da prioridade para retransmitir, $E_{v'}$ fornece dados que permitem ao protocolo de roteamento de u balancear o consumo de energia de seus possíveis retransmissores (R_u) e, conseqüentemente, aumentar o tempo de vida da rede [3]. Quando a RSSF é iniciada, todos os nós estão com a sua carga energética completa, aqui denominada de energia inicial (E_0).

O RSSI, obtido através do pacote de controle (PC) enviado pelo nó v' e recebido pelo nó u , é denotado por $RSSI_{u \leftarrow v'}$ ou simplesmente por $RSSI_{v'}$. No presente trabalho o RSSI foi normalizado tal que $RSSI \in [0, 100]$, e é medido quando um nó recebe um pacote PC de seu vizinho. O RSSI pode variar em função da distância, da potência de transmissão e dos obstáculos do meio.

No cálculo de P , o RSSI serve para indicar a qualidade do enlace de comunicação e o nível de confiabilidade da comunicação [15]. Serão consideradas simétricas as medidas do RSSI entre dois nós u e v' , ou seja: $RSSI_{u \leftarrow v'} = RSSI_{v' \leftarrow u}$.

O grau de conectividade de v' , localizado na posição $h - 1$, é denotado por $G_{v'}$, o qual registra a quantidade de vizinhos de v' , localizados a 1 salto mais próximos da BS do que o próprio v' . Ou seja, o total de nós pertencentes a $R_{v'}$ (elipse verde na Fig. 1), o que pode ser formulado como $G_{v'} = tam(R_{v'}) \mid d_{v'} = h - 1$. A função $tam(R_{v'})$ retorna a quantidade de nós contidos no conjunto $R_{v'}$. No cálculo da prioridade para retransmissão, nós com mais alto grau de conectividade apresentam maior tolerância a falhas [16]. Isto porque, ao selecionar um nó que possui um alto grau de conectividade é maior a possibilidade de que este consiga retransmitir os dados, mesmo na presença de falhas de nós e enlaces, visto que o roteamento é feito salto-a-salto.

A prioridade de retransmissão P , calculada em um nó u , para cada nó $v' \in R_u$, é dada por

$$P = P_{v'} + P_{R_{v'}}, \quad (1)$$

onde $P_{v'}$ é a prioridade de retransmissão de um nó $v' \in R_u$ e $P_{R_{v'}}$ que é a soma da prioridade de retransmissão de cada um dos nós pertencentes ao conjunto $R_{v'}$ no nível $h - 2$. Dessa forma temos que

$$P_{v'} = \beta \times \left[\left(a \times \frac{E_{v'}}{E_0} \right) + \left(b \times \frac{RSSI_{v'}}{100} \right) + \left(c \times \frac{G_{v'}}{\sum_{v' \in R_u} G_{v'}} \right) \right], \quad (2)$$

e que

$$P_{R_{v'}} = \lambda \times \left[\left(a \times \frac{MED(E_{R_{v'}})}{E_0} \right) + \left(b \times \frac{MED(RSSI_{R_{v'}})}{100} \right) + \left(c \times \frac{\sum_{w' \in R_{v'}} G_{R_{w'}}}{\sum_{w' \in RT_{v'}} G_{RT_{w'}}} \right) \right],$$

$$\text{onde } \begin{cases} (\beta, \lambda) \in \mathbb{R} & \beta + \lambda = 1, & \beta \geq \lambda > 0; \\ (a, b, c) \in \mathbb{R} & a + b + c = 1, & a \geq b + c, & b \geq c > 0, \end{cases} \quad (3)$$

em que $MED(x)$ representa média dos três quartis de x ou a mediana de x , cujos cálculos serão detalhados adiante.

As constantes β e λ são números reais positivos que determinam o peso dessas equações na formação de P e normalizam o resultado final, onde $\beta + \lambda = 1$.

As constantes a , b , e c referem-se, respectivamente, ao peso que é dado à energia residual, ao RSSI e ao grau de conectividade. Neste trabalho, visto que o principal objetivo é proporcionar o balanceamento do consumo energético na rede e aumentar a confiabilidade no envio de dados, as constantes a e b recebem peso maior do que c . Assim, priorizam-se os nós que apresentam maior reserva de energia e qualidade do sinal. Por outro lado, poder-se-ia ajustar os pesos de forma a se priorizar a tolerância à falhas ou mesmo empregar uma abordagem equânime dos pesos. Dessa maneira, a proposta aqui apresentada tem a versatilidade e enfoque que se queira explorar dependendo do planejamento e aplicação da rede.

No cálculo de $P_{v'}$, a energia residual ($E_{v'}$) do nó v' é dividida pelo valor da capacidade de energia inicial E_0 . No segundo termo de $P_{v'}$ é encontrado o percentual da qualidade do sinal dado pelo $RSSI_{u \leftarrow v'}$. No terceiro termo, o grau do nó v' ($G_{v'}$) é dividido pela soma do grau de todos os nós de R_u a fim de se obter a representatividade do grau de conectividade do nó v' em relação a R_u .

Seja n a quantidade de elementos dos conjuntos de dados da energia residual ou do RSSI dos nós pertencentes a $R_{v'}$. Esses conjuntos são denominados, respectivamente, $E_{R_{v'}}$ e $RSSI_{R_{v'}}$.

Dado um nó $v' \mid v' \in R_u$, existem vários enlaces de comunicação $E(v', R_{v'})$. Isso significa que, para cada nó v' , no cálculo de $P_{R_{v'}}$ na Eq. (3), deverá ser analisada a energia residual e o RSSI de todos os nós de $R_{v'}$. Para sintetizar $E_{R_{v'}}$ e $RSSI_{R_{v'}}$ em um único valor que represente a energia e o RSSI desse grupo de nós é proposto, então, extrair a média dos três quartis da $E_{R_{v'}}$ e do $RSSI_{R_{v'}}$. A média dos quartis retorna um valor que captura melhor a dispersão da população de valores, pois representa 50% dos valores mais significativos dessa distribuição, diferente da mediana que representa, apenas, o valor central.

Para o cálculo dos quartis, nesse trabalho, é utilizado o método da interpolação de base $n + 1$ [18]. Sejam $MED(E_{R_{v'}})$ e $MED(RSSI_{R_{v'}})$, respectivamente, a média dos três quartis da energia residual e do RSSI se $n \geq 3$. Caso $0 < n < 3$, então $MED(E_{R_{v'}})$ e $MED(RSSI_{R_{v'}})$ representam, respectivamente, a mediana dos valores da energia residual e a mediana dos valores de RSSI dos vizinhos a 2 saltos, membros de $R_{v'}$. Para fundamentar o método de cálculo da média dos quartis, o formalismo básico é apresentado nos próximos parágrafos.

Seja Q_i , $i = (1, 2, 3)$ quartis de um dado conjunto de dados ordenado, sendo este dividido em três quartis (Q_1 , Q_2 , Q_3). De forma que Q_1 é definido como o número médio entre o menor número e a mediana dessa lista. Já Q_2 corresponde à mediana dessa distribuição ordenada. Q_3 equivale ao valor do meio entre a mediana e o maior valor do conjunto.

Seja uma lista ordenada, com n valores, cada um deles rotulados com índices inteiros compreendidos entre 0 a $n - 1$. Sejam $K_{Q_1} = \frac{1}{4}(n + 1)$, $K_{Q_2} = \frac{1}{2}(n + 1)$ e $K_{Q_3} = \frac{3}{4}(n + 1)$ os endereços exatos, na lista ordenada, onde se encontram os valores de Q_1 , Q_2 e Q_3 , respectivamente.

Para o cálculo de cada um dos quartis, utiliza-se o método de interpolação com base $n + 1$, de forma que

$$Q_i = V[[K_{Q_i}]] + F_{K_{Q_i}}(V[[K_{Q_i}]] - V[[K_{Q_i}]]), \quad (4)$$

tal que $V[K_{Q_i}]$ refere-se a um valor da lista ordenada, contido no endereço dado pelo teto ou pelo piso de K_{Q_i} . Já $F_{K_{Q_i}}$ trata-se da parte fracionária de K_{Q_i} .

Na primeira parte da Eq. (3), é calculada a média dos três quartis da energia residual (E) dos nós pertencentes a $R_{v'}$, dada por

$$MED(E_{R_{v'}}) = \frac{Q_1(E_{R_{v'}}) + Q_2(E_{R_{v'}}) + Q_3(E_{R_{v'}})}{3}. \quad (5)$$

O resultado dessa média é então dividido pelo valor da energia inicial E_0 de cada nó. Em seguida, o resultado é multiplicado por a , a fim de se obter o percentual ponderado da energia residual dos nós de $R_{v'}$.

Na segunda parte da Eq. (3) é calculada a média dos três quartis do RSSI dos nós pertencentes a $R_{v'}$, dada por

$$MED(RSSI_{R_{v'}}) = \frac{Q_1(RSSI_{R_{v'}}) + Q_2(RSSI_{R_{v'}}) + Q_3(RSSI_{R_{v'}})}{3}. \quad (6)$$

O resultado dessa média é então dividido por 100 e depois multiplicado por b , a fim de se obter o percentual ponderado do RSSI dos nós pertencentes a $R_{v'}$.

Na terceira parte da Eq. (3), a soma do grau de todos os nós de $R_{v'}$, dado por $G_{R_{v'}}$, é dividida pela soma do grau de todos os nós de $RT_{v'}$, dado por $G_{RT_{v'}}$, tal que $R_{v'} \subseteq RT_{v'}$. Depois, realiza-se o produto do resultado pelo peso c .

A. Exemplo de Cálculo da Prioridade de Retransmissão

Nesta seção é apresentado o funcionamento do protocolo proposto. Para ilustrar esse processo, a Fig. 2 representa uma RSSF com 20 nós e uma BS. Nesse exemplo o nó 18 (nó u) executa o algoritmo de roteamento proposto, para selecionar o próximo salto em direção à BS. Os possíveis retransmissores (R_u) do nó 18 são os nós 13, 14 e 15. A legenda e , ao lado desses nós, refere-se à energia residual de cada um dos nós envolvidos nos cálculos desse exemplo. Sobre as arestas que ligam os nós, entre o nó 18 e os nós de R_u , encontra-se o RSSI, em percentual, medido pelo nó 18 ao receber pacotes de controle (PC) desses nós.

Para efeitos didáticos, seguindo as regras definidas anteriormente, serão atribuídos valores às constantes que definem o peso de cada variável envolvida no cálculo de $P_{v'}$. O peso atribuído aos dados dos nós localizados a 1 salto é $\beta = 0,50$, logo $\lambda = 0,50$. Já o peso da energia residual, do RSSI e

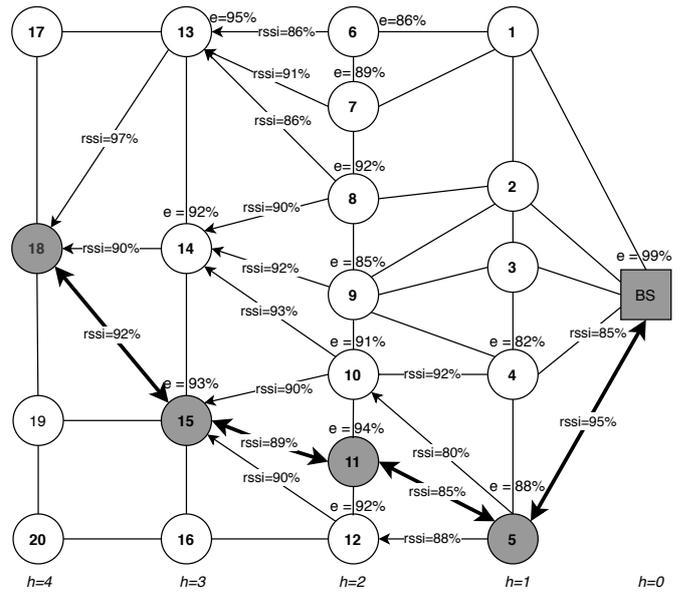


Fig. 2. Nó 18 seleciona um entre seus vizinhos do conjunto R_u aquele que retransmitirá os dados com base no RSSI, energia residual e no grau de conectividade. Rota resultante é 18-15-11-5-BS.

do grau de conectividade são, respectivamente, $a = 0,85$, $b = 0,13$ e $c = 0,02$, já que neste exemplo foi considerado que a energia é o fator mais importante, seguido da qualidade do enlace e depois o grau de conectividade.

Para o cálculo de $P_{v'}$ são considerados, apenas, vizinhos cujo número de saltos seja igual 3 ($h = 3$). Ou seja, aqueles nós localizados 1 salto mais próximos da BS do que o nó 18 ($R_u = \{13, 14, 15\}$). Neste exemplo, o primeiro nó a ser analisado é o nó 13. Observa-se que o nó 13 possui $h = 3$, $e = 95\%$, $G_{13} = 3$ e $RSSI = 97\%$. Após a execução do cálculo $P_{v'}$ o valor resultante é $P_{v'} = 0,47013$ conforme apresentado na célula da linha 2 coluna 2 da Tabela I.

Depois de calculado $P_{v'}$ é a vez de executar o cálculo de $P_{R_{v'}}$ para os vizinhos a 2 saltos do nó 18, possíveis retransmissores do nó 13, os quais são os nós 6, 7 e 8. Para executar o cálculo da Eq. (1) os valores das variáveis dos nós 6, 7 e 8, para o cálculo de $P_{R_{v'}}$ são, respectivamente: ($h = 2$, $e = 86\%$, $G_6 = 1$ e $RSSI = 86\%$), ($h = 2$, $e = 89\%$, $G_7 = 1$ e $RSSI = 91\%$) e ($h = 2$, $e = 92\%$, $G_8 = 1$ e $RSSI = 86\%$). O valor resultante é $P_{R_{v'}} = 0,43754$ (coluna 3 e linha 2 da Tabela I). Logo, o valor da prioridade de retransmissão do nó 13, obtido após executar a Eq. (1), é $P = 0,90767$.

Os procedimentos apresentados nos parágrafos anteriores são executados para todos os outros vizinhos do nó 18, pertencentes a R_u . Ou seja, para os nós 14 e 15. Na Tabela I são apresentados os resultados finais da execução da Eq. (1), para o exemplo em questão. Conforme se observa, o nó que apresentou o maior valor para P foi o nó 15, logo é considerado o nó vencedor, isto é, $v_{winner} = 15$.

Como se observa na Tabela I, o nó 13, para o cálculo de $P_{v'}$, apresenta a maior prioridade dentre os 3 possíveis retransmissores. Todavia, os vizinhos desse nó, os nós 6, 7 e 8, apresentam valores para energia, RSSI e grau de conectividade

TABELA I

RESULTADO DO CÁLCULO DA PRIORIDADE DE RETRANSMISSÃO DOS NÓS $v' \in R_u$ RELATIVOS AO NÓ 18 NA FIG. 2.

Nó v'	$P_{v'}$	$P_{R_{v'}}$	P
13	0,47013	0,43754	0,90767
14	0,45283	0,44387	0,89670
15	0,45838	0,45378	0,91216

muito abaixo dos apresentados pelos vizinhos dos nós 14 e 15. O nó 15, por exemplo, possui 2% menos energia do que o nó 13, no entanto, em média seus vizinhos, os nós 8, 9 e 10, apresentam 3,33% a mais energia e RSSI do que os vizinhos do nó 13. O que justifica o fato de o nó 15 ter apresentado o maior valor para P . Nesse caso prevaleceu o peso da prioridade dos vizinhos a 2 saltos, passando pelo nó 15.

Executando procedimentos similares, o nó 15 escolhe o nó 11 como seu retransmissor. O nó 11, por sua vez, como tem apenas o nó 5 como possível retransmissor o escolhe sem a necessidade de calcular P . Já o nó 5, como é vizinho a 1 salto da BS, apenas, encaminha o pacote diretamente para a BS. Logo, a rota a partir do nó 18, passará pelos nós 15, 11 e 5 até alcançar a BS.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma técnica para seleção do próximo salto, na rota em direção à estação base (BS) ou *sink* em redes de sensores. Para esta escolha, um protocolo foi proposto o qual leva em consideração a energia residual, a intensidade do sinal recebido (RSSI) e o grau de conectividade dos nós vizinhos, localizados a 1 e a 2 saltos do transmissor.

O principal objetivo desse protocolo é que o nó transmissor selecione o melhor retransmissor, dentre seus vizinhos, capaz de reencaminhar seus dados e garantir a longevidade da rede. Para isso, considera-se como melhor retransmissor, o nó que apresenta a maior prioridade de retransmissão obtida a partir da relação entre energia residual, RSSI e grau de conectividade.

Dessa relação, o peso dado a energia visa selecionar nós com boa reserva energética a fim de balancear o consumo de energia e aumentar a longevidade da rede. O peso dado ao RSSI visa garantir que, o canal de comunicação com o retransmissor possui qualidade suficiente para evitar perdas de pacotes. E o grau de conectividade visa aumentar a tolerância à falhas em caso de quebra de enlaces.

Com essa técnica é possível que, em RSSFs com nós fixos ou móveis, sejam escolhidas rotas que proporcionem o balanceamento do consumo energético entre os possíveis retransmissores. Destaque-se, ainda, que os dados necessários para o cálculo da prioridade geram baixa sobrecarga de pacotes de controle na rede, pois cada nó precisa conhecer apenas dados dos vizinhos a 2 saltos e não de toda a rede.

Como proposta de trabalhos futuros, pretende-se implementar uma abordagem *cross-layer* para a construção das tabelas de vizinhos a 1 e a 2 saltos, utilizando técnicas de predição de dados de controle. Outro objetivo futuro é tornar parametrizável e ajustável dinamicamente, segundo as

condições de tráfego na rede, as constantes que definem o peso da energia residual, do RSSI e do grau de conectividade no cálculo da prioridade de retransmissão.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado em parte pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) e pelo Centro de Informática - CIn/UFPE.

REFERÊNCIAS

- [1] W. Rehan, S. Fischer, M. Rehan and M. H. Rehmani, "A comprehensive survey on multichannel routing in wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, v. 95, pp. 1–25, October 2017.
- [2] Y. Liu, A. Liu, N. Zhang, X. Liu, M. Mad and Y. Hu, "DDC: Dynamic duty cycle for improving delay and energy efficiency in wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, v. 131, pp. 16–27, April 2019.
- [3] A. Vinitha, M.S.S. Rukmini and Dhirajsunehra, "Secure and energy aware multi-hop routing protocol in WSN using Taylor-based hybrid optimization algorithm," *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, November 2019.
- [4] R. Balamurali and K. Kathiravan, "Mitigating Hot Spot Problems in Wireless Sensor Networks Using Tier-Based Quantification Algorithm," *Cybernetics and Information Technologies*, v. 16, n. 1, April 2016.
- [5] Q. Wang, D. Lin, P. Yang and Z. Zhang, "An Energy-Efficient Compressive Sensing-Based Clustering Routing Protocol for WSNs", *IEEE Sensor Journal*, n. 10, v. 19, pp. 3950–3960, May 2019.
- [6] G. Sara and D. Sridharan, "Routing in mobile wireless sensor network: A survey," *Telecommunication Systems*, v. 57, n. 1, pp.51–79, September 2014.
- [7] k. Kim, J. Yun, J. Yun, B. Lee and K. Han, "A location based routing protocol in mobile sensor networks," in *2009 11th International Conference on Advanced Communication Technology*, Phoenix Park, South Korea, April 2009.
- [8] L. K. Ketshabetswe, A. M. Zungeru, M. Mangwala, J. M. Chuma and B. Sigweni, "Communication protocols for wireless sensor networks: A survey and comparison," *Heliyon*, v. 5, April 2019.
- [9] A. I. Al-Sulaifanie, S. Biswas and K. Al-Sulaifanie, "AH-MAC: adaptive hierarchical MAC protocol for low-rate wireless sensor network applications," *Journal of Sensors*, v. 2017, pp. 1–15, January 2017.
- [10] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00)*, Hawaii, January 2000.
- [11] H. Wu, J. Wang, R. A. Raghavendra, R. K. Vamsee, R. Wang and P. Mohapatra, "Prediction based opportunistic routing for maritime search and rescue wireless sensor network," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, v. 111, pp. 56–64, January 2018.
- [12] L. Li, L. Sun, J. Ma and C. Chen, "A receiver-based opportunistic forwarding protocol for mobile sensor networks," in *2008 The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, Beijing, China, July 2008.
- [13] P. Zhang, O. Landsiedel and O. Theel, "MOR: Multichannel Opportunistic Routing for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, Uppsala, Sweden, February 2017.
- [14] S. Lin, F. Miao, J. Zhang, G. Zhou, L. Gu, T. He, J. A. Stankovic, S. Son and G. J. Pappas, "ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks," *ACM Transactions on Sensor Networks*, n. 6, vol 12, pp. 138–147, March 2016.
- [15] A. Awang, X. Lagrange, Xavier and D. Ros, "RSSI-Based Forwarding for Multihop Wireless Sensor Networks," in *The Internet of the Future, 15th Open European Summer School and IFIP TC6.6 Workshop, EUNICE 2009*, Barcelona, Spain, September 2009.
- [16] L. Wang, J. Yan, T. Han and D. Deng, "On Connectivity and Energy Efficiency for Sleeping-Schedule-Based Wireless Sensor Networks," *Sensors (Basel)*, vol. 19, May 2019.
- [17] S. Diwakaran, B. Perumal and K. V. Devi, "A cluster prediction model-based data collection for energy efficient wireless sensor network," *The Journal of Supercomputing*, n. 6, v. 75, pp. 3302–3316, May 2018.
- [18] J. E. Freund and B. M. Perles, "A New Look at Quartiles of Ungrouped Data," *The American Statistician*, n. 3, v. 41, pp. 200–203, August 1987.