

Um Método para Aumento do Tempo de Vida de Redes de Sensores Sem Fio

Lucas Jun Sakai e Dayan Adionel Guimarães

Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel. Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil.

e-mail: {lucas.sakai, dayan}@inatel.br

Abstract—Neste artigo é proposto um método para aumentar o tempo de vida de redes de sensores sem fio fixas. O método otimiza dinamicamente o que se denomina de níveis de atividade dos nós sensores, de modo que o tempo de vida da rede seja prolongado, interrupção esta causada pela descarga prematura de baterias. Os níveis de atividade são definidos de maneira que possam ter uma relação direta com o número de lacunas de um quadro de transmissão, durante as quais os nós sensores se comunicam com o nó central. Aumentos significativos do tempo de vida da rede são reportados.

Index Terms—Programação linear, redes de sensores sem fio, vida útil.

I. INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio têm sido amplamente utilizadas em diversas aplicações, tais como o monitoramento climático, em fins militares, na agropecuária, em automatização residencial, no sensoriamento industrial, em cidades inteligentes, dentre outras [1], [10]. Essas redes são compostas essencialmente por nós de sensoriamento e um nó central com o qual os outros sensores se comunicam por transmissão sem fio. O nó central recebe, de todos os nós de sensoriamento, informações dependentes da aplicação a qual se destina a rede. Como exemplo de aplicação, dentre aquelas já citadas, tem-se a utilização da rede de sensores para monitoramento sísmico em regiões de incidência de terremotos [18], [11], onde os nós de sensoriamento são previamente instalados e enviam informações relacionadas a vibração do solo para o nó central para posterior análise, ou então com o objetivo de se emitir algum alerta em caso de anormalidades. Uma aplicação interessante, porém ainda em estudo, é o uso da rede para sensoriamento corporal em aplicações na área médica, onde os nós de sensoriamento são introduzidos no corpo de um paciente para aquisição de dados relacionados à sua saúde [19]. Outra aplicação também em estudo e de grande interesse para cenário de telecomunicações é a utilização de redes de sensores sem fio no sensoriamento espectral, situação na qual os nós de sensoriamento são responsáveis por monitorar constantemente o espectro de frequência e repassar a informação para um nó central para a composição e atualização de uma base de dados que posteriormente é utilizada por rádios cognitivos no auxílio ao acesso dinâmico do espectro. Essa aplicação é a grande impulsionadora da

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Finep, com recursos do Funttel, contrato No. 01.14.0231.00, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações, Inatel, Brasil.

realização do conceito de rádios cognitivos [15], os quais são vistos como uma das potenciais soluções que farão parte do sistemas de comunicação sem fio de quinta geração (5G) [9].

Um dos principais desafios na aplicação de uma rede de sensores sem fio está relacionado ao seu limitado tempo de vida, pois em muitas aplicações os nós de sensoriamento são alimentados por baterias que não podem ser trocadas nem recarregadas [10]. Tais redes necessitam de um gerenciamento de energia em suas atividades para que o tempo de vida seja maximizado. Vários estudos já foram e estão sendo realizados com o objetivo de maximizar o tempo de vida em redes sem fio baseado em modelos de camada MAC, estratégias de roteamento, codificação de rede, controle de potência de transmissão, dentre outros, como pode ser visto em [16] e suas referências.

Este artigo também tem como objetivo a maximização do tempo de vida da rede de sensores sem fio, propondo um procedimento de otimização que controla os níveis de atividade dos sensores, os quais estabelecem o número de lacunas em um quadro de transmissão, durante as quais um sensor se comunica com o nó central. O foco da otimização é na tarefa de comunicação, que é a que mais consome energia em um nó sensor. A organização do artigo é a seguinte: a Seção II apresenta o problema e sua formulação, a Seção III tem os resultados obtidos e a Seção IV conclui o trabalho e aponta possíveis oportunidades de pesquisa.

II. DEFINIÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Considere uma rede com n sensores que possuem baterias que não podem ser trocadas ou recarregadas. A rede é controlada por um nó central com mais poder de processamento que os sensores.

O evento em que ocorre o maior gasto de energia dos sensores é quando acontece a comunicação entre os nós sensores e o nó central. É considerado que a comunicação é realizada por multiplexação por divisão no tempo em que cada sensor possui um número de lacunas temporais (do Inglês, *time-slots*) para enviar informação. Os sensores estão dispostos em posições com diferentes distâncias do nó central, resultando em potências maiores de transmissão para sensores mais distantes, ou seja, maior gasto de energia. Dado que cada sensor possui gastos de energia diferentes, o problema é encontrar valores ótimos para seus níveis de atividade, com o objetivo de prolongar o tempo de vida da rede.

O nível de atividade aqui proposto define a porcentagem de um quadro de transmissão que é utilizada por um sensor.

Como o quadro é dividido em lacunas, os níveis de atividade definem o número de lacunas que é atribuído a cada nó sensor para que se comunique. Como consequência dessa definição, se um nível de atividade baixo é atribuído a um nó sensor, esse nó deve se comunicar menos com o nó central.

Antes da formulação do problema de otimização, alguns parâmetros devem ser definidos. O evento discreto de otimização $t = 1, 2, \dots, N$ é associado a um quadro que contém um certo número de lacunas temporais. O valor de N representa o horizonte de otimização, que contém N quadros, e é associado ao intervalo durante o qual a otimização é executada. Em uma rede real o parâmetro N não é especificado, já que a otimização ocorre durante todo o tempo de vida da rede. O vetor contendo a capacidade de energia máxima das baterias de todos os sensores é $\mathbf{e}_{\max} \in \mathbb{R}^n$. O vetor contendo a energia disponível para todos os sensores em cada evento de otimização é $\mathbf{e}(t) \preceq \mathbf{e}_{\max} \in \mathbb{R}^n$, com \preceq especificado como não-igualdade elemento a elemento. As energias que todos os sensores gastam ao transmitir, se estão operando a 100% de seus níveis de atividade, são dadas pelo vetor $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$. A principal variável do problema de otimização é composta pelos níveis de atividade para todos os sensores em cada evento de otimização, e é definida como o vetor $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T$, com $[\]^T$ representando transposição.

A função objetivo que deve ser maximizada no problema de otimização é definida como sendo a soma dos níveis de atividade de todos os sensores em um dado evento de otimização, ou seja,

$$f_0[\mathbf{x}(t)] = \mathbf{1}^T \mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t), \quad (1)$$

em que $\mathbf{1}$ é um vetor com n elementos unitários.

As restrições do problema de otimização também devem ser definidas. Para cada evento de otimização t , os níveis de atividade dos sensores devem ser não negativos, ou seja, $\mathbf{x}(t) \succeq 0$. Os níveis de atividade também devem ser limitados, ou seja $\mathbf{x}(t) \preceq \mathbf{p}(t)$, com $\mathbf{p}(t) \in \mathbb{R}^n$ configurado para representar a porcentagem de energia disponível na bateria que cada sensor pode gastar. Quando a bateria está carregada completamente o limite é de 1, o que quer dizer que o nível de atividade pode atingir 100%; quando a bateria está a 50% de sua capacidade total, o limite é de 0.5, o que quer dizer que o nível de atividade pode atingir 50%. Por esta definição, tem-se que

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{e}(t) \circ \frac{1}{\mathbf{e}_{\max}}, \quad (2)$$

em que o símbolo \circ representa o produto de Hadamard (multiplicação elemento a elemento). É bom notar que somente $\mathbf{p}(1)$ é um parâmetro de entrada, pois para $t > 1$, $\mathbf{p}(t)$ é dinamicamente modificado pelo processo de otimização, de acordo com as variações da energia disponível $\mathbf{e}(t)$. Além das restrições já mencionadas, para cada evento de otimização t a soma dos níveis de atividade deve ser limitada a 100% das lacunas do quadro de transmissão, ou seja $\mathbf{1}^T \mathbf{x}(t) \leq 1$. A última restrição é expressa por $\mathbf{s}(t) = \mathbf{e}(t) - \mathbf{b} \circ \mathbf{x}(t)$, sendo $\mathbf{s}(t) \succeq 0 \in \mathbb{R}^n$ a energia em excesso ao final de cada

evento de otimização t . A energia disponível para um evento de otimização é a energia em excesso do evento anterior, ou seja, $\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(t-1)$. Para o primeiro evento $t = 1$, as energias disponíveis em $\mathbf{e}(1)$ são os níveis de carga inicial das baterias, que não são necessariamente iguais entre si.

Agrupando todas as definições apresentadas até este ponto, tem-se o seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} &\text{maximizar} && f_0 = \mathbf{1}^T \mathbf{x}(t), \quad t = 1, 2, \dots, N \\ &\text{sujeito a} && \mathbf{x}(t) \succeq 0 \\ &&& \mathbf{x}(t) \preceq \mathbf{s}(t-1) \circ (1/\mathbf{e}_{\max}) \\ &&& \mathbf{s}(t) = \mathbf{s}(t-1) - \mathbf{b} \circ \mathbf{x}(t) \\ &&& \mathbf{s}(t) \succeq 0 \\ &&& \mathbf{1}^T \mathbf{x}(t) \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Este é um problema de otimização linear, às vezes denotado por Programa Linear (do Inglês, *linear program*, LP) [2]. As variáveis de otimização são $\mathbf{x}(t)$ e $\mathbf{s}(t)$, $t = 1, \dots, N$, sendo que $\mathbf{s}(t)$ é uma variável de folga (do Inglês, *slack variable*), associada à restrição $\mathbf{s}(t) = \mathbf{e}(t) - \mathbf{b} \circ \mathbf{x}(t)$. Os parâmetros de entrada são o número de sensores n , o intervalo de análise definido pelo número de eventos N , o nível máximo de energia das baterias \mathbf{e}_{\max} , a energia inicial das baterias $\mathbf{e}(1)$ e as energias de consumo representadas por \mathbf{b} .

Na prática, admite-se que o problema de otimização (3) deva ser resolvido para cada t em um nó central com mais capacidade de processamento do que um nó de sensoriamento. Os níveis de atividade encontrados com a otimização, são subsequentemente informados aos nós de sensoriamento. As energias em excesso no final do evento de otimização devem ser informadas ao nó central, já que elas serão utilizadas como parâmetros de entrada para o próximo evento de otimização. Se outro parâmetro de entrada for adicionado ao modelo, e este variar de um evento para outro, o nó central deve ser informado. Note que o problema de otimização (3) é flexível o suficiente para considerar essas variações, e que a quantidade de tráfego de controle relacionado a essas variações, que são trocadas entre o nó central e os nós sensores, é diretamente proporcional ao número de parâmetros que variam com t .

Vale mencionar que um Programa Linear é a forma mais simples entre todos os problemas de otimização convexa [2], e que algoritmos para sua solução são maduros o suficiente para prover resultados extremamente precisos em pouco tempo de processamento. No caso do problema de otimização em questão, mesmo altos valores de n não representam um fator limitante para soluções rápidas e precisas de (3).

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Foram aqui considerados dois casos no que se refere à energia que todos os sensores gastam se estão trabalhando a 100% de seus níveis de atividade: um considera consumos diferentes e outro admite consumo igual por todos os nós sensores. Nos dois casos o problema de otimização (3) foi resolvido com a utilização do CVX, que é um sistema que utiliza o ambiente do Matlab para modelagem e solução de problemas de otimização convexa. O código desenvolvido para este artigo em CVX com suas funções principais é apresentado como Apêndice ao final do artigo.

O número de nós sensores escolhido foi de $n = 7$, para não poluir desnecessariamente os gráficos. As conclusões obtidas a partir da análise desses gráficos se aplicam, portanto, a redes de sensores com mais nós. A capacidade máxima de energia das baterias foi de $e_{\max} = 1000$. A energia inicial nos sensores foi gerada aleatoriamente tal que $900 \preceq e(0) \preceq 1000$, e simula uma rede onde todos os nós sensores estão com as baterias quase que totalmente carregadas. No primeiro caso, a energia que todos os sensores gastam se estão trabalhando a 100% de seus níveis de atividade foi aleatoriamente gerada, mas mantida fixa para todos os eventos de otimização, tal que $0 \preceq \mathbf{b} \preceq 300$. Para o segundo caso, $\mathbf{b} = 100$ para todo t . Deve-se lembrar que a energia gasta é considerada fixa em cada evento t , já que se admitiu que os sensores estão em posições fixas no ambiente físico. O primeiro caso representa uma rede disposta aleatoriamente, com diferentes distâncias entre os nós sensores e o nó central. Já o segundo simula nós sensores que possuem a mesma distância até o nó central.

Os valores e intervalos para os parâmetros foram escolhidos para que a rede otimizada seja comparado de forma justa com a rede não otimizada em termos de níveis de atividade e tempo de vida da rede. Os valores relativos entre os parâmetros foram escolhidos para gerar resultados compatíveis com uma rede real. Sem perda de generalidade, os valores absolutos dos parâmetros foram selecionados para forçar a morte da rede em valores de N não muito grandes, evitando que a simulação processe desnecessariamente horizontes de otimização muito longos.

Considera-se como o tempo de vida da rede o intervalo durante o qual todos os sensores estão em operação. Assim, o instante em que um sensor falha com alta probabilidade ou interrompe seu funcionamento completamente define o tempo de vida da rede. Esta consideração é adotada em várias referências, como exemplo em [3], [4], [5], [6], [7], [8], [12], [14], [17] e [17]. Como consequência, partindo de $t = 0$, define-se como tempo de vida da rede o instante t no qual um nível mínimo de energia de referência é alcançado por algum sensor. Este nível de energia de referência é aqui denominado de energia de morte, que na prática é totalmente dependente das características de funcionamento dos nós sensores e da bateria utilizada.

Para efeitos de comparação se estabelece uma rede de referência sem a otimização, porém utilizando-se dos valores de níveis de atividade encontrados para a rede otimizada. Para esta rede de referência utilizam-se os níveis de atividade $x'(t)$ computados pela média de todos os níveis de atividade em todos os sensores, em todos os eventos, ou seja,

$$x'_i(t) = \frac{1}{nN} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^N x_k(j) \quad (4)$$

para $t = 1, 2, \dots, N$, e $i = 1, 2, \dots, n$. Deve-se notar que todos níveis de atividade da rede não otimizada possuem o mesmo valor para todos os sensores, em todo o horizonte de eventos. Com isto é possível afirmar que a energia excedente da rede não otimizada decresce de forma linear, com taxa de decremento dependente apenas do parâmetro \mathbf{b} .

Os resultados da simulação para $0 \preceq \mathbf{b} \preceq 300$ podem ser observados nas Figuras 1 e 2. Para a simulação com $\mathbf{b} = 100$, os resultados são mostrados nas Figuras 3 e 4. Os níveis de atividade para cada sensor dentro do horizonte de análise são apresentados nas Figuras 1 e 3, nas quais as linhas sólidas estão associadas à rede otimizada e as linhas tracejadas referem-se à rede não otimizada. Nas Figuras 2 e 4 são apresentadas as energias disponíveis para cada sensor em cada evento t , dentro do intervalo de análise. Cada parâmetro de entrada foi gerado aleatoriamente, dentro do intervalo pré-estabelecido, com exceção dos valores de \mathbf{b} para a segunda simulação. Os valores aleatórios das energias iniciais gerados para ambas as simulações foram $e(0) = [942 \ 994 \ 976 \ 964 \ 917 \ 998 \ 995]^T$. Os valores de energia gasta para a primeira simulação foram $\mathbf{b} = [249 \ 105 \ 80 \ 105 \ 164 \ 135 \ 211]^T$. O comportamento dinâmico dos níveis de atividade da rede otimizada pode ser observado nas Figuras 1 e 3.

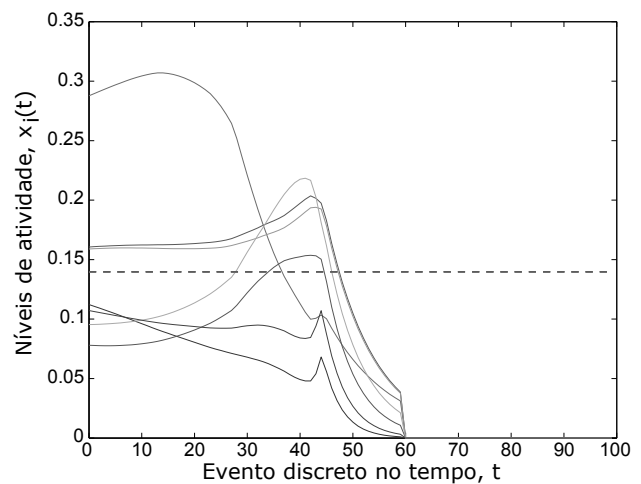


Fig. 1. Níveis de atividade para $0 \preceq \mathbf{b} \preceq 300$. Rede otimizada (linhas sólidas), rede não otimizada (linha tracejada).

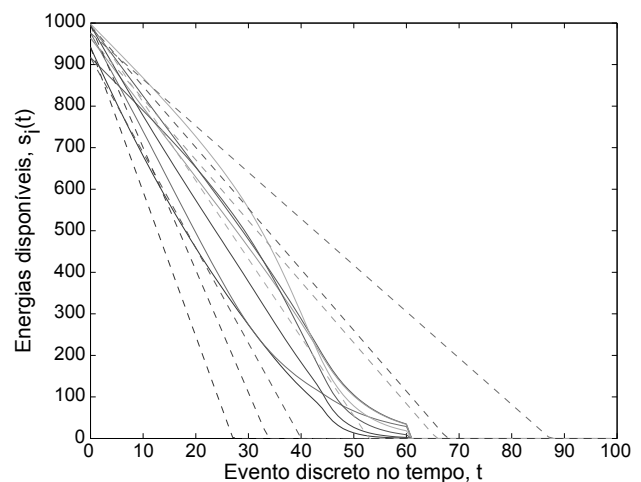


Fig. 2. Energias disponíveis para $0 \preceq \mathbf{b} \preceq 300$. Rede otimizada (linhas sólidas), rede não otimizada (linhas tracejadas)

Utilizando como referência o nó sensor que primeiro atinge

o nível de energia de morte de 25 (morte da rede em 2.5%, ou seja, quando a energia disponível em um nó sensor $s_i(t) = 25$), pode-se verificar por meio das Figuras 2 e 4 que a rede otimizada pode ter o tempo de vida da rede prolongado significativamente em relação à rede não otimizada. Especificamente, para $0 \leq b \leq 300$ (Figura 2), o instante de morte da rede não otimizada está próximo ao evento $t = 26$, enquanto na rede otimizada está próximo ao evento $t = 47$, situação essa que representa um aumento de aproximadamente 80% no tempo de vida. Neste caso fica clara a vantagem da rede otimizada sobre a rede não otimizada. A situação em que o tempo de vida da rede não otimizada mais se aproxima da rede otimizada ocorre quando o consumo de energia dos sensores é o mesmo, conforme ilustrado na Figura 4 para $b = 100$. Neste caso a rede não otimizada tem o instante de morte próximo ao evento $t = 70$, enquanto na rede otimizada este instante fica em torno do evento $t = 73$, o que representa um ganho de apenas 4%, aproximadamente. Outras simulações foram executadas diversas vezes para ambos os casos aqui considerados, porém com outros valores dos parâmetros de interesse, tendo apresentado resultados similares.

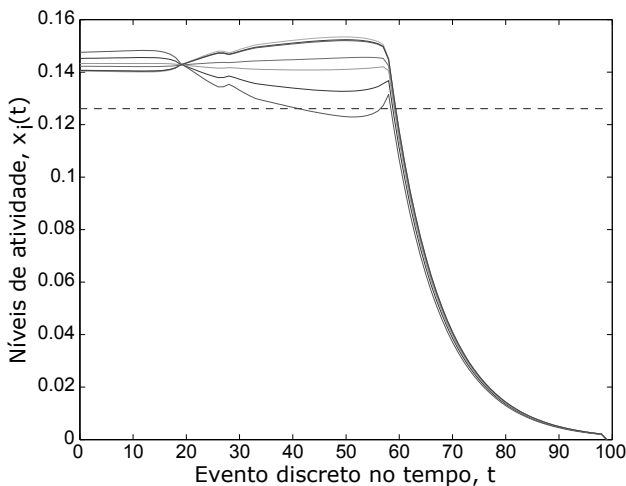


Fig. 3. Níveis de atividade para $b = 100$. Rede otimizada (linhas sólidas), rede não otimizada (linha tracejada).

IV. CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES

Neste artigo foi apresentado um novo método para estender o tempo de vida de uma rede de sensores disposta fisicamente de maneira fixa. O método otimiza dinamicamente os níveis de atividade de cada nó sensor de modo que a interrupção de sua operação ocorra momentos após a interrupção da operação de uma rede de sensores com níveis de atividade não otimizados. Os níveis de atividade estão relacionados com o número de lacunas em um dado quadro de transmissão durante os quais os nós sensores podem se comunicar com o nó central. Em vários casos nas simulações, um ganho expressivo no tempo de vida da rede foi identificado, se comparado com uma rede sem otimização de níveis de atividade. Em casos onde a energia inicial possui uma dispersão maior, os resultados da rede otimizada são ainda melhores, com algumas das simulações chegando a mais de 100% de ganho em relação à rede não

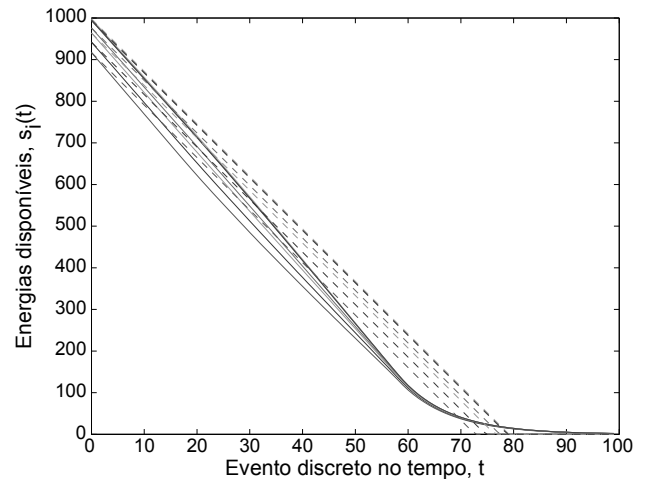


Fig. 4. Energias disponíveis para $b = 100$. Rede otimizada (linhas sólidas), rede não otimizada (linhas tracejadas).

otimizada. A aplicação do método em uma rede real é atrativa, mas deve ser considerado que além da informação de sensoriamento que é enviada pelos nós sensores, também deverá ser enviada a informação contendo dados para a otimização. No entanto, o volume adicional de dados é pequeno.

Para estudos futuros o modelo aqui proposto pode ser adaptado para atender uma rede móvel de sensores sem fio, variando-se o valor de b em função de cada evento t . Outra adaptação seria o acréscimo de um sistema de recarga de energia nos nós sensores como descrito em [13]. Mais modificações podem ser realizadas no modelo para contemplar outras tarefas executadas pelo sensor, como retransmissão de pacotes, roteamento de pacotes, dentre outras.

REFERÊNCIAS

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422, March 2002.
- [2] S.P. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [3] Jae-Hwan Chang and L. Tassiulas. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 1, pages 22–31 vol.1, 2000.
- [4] Jae-Hwan Chang and L. Tassiulas. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 12(4):609–619, August 2004.
- [5] Yunxia Chen and Qing Zhao. On the lifetime of wireless sensor networks. 9(11):976–978, November 2005.
- [6] Zhao Cheng, M. Perillo, and W.B. Heinzelman. General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies. 7(4):484–497, April 2008.
- [7] Antonio Damaso, Nelson Rosa, and Paulo Maciel. Reliability of wireless sensor networks. *Sensors*, 14(9):15760, 2014.
- [8] Isabel Dietrich and Falko Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 5(1):1–39, February 2009.
- [9] Xuemin Hong, Jing Wang, Cheng-Xiang Wang, and Jianghong Shi. Cognitive radio in 5G: a perspective on energy-spectral efficiency trade-off. *Communications Magazine, IEEE*, 52(7):46–53, July 2014.
- [10] S. Khan, A.S.K. Pathan, and N.A. Alrajeh. *Wireless Sensor Networks: Current Status and Future Trends*. Taylor & Francis, 2012.
- [11] R. Lopes Pereira, J. Trindade, F. Gonçalves, L. Suresh, D. Barbosa, and T. Vazão. A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(12):3123–3142, 2014.

- [12] Nok Hang Mak and W.K.G. Seah. How long is the lifetime of a wireless sensor network? In *Advanced Information Networking and Applications, 2009. AINA '09. International Conference on*, pages 763–770, May 2009.
- [13] David L. Mascarenas, Eric B. Flynn, Michael D. Todd, Timothy G. Overly, Kevin M. Farinholt, Gyuhae Park, and Charles R. Farrar. Experimental studies of using wireless energy transmission for powering embedded sensor nodes. *Journal of Sound and Vibration*, 329(12):2421 – 2433, 2010. Structural Health Monitoring Theory Meets Practice.
- [14] Xiang Min, Shi Wei-ren, Jiang Chang-jiang, and Zhang Ying. Energy efficient clustering algorithm for maximizing lifetime of wireless sensor networks. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 64(4):289 – 298, 2010.
- [15] J. Mitola III and G. Q. Maguire Jr. Cognitive radio: making software radios more personal. 6(4):13–18, August 1999.
- [16] A. R. Pinto, L. Bolzani Poehls, C. Montez, and F. Vargas. *Power Optimization for Wireless Sensor Networks*, chapter 2, pages 23–50. InTech, 2012.
- [17] J. Ren, Y. Zhang, K. Zhang, A. Liu, J. Chen, and X. Shen. Lifetime and energy hole evolution analysis in data-gathering wireless sensor networks. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, PP(99):1–1, 2015.
- [18] B. Weiss, H. L. Truong, W. Schott, A. Munari, C. Lombriser, U. Hunkeler, and P. Chevillat. A power-efficient wireless sensor network for continuously monitoring seismic vibrations. In *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on*, pages 37–45, June 2011.
- [19] Zhaoyang Zhang, Jingfang Huang, Honggang Wang, and Hua Fang. Power control and localization of wireless body area networks using semidefinite programming. In *Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous HealthCare (Ubi-HealthTech), 2015 2nd International Symposium on*, pages 1–5, May 2015.

APÊNDICES

Nestes apêndices é fornecido o código em Matlab para a resolução do problema de otimização (3). O código principal está no Apêndice A e as funções utilizadas pelo código principal estão nos Apêndices B-E.

A. Código principal

```
clear all; close all; clc; format long;
%% Parâmetros de entrada
N = 100; % Horizonte de eventos, intervalo de
% análise
n = 7; % Número de sensores
e_max = 1000; % Capacidade de energia da bateria
b_max = 300; % Consumo de energia estimado se o
% sensor usar 100% das lacunas
e_er = 0.1; % Porcentagem de variação da energia
% inicial das baterias
b_er = 1; % Porcentagem de variação da energia
% de consumo
e_ref = 25; % Energia de morte
%% Loop de simulação
% Geração de valores aleatórios
[e_0 b] = GV(n,N,e_max,e_er,b_max,b_er);
% Níveis de atividade otimizados
[s_opt x_opt] = WSNALP(n,N,e_max,e_0,b);
Pos = N*ones(1,n);
for i = 1:n
tmp = find( (s_opt(:,i) <= e_ref), 1);
if isempty(tmp) == 0
Pos(1,i) = tmp;
end
end
t_death = min(Pos(1,:));
% Níveis de atividade não otimizados
[s_eu x_eu] = WSNALP(n,N,t_death,x_opt,e_0,b);
saveData(n,'EnergiaDisponivel_opt',s_opt);
saveData(n,'NivelAtividade_opt',x_opt);
saveData(n,'EnergiaDisponivel_notp',s_eu);
saveData(n,'NivelAtividade_notp',x_eu);
%% Gráficos
t = 1:N; t2 = 0:N-1; figure(1);
```

```
plot(t2,x_opt(t,:)); hold on; %grid on;
plot(t2,x_eu(t,:), '--');
title('Níveis de atividade');
xlabel('Evento discreto no tempo, t');
ylabel('Níveis de atividade, x_i(t)');
figure(2);
plot(t2,s_opt(t,:)); hold on; %grid on;
plot(t2,s_eu(t,:), '--');
title('Energias disponíveis');
xlabel('Evento discreto no tempo, t');
ylabel('Energias disponíveis, s_i(t)');
ylim([0 e_max]);
```

B. Função WSNALP

```
function[s x]=WSNALP(n,N,e_max,e_0,b)
%% Matriz de inicialização
x = zeros(N,n); s = zeros(N,n); s(1,:) = e_0;
%% Sistema com otimização
for t = 1:N-1
p = (s(t,:)/e_max);
cvx_begin quiet
variables x_cvx(1,n) s_cvx(1,n);
maximize sum(x_cvx)
subject to
x_cvx >= 0; x_cvx <= p;
s_cvx == s(t,:) - b.*x_cvx;
s_cvx >= 0;
sum(x_cvx,2) <= 1;
cvx_end
x(t,:) = x_cvx;
s(t+1,:) = s_cvx;
if( max(s(t+1,:) <= 1) ) % Salva processamento
break;
end
end
```

C. Função WSNALP

```
function[s x]=WSNALE(n,N,t_death,x_opt,e_0,b,r)
%% rede sem otimização
% Diluição dos níveis de atividade
x = sum(sum(x_opt(1:t_death,:)))/...
(t_death*n)*ones(N,n);
s = zeros(N,n);
s(1,:) = e_0;
for t = 1:N-1
s(t+1,:) = s(t,:) - b.*x(t,:);
for i = 1:n % Limita energia a zero
if(s(t+1,i) <= 0)
s(t+1,i) = 0;
end
end
end
```

D. Função GV

```
function[e_0 b]=GV(n,N,e_max,e_er,b_max,b_er)
%% Inicialização de vetores
e_0 = e_max*ones(1,n); % Energ. iniciais
b = b_max*ones(1,n); % Energ. de consumo
%% Valores aleatórios
e_0 = e_0 - e_0.*rand(1,n)*e_er;
b = b - b.*rand(1,n)*b_er;
%% Salva valores em arquivo
saveData(n,'Initial',e_0); saveData(n,'Consume',b);
```

E. Função saveData

```
function saveData(n,name,data)
for i = 1:n % Contador de sensor
sen = int2str(i);
fid = fopen(cat(2,name,'_s',sen,'.dat'),'a');
for t = 1:size(data,1) % Contador de evento
fprintf(fid,'%g\t',data(t,i));
end
fprintf(fid,'\n'); fclose(fid);
end
```