

Controle da Topologia de Redes de Sensores sem Fio para Economia de Energia Baseado no Algoritmo de Prim

Jonathan de C. Silva¹, Evandro L. B. Gomes¹, Edielson P. Frigieri¹

¹ Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Santa Rita do Sapucaí, MG

Email: jonathancs@inatel.br, evandro@inatel.br, edielson@inatel.br

Resumo—Hoje em dia, a IoT (Internet das Coisas) exige que cada vez mais sensores estejam interligados. No entanto, as Redes de Sensores sem Fio são constituídas por dispositivos com limitação de energia, o que torna as técnicas para economia de energia uma tendência na pesquisa. Por outro lado, a redução de energia tem um custo para a rede, e suas consequências devem ser cuidadosamente consideradas a fim de manter a comunicação eficaz. Neste trabalho, propõe-se uma abordagem baseada no algoritmo de Prim para calcular a mínima potência de transmissão para cada nó, mantendo todos os nós conectados. Diferentes cenários são avaliados considerando o tempo computacional e a redução da potência total, e é possível comparar o desempenho do algoritmo para diferentes densidades de nós e áreas.

Palavras-Chave—Economia de potência, árvore geradora mínima, redes de sensores sem fio, internet das coisas.

I. INTRODUÇÃO

O surgimento da Internet das Coisas tem aumentado a escala dos problemas inerentes à energia restrita aos nós nas redes sem fio. Para o melhor desempenho da rede, pesquisas estão sendo produzidas, durante esta década, a fim de atingir a potência de transmissão ideal para cada nó da rede, fazendo com que esta rede esteja conectada e com o mínimo de desperdício de potência, aumentando assim seu tempo de vida [1]. Ao invés de cada nó transmitir utilizando a máxima potência possível, pode-se redefinir a potência dos nós de forma colaborativa, redefinindo a topologia da rede sem fio pela relação entre os vizinhos sob determinados critérios [2].

Em geral, técnicas para o aumento do tempo de vida de uma rede sem fio podem ser caracterizadas como centralizadas ou distribuídas [3]. Para o primeiro caso, as conexões são geridas por um nó central, que realiza a computação necessária para a otimização. Como é necessário receber informações de cada nó, gera-se uma sobrecarga na rede, o que é agravado pelos dados transmitidos de volta para cada sensor [4]. No entanto, o conhecimento de toda a arquitetura permite que o nó central calcule uma solução de roteamento quase-ideal, ao passo que as propostas distribuídas só podem alcançar decisões locais, não atingindo a mesma eficácia [5]. Sendo assim, soluções centralizadas serão considerados neste trabalho.

Dentre as propostas mais recentes pode-se citar Aziz *et al.* [3], que apresenta uma técnicas de controle de topologia para

estender o tempo de vida de bateria e eficiência energética em RSSFs. Nesta proposta utiliza-se a idéia de *cluster* para selecionar um conjunto de nós na rede a fim de construir uma topologia eficiente. A seleção de vizinhos pode ser feita com base em vários critérios, isto é, reserva de energia, a densidade da rede ou pelo nó *sink*.

Qiao *et al.* [6] apresenta um exemplo de técnica distribuída, chamada LRMST (*Local Robust Minimum Spanning Tree*), com uma proposta de otimização robusta baseada em algoritmos de Árvore Geradora Mínima (MST - *Minimum Spanning Tree*). Utilizando o algoritmo de Prim para gerar soluções locais para cada nó, essa proposta considera a incerteza em relação à distância dos nós a fim de obter uma solução mais robusta, ao custo de valores ótimos inferiores aos obtidos pelo algoritmo LMST (*Local Minimum Spanning Tree*).

Com foco nas técnicas centralizadas, esse artigo propõe uma abordagem de controle de topologia para redução de potência, baseada no algoritmo de Prim [7]. Vários cenários são avaliados com diferentes densidades de nós e áreas a fim de avaliar o impacto no desempenho do algoritmo proposto. Largura de banda e número de saltos não foram considerados na avaliação. Outros parâmetros como frequência e perda de percurso no espaço livre foram especificados mas podem ser modificados para cada tecnologia específica.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II fornece uma modelagem matemática do problema a ser resolvido. Em seguida, na Seção III, a abordagem baseada no algoritmo de Prim é detalhada. Na Seção IV, os cenários são apresentados e os resultados obtidos discutidos. A conclusão é descrita na Seção V, juntamente com sugestões de continuidade da pesquisa para melhorar este artigo.

II. MODELAGEM E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Considere a rede de sensores sem fio, um grafo orientado G composto por um conjunto de nós N de vértices correspondentes aos nós sensores da rede e um conjunto L de arestas orientadas correspondentes aos enlaces entre os nós sensores, de modo que $G = (N, L)$. Todos nós sensores têm como objetivo enviar os pacotes para um nó central chamado *sink*, responsável pela retransmissão dos dados para uma rede externa ou um ambiente externo [8], [9], como ilustrado na Figura 1.

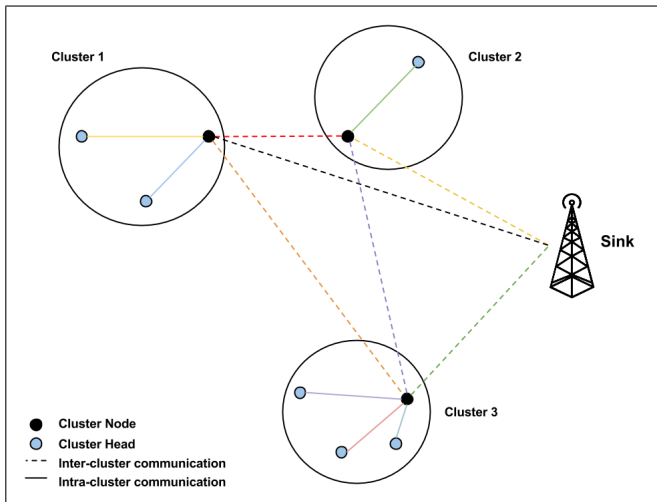


Fig. 1. Topologia de RSSF.

A sensibilidade do receptor ρ_{min} é o limiar da intensidade do sinal necessário para a recepção. Assume-se ser conhecida *a priori* por uma constante com o mesmo valor para todos os nós. Em particular, para uma recepção bem sucedida, é necessário que:

$$\gamma_i - \lambda(d_{ij}) \geq \rho_{min}, \forall (i, j) \in L, i \in N. \quad (1)$$

É assumido que λ é uma função da distância geográfica d_{ij} entre nós i e j constantemente crescente. Essa afirmação é geralmente verdadeira para propagação em espaço livre ou quando a mesma quantidade de degradação de sinal ocorre em todas as direções [10]. Combinando γ e λ em ρ_{ij} , as conexões entre os nós podem ser calculadas como uma função do vetor de potência transmitida $\vec{\gamma}$ conforme:

$$L_{ij}(\gamma_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho_{ij} < \rho_{min}, \forall (i, j) \in L, i \in N, \\ 1 & \text{if } \rho_{ij} \geq \rho_{min} \end{cases} \quad (2)$$

em que ρ_{ij} é o nível de potência recebida para o nó j enquanto i transmite com potência γ_i . Uma conexão válida só pode existir se ρ_{ij} é maior do que um mínimo de sensibilidade do receptor ρ_{min} [11].

De acordo com Friis [12], o nível de potência recebida em espaço livre, sem obstrução entre antenas de mesma polarização, é uma função da distância física d entre as antenas e da potência transmitida, de tal forma que diminui inversamente proporcional à d^2 . Em outras palavras, uma rede de sensores sem fio pode economizar energia se forem implantados enlaces curtos de comunicação *multi-hop*, em vez de enlaces diretos mais longos [13]. Isso se torna decisivo para pequenos saltos, pois podem diminuir o consumo de energia, mas apenas até um certo grau, uma vez que outros problemas podem surgir, tais como aumento do atraso e da energia de processamento e controle. Essas restrições, no entanto, não serão tratadas neste artigo.

Há outras considerações importantes sobre o consumo de energia em nós sensores [14], mas esse artigo será restrito à potência de transmissão. Portanto, somando a potência de

transmissão de todos os nós, é possível calcular o consumo de energia total da rede.

$$\Gamma_{total} = \sum_{i \in N} \gamma_i. \quad (3)$$

Se for encontrado o caminho com a mínima distância que conecta todos os nós com o nó *sink*, é possível reajustar a potência de transmissão de todos os nós para um valor mínimo, resultando na redução do consumo total de energia na rede Γ_{total}^* . Partindo dessa ideia, é possível construir a seguinte formulação.

A. Formulação da Programação Linear

O objetivo é construir uma Rede de Sensores sem Fio conectada com a mínima potência de transmissão para todos os nós. Logo, pode-se separar o problema em duas fases. A primeira fase é responsável por encontrar a árvore geradora mínima do grafo original, de acordo com a seguinte formulação:

Fase 1 - Árvore geradora mínima

Minimizar:

$$\sum_{(i,j) \in L} d_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

Sujeito à:

$$\sum_{j \in N} x_{1j} \geq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{(i,j) \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, S \subset N, 2 \leq |S| \leq n/2, \quad (7)$$

onde N representa o conjunto de nós $(1, \dots, n)$, e S é um subconjunto de N .

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i \neq j = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

A restrição em (5) garante que pelo menos uma conexão deve partir do nó raiz (*sink*). A restrição em (6) garante um predecessor para todos os outros nós e (7) está relacionada com as restrições de eliminação de percursos intermediários (*subtours*).

Uma vez definida a árvore geradora mínima que conecta todos nós, uma segunda fase pode ser iniciada a fim de reduzir a potência necessária, como mostrada na formulação:

Fase 2 - Redução de potência

Minimizar:

$$\Gamma_{total} = \sum_{i \in N} \gamma_i. \quad (9)$$

Sujeito à:

$$\delta_i \geq d_{ij}, \forall (i, j) \in L, \forall i \in N \quad (10)$$

$$\gamma_i \geq \rho_{min} + \lambda(\delta_i), \forall i \in N \quad (11)$$

$$\gamma_{min} \leq \gamma_i \leq \gamma_{max}, \delta_i \geq 0, \forall i \in N \quad (12)$$

A restrição em (10) seleciona o vizinho j mais distante do nó i . A restrição em (11) garante ao nó i uma potência mínima ($\gamma_{min} \leq \gamma_i \leq \gamma_{max}$) capaz de manter a comunicação com seu vizinho mais distante j e consequentemente com os demais vizinhos que estão mais próximos.

Um resumo das notações usadas em ambas as formulações é fornecido na Tabela I.

TABELA I
LISTA COM AS NOTAÇÕES UTILIZADAS.

Variável	Definição
L	Conjunto de links na rede.
N	Conjunto de nós na rede.
S	Conjunto de percursos intermediários (<i>subtours</i>) que podem ser formados na rede e devem ser evitados.
d_{ij}	Representa a distância física entre o nó i e nó j , $d_{ij} = d_{ji}$.
x_{ij}	Variável binária que indica se o link (i, j) foi selecionado.
δ_i	Variável que indica a distância para o vizinho mais distante do nó (i) .
γ_i	Variável que indica a potência mínima suficiente para manter comunicação com o vizinho mais distante (δ_i). A potência deve estar entre uma potência máxima e mínima conforme especificação.
λ	Função que calcula o nível de potência a partir da distância entre dois nós.

Em seguida, a abordagem proposta baseada no algoritmo de Prim é apresentada. Na Seção IV, o desempenho do algoritmo proposto é avaliado para diferentes cenários considerando a redução da potência total e o tempo computacional.

III. ABORDAGEM BASEADA NO ALGORITMO DE PRIM

A abordagem proposta pode ser separada em três fases principais: *Discover*, *Rebuild* e *Optimize*. É importante definir alguns termos, a fim de facilitar a discussão. Considere uma topologia de rede $G = (N, L)$ na qual cada nó j pode ser alcançado por um conjunto de nós vizinhos i , definidos como β_{ij} , usando a máxima potência de transmissão γ_i^{max} de forma que $\beta_{ij} = \{i, j \in N : \rho_{ij} \geq \rho_{min}\}$.

A primeira fase, *Discover*, é responsável pela construção da topologia de rede utilizando as informações dos vizinhos β_{ij} . Para essa finalidade, o nó *sink* inicia um processo de descoberta, periodicamente, enviando uma mensagem de transmissão na rede. Assim que um nó recebe a mensagem de transmissão, o sinal é retransmitido com a potência máxima. Então, essa mensagem de difusão é utilizada por cada nó j para descobrir seus vizinhos i e informar ao *sink* qual é o nível de potência ρ_{ij} recebido de cada um. A periodicidade da mensagem de transmissão foi discutida em outro trabalho [2] e não é o objetivo deste artigo. A Figura 2-a apresenta um exemplo de topologia de rede depois da fase *Discovery*, em

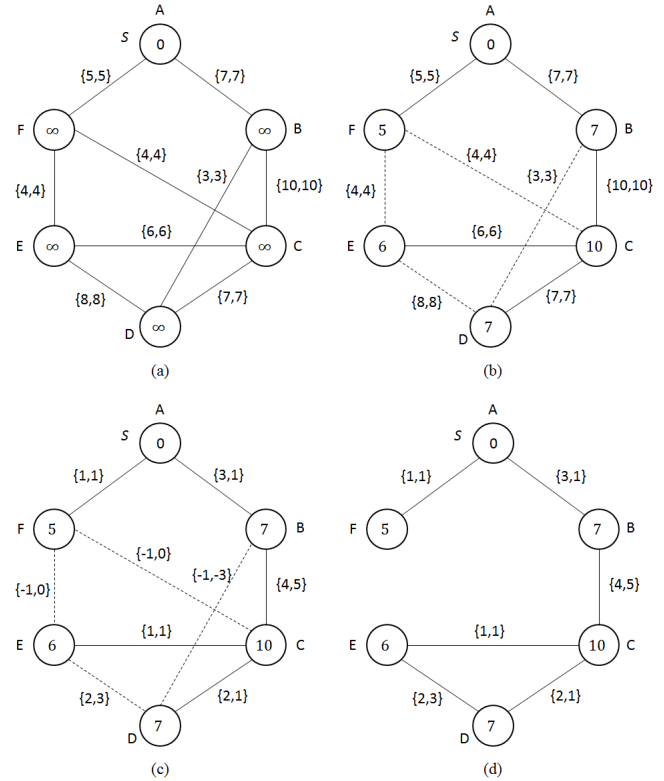


Fig. 2. Exemplo de grafos representativos da operação dos algoritmos *Rebuild* e *Optimize*.

que cada aresta representa o nível de potência recebido por cada nó em ambas as direções (ρ_{ij}, ρ_{ji}).

Uma vez que a topologia da rede é conhecida pelo *sink*, a segunda fase é inicializada, o *Rebuild*. Essa fase resulta em uma nova topologia de rede utilizando o algoritmo de Prim [8], um algoritmo guloso que corre em tempo polinomial e têm sido utilizados em várias diferentes abordagens para o controle de topologia de rede [15], [6]. A ideia principal é encontrar o caminho de custo mínimo que conecta todos os nós da rede, representando uma árvore geradora mínima $T = (N^T, L^T)$ de G . Como o nível de potência recebida é inversamente proporcional à distância, o nível mais elevado recebido representa o nó vizinho mais próximo e que exige menos energia para a comunicação. Nesse caso, para o processo de *Rebuild*, a árvore geradora mínima é construída, de fato, considerando o "custo máximo". Antes de prosseguir, o processo *Rebuild* será apresentado:

Processo de Rebuild:

Entrada: Grafo indireto $G = (N, L)$, onde N denota o conjunto de vértices (nós) e L o conjunto de links.

Saída: Um grafo T conexo com um custo mínimo.

- 1) Criar um vetor P inicialmente vazio que recebe o predecessor de cada vértice do grafo G selecionado para a árvore geradora mínima.
- 2) Criar um vetor V que mantém o controle dos vértices que já foram inseridos em P .
- 3) Criar um vetor K que mantém o peso das conexões entre os vértices selecionados.

- 4) Atribuir um valor-chave menor que ρ_{min} para cada vértice ($K_i < \rho_{min}, \forall i \in N$).
- 5) Atribuir um valor-chave maior que ρ_{min} para o primeiro vértice (nó *sink*) para que seja escolhido primeiro $K_{sink} > \rho_{min}$.
- 6) Enquanto V não tiver todos os vértices do grafo G :
 - a) Selecionar um vértice i que ainda não tenha sido incluído em V e que tenha o menor valor-chave.
 - b) Incluir i em V .
 - c) Iterar por todos os vértices j adjacentes de i :
 - i) Se o peso da aresta, ou conexão (i, j) for maior que o valor-chave anterior K_j , atualize o valor-chave com o peso da aresta atual ($K_j = L_{ij}$) e adicione i como predecessor de j , ($P_j = i$).
- 7) Retornar a árvore mínima T apenas com as conexões selecionadas em P e respectivos pesos em K .

Um importante ponto sobre o processo *Rebuild* é a conexão entre nós. Como a topologia representa uma rede de sensores sem fio, se o nó i é conectado ao nó j , ambas as potências dos rádios γ_i e γ_j devem ser suficientes para permitir a comunicação nos dois sentidos, o que significa $\rho_{ij} = \rho_{ji} \geq \rho_{min}$. A Figura 2-b exemplifica o processo *Rebuild* aplicado ao grafo resultante da fase *Discovery* (Figura 2-a), onde as linhas tracejadas representam ligações que não fazem parte da árvore geradora mínima.

A terceira fase, chamada *Optimize*, é responsável pela diminuição da potência de rádio de cada nó para um novo nível de acordo com o seu vizinho. O procedimento é resumido a seguir:

Processo de Optimize:

Entrada: Árvore mínima $T = (N^T, L^T)$ resultante de *Rebuild*, vetor de potência de rádio $\vec{\gamma}$, e número de nós N .

Saída: Um vetor com a mínima potência de transmissão para cada nó $\vec{\gamma}^*$.

- 1) Para $i = 1, 2, \dots, N$:
 - a) Iterar sobre todas as conexões (i, j) e escolher aquela com o menor peso (menor nível de potência que equivale a maior distância).
 - b) Calcular a mínima potência γ_i de tal forma que o nó mais distante j ainda possa ser alcançado, $\rho_{ij} \geq \rho_{min}$.

As Figuras 2-c e 2-d exemplificam o processo *Optimize*. Considerando que o nível mínimo necessário para manter a comunicação deve ser mais elevado e igual ao valor 1, ($\rho_{min} = 1$), cada potência do rádio γ_i pode ser diminuída até chegar a este valor mínimo relacionado com o seu pior vizinho j . Considerando a Figura 2-b e usando o nó C como referência, o pior vizinho é o nó E quando comparado com B , D e F . Então, a potência de rádio do nó C pode ser diminuída até que atinja um nível mínimo de comunicação com E . Consequentemente, as conexões com B , D e F terão o seu nível reduzido a ponto da conexão com o nó F desaparecer (nó F não é uma conexão requisitada resultante pelo processo de *Rebuild*, visto na Figura 2-b). Este procedimento é repetido para todos os nós e o novo grafo resultante de *Optimize* é apresentado na Figura 2-d.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este experimento foi delineado com o objetivo de analisar o desempenho do algoritmo proposto para diferentes cenários, de acordo com as métricas de *Redução de Energia* e *Tempo Computacional*. O algoritmo proposto foi avaliado utilizando o software *Scilab* [16]. Os cenários simulados foram criados variando a densidade de nós e a área total, de acordo com os valores apresentada na Tabela II.

TABELA II
FATORES DE CONTROLE E SEUS RESPECTIVOS NÍVEIS.

ID	FATORES DE CONTROLE	NÍVEIS			
De	Densidade (%)	10	30	60	80
Ar	Área (km^2)	100	225	400	

A densidade representa o número de nós por unidade de área, assumindo-se que não pode haver mais do que um nó por unidade de área. Logo, foram consideradas densidades de 10, 30, 60 e 80% [8]. A fim de avaliar o impacto da área para o algoritmo, três diferentes valores de áreas foram considerados, 100, 225 e 400 km^2 . A frequência de operação foi fixada em 933 MHz e o raio de comunicação foi calculado usando a equação de atenuação no espaço livre (representando a função λ na equação 11) de acordo com a expressão

$$FSPL(dB) = 32.45 + 20 * \log(f) + 20 * \log(d), \quad (13)$$

em que d é a distância em Km e f a frequência em MHz. Também foi considerado um limiar de sensibilidade para o receptor $\rho_{min} = -80$ dBm e as potências de transmissão mínimas e máximas iguais a $\gamma_{min} = -15$ e $\gamma_{max} = 27$ dBm, respectivamente [17].

A. Resultados Numéricos

Uma matriz experimental baseada no fatorial completo foi definida a fim de analisar como a *Redução de Potência* e o *Tempo Computacional* são afetadas pela densidade de nós (*Densidade*), tamanho total da área (*Área*) e suas interações. O planejamento fatorial foi replicado 5 vezes resultando um total de 60 experimentos diferentes, no qual cada execução experimental resultou em uma medida de *Redução de Potência* e *Tempo Computacional*, resumidos na Tabela III.

Utilizando da soma de quadrados, foi aplicada um análise estatística de variância (ANOVA) com o objetivo de verificar quais fatores de controle e interações são significativos. A análise foi feita considerando o nível de significância estatística de 0,05. De acordo com a Tabela IV, *Redução de Potência* teve somente o fator *Densidade* sendo significativo, uma vez que o valor do *P-value* correspondente foi inferior a 5%. Já o para o *Tempo Computacional*, todos fatores (*Área* e *Densidade*) e suas interações mostraram-se estatisticamente significativos.

B. Análise Fatorial

Para entender como o desempenho de *Redução de Potência* para algoritmo proposto é afetado de acordo com cada cenário, um gráfico com os efeitos principais foi gerado a partir do

TABELA III
RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM A MÉDIA DE 5 RÉPLICAS.

Densidade (%)	Área (km ²)	Máxima Potência (dBm)	Redução de Potência (dBm)	Redução de Potência (%)	Tempo Computacional (seg.)
10	100	270	80.21	30%	0.02
10	225	621	168.83	27%	0.07
10	400	1080	313.10	29%	0.40
30	100	810	380.42	47%	0.19
30	225	1836	880.97	48%	2.21
30	400	3240	1,516.81	47%	12.19
60	100	1620	964.99	60%	1.72
60	225	3645	2,138.59	59%	18.36
60	400	6480	3,836.81	59%	111.58
80	100	2160	1,418.21	66%	4.14
80	225	4860	3,089.55	64%	45.86
80	400	8640	5,505.82	64%	261.86

TABELA IV
ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA REDUÇÃO DE POTÊNCIA E TEMPO COMPUTACIONAL.

Fator	Redução de Potência	Tempo Computacional
Densidade	500.31 ¹	156.72 ²
Área	0.88	236.24
Densidade*Área	0.51	92.65

¹ F-test é calculado a partir da soma de quadrados entre grupos dividido pela soma de quadrados dentro do grupo.

² Valore em negrito representam termos estatisticamente significativos no modelo (P-Value < 5%). Não podemos rejeitar a hipótese nula de igual variância se P-value > 5%.

modelo obtido, e mostrado na Figura 3. É possível confirmar que variações na área não têm impacto estatisticamente significativo no desempenho do algoritmo, conforme o modelo obtido. Por outro lado, um aumento na densidade de nós resulta em um aumento na redução de potência, o que é realizável uma vez que os nós estão mais próximos uns dos outros, o que resulta em níveis mais baixos de potência de transmissão.

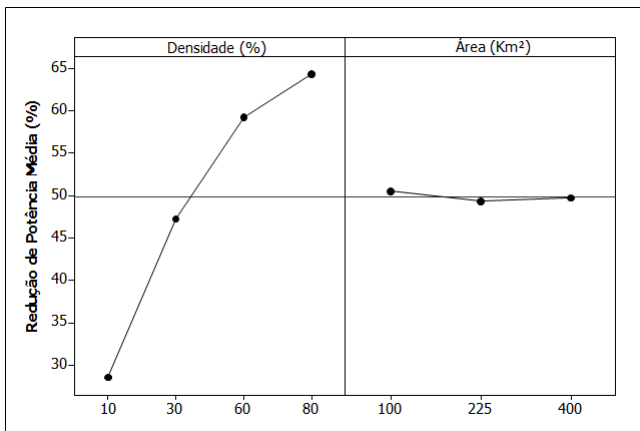


Fig. 3. Curvas da Redução de Potência Média em função da Densidade e da Área de distribuição de sensores.

O modelo obtido para o Tempo Computacional apresentou todos os fatores significativos, incluindo suas interações. Para entender a relação entre os fatores e o desempenho do algoritmo, foi gerado um gráfico com os efeitos principais para Densidade e Área (Figura 4) e outro gráfico com o impacto da respectiva interação (Figura 5). Ambas as figuras mostram

que, quanto maior a densidade de nós e o tamanho da área, maior deve ser o tempo computacional necessário para achar a rede ótima, já que existem mais rotas para serem avaliadas, o que já era esperado por um algoritmo polinomial como o algoritmo de Prim.

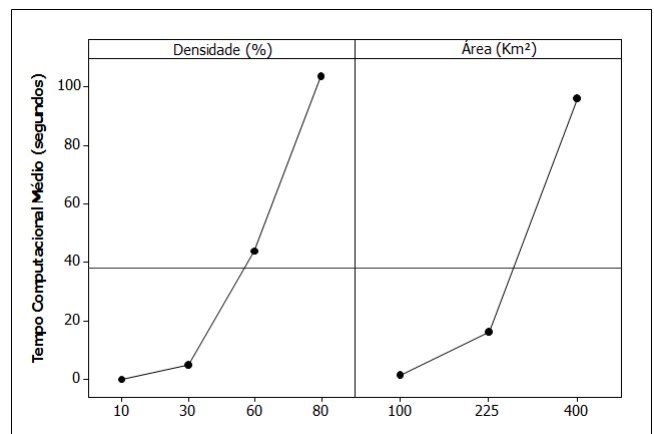


Fig. 4. Curvas do Tempo Computacional Médio em função da Densidade e da Área de distribuição de sensores.

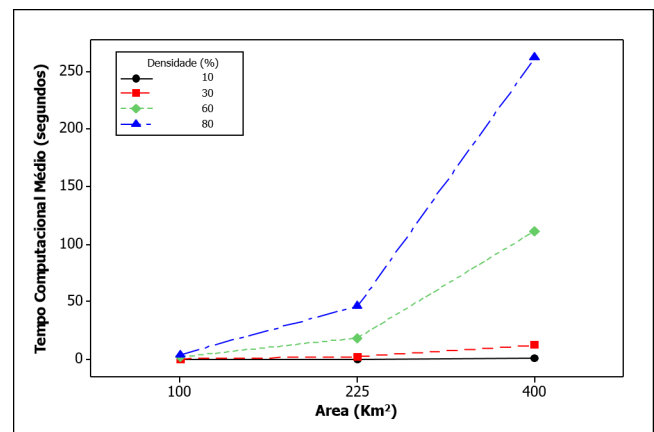


Fig. 5. Curvas do Tempo Computacional Médio em função da interação entre Densidade e Área de distribuição de sensores.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi proposto um método de controle de topologia baseado no algoritmo de Prim com o objetivo de minimizar

a potência total de uma Rede de Sensores sem Fio.

Por meio de uma análise de experimentos, diferentes cenários foram avaliados considerando variações de área e densidade de nós onde foram medidos o tempo computacional e a redução da potência total obtidos.

O algoritmo proposto atingiu reduções na potência total acima de 65% para alguns cenários. Foi possível identificar um impacto positivo no desempenho em relação à redução de potência ao aumentar a densidade de nós da rede. Por outro lado, alterações apenas na área de distribuição de sensores não mostraram-se significativas para o algoritmo.

O tempo computacional exigido pelo método proposto é fortemente impactado pelo aumento da área e/ou a densidade de nós da rede. Quanto maior a quantidade de nós em uma determinada área, maior é o tempo computacional gasto para a rede convergir.

Iterações futuras dessa pesquisa incluirão uma comparação com o método metaheurística chamado PSO, a fim de medir os ganhos de tempo de processamento e redução de potência. No entanto, outras métricas como taxas de transmissão, quantidade de saltos, e a análise de frequência poderiam ser incluídos, a fim de avaliar os seus efeitos sobre o consumo de energia e o tempo gasto. Outro ponto importante a ser avaliado são técnicas ou algoritmos para reduzir o tempo de processamento total.

AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa tem o apoio da CAPES, processo número BEX 3203/15-8. Obrigado ao INATEL pelo apoio institucional.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Asorey-Cacheda, A. J. García-Sánchez, F. García-Sánchez, J. García-Haro, and F. J. González-Castano, "On maximizing the lifetime of wireless sensor networks by optimally assigning energy supplies." *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 13, pp. 10219–10244, 2013.
- [2] N. Li, J. Hou, and L. Sha, "Design and analysis of an mst-based topology control algorithm," in *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*, vol. 3, no. C. IEEE, 2003, pp. 1702–1712.
- [3] a. a. Aziz, Y. a. Sekercioglu, P. Fitzpatrick, and M. Ivanovich, "A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 121–144, 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6177190>
- [4] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [5] T. Acharya and G. Paul, "Maximum lifetime broadcast communications in cooperative multihop wireless ad hoc networks: Centralized and distributed approaches," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 6, pp. 1667–1682, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2013.02.010>
- [6] J. Qiao, S. Liu, and W. Duan, "A topology control algorithm for sensor networks based on robust optimization," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2015, pp. 1–8, 2015.
- [7] R. C. Prim, "Shortest connection networks and some generalizations," *Bell System Technical Journal*, vol. 36, no. 6, pp. 1389–1401, 1957. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1957.tb01515.x>
- [8] S. Upadhyayula and S. K. S. Gupta, "Spanning tree based algorithms for low latency and energy efficient data aggregation enhanced convergecast (dac) in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 5, pp. 626–648, 2007.
- [9] W. M. Aioufi, G. R. Mateus, and F. P. Quint, "Optimization issues and algorithms for wireless sensor networks with mobile sink," in *International Network Optimization Conference 2007 (INOC 2007)*, 2007, pp. 1–6.
- [10] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, vol. 2. IEEE, 2000, pp. 404–413.
- [11] G. Lobão, F. A. Reis, J. D. C. Silva, L. Dias, and P. Mendes, "Particle swarm optimization implementation for minimal transmission power providing a fully- connected cluster for the internet of things," in *International Workshop on Telecommunications - IWT*. IEEE, 6 2015, pp. 1–7.
- [12] H. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
- [13] E. I. Oyman and C. Ersoy, "Overhead energy considerations for efficient routing in wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 46, no. 4, pp. 465–478, 2004.
- [14] I. Akyildiz and J. Jornet, "The internet of nano-things," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, 2010.
- [15] K.-T. Yang, W. K. Lai, S.-M. Li, and Y.-C. Lin, "Event-based clustering architecture for power efficiency in wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, no. 1, pp. 1–12, 2014.
- [16] "Scilab: Free and open source software for numerical computation," 2015. [Online]. Available: <http://www.scilab.org/>
- [17] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with rf energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, 1 2015.