

Aumento do Tempo de Vida de
Redes Móveis de Sensores sem Fio
via Otimização Convexa

LUCAS JUN SAKAI

DEZEMBRO/ 2016

**Aumento do Tempo de Vida de Redes
Móveis de Sensores sem Fio via Otimização Convexa**

LUCAS JUN SAKAI

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães.

Sakai, Lucas Jun

S1584a

Aumento do tempo de vida de redes móveis de sensores sem fio via otimização convexa. / Lucas Jun Sakai. – Santa Rita do Sapucaí, 2016. 92 p.

Orientador: Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães.

Dissertação de Mestrado – Engenharia de Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia e anexo.

1. Captação de energia 2. Otimização convexa 3. Otimização de tempo de vida 4. Rede de sensores sem fio 5. Transmissão de energia sem fio 6. Engenharia de Telecomunicações. I. Guimarães, Dayan Adionel II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em ____/____/____,
pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães (Orientador)
INATEL

Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho
PUC Campinas

Prof. Dr. Alexandre Baratella Lugli
INATEL

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

“O homem sábio é poderoso, e quem tem conhecimento aumenta sua força; quem sai a guerra precisa de orientação, e com muitos conselheiros se obtém a vitória.”

Provérbios 24,5-6

À minha família

Agradecimentos

Agradeço aos meu pais, Júlio Sakai e Nádia Pereira Sakai, que não mediram esforços para que eu chegasse até onde estou hoje, sempre me apoiando e orientando pelas etapas de minha vida.

Aos demais familiares, em especial minha irmã Lidiane e meu irmão Gabriel.

Também agradeço a minha querida noiva Elaine Mariana, por ter paciência, e por me incentivar em momentos de preocupação.

À meu orientador, Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães, pelo auxílio nos estudos, pela paciência nos momentos que tive dificuldade, pelo profissionalismo na orientação e pelo grande incentivo para que este trabalho pudesse ser concluído.

Aos Prof. Dr Rausley Adriano Amaral de Souza e Prof. Dr Antonio Marcos Alberti que deram apoio e não mediram esforços nas revisões e interpretações do trabalho.

Aos demais professores e profissionais do mestrado e graduação, por todo o conhecimento adquirido ao longo destes anos.

Aos profissionais da secretaria de pós-graduação do Inatel, em especial à Gisele Moreira dos Santos por todo o auxílio prestado a mim e aos demais alunos de mestrado.

Aos colegas de trabalho do Laboratório de Hardware e Software Embarcado do Inatel Competence Center, que enfrentaram e enfrentam desafios diários comigo, e que me aconselharam durante os estudos do mestrado.

Às instituições que financiaram este trabalho, como a Finep, com recursos do Funtel, contrato No. 01.14.0231.00, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Brasil, e também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Índice

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Resumo	xix
Abstract	xxi
1 Introdução	1
1.1 Redes móveis de sensores sem fio	1
1.2 Trabalhos relacionados	2
1.3 Contribuições	6
1.4 Organização da dissertação	7
1.5 Publicações	8
2 Fundamentos	9
2.1 Otimização convexa	9
2.2 CVX	10
3 Formulação e solução do problema	11
3.1 Formulação do problema	13
3.2 Solução do problema	21

4	Resultados numéricos	27
4.1	Influência dos parâmetros do sistema	28
4.1.1	Efeitos das ponderações da função objetivo	28
4.1.2	Efeito do intervalo de otimização e da mobilidade de nós . . .	33
4.1.3	Efeito da recarga e de energias iniciais diferentes	36
4.1.4	Efeito da densidade de nós	39
4.2	Complexidade de tempo	43
5	Conclusões e Propostas para Novas Pesquisas	47
	Referências Bibliográficas	51
A	Código fonte no MATLAB[®]-CVX	57

Lista de Figuras

3.1	Topologia de uma rede móvel sem fio. Os nós sensores móveis dentro da área de cobertura são os que podem ter links diretos com o nó central móvel. Outros sensores se comunicam com o nó central por meio de múltiplos saltos.	11
3.2	Topologia de rede móvel sem fio adotada. Os nós sensores e o nó central são móveis e possuem a arquitetura estrela.	12
3.3	Estrutura do método de otimização onde são alocados os níveis de atividade dos nós sensores móveis.	14
3.4	Representação ilustrando a aleatoriedade dos consumos de energia durante o k -ésimo bloco de $F = 5$ quadros para o n -ésimo nó sensor. . .	18
3.5	Representação ilustrando os máximos consumos de energia de cinco sensores durante 100 quadros, para $\rho = 0.999$ representando baixa mobilidade (a) e $\rho = 0.98$ representando alta mobilidade (b) , para $B_{\min} = 0.1$ e $B_{\max} = 5$	20
3.6	Linha do tempo ilustrando a operação do Algoritmo 1.	25
4.1	Energias residuais obtidas no método proposto para $(w_1, w_2) = (1, 0)$. A rede não otimizada é considerada em todos os gráficos como referência.	29
4.2	Energias residuais obtidas no método proposto para $(w_1, w_2) = (0, 1)$. A rede não otimizada é considerada em todos os gráficos como referência.	30

4.3	Energias residuais obtidas no método proposto para $(w_1, w_2) = (1, 2)$. A rede não otimizada é considerada em todos os gráficos como referência.	31
4.4	Níveis de atividade atribuídos pelo método proposto referente as situações consideradas na Figura 4.1, i.e. $(w_1, w_2) = (1, 0)$	32
4.5	Níveis de atividade atribuídos pelo método proposto referente as situações consideradas na Figura 4.2, i.e. $(w_1, w_2) = (0, 1)$	32
4.6	Níveis de atividade atribuídos pelo método proposto referente as situações consideradas na Figura 4.3, i.e. $(w_1, w_2) = (1, 2)$	33
4.7	Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$, para $F = 5$ e $\rho = 0.98$. A rede não otimizada é considerada como referência.	34
4.8	Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$, para $F = 10$ e $\rho = 0.98$. A rede não otimizada é considerada como referência.	34
4.9	Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$, para $F = 20$ e $\rho = 0.98$. A rede não otimizada é considerada como referência.	35
4.10	Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$, para $F = 5, 10, 20$ e $\rho = 0.999999$. A rede não otimizada é considerada como referência.	35
4.11	Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$ (a) e $(w_1, w_2) = (0, 1)$ (b) com recarga e energias iniciais diferentes. A rede não otimizada é considerada como referência.	37
4.12	Energias residuais (a) e níveis de atividade (b) do método de otimização proposto para $(w_1, w_2) = (1, 0)$, com recarga em $t = t_r = 184$ e energias iniciais diferentes. A rede não otimizada é considerada no gráfico (a) como referência.	38

-
- 4.13 Energias residuais obtidas no método proposto para $(w_1, w_2) = (1, 0)$, $F = 10$, $B_{\min} = 0.001$ e $\rho = 0.98$, com $N = 10$ e $B_{\max} = 0.1$ **(a)**, e $N = 100$ e $B_{\max} = 1$ **(b)**. A rede não otimizada é considerada como referência. 42
- 4.14 Curva de crescimento do tempo de processamento em relação ao número de nós sensores da rede. 44

Lista de Tabelas

4.1	Resumo de resultados apresentados. O instante de morte da rede otimizada é t_d e o instante de morte para rede não otimizada é t'_d	43
4.2	Complexidade de tempo empírica média do método de otimização para prolongamento no tempo de vida proposto. A coluna da direita mostra a ordem de crescimento a	45

Lista de Siglas

IEC	- Informação de Estado de Canal
IER	- Informação de Energia Residual
IoT	- <i>Internet of Things</i>
LPHND	- <i>Location-wise Pre-determined Heterogeneous Node Deployment</i>
LPHNDE	- <i>Location-wise Pre-determined Heterogeneous Node Deployment with Error</i>
MAC	- <i>Medium Access Control</i>
PSO	- <i>Particle Swarm Optimization</i>
QoS	- <i>Quality of Service</i>
RC	- Rádio Cognitivo
RNDGD	- <i>Relay Node Deployment with a Gaussian Distribution</i>
RMSSF	- Rede Móvel de Sensores Sem Fio
RSSF	- Rede de Sensores Sem Fio
SENMA	- <i>Sensor Network With Mobile Access</i>
TDMA	- <i>Time-Division Multiple Access</i>
WBAN	- <i>Wireless Body Area Network</i>

Lista de Símbolos

$\mathbf{0}$	- Vetor N -dimensional com todos elementos iguais a zero
$\mathbf{1}$	- Vetor unitário N -dimensional
$\mathbf{1}^T$	- Vetor transposto de $\mathbf{1}$
a	- Constante de potência
$\mathbf{B}(k)$	- Matriz de máximo consumo dos sensores no evento k
$\mathbf{b}_f(k)$	- Vetor de máximo consumo dos sensores do quadro f no evento k
B_{\max}	- Consumo de energia máximo da rede
B_{\min}	- Consumo de energia mínimo da rede
C	- Constante de proporcionalidade
D	- Densidade da rede
d	- Distância de análise
d_{\max}	- Distância máxima do nó sensor ao nó central
d_{\min}	- Distância mínima do nó sensor ao nó central
d_0	- Distância de referência
F	- Número de quadros em um evento de otimização
f	- Quadro de transmissão
k	- Evento de otimização
K	- Número de eventos de otimização
\max	- Função de máximo valor
n	- Índice dos sensores
N	- Número de sensores que compões a rede
$\mathcal{O}(N^a)$	- Complexidade polinomial de tempo

-
- $P_{\text{ref}}(d_0)$ - Potência de referência referente a distância d_0
 P_{target} - Potência alvo de sinal recebido no nó central
 $\mathbf{R}(k)$ - Matriz de recarga de energia dos sensores no evento k
 $\mathbf{r}_f(k)$ - Vetor de recarga de energia dos sensores do quadro f no evento k
 $\mathbf{S}(k)$ - Matriz de energia residual dos sensores no evento k
 $\mathbf{s}_f(k)$ - Vetor de energia residual dos sensores do quadro f no evento k
 S_{max} - Capacidade de energia máxima das baterias
 s_d - Energia de morte
 t - Índice dos eventos de otimização
 t_r - Instante de recarga
 t_d - Instante de morte da rede
 $w_1 \geq 0$ - Função de ponderação da função objetivo
 $w_2 \geq 0$ - Função de ponderação da função objetivo
 $\mathbf{X}(k)$ - Matriz de níveis de atividade dos sensores no evento k
 $\mathbf{X}'(k)$ - Matriz de níveis de atividade idênticos dos sensores no evento k
 $\mathbf{x}_f(k)$ - Vetor de níveis de atividade dos sensores do quadro f no evento k
 \circ - Produto de Hadamard, multiplicação elemento por elemento
 η - Expoente de perda
 ρ - Coeficiente de correlação
 \asymp - Não igualdade elemento por elemento

Resumo

Sakai, L. J., Aumento do Tempo de Vida de Redes Móveis de Sensores sem Fio via Otimização Convexa [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2016.

Nesta dissertação, é descrito um método simples e flexível para prolongar o tempo de vida de redes fixas ou móveis de sensores sem fio. Baseado em informações passadas de energia residual reportadas pelos nós sensores, um nó central otimiza dinamicamente os níveis de atividade de comunicação dos nós sensores para economizar energia sem sacrificar a vazão de dados. Os níveis de atividade são definidos para representar porções de lacunas no tempo ou tempo-frequência em um quadro de transmissão, no qual os nós sensores são agendados para comunicar-se com o nó central para reportar medidas de sensoriamento. Além da mobilidade dos nós, é considerado que as baterias dos sensores podem ser recarregadas por transmissão de energia sem fio ou um esquema equivalente de captação de energia, incluindo no problema de otimização uma variável ainda mais dinâmica. Resultados com grande aumento no tempo de vida em relação a uma rede não otimizada são apresentados.

Palavras-chave: Captação de energia; otimização convexa; otimização de tempo de vida; rede de sensores sem fio; transmissão de energia sem fio.

Abstract

Sakai, L. J., Aumento do Tempo de Vida de Redes Móveis de Sensores sem Fio via Otimização Convexa [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2016.

In this dissertation, a simple and flexible method for increasing the lifetime of fixed or mobile wireless sensor networks is presented. Based on past residual energy information reported by the sensor nodes, the central node dynamically optimizes the communication activity levels of the sensor nodes to save energy without sacrificing the data throughput. The activity levels are defined to represent portions of time or time-frequency slots in a frame, during which the sensor nodes are scheduled to communicate with the sink node to report sensory measurements. Besides node mobility, it is considered that sensors' batteries may be recharged via a wireless power transmission or equivalent energy harvesting scheme, bringing to the optimization problem an even more dynamic character. It is report large increased lifetimes over the non-optimized network.

Keywords: Convex optimization; energy harvesting; lifetime optimization; mobile wireless sensor network; wireless power transmission.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Redes móveis de sensores sem fio

A presença de nós centrais móveis, sensores móveis, ou ambos em uma rede de sensores sem fio (RSSF) caracteriza uma rede móvel de sensores sem fio (RMSSF) [1, 2]. Uma RMSSF tem topologia dinâmica, e por esta razão ela possui uma série de restrições para o projeto do sistema, como por exemplo, no que diz respeito aos protocolos de roteamento e de acesso ao meio (*MAC - Medium Access Control*). Adicionalmente, os enlaces de comunicação podem se tornar não confiáveis enquanto os componentes da rede se movem, trazendo restrições para as estratégias de controle de qualidade de serviço (*QoS - Quality of Service*). Além disso, a determinação da localização ótima dos nós sensores para máxima eficiência energética também torna-se um problema em redes móveis. No entanto, a mobilidade traz não só problemas e restrições para as RMSSFs. Ela pode ser explorada para melhorar a cobertura, aumentar o tempo de vida da rede e para lidar com o controle de energia [2]. O gerenciamento de energia é uma questão importante a ser considerada, uma vez que a maioria das redes de sensores tem seu tempo de vida prolongado se a energia residual limitada dos nós sensores pudesse ser salva de alguma maneira.

As aplicações para RMSSFs incluem as típicas de RSSFs, como monitoramento

ambiental, vigilância militar, casas inteligentes, monitoramento da saúde, controle de manufatura, rastreamento de veículos e outras aplicações telemáticas. Aplicações específicas para RMSSFs são, por exemplo [2]: telefones celulares atuando como nós centrais para coletar informações provenientes de sensores colocados em lugares quaisquer, em aplicações relacionadas com sistemas inteligentes de transporte, segurança, interação social, saúde, monitoramento da vida selvagem, dentre outros. Uma interessante aplicação prevista está relacionada com o recente conceito de rádios cognitivos (CR) [3]: uma RMSSF dedicada ou multiuso pode ser utilizada para sensoriamento do espectro, e terminais secundários móveis podem funcionar como nós centrais para coletar informações sobre a disponibilidade de espectro para acesso dinâmico [4]. Além disso, as aplicações de RSSFs na área de saúde estão ganhando atenção especial em pesquisas recentes, como por exemplo, as redes corporais sem fio (*WBANs - Wireless Body Area Network*) com sensores implantados [5]. Nesta aplicação, o tempo de vida da bateria e, conseqüentemente, o tempo de vida da rede são problemas cruciais uma vez que as baterias não podem ser substituídas sem um procedimento médico complexo e invasivo. Visando maximizar a vida útil da bateria, sensores não ativos podem ser mantidos em um estado de economia de energia. Durante este estado, um processo de despertar e recarregar pode ocorrer quando um nó de recarga está perto o suficiente para usar algum tipo de técnica de transmissão de energia sem fio [6–8]. No que diz respeito à transmissão de energia sem fio, [6] discute aspectos teóricos e práticos da energia de campo distante de sensores sem fio de baixa potência. Resultados de um protótipo e etapas para implementação também são apresentadas em [6]. Uma atenção especial é dada para o projeto da rectenna (antena retificadora), que é o principal elemento responsável por converter a energia de ondas eletromagnéticas em energia utilizada para carregar as baterias dos nós sensores.

1.2 Trabalhos relacionados

Um grande esforço em pesquisa já foi realizado com o intuito de aumentar o tempo de vida de RSSFs, com base, por exemplo, em protocolos de roteamento, controle de

potência de transmissão, codificação de rede, reestruturação da camada *MAC*, dentre outros. Abaixo, está uma lista de algumas pesquisas e as suas principais características.

Em [9], há uma proposta de estrutura para maximizar o tempo de vida útil de uma RSSF, explorando a mobilidade do nó central sob três restrições: a tolerância do atraso quanto à transmissão da informação do nó sensor para o nó central, o consumo de energia do nó e a conservação do fluxo de dados. Os nós podem armazenar temporariamente os dados até que o nó central móvel esteja em uma posição melhor para a troca de dados. O tempo de vida é uma variável do problema de otimização que, quando maximizado, atua sobre a minimização da energia necessária por unidade de tempo, para transmitir dados a uma taxa de bits determinada em uma topologia de rede *multi-hop*. Comparações com um cenário em que o nó central é estático também são apresentadas em [9].

O trabalho em [10] se concentra em encontrar a posição ótima do nó central em relação aos nós de retransmissão, a fim de prolongar o tempo de vida útil da RSSF. Um algoritmo baseado na otimização por enxame de partículas (*PSO - Particle Swarm Optimization*) é usado para encontrar a melhor posição.

Os autores de [11] propõem uma estrutura unificada para analisar o problema de maximização de tempo de vida da rede. Um modelo de programação linear cobre conjuntamente a mobilidade do nó central e problemas de roteamento, restringindo ao nó central a um número finito de locais. Os autores aplicam esta estrutura a um conjunto típico de grafos topológicos, incluindo as topologias linear, anel, grade e arbitrárias. O artigo relata aumento no tempo de vida para nós centrais móveis, quando comparado com os nós centrais estáticos, para diferentes tamanhos de rede.

Em [12], os autores apresentam dois modelos de programação linear para a coleta de dados em uma RSSF com uma estação base móvel controlada e capacidade de *buffer* limitado. O primeiro modelo não considera buferização de pacotes, enquanto o segundo modelo considera. O artigo é focado em comparar ambos os cenários, considerando nós sensores estáticos e um nó central móvel. Sensores são implantados de forma aleatória e o nó central pode mover-se dentro de um conjunto de locais. Cada

sensor envia os dados para o nó central, seja através de *multi-hop*, ou através de comunicação direta se o nó central estiver nas proximidades do sensor.

Em [13], um estudo comparativo de protocolos de RSSFs é realizado com base em diversas definições de tempo de vida de rede, discutindo as implicações e a aplicabilidade das métricas de tempo de vida. Vários protocolos são agrupados em três classes de acordo com similaridades em relação às definições de tempo de vida. As análises são feitas com base nos protocolos que mais representam cada classe. Resultados da simulação em nível de rede são apresentados, mostrando os números associados ao tempo de vida alcançado por cada protocolo.

Os autores em [14] lidam com algoritmos de agrupamento, onde uma série de sensores estão distribuídos em uma determinada área e grupos são formados onde um nó é responsável por cada grupo. As posições dos nós de captação de energia são ajustadas para otimizar o tempo de vida da rede. O trabalho apresenta aumento no tempo de vida para redes de sensores em grupo.

Os autores em [15] propõem explorar a redundância espacial dos sensores, definindo subconjuntos de sensores ativos em diferentes períodos de tempo, permitindo economia de energia quando inativos. Dois problemas de programação linear são apresentados para maximizar o tempo de vida da rede, que são definidos em termos do nível exigido de cobertura: o primeiro, com base em geração de coluna, deve ser executado de uma forma centralizada, enquanto que o segundo baseia-se num algoritmo heurístico visando uma implementação distribuída. O artigo apresenta resultados para validar o modelo e para comparar os problemas de otimização linear adotados.

Uma estratégia de implantação de uma rede de sensores heterogênea é proposta em [16]. Nela são realizadas simulações para medir até que ponto a limitação de memória e processamento pode melhorar o tempo de vida da rede, ao mesmo tempo em que busca um equilíbrio na energia da rede. O tempo de vida da rede é definido como o tempo em que uma certa proporção dos nós inativos é superior a um limiar, que é quando há falha de cobertura, conectividade ou ambos em um determinada região. A heurística proposta é chamada *location-wise pre-determined heterogeneous node de-*

ployment (LPHND). Ela é comparada a implantação de nós de retransmissão com uma distribuição gaussiana (*RNDGD - Relay Node Deployment with a Gaussian Distribution*) e com a *LPHND* com erro de implantação (*LPHNDE*).

O problema de controlar a mobilidade do nó central em aplicações orientadas a eventos, para alcançar o tempo de vida útil máximo da rede, é o foco da referência [17]. Os autores propõem um modelo de otimização convexa inspirado pela técnica de regressão de vetores de suporte para determinar uma trajetória ideal até o nó central móvel. O tempo de vida da rede é definido como o tempo decorrido desde o início da operação da rede até que o primeiro nó sensor ativo se torne inativo. Três modelos de otimização são propostos e comparados a um algoritmo com base em busca tabu. A rede é dividida em zonas que têm um nó central móvel. O artigo reporta resultados na diferença de tempo médio de vida entre os modelos convexos propostos e o algoritmo de busca tabu.

Abordagens que atuam principalmente na energia gasta durante a tarefa de comunicação entre os nós sensores ou entre nós sensores e nós centrais podem ser encontradas em [5, 17–21]. Por exemplo, técnicas de controle de potência de transmissão, com o objetivo de gerenciar o consumo de energia durante a comunicação, são discutidos em [18]. Algumas destas técnicas utilizam uma única fonte de transmissão para toda a rede. Outras aplicam algoritmos de gestão de energia locais que não envolvem protocolos *MAC*. Além disso, múltiplo acesso por divisão no tempo (*TDMA - Time-Division Multiple Access*) com prevenção de colisão e estratégias de ciclo de transmissão também são discutidas em [18]. Em [5], os autores propõem uma técnica para minimizar a interferência entre *WBANs* usando otimização convexa, a fim de otimizar a potência total de transmissão. Ainda no contexto de técnicas de otimização, os autores de [22] consideram o consumo de energia, a vazão e o atraso como métricas relacionadas com a função objetivo do problema de otimização. É mostrado em [20] que as técnicas de codificação de rede e de controle do ciclo de transmissão podem ser integradas para utilizar os recursos da rede de forma eficiente na assim chamada zona de gargalo, que é a área em torno do nó central. Um algoritmo de agrupamento com base na energia consumida em cada momento em que um nó se torna o responsável pelo grupo é pro-

posto em [19]. Em [21], com base em orientações para o prolongamento do tempo de vida, um algoritmo *greedy* que usa tanto informações do canal em tempo real quanto as informações de energia residual, é proposto para controlar as comunicações entre os nós sensores e o nó central.

1.3 Contribuições

Esta dissertação também trata do problema de maximização do tempo de vida de uma rede móvel de sensores sem fio e tem foco na energia gasta durante a tarefa de comunicação entre nós sensores ou entre nós sensores e os nós centrais. É apresentado um novo procedimento (ou método) baseado em otimização convexa que controla o que é definido aqui como sendo os níveis de atividade de comunicação dos nós sensores, agendando dinamicamente um certo número de lacunas no tempo ou no tempo-frequência dentro de um quadro, para comunicação com o nó central. A otimização se concentra na tarefa de comunicação, já que este é o processo que mais consome energia em um nó sensor [18]. A mobilidade autônoma de nós sensores não é considerada neste trabalho, já que neste caso específico o maior consumo de energia vem de mecanismos que realizam a movimentação, como por exemplo motores em robôs. O movimento dos nós pode ocorrer de maneira não autônoma, como por exemplo quando os nós sensores são acoplados a veículos, animais, soldados no campo de batalha, implantados no oceano, dentre outros. Em todos estes casos a tarefa de comunicação será a que mais consome energia. Para introduzir um desafio maior ainda na solução do problema além da mobilidade, é considerado que a rede de sensores pode utilizar de uma técnica de transmissão de energia para recarga de bateria que, dentro do intervalo de análise, causa uma variação inesperada na energia armazenada. Os atributos principais do método proposto são:

- É flexível, permitindo o controle da periodicidade na qual a tarefa de otimização ocorre, de acordo com a velocidade da mobilidade dos nós sensores: velocidades baixas requerem uma frequência menor de otimização.

- Também permite o controle flexível sobre o balanço entre a equalização do consumo de energia dos nós sensores para que os mesmos se tornem inativos ao mesmo tempo e a minimização da energia residual (não utilizada), ou liberando o consumo de energia em favor de tempo de vida mais longo, por meio de transmissões em rajada seguidas de períodos de silêncio. Quando a equalização de energia é favorecida, a comunicação com o nó central é frequente e evita, em comparação ao modo de transmissão em rajada, o desperdício de banda quando não há dados o suficiente para enviar ao nó central. A comunicação frequente também evita o armazenamento de um grande número de dados de sensoramento até que a próxima transmissão seja permitida no modo de comunicação em rajada.
- É simples, porém totalmente consistente com as orientações para o desenvolvimento de algoritmos de otimização existentes na literatura.
- Tem performance próxima ou até melhor do que o algoritmo *greedy* [21] proposto recentemente na literatura e desenvolvido estritamente dentro das orientações mencionadas, com a vantagem de não exigir a informação em tempo real do estado do canal e da energia residual, necessários para a solução do algoritmo *greedy*.
- Os resultados reportados mostram que a rede otimizada pode alcançar tempos de vida mais que três vezes maiores se comparados com as redes não otimizadas.

1.4 Organização da dissertação

O restante da dissertação é organizado da seguinte maneira: O Capítulo 2 faz uma breve apresentação do conceito de otimização convexa. O Capítulo 3 apresenta o problema, sua formulação e a solução correspondente via otimização convexa. Resultados numéricos e discussões a respeito da performance da solução proposta são mostrados no Capítulo 4. O Capítulo 5 conclui o trabalho e aborda algumas direções sobre pesquisas futuras.

1.5 Publicações

A pesquisa apresentada nesta dissertação originou as seguintes publicações:

1. GUIMARÃES, D.A., SAKAI, L.J., SOUZA, R.A.A., ALBERTI, A.M. “**Increasing the Lifetime of Mobile WSNs via Dynamic Optimization of Sensor Node Communication Activity**”. *Sensors* 2016, 16(9), 1536; doi:10.3390/s16091536. CRR.
2. GUIMARÃES, D.A., SAKAI, L.J., SOUZA, R.A.A., ALBERTI, A.M. “**Modified Greedy Algorithm for Prolonging the Lifetime of Mobile Wireless Sensor Networks**”. *Anais do XVIII SIGE, Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*. São José dos Campos, SP, 28-30 Set. 2016. pp. 106-111. CRR.
3. SAKAI, L.J., GUIMARÃES, D.A. “**Um Método para Aumento do Tempo de Vida de Redes de Sensores Sem Fio**”. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação (RTIC)*, aceito para ser publicado em Novembro de 2016.

Capítulo 2

Fundamentos

2.1 Otimização convexa

Otimização convexa é uma classe dentro dos problemas de otimização matemática [38], juntamente com os problemas de mínimos quadrados e os de programação linear. A vantagem em se resolver problemas formulados como problemas de otimização convexa, é que eles podem ser resolvidos por métodos bem amadurecidos, de maneira eficiente e confiável. Para se solucionar um problema de otimização convexa, é preciso minimizar uma função objetivo dada uma variável de otimização, sujeita a funções de restrições com limites definidos. O problema de otimização pode ser descrito como na equação 2.1:

$$\begin{aligned} &\text{minimize } f_0(x) \\ &\text{sujeito a } f_i(x) \preceq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \tag{2.1}$$

onde $f_0(x)$ é a função objetivo, o vetor $x = (x_1, \dots, x_n)$ é a variável de otimização, $f_i(x)$ são funções de restrição e b_i são os limites das restrições. Dentro de todos os possíveis valores, o vetor x é chamado de ótimo quando consegue minimizar a função objetivo, satisfazendo todas as restrições. Problemas de otimização convexa podem ser aplicados em diversas áreas, como por exemplo, em aplicações financeiras, dimensio-

namento de dispositivos em circuitos eletrônicos, dentre outros, como citado em [38] (p. 2-3). Nesta dissertação, a otimização convexa é aplicada a uma rede de sensores sem fio, para aumentar o tempo de vida da rede. As definições e a formulação do problema apresentado como um problema de otimização convexa são apresentadas no Capítulo 3.

2.2 CVX

O CVX [40] é um sistema de modelamento de otimização convexa baseado na plataforma Matlab. Ele permite que restrições e objetivos sejam especificados utilizando a sintaxe padrão do Matlab. É uma ferramenta para o modelamento e solução de problemas convexos, porém, não consegue determinar se um problema é convexo ou não. Dado esta característica, é necessário que o problema a ser modelado e resolvido seja previamente transformado para a forma de um problema convexo. Internamente, o CVX possui diferentes solucionadores com capacidades distintas, onde cada um pode solucionar de maneira mais eficiente que o outro, dependendo do problema modelado. Informações sobre download e instalação do pacote CVX, bem como o guia do usuário e outros materiais relacionados podem ser encontrados em [40].

Capítulo 3

Formulação e solução do problema

Considera-se uma RMSSF consistindo de um certo número de nós sensores cuja tarefa de comunicação é controlada por um nó central com base em múltiplo acesso por divisão do tempo-frequência. A Figura 3.1 ilustra uma possível topologia adotada pela RMSSF. Os nós sensores que podem ser controlados diretamente são aqueles dentro da área de cobertura do nó central. No entanto, um controle indireto de todos os nós sensores ou de uma grande parte deles pode ser conseguido por meio de comunicação por múltiplos saltos. A abordagem proposta para otimização do tempo de vida aplica-se a ambas as situações, mas na abordagem com múltiplos saltos ela deve ser combinada com algum protocolo de roteamento adequado.

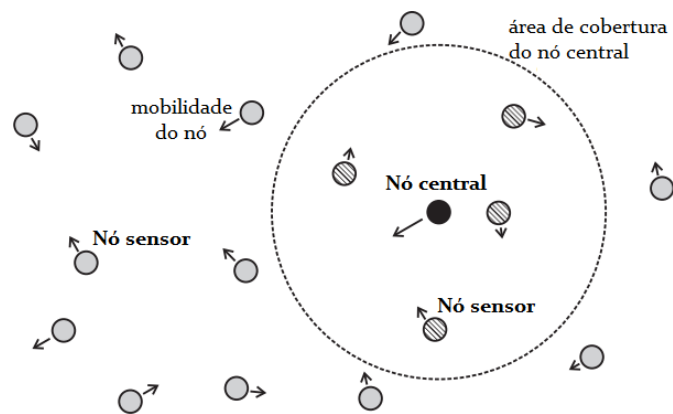


Figura 3.1: Topologia de uma rede móvel sem fio. Os nós sensores móveis dentro da área de cobertura são os que podem ter links diretos com o nó central móvel. Outros sensores se comunicam com o nó central por meio de múltiplos saltos.

Quando vários saltos são considerados, duas arquiteturas de rede conhecidas podem ser definidas, nomeadamente [21]: *ad hoc* simples e *ad hoc* hierárquico. Sob a arquitetura simples, nós sensores transmitem dados uns dos outros ao nó central, enquanto que na arquitetura hierárquica nós centralizadores enviam para o nó central os dados agregados de nós sensores do grupo. Quando a comunicação direta com um nó central móvel é considerada, diz-se que a rede está funcionando sob a arquitetura estrela.

Embora muitos protocolos para RSSF existentes também trabalham com roteamento para melhorar o tempo de vida da rede [11, 23, 24], neste estudo, como pode ser observado na Figura 3.2, é considerada a arquitetura estrela no conceito *SENMA - Sensor Network With Mobile Access* (rede de sensores com acesso móvel), para que o desempenho da abordagem da otimização possa ser dissociado de qualquer protocolo de roteamento que poderia estar sendo executado em paralelo. Assim, o aumento no tempo de vida trazido pelo método apresentado pode ser avaliado sem perda de generalidade. Uma arquitetura similar é considerada, por exemplo, em [25], e se encaixa em aplicações como transporte inteligente, vigilância ambiental e monitoramento da vida selvagem. O desacoplamento entre o método de aumento do tempo de vida e o roteamento, também é considerado em [21].

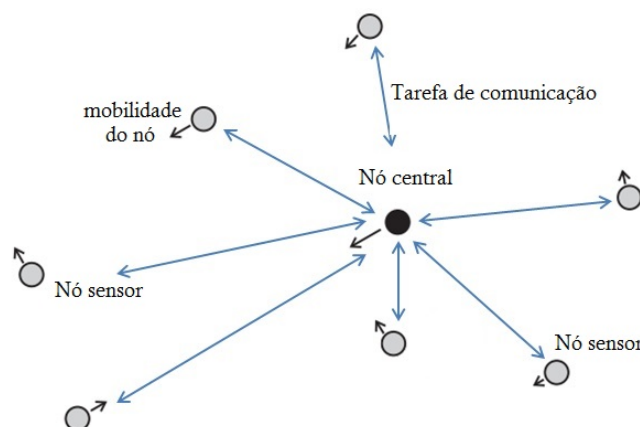


Figura 3.2: Topologia de rede móvel sem fio adotada. Os nós sensores e o nó central são móveis e possuem a arquitetura estrela.

Os nós sensores, o nó central ou ambos podem se mover e, como consequência, as distâncias entre nós sensores e o nó central podem variar, alterando também o consumo

de energia durante a comunicação. Esta consideração define que os nós sensores tem controle sobre sua potência de transmissão, que variam de acordo com sua distância com o nó central. Os sensores utilizam bateria que não podem ser trocadas, mas no modelo apresentado elas podem esporadicamente ser recarregadas por meios de transmissão de energia sem fio a partir de um nó de recarga (que pode ser o próprio nó central). É assumido que cada nó sensor gasta a maioria de sua energia durante a tarefa de comunicação com o nó central. O termo nível de atividade é associado a quantidade de lacunas de tempo ou tempo-frequência alocados a esta tarefa. O processo de comunicação é tipicamente organizado em quadros (ou super quadros) e cada quadro é dividido em lacunas de tempo ou tempo-frequência. Então, os níveis de atividade definem a fração de lacunas em um quadro nos quais cada sensor pode utilizar para a comunicação. Por causa da mobilidade dos nós, o problema é determinar dinamicamente os níveis de atividade ótimos que devem ser associados a cada nó sensor para que o tempo de vida da rede seja maximizado. Neste contexto, o modelo proposto de otimização do nível de atividade do nó sensor pode ser, a princípio, aplicado a qualquer rede de sensores sem fio que utilize a comunicação em lacunas, similarmente a aquelas que utilizam gerenciamento central para manter o agendamento da rede, como por exemplo, WirelessHART [26], ISA100.11a [27, 28] e IEEE 802.15.4e [29, 30].

3.1 Formulação do problema

Antes da apresentação do método de otimização do tempo de vida, alguns parâmetros, variáveis e o modelo do sistema necessitam ser definidos:

- Tal como apresentado na estrutura do quadro mostrado na Figura 3.3, um evento de otimização $k = 1, 2, \dots, K$ contém F quadros indexados por $f = 1, 2, \dots, F$, significando que o evento de otimização do tempo de vida tem ação sobre grupos de F quadros. O número de lacunas no tempo ou tempo-frequência em um quadro é definido para acomodar o número planejado de nós sensores na rede. F é chamado de intervalo de otimização. Uma baixa mobilidade ou uma rede fixa,

tem eventos de otimização menos frequentes, ou seja, valores altos de F , enquanto RSSFs com alta mobilidade dos nós necessita de otimizações frequentes, com pequenos valores para F , ou até mesmo com $F = 1$.

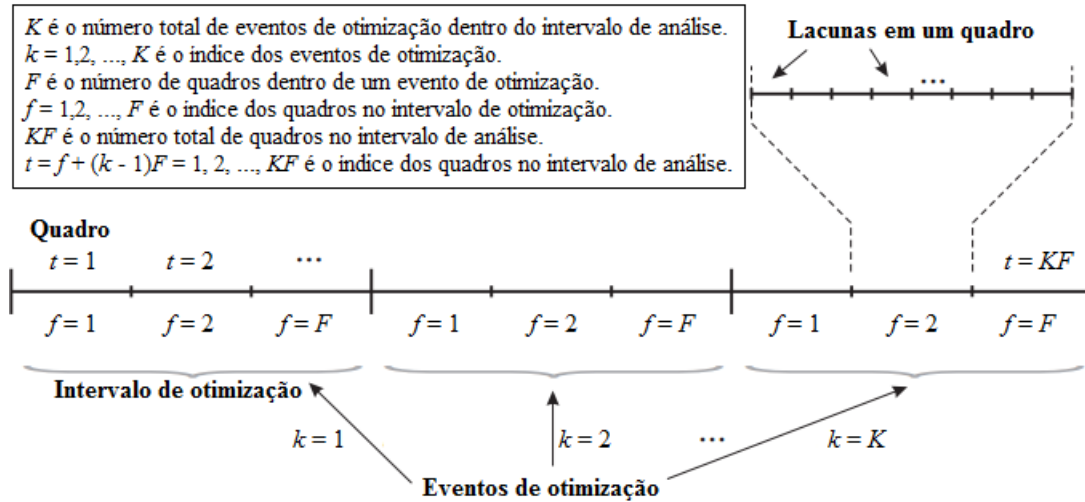


Figura 3.3: Estrutura do método de otimização onde são alocados os níveis de atividade dos nós sensores móveis.

- O valor de KF é associado com o intervalo de análise que corresponde a KF quadros indexados por $t = f + (k - 1)F = 1, 2, \dots, KF$, e representa o intervalo no qual a rede está em operação. Em uma rede real, o parâmetro KF não é especificado, sendo determinado pelo tempo de vida da rede. O valor de KF pode ser determinado pelo administrador da rede para que a otimização acabe em um determinado momento enquanto a rede está em operação.
- O número de nós sensores é definido com N e são indexados por $n = 1, 2, \dots, N$. É assumido que a rede possui apenas um nó central.
- As energias nas baterias dos nós sensores são associadas com o k -ésimo evento de otimização, $k = 1, 2, \dots, K$, e são representados pela matriz de energia residual $\mathbf{S}(k) = [\mathbf{s}_1(k), \mathbf{s}_2(k), \dots, \mathbf{s}_{F+1}(k)] \in \mathbb{R}^{N \times (F+1)}$, com $\mathbf{s}_1(1)$ sendo o vetor com as energias iniciais armazenadas nas baterias. Após a ação do k -ésimo evento de otimização, os valores de energia residual no vetor $\mathbf{s}_{F+1}(k)$ se tornam as energias iniciais para o próximo evento de otimização, então $\mathbf{s}_1(k + 1) = \mathbf{s}_{F+1}(k)$.

- A matriz de nível de atividade é definida por $\mathbf{X}(k) = [\mathbf{x}_1(k), \mathbf{x}_2(k), \dots, \mathbf{x}_F(k)] \in \mathbb{R}^{N \times F}$, com $\mathbf{x}_f(k) \succeq 0$ e $\mathbf{1}^T \mathbf{x}_f(k) = 1$, onde \succeq representa não igualdade elemento por elemento, $\mathbf{1}$ é o vetor unitário N -dimensional e o expoente T denota transposição. A matriz contém os níveis de atividade gerados pelo k -ésimo evento de otimização para todos os sensores no f -ésimo quadro dentro do intervalo de otimização. Por exemplo, se um elemento $X_{n,f}(k)$ da matriz de níveis de atividade é 0.1, isso significa que o n -ésimo nó sensor pode ocupar 10% das lacunas durante o f -ésimo quadro que está dentro do k -ésimo grupo de F quadros. O total de energia consumida pelos nós sensores é proporcional aos níveis de atividade atribuídos e depende das condições do canal entre os nós sensores e o nó central. Estas condições do canal, dependem da posição relativa de cada nó sensor em referência ao nó central, assumidas como desconhecidas. Na prática isto é importante, já que a estimativa do canal é um processo computacional custoso e contribui para o aumento do consumo de energia e a complexidade do sistema.
- Se o nível de atividade máximo 1 é atribuído aos nós sensores, a energia esperada que eles vão gastar durante a transmissão dos F quadros é representada pela matriz de máximo consumo $\mathbf{B}(k) = [\mathbf{b}_1(k), \mathbf{b}_2(k), \dots, \mathbf{b}_F(k)] \in \mathbb{R}^{N \times F}$, com $\mathbf{B}(1)$ sendo o máximo consumo de energia esperado durante os primeiros F quadros. Durante o k -ésimo bloco de F quadros, os consumos de energia esperados dos nós sensores são dados por $\mathbf{B}(k) \circ \mathbf{X}(k)$, onde o símbolo \circ denota o produto de Hadamard (multiplicação elemento por elemento). Os elementos de $\mathbf{B}(k)$ na prática dependem das distâncias e canais entre os nós sensores e o nó central e das características dos nós sensores, como consumo em modo normal de operação, consumo relativo a tarefas de processamento, dentre outras.
- É assumido que o consumo estimado para os primeiros F quadros é constante, ou seja, $\mathbf{b}_1(1) = \mathbf{b}_2(1) = \dots = \mathbf{b}_F(1)$. Isto significa que é esperado que as transmissões durante o primeiro quadro são realizadas antes que os nós sensores comecem a se movimentar. Estas primeiras transmissões não necessitam conter informações de sensoriamento úteis, sendo utilizadas somente para atualizar cor-

retamente o consumo de energia para o próximo evento de otimização. De fato, não há razão para ter $\mathbf{b}_1(1) \neq \mathbf{b}_2(1) \neq \dots \neq \mathbf{b}_F(1)$. Isto seria impraticável, pois demandaria a predição de movimentação dos nós durante os primeiros F quadros. Por isso, se as posições dos nós sensores são conhecidas na implantação inicial da rede, $\mathbf{b}_1(1)$ pode ser estimado apenas pela potência final entre o nó central e os nós sensores, considerando todos os ganhos e perdas do percurso. As potências de transmissão consideradas nesta estimativa são aquelas com valores que possam produzir a probabilidade de erro esperada no nó central (os cálculos relacionados são exemplificados no Subcapítulo 4.1.4). Alternativamente, os elementos de $\mathbf{b}_1(1)$ podem ser, por exemplo, os consumos de energia calculados a partir da média esperada da distância entre os nós sensores e o nó central. A matriz de máximo consumo é computada a partir do consumo de energia dos nós sensores durante os F quadros anteriores, levando em consideração recargas anteriores e a mobilidade.

- A matriz de recarga é definida como $\mathbf{R}(k) = [\mathbf{r}_1(k), \mathbf{r}_2(k), \dots, \mathbf{r}_F(k)] \in \mathbb{R}^{N \times F}$, com $\mathbf{r}_f(k)$ representando a quantidade de energia entregue às baterias dos nós sensores durante a recarga. Na prática, os instantes de recarga e a quantidade de carga transferida para as baterias dos nós sensores vai depender do método de captação de energia e da tecnologia a ele associada. Como exemplo, a recarga pode ocorrer pela captação de energia através da transmissão de um sinal de rádio-frequência (RF), e definida por quando e quão frequente o dispositivo de recarga passa através da rede transmitindo sinais de RF para o propósito específico de recarga por transmissão de energia. Como caso de estudo, neste trabalho é considerado que a recarga é realizada pela transmissão de energia via RF no f -ésimo quadro do k -ésimo bloco de quadros. Neste caso, é razoável assumir que $\mathbf{R}(k)$ é uma matriz esparsa (maioria dos elementos é nula), já que na prática este tipo de evento de recarga é esporádico. Isto significa que $\mathbf{r}_f(k) = \mathbf{0}$ para a grande maioria de f e k , onde $\mathbf{0}$ é o vetor N -dimensional com todos elementos iguais a zero. Assume-se que a recarga ocorre em um simples instante $t = t_r$ durante o intervalo de análise, o que significa que os índices do vetor de recarga $\mathbf{r}_f(k)$ serão valores inteiros e positivos para f e k , tal que $t_r = f + (k-1)F$. O parâme-

tro auxiliar r_r é definido como sendo uma fração da máxima energia armazenada $\max\{s_1(1)\}$ que limita a energia de recarga, ou seja, $\mathbf{r}_f(k) \preceq r_r \max\{s_1(1)\}$. Isto quer dizer que a recarga nunca excederá o valor de carga máximo da bateria. Para simular o comportamento de diferentes energias de recarga aplicadas as baterias dos nós sensores, os valores de $\mathbf{r}_f(k)$ são retirados da distribuição uniforme em $[0, r_r \max\{s_1(1)\}]$. Um modelo mais realista para transmissão de energia por RF para recarga é muito mais complexo do que o modelo descrito, mas a simplificação proposta atende ao método para análise do tempo de vida, causando a variação inesperada que uma recarga ocasionaria.

- Na prática, cada linha da matriz de máximo consumo $\mathbf{B}(k+1)$ que será utilizada como entrada para o $(k+1)$ -ésimo evento de otimização é formada no nó central, pela divisão elemento por elemento entre a real energia consumida pelos nós durante o k -ésimo bloco de F quadros e seus respectivos níveis de atividade (lembrando que cada elemento da matriz de máximo consumo contém o consumo de energia de um nó sensor quando seu nível de atividade é 1). A energia residual vem da energia disponível da bateria e do nível de recarga que pode ser mensurado por cada nó sensor, e reportado para o nó central onde o problema de otimização é solucionado, para que seja aplicado nos próximos F quadros. Por agora, assume-se que os nós sensores utilizam os níveis de atividade atribuídos pelo k -ésimo evento de otimização. Como consequência, as energias residuais nas baterias no final do quadro $(f+1)$ são as energias residuais do quadro f menos o consumo de energia, somado ao possível valor de recarga, resultando na Equação (3.1):

$$\mathbf{s}_{f+1}(k) = \mathbf{s}_f(k) - \mathbf{b}_f(k) \circ \mathbf{x}_f(k) + \mathbf{r}_f(k) \quad (3.1)$$

então, a coluna f de $\mathbf{B}(k+1)$ pode ser computada pela Equação (3.2):

$$\mathbf{b}_f(k+1) = [\mathbf{s}_f(k) - \mathbf{s}_{f+1}(k) + \mathbf{r}_f(k)] \circ \frac{1}{\mathbf{x}_f(k)} \quad (3.2)$$

onde $\mathbf{s}_f(k)$ e $\mathbf{r}_f(k)$, $f = 1, 2, \dots, F$ são as informações sobre energia residual e

recarga que são enviadas pelos nós sensores para o nó central.

- Entretanto, os níveis reais de energia podem variar de acordo com efeitos combinados de mobilidade, níveis de atividade atribuídos mas não utilizados completamente (desperdício de lacunas atribuídas), e variações nas operações dos nós sensores, que podem ser ocasionadas por mudanças de estado ou por diferentes necessidades de processamento, dependendo do fenômeno físico sensoriado. A Figura 3.4 ilustra possíveis evoluções das energias residuais $s_{n,f}(k)$ do f -ésimo ao $(f + 1)$ -ésimo quadro em um bloco arbitrário de $F = 5$ quadros, para o sensor arbitrário n durante o k -ésimo bloco, assumindo-se níveis de atividade fixos e energias residuais idênticas em $f = 1$. Para o consumo constante com atividade total, o decaimento da energia residual é constante. Já para o consumo constante com atividade parcial o decaimento é menor, devido a menor utilização da energia. A mudança de estado de inativo para ativo, faz com que o consumo seja maior somente no instante da mudança do estado, ou seja, $f = 2$ no gráfico. A mobilidade do nó afeta o consumo em todos os instantes. A recarga tem o mesmo efeito da mudança de estado porém, eleva o nível de energia, que no gráfico ocorre em $f = 4$. A partir desta figura, a natureza aleatória do consumo de energia de um nó sensor é visível, mesmo com um nível de atividade fixo atribuído a ele.

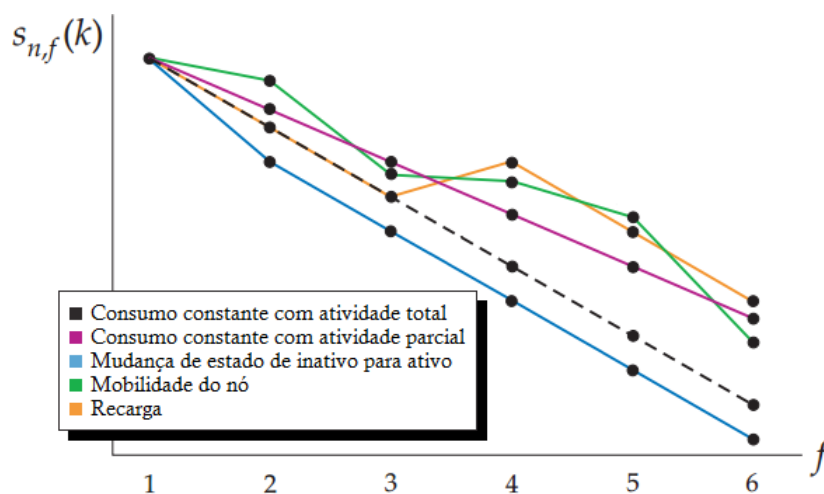


Figura 3.4: Representação ilustrando a aleatoriedade dos consumos de energia durante o k -ésimo bloco de $F = 5$ quadros para o n -ésimo nó sensor.

- A partir das informações acima, cada linha da matriz de máximo consumo pode ser formada a partir de valores correlacionados de uma variável aleatória que simule variações nas energias residuais como ilustrado na Figura 3.4. O nível de correlação determinará a taxa de variação nos consumos de energia de um quadro para o seguinte devido aos efeitos combinados previamente descritos. Os parâmetros auxiliares B_{\min} e B_{\max} indicam os consumos de energia mínimo e máximo se o transmissor do nó sensor estiver ligado durante todo o intervalo de um quadro (o que só ocorre se o seu nível de atividade for um), quando posicionado a distâncias mínimas e máximas do nó central, respectivamente. Para imitar nós sensores implantados em posições aleatórias, produzindo distâncias diferentes do nó central e, portanto, consumos diferentes, os elementos de $\mathbf{b}_1(1) = \mathbf{b}_2(1) = \dots = \mathbf{b}_F(1)$ são assumidos como sendo uniformemente distribuídos no intervalo $[B_{\min}, B_{\max}]$. Uma alta proporção N/B_{\max} implica nós sensores menos distantes uns em relação aos outros, isto é, uma rede mais densa. O coeficiente de correlação entre os consumos de energia em dois quadros consecutivos é denotado por ρ . Como exemplo, a Figura 3.5 mostra dois exemplos dos consumos máximos de cinco nós sensores para dois valores de ρ . O método adotado para gerar as variáveis aleatórias uniformes correlacionadas mostradas nesta figura é de [31] (Capítulo 7) e [32], assumindo uma função de correlação triangular para garantir o mesmo coeficiente de correlação entre os consumos durante quaisquer dois quadros vizinhos. Uma rede de baixa mobilidade é representada no gráfico (a) desta figura, enquanto uma mobilidade relativamente maior é considerada no gráfico (b). Neste último caso, pode ser observado que a linha tracejada do consumo máximo de um nó sensor vai de B_{\max} a B_{\min} dentro de 10 quadros, o que representa uma grande velocidade do nó na prática, apesar do valor aparentemente elevado de ρ .
- É definido que o tempo de vida de uma rede é o intervalo de tempo durante o qual todos os nós de sensores estão em pleno funcionamento. Em outras palavras, o instante em que o primeiro nó sensor falha com alta probabilidade (não funciona corretamente) ou falha permanentemente (termina a sua operação ou se torna inativo) devido à energia insuficiente, irá determinar o tempo de vida

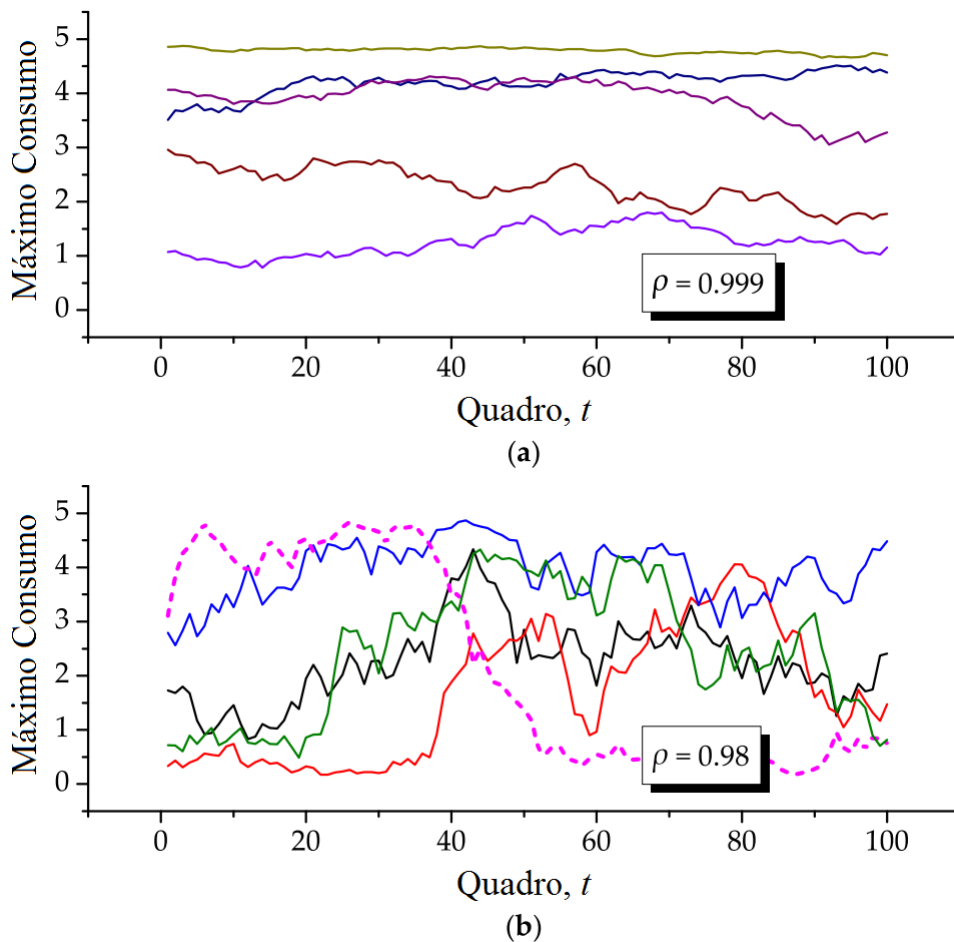


Figura 3.5: Representação ilustrando os máximos consumos de energia de cinco sensores durante 100 quadros, para $\rho = 0.999$ representando baixa mobilidade (a) e $\rho = 0.98$ representando alta mobilidade (b), para $B_{\min} = 0.1$ e $B_{\max} = 5$.

da rede. Esta definição foi adotada em várias referências, como por exemplo em [13, 21, 23, 24, 33–37]. O valor de t em que a energia residual de qualquer nó sensor da rede torna-se menor ou igual a uma dada fração de sua energia máxima armazenada $\max\{s_1(1)\}$ é definido como o instante de morte, t_d , e a energia residual correspondente é definida como a energia de morte s_d . A energia de morte é um parâmetro dependente do sensor, que se baseia nas características da bateria e no nível de tensão da bateria em que o nó sensor começa a falhar na realização parcial ou total das suas funções. Exemplos de níveis práticos de tensão relacionados a falhas podem ser encontrados em [37]. Vale ressaltar que o nível de tensão relacionado à falha (que poderia ser chamado de tensão de morte) está relacionado com a energia de morte, mesmo que a conversão entre essas grandezas

não seja direta.

3.2 Solução do problema

Uma pergunta que deve ser respondida antes de apresentar a solução do problema: o que é esperado de um processo eficaz de otimização de tempo de vida de uma rede? De acordo com as diretrizes relatadas em [21], é preciso encontrar um equilíbrio entre a minimização da energia desperdiçada, que é a energia residual não utilizada no momento da morte da rede e a minimização da energia gasta para relatar a informação sensorial ao nó central. Os autores de [21] complementam suas diretrizes, indicando que isso pode ser realizado explorando a informação de estado de canal (IEC) e a informação de energia residual (IER). Entretanto, é preciso lembrar que estimar a IEC tornaria os dispositivos mais complexos e com consumo de energia adicional. Na abordagem descrita a seguir, a IER e a IEC não são em tempo real, levando a uma implementação simples. Na estratégia de otimização proposta neste trabalho, o equilíbrio energético é conseguido controlando-se dinamicamente os níveis de atividade de comunicação dos nós sensores em uma tentativa constante de balancear dois objetivos: (i) fazer com que todos os nós sensores consumam a mesma quantidade de energia durante a comunicação, fazendo com que eles se tornem inativos juntos e produzam a menor energia desperdiçada possível; (ii) priorizar tempos de vida mais longos, com equalização menos intensa dos consumos de energia para permitir transmissões em rajada seguidas por períodos de silêncio (sem dados para transmitir). Quando a equalização dos consumos de energia é privilegiada, a melhora no tempo de vida é penalizada. No entanto, a comunicação com o nó central é mais freqüente, evitando assim o desperdício de largura de banda causado pelo modo de transmissão em rajada quando não há dados suficientes para enviar ao nó central, no momento em que é permitido transmitir, e evitando também o armazenamento de uma grande quantidade de dados até que a próxima transmissão seja permitida, característica do modo de transmissão em rajada. Em cada evento de otimização, os objetivos são minimizar as energias residuais para que a energia não utilizada seja a menor possível e minimizar as ener-

gias residuais descontadas. Estas energias descontadas são formadas subtraindo-se os consumos máximos de energia dos nós sensores de suas energias residuais. Como consequência, energias residuais elevadas combinadas com baixos consumos (canais bons e/ou distâncias menores) farão a otimização atribuir níveis de atividade elevados, isto é, os nós sensores correspondentes a estes níveis de atividades poderão transmitir em rajada. Por outro lado, baixas energias residuais combinadas com altos consumos (canais ruins e/ou distâncias maiores) serão associados a níveis de atividade bem baixos, isto é, os nós sensores correspondentes a estes níveis ficarão praticamente inativos enquanto esta situação permanecer. Matematicamente, no k -ésimo evento de otimização, é estabelecido um problema de otimização com dois critérios, no qual a função objetivo é formada pela soma ponderada de duas funções objetivas, de acordo com a equação (3.3):

$$f_0 [\mathbf{s}_f(k)] = w_1 \max\{\mathbf{s}_f(k)\} + w_2 \max\{\mathbf{s}_f(k) - \mathbf{b}_f(k)\}, f = 1, 2, \dots, F. \quad (3.3)$$

As variáveis do problema de otimização são as colunas $\mathbf{s}_f(k)$ da matriz de energia residual $\mathbf{S}(k)$ e os níveis de atividade implícitos, que são as colunas $\mathbf{x}_f(k)$ da matriz $\mathbf{X}(k)$. As funções dos pesos $w_1 \geq 0$ e $w_2 \geq 0$ são as seguintes: quando $w_1/w_2 > 1$, a otimização age em favor de energias residuais equalizadas ao custo de tempo de vida reduzido. Por outro lado, quando $w_2/w_1 > 1$, a otimização tende a atribuir altos níveis de atividade a nós com canais melhores e altas energias residuais e, às vezes, até desabilita nós em canais ruins e com baixas energias residuais, trazendo assim a possibilidade do aumento do tempo de vida. Assumindo que os nós sensores são implantados uniformemente na área de interesse, quando o número de nós é pequeno, o número daqueles que podem transmitir em rajada (canais bons e altas energias residuais), também é pequeno, implicando que $w_2/w_1 > 1$ não trará vantagem sobre $w_1/w_2 > 1$. Em outros termos, quando N é pequeno, por exemplo $N < 30$, praticamente não há diferença entre as melhorias no tempo de vida alcançadas ao privilegiar os consumos equalizados ou privilegiando as transmissões em rajada. Neste caso, uma

total flexibilidade é dada na escolha dos pesos w_1 e w_2 . Quando N é grande, por exemplo $N > 80$, o número de nós que podem ter transmissões em rajada aumenta, fazendo com que $w_2/w_1 > 1$ tenha vantagem sobre $w_1/w_2 > 1$. Neste caso, deve-se ter $w_1 = 0$ e $w_2 = 1$, a menos que seja possível conviver com a penalidade no prolongamento do tempo de vida, que ocorre quando os consumos equalizados são de maior importância. Para um número moderado de nós sensores, por exemplo no intervalo $30 < N < 80$, um balanço razoável é alcançado com $w_1 = 1$ e $w_2 = 2$. Os resultados numéricos mostrados no Capítulo 4 confirmam estas afirmações. Pode ser observado que, na perspectiva de um problema de otimização matemático, qualquer par de w_1 e w_2 possui soluções ótimas. Variando-os, uma fronteira ótima de Pareto [38] (p. 57) será estabelecida, mostrando as perdas e ganhos de uma análise de *trade-off* (Situação onde há conflito de escolha). No k -ésimo evento de otimização, as seguintes restrições devem ser satisfeitas, minimizando a função objetivo definida na Equação (3.3).

- Os níveis de atividade devem ser não-negativos, tal como $\mathbf{x}_f(k) \succeq 0$, $f = 1, 2, \dots, F$, o que significa que o menor número de lacunas atribuído a um nó sensor é zero.
- Os níveis de atividade atribuídos aos nós sensores em um dado quadro devem somar até 1, isto é, $\mathbf{1}^T \mathbf{x}_f(k) = \sum_{n=1}^N x_{n,f}(k) = 1$, com $x_{n,f}(k)$ sendo o n -ésimo elemento de $\mathbf{x}_f(k)$. Esta restrição é consistente com a definição do nível de atividade como a fração atribuída das lacunas em um quadro de transmissão. O efeito desta restrição é a garantia de não penalizar a vazão enquanto a otimização tenta minimizar as energias residuais e descontadas na função objetivo definida na Equação (3.3).
- A otimização calcula os níveis de atividade e as energias residuais com base na informação de máximo consumo de energia passada, ou seja, as energias residuais disponíveis para o $(f + 1)$ -ésimo quadro, são as energias residuais no final do f -ésimo quadro menos os consumos de energia durante o f -ésimo quadro. Então, baseado na Equação (3.1), $\mathbf{s}_{f+1}(k) = \mathbf{s}_f(k) - \mathbf{b}_f(k) \circ \mathbf{x}_f(k)$, $f = 1, 2, \dots, F$, pode ser notado que os consumos máximos a serem utilizados

como dados de entrada para o evento de otimização subsequente, provêm das informações passadas reais sobre energias residuais e de recarga.

Colocando todas estas informações em conjunto, para cada evento de otimização k , deve ser resolvido o problema de otimização, como mostra a Equação (3.4):

$$\begin{aligned}
 &\text{minimize} && f_0[\mathbf{s}_f(k)] = w_1 \max\{\mathbf{s}_f(k)\} + w_2 \max\{\mathbf{s}_f(k) - \mathbf{b}_f(k)\}, \quad f = 1, 2, \dots, F \\
 &\text{sujeito a} && \mathbf{x}_f(k) \succeq 0 \\
 &&& \mathbf{1}^T \mathbf{x}_f(k) = 1 \\
 &&& \mathbf{s}_{f+1}(k) = \mathbf{s}_f(k) - \mathbf{b}_f(k) \circ \mathbf{x}_f(k).
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Este é um problema de otimização convexo, uma vez que a função \max é convexa [38] (p. 72), e a soma ponderada não negativa de funções convexas também é convexa [38] (p. 79). O problema de otimização (3.4) pode ser facilmente convertido em um problema de otimização linear, geralmente chamado de programa linear (LP) [38] (p. 146), por meio de sua forma epígrafe [38] (p. 134), como mostra a Equação (3.5):

$$\begin{aligned}
 &\text{minimize} && z, \quad f = 1, 2, \dots, F \\
 &\text{sujeito a} && w_1 \max\{\mathbf{s}_f(k)\} + w_2 \max\{\mathbf{s}_f(k) - \mathbf{b}_f(k)\} - z \leq 0 \\
 &&& \mathbf{x}_f(k) \succeq 0 \\
 &&& \mathbf{1}^T \mathbf{x}_f(k) = 1 \\
 &&& \mathbf{s}_{f+1}(k) = \mathbf{s}_f(k) - \mathbf{b}_f(k) \circ \mathbf{x}_f(k).
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Vale ressaltar que um LP é a forma mais simples entre todos os problemas de otimização convexa, e que os algoritmos para sua solução têm amadurecido até o ponto de fornecer resultados extremamente precisos em um tempo de processamento muito curto. No caso, mesmo grandes valores de N não representam um fator limitante para a solução precisa e rápida do problema (3.4) ou (3.5). As abordagens de otimização convexa em tempo real [39] podem ser aplicadas e incorporadas em processadores digitais de sinal, se os requisitos de tempo de quadro de uma aplicação específica se tornarem

rigorosos. No entanto, o problema de otimização (3.4) ou (3.5) é previsto para ser resolvido, para cada k , em um nó central com mais poder de processamento do que um nó sensor comum. As variáveis de otimização obtidas a partir do k -ésimo evento de otimização são a matriz de níveis de atividade $\mathbf{X}(k) = [\mathbf{x}_1(k), \mathbf{x}_2(k), \dots, \mathbf{x}_F(k)]$, a serem atribuídos aos nós sensores, e a matriz de energia residual estimada (não necessariamente a real) $\mathbf{S}(k) = [\mathbf{s}_1(k), \mathbf{s}_2(k), \dots, \mathbf{s}_{F+1}(k)]$, $k = 1, 2, \dots, K$. Os parâmetros de entrada são o número de nós sensores, N ; o intervalo de otimização definido por F ; os níveis de energia iniciais das baterias, $\mathbf{s}_1(1)$; e os máximos consumos de energia estimados nos primeiros F quadros, $\mathbf{B}(1) = [\mathbf{b}_1(1), \mathbf{b}_2(1), \dots, \mathbf{b}_F(1)]$. A matriz de máximo consumo que será usada como entrada para o evento $k + 1$ é atualizada usando a Equação (3.2), a partir dos níveis de atividade atribuídos e das energias residuais e de recarga reais associadas ao k -ésimo bloco de F quadros. Existem duas opções para atualizar esta matriz: cada uma das suas linhas é calculada por cada nó sensor e reportada ao nó central, ou toda a matriz de consumo é calculada no nó central a partir da informação residual e de recarga reportada pelos nós sensores. O Algoritmo 1, desenvolvido a partir deste trabalho, sintetiza as etapas para otimizar os níveis de atividade dos nós sensores com o objetivo de aumentar o tempo de vida da rede. A última etapa do algoritmo serve para indicar que os níveis de atividade devem ser convertidos em uma fração das lacunas de um quadro, sendo essa fração subsequente atribuída aos nós sensores por meio de um agendamento apropriado ou um algoritmo de alocação de recursos equivalente. A Figura 3.6 expõe a linha do tempo do Algoritmo 1, bem como os eventos de comunicação entre os nós sensores e o nó central.

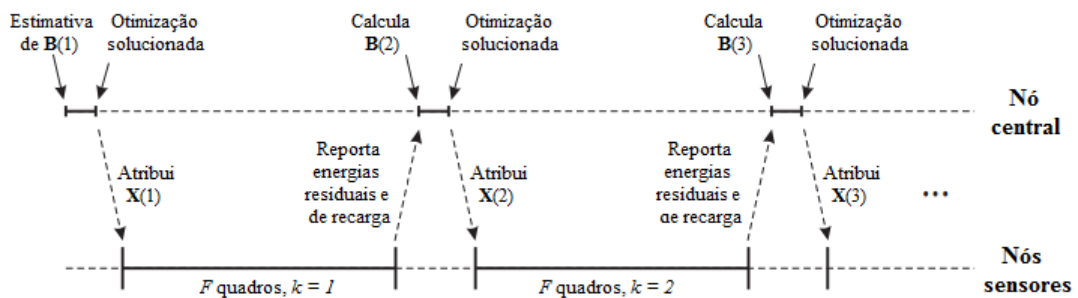


Figura 3.6: Linha do tempo ilustrando a operação do Algoritmo 1.

Algorithm 1: Otimização dos níveis de atividades dos sensores.

Entradas:Número de nós sensores, N ,Intervalo de otimização, F ,Níveis de energia iniciais das baterias, $s_1(1)$,Energia de consumo estimado para os primeiros F quadros, $\mathbf{B}(1)$,**para** $k = 1, 2, \dots$ (até a morte da rede),Resolva o problema de otimização (3.4) ou (3.5) para determinar $\mathbf{X}(k)$.Calcule a matriz $\mathbf{B}(k + 1)$ das informações atuais de energias residuais e de recarga dos sensores.Atribua as lacunas no tempo ou tempo-frequência para os nós sensores de acordo com os níveis de atividade em $\mathbf{X}(k)$.**fim**

Capítulo 4

Resultados numéricos

Para todos os casos analisados neste capítulo, o problema de otimização (3.4) foi resolvido utilizando o CVX, que é um sistema que funciona no ambiente MATLAB para modelagem e resolução de problemas de otimização convexa [40]. O código MATLAB-CVX desenvolvido para gerar os resultados mostrados a seguir, é dado no Apêndice A. Para todos os resultados apresentados nesta seção, a energia inicial nas baterias dos nós sensores, os consumos de energia e os valores esporádicos de recarga da bateria não são reais, mas redimensionados de modo a antecipar a morte da rede em relação a uma situação real, prevenindo intervalos de simulação muito longos. Essa escala também foi adotada, por exemplo, em [21], e embora altere o tempos de vida absolutos, ela não afeta as comparações e conclusões sobre os ganhos relativos no prolongamento do tempo de vida. Os resultados referentes à rede não otimizada foram obtidos através do estabelecimento de níveis de atividade equivalentes idênticos $X'_{n,f}(k) = 1/N$ para todos os nós sensores durante todo o intervalo de análise, com $X'_{n,f}(k)$, sendo o elemento na n -ésima linha e na f -ésima coluna na matriz de níveis de atividade equivalente $\mathbf{X}'(k)$, associada com o k -ésimo bloco de F quadros. Observe que esses níveis de atividade não são mais do que a média dos níveis de atividade de todos os nós sensores, que somam até um, durante todos os eventos de otimização até o instante de morte da rede. Como consequência, as energias residuais dos nós sensores da rede não otimizada variam conforme determinado pelos seus consumos calculados

de acordo com $\mathbf{X}'(k)\mathbf{B}(k)$, sendo $\mathbf{B}(k)$ a mesma matriz de consumo máximo considerada na rede otimizada.

4.1 Influência dos parâmetros do sistema

Os efeitos dos parâmetros do sistema sobre o desempenho do método proposto de otimização de tempo de vida, são analisados nesta subseção. Para uma clara visualização dos resultados nos gráficos, é considerado um número pequeno de nós sensores, isto é, $N = 10$. Um grande número de nós é analisado posteriormente. Sempre que um valor de energia normalizado é indicado, significa que o seu valor foi normalizado em relação à máxima energia armazenada na bateria do nó sensor, isto é, S_{\max} . Quando for afirmado que uma única execução da simulação de consumos aleatórios foi adotada, significa que os consumos de energia máximos dos nós sensores foram gerados para todo o intervalo de análise de acordo com o coeficiente de correlação ρ e os limites B_{\min} e B_{\max} , e armazenados para serem reutilizados sob diferentes configurações dos parâmetros do sistema. A energia de morte foi adotada como 5% de S_{\max} . Na prática, esta porcentagem relativamente baixa de energia de morte, corresponde a uma porcentagem elevada da tensão nominal da bateria, associada à tensão de morte [37, 41]. Por exemplo, quando o nível de tensão da bateria do sensor ainda está em uma porcentagem alta, diga-se 70% de sua tensão nominal, a porcentagem de energia restante na bateria relacionada a este valor de tensão, é um valor baixo da energia total, diga-se 5% da energia total ou menos [41].

4.1.1 Efeitos das ponderações da função objetivo

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram as energias residuais obtidas com o método de otimização proposto sob diferentes pesos na função objetivo definida na Equação (3.3), com $(w_1, w_2) = (1, 0)$ para a Figura 4.1, $(w_1, w_2) = (0, 1)$ para a Figura 4.2 e $(w_1, w_2) = (1, 2)$ para a Figura 4.3. Os pesos foram definidos de modo que possam representar as características individuais de cada configuração do problema. A rede

não-otimizada é considerada em todos os gráficos como referência. Foi estabelecido $N = 10$, $K = 400$, $F = 1$, $\rho = 0.98$, sem recarga, $B_{\min} = 0.001$, $B_{\max} = 1$, e valores iniciais de energia idênticos a $s_1(1) = S_{\max} \times \mathbf{1}$, com $S_{\max} = 10$. Uma única execução dos consumos de energia foi adotada. Na maioria dos gráficos desta seção, não foram usadas linhas com símbolos, por razões de clareza. Foram utilizadas somente cores para identificar diferentes nós sensores.

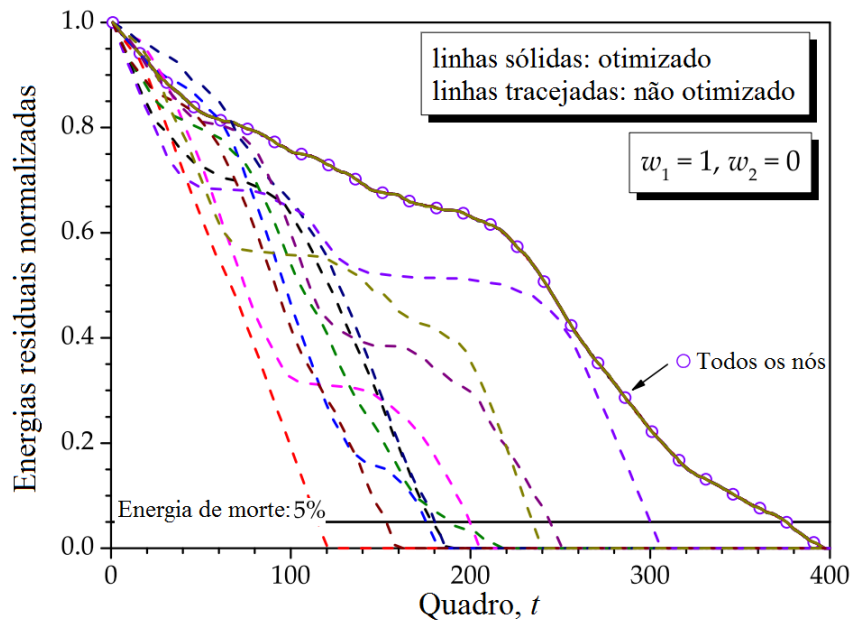


Figura 4.1: Energias residuais obtidas no método proposto para $(w_1, w_2) = (1, 0)$. A rede não otimizada é considerada em todos os gráficos como referência.

A partir do gráfico na Figura 4.1, pode-se inferir que todos os nós sensores têm permissão para comunicação freqüente com o nó central, de forma que eles gastam aproximadamente a mesma quantidade de energia à medida que o tempo passa, ou seja, os nós morrerão juntamente. Além disso, as energias residuais não utilizadas no momento da morte da rede, isto é, as energias desperdiçadas, são mínimas devido aos consumos equalizados. Como será mostrado adiante, para $F > 1$, menor ρ ou ambos, a adoção de $(w_1, w_2) = (1, 0)$ não iria equalizar os consumos com precisão, mas reduziria o tempo de vida da rede. Isto é devido ao uso de informações passadas para otimizar o bloco atual de F quadros: baixas correlações combinadas com blocos mais longos, representam informações passadas menos confiáveis em relação ao momento em que são utilizadas.

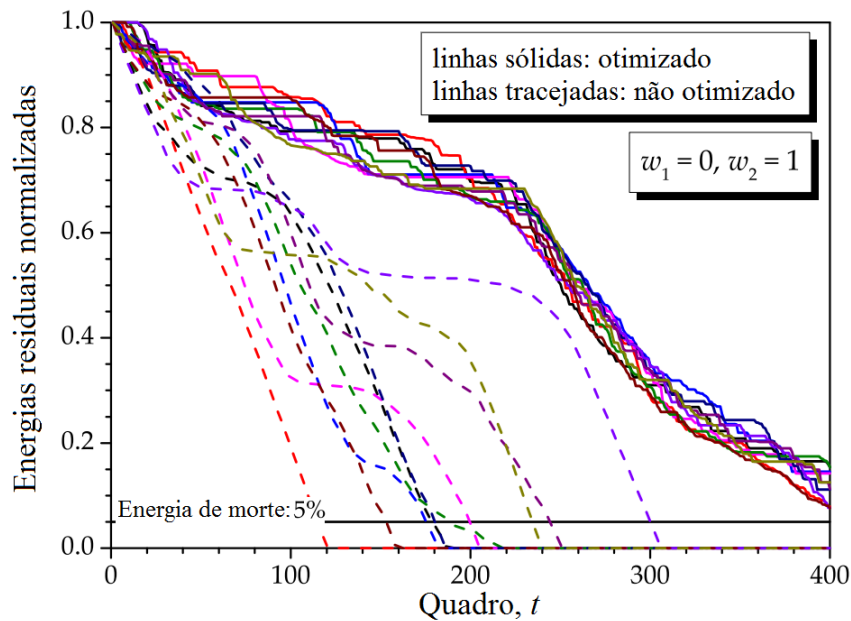


Figura 4.2: Energias residuais obtidas no método proposto para $(w_1, w_2) = (0, 1)$. A rede não otimizada é considerada em todos os gráficos como referência.

A partir do gráfico na Figura 4.2, que considera $(w_1, w_2) = (0, 1)$, pode-se observar que a otimização permite transmissões do tipo rajada, combinadas com períodos de silêncio e transmissões contínuas. As transmissões tipo rajada correspondem a mudanças abruptas das energias residuais, enquanto os intervalos durante os quais as energias residuais não mudam, estão associados aos nós desabilitados (silenciosos). Observe que esta forma de ponderação atinge um aumento do tempo de vida útil da rede em relação a $(w_1, w_2) = (1, 0)$. Como será demonstrado mais adiante neste trabalho, este efeito é ainda maior quando o número de nós sensores é maior.

No gráfico na Figura 4.3, os pesos aplicados à função objetivo foram $(w_1, w_2) = (1, 2)$, resultando numa situação mista em que os consumos não são perfeitamente igualados e apenas algumas pequenas transmissões em rajada e períodos de silêncio ocorrem. Nenhuma penalidade e nenhuma melhoria é observada no tempo de vida da rede em relação ao alcançado quando $(w_1, w_2) = (1, 0)$, que acontece para um número moderado ou pequeno de nós sensores. Se N é grande, ambos $(w_1, w_2) = (1, 0)$ e $(w_1, w_2) = (1, 2)$ têm uma certa penalidade no tempo de vida, mas ela é menor para $(w_1, w_2) = (1, 2)$. Em todas as situações consideradas nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, as melhorias no tempo de vida foram iguais ou superiores a $375/115 \approx 3.27$ vezes.

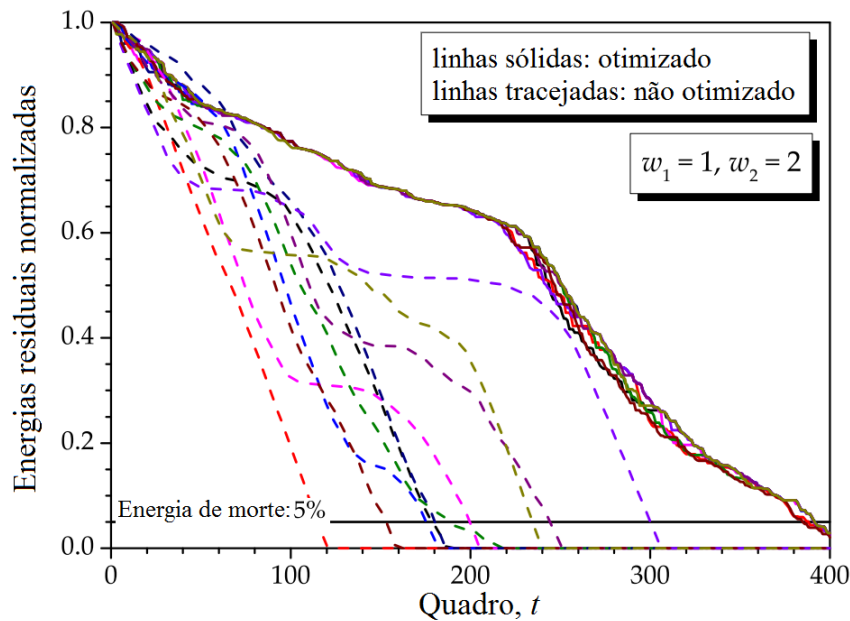


Figura 4.3: Energias residuais obtidas no método proposto para $(w_1, w_2) = (1, 2)$. A rede não otimizada é considerada em todos os gráficos como referência.

Tempos de vida ainda maiores podem ser alcançados à medida que os parâmetros do sistema são escolhidos, de maneira que a morte da rede ocorra mais tarde, como por exemplo, se a energia inicial for incrementada enquanto os consumos permanecem inalterados, se os consumos forem reduzidos para a mesma energia inicial ou se o número de nós sensores é aumentado. Isso ocorre porque as curvas associadas às energias residuais nas redes otimizadas e não otimizadas, tornam-se mais separadas uma da outra à medida que t aumenta. Então, em uma rede real em que os tempos de vida esperados são muito mais altos do que aqueles simuladas aqui, pode-se esperar melhorias consideravelmente maiores com o método proposto. Outra conclusão relevante obtida nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 refere-se ao fato de que os níveis de energia tendem a ser mais contínuos quando $(w_1, w_2) = (1, 0)$ e com característica de degrau quando $(w_1, w_2) = (0, 1)$. No primeiro caso, significa que os nós sensores têm oportunidade freqüente para transmitir seus dados sensoriais ao nó central, enquanto que no segundo caso alguns nós sensores devem permanecer em silêncio durante alguns intervalos, que podem ser relativamente longos.

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os níveis de atividade atribuídos aos nós sensores em relação às energias residuais mostradas nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 respectiva-

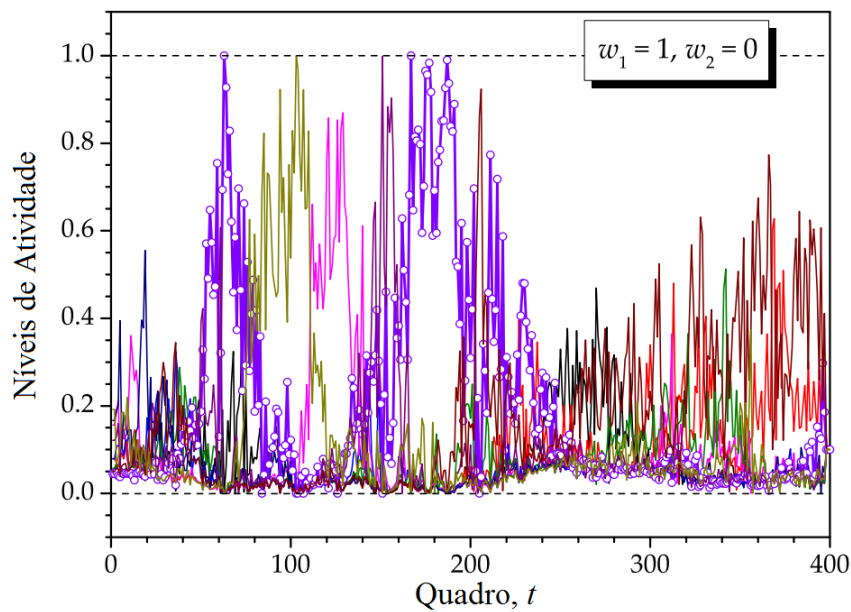


Figura 4.4: Níveis de atividade atribuídos pelo método proposto referente as situações consideradas na Figura 4.1, i.e. $(w_1, w_2) = (1, 0)$.

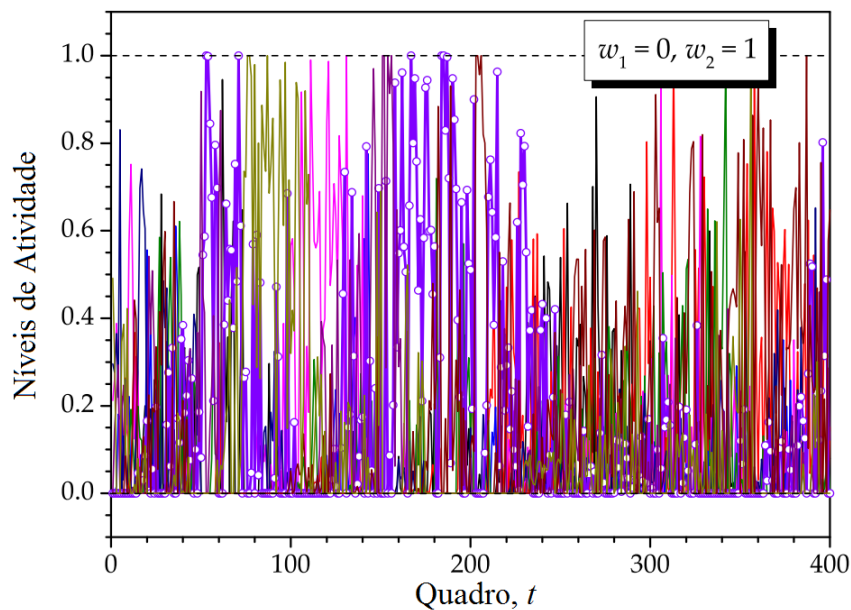


Figura 4.5: Níveis de atividade atribuídos pelo método proposto referente as situações consideradas na Figura 4.2, i.e. $(w_1, w_2) = (0, 1)$.

mente. Em geral, aqueles nós que têm baixa energia residual, estão longe do nó central ou ambos têm atribuídos para si níveis de atividade menores do que aqueles que estão perto do nó central e têm alta energia residual. Por exemplo, pode ser observado que o nó sensor identificado com círculos tem altos níveis de atividade em torno de $t = 60$ e $t = 180$, o que significa que ele está sob a combinação de uma boa condição de canal

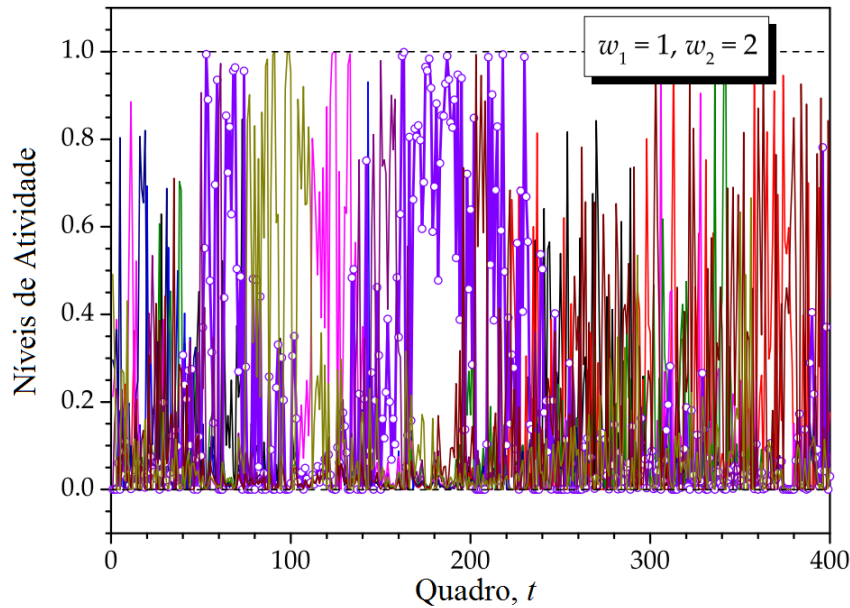


Figura 4.6: Níveis de atividade atribuídos pelo método proposto referente as situações consideradas na Figura 4.3, i.e. $(w_1, w_2) = (1, 2)$.

e tem energia residual suficiente em torno desses intervalos.

4.1.2 Efeito do intervalo de otimização e da mobilidade de nós

O intervalo de otimização F foi definido no modelo proposto para que seja negociado entre a frequência dos eventos de otimização e a velocidade da mobilidade dos nós sensores, do nó central ou ambos. É válido lembrar que uma velocidade maior na mobilidade pode ser simulada reduzindo-se o coeficiente de correlação ρ entre os consumos de energia nos próximos quadros. Quanto maior a velocidade da mobilidade, menor deve ser o intervalo de otimização. Os efeitos destes dois parâmetros são analisados simultaneamente nesta subseção. Considera-se $F = 5$, $F = 10$ e $F = 20$ para complementar os resultados já apresentados para $F = 1$. É considerado $\rho = 0.98$ para representar uma rede com nós de mobilidade moderada a alta e $\rho \approx 1$ para representar uma rede fixa (Ver Figura 3.5 e seus comentários). No primeiro caso, para manter a consistência com os resultados anteriores, foi utilizado a mesma execução única da simulação dos consumos em todo os KF quadros. No último caso apresentado, foi gerada outra execução de tais consumos com $\rho = 0.999999$. Foram consideradas ener-

gias iniciais iguais $s_1(1) = S_{\max} \times \mathbf{1}$, com $S_{\max} = 10$, $B_{\min} = 0.001$, $B_{\max} = 1$, e nenhuma recarga. Foram escolhidos $(w_1, w_2) = (1, 0)$, $N = 10$ e $KF = 400$ para que os efeitos de interesse sejam claramente vistos nos gráficos correspondentes.

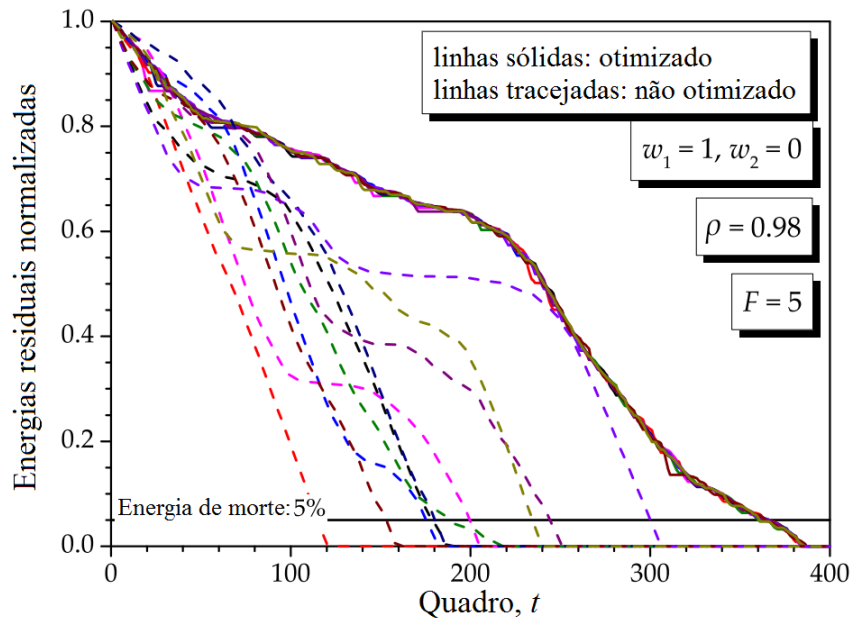


Figura 4.7: Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$, para $F = 5$ e $\rho = 0.98$. A rede não otimizada é considerada como referência.

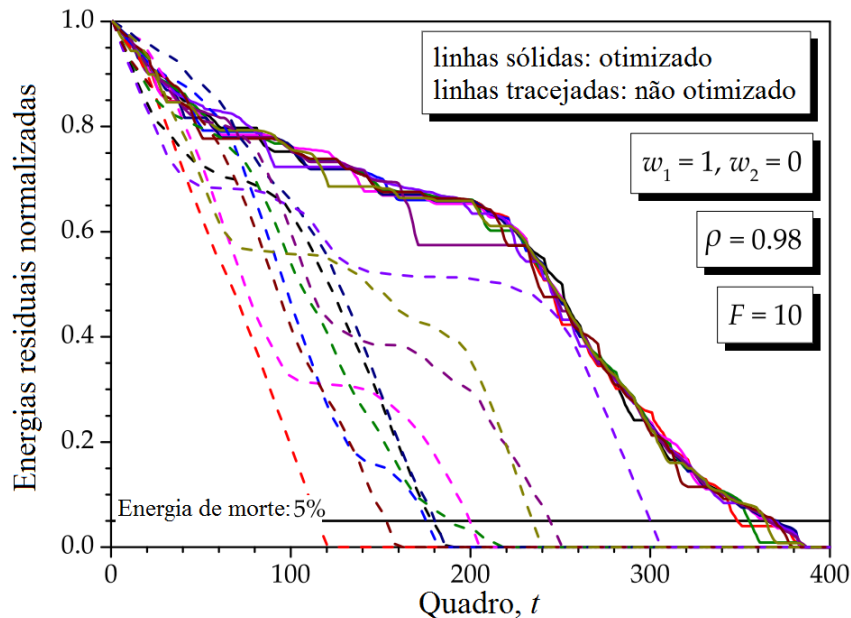


Figura 4.8: Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$, para $F = 10$ e $\rho = 0.98$. A rede não otimizada é considerada como referência.

As Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 mostram os resultados obtidos considerando diferen-

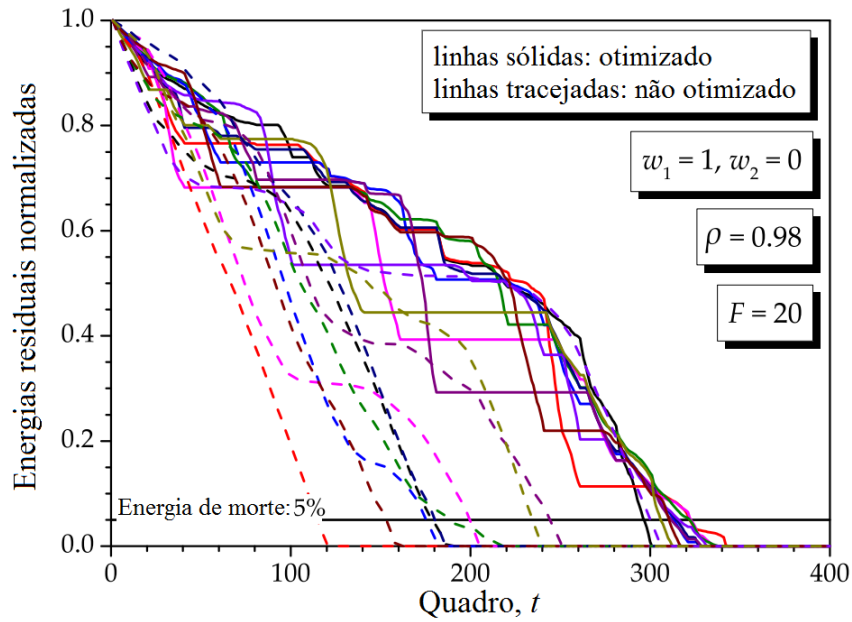


Figura 4.9: Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$, para $F = 20$ e $\rho = 0.98$. A rede não otimizada é considerada como referência.

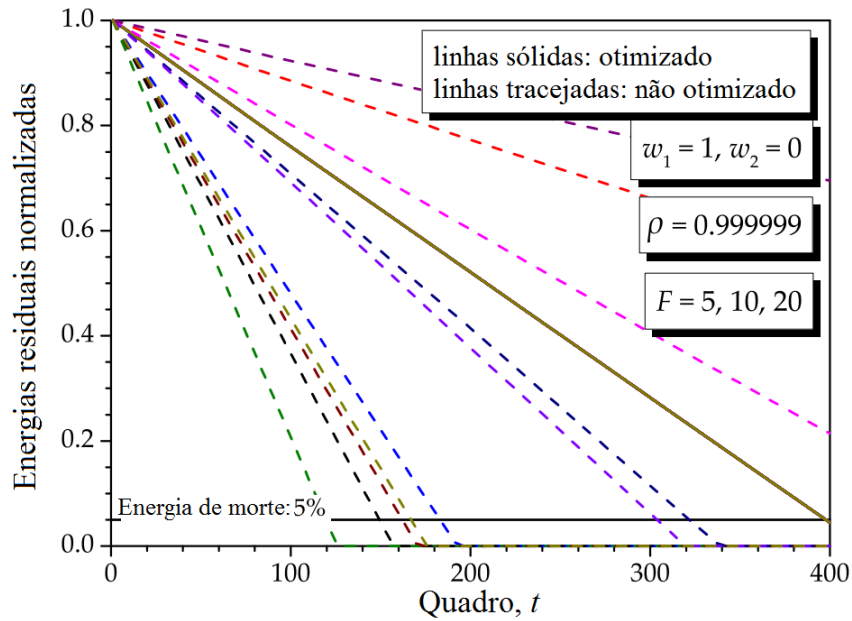


Figura 4.10: Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$, para $F = 5, 10, 20$ e $\rho = 0.999999$. A rede não otimizada é considerada como referência.

tes intervalos de otimização e coeficientes de correlação. Comparando os resultados para $\rho = 0.98$, pode-se concluir que um aumento no intervalo de otimização produz uma degradação esperada no desempenho, ou seja, poucos ganhos no tempo de vida.

Isto é devido ao fato de que as informações passadas sobre energias residuais, produzem consumos estimados menos correlacionados com os atuais, à medida que F aumenta. Comparando estes resultados a Figura 4.1, em que o momento de morte da rede otimizada ocorre em torno de $t = t_d = 375$, tem-se agora instantes de morte em torno de $t_d = 370$ para $F = 5$, $t_d = 350$ para $F = 10$ e $t_d = 300$ para $F = 20$. Agora, observando-se a Figura 4.10 que, apenas para efeitos de comparação, considera nós sensores fixos (uma situação atípica e impraticável devido a variação do canal), pode-se notar que o tempo de vida não muda com F . Conseqüentemente, apenas alguns eventos de otimização durante a operação de rede seriam suficientes para corrigir as variações no consumo de energia em relação ao que foi predito pela otimização. Essas variações ocorrem devido a outras causas além da mobilidade, como por exemplo níveis de atividade não utilizados, mudanças no estado dos nós sensores, cargas de processamento diferentes que dependem da tarefa realizada, dentre outros.

4.1.3 Efeito da recarga e de energias iniciais diferentes

O efeito da recarga e das energias iniciais desiguais podem ser analisados separadamente, a partir da execução dos consumos utilizados anteriormente e com um intervalo de otimização $F = 1$. Novamente, foi utilizado $N = 10$, $K = 400$, $B_{\min} = 0.001$, $B_{\max} = 1$ e $\rho = 0.98$. A Figura 4.11 mostra alguns resultados assumindo-se energias iniciais normalizadas (em relação a S_{\max}) igualmente espaçadas no intervalo $[0.8, 1]$ e uma recarga única em $t = t_r = 200$, com valores de recarga normalizados e igualmente distribuídos em $[0, 0.2]$. Estas energias igualmente espaçadas foram adotadas para facilitar a visualização nos gráficos. A partir desta figura, pode-se notar a redução esperada no tempo de vida produzida por energias iniciais menores do que o máximo, combinada com a melhoria esperada do tempo de vida obtida com a recarga, independentemente dos pesos da função objetivo. No entanto, a observação mais importante advém da equalização dos consumos, que partem de energias iniciais desiguais e do restabelecimento da operação normal do processo de otimização após a variação das energias residuais, causada pela recarga. Pode se observar que os nós sensores com menos energias iniciais são mantidos em silêncio por intervalos maiores do que aqueles

com energias iniciais maiores, até o momento em que todos os consumos são equalizados no caso de $(w_1, w_2) = (1, 0)$ ou quando a operação característica é restabelecida no caso de $(w_1, w_2) = (0, 1)$. Um comportamento semelhante ocorre em relação à recarga.

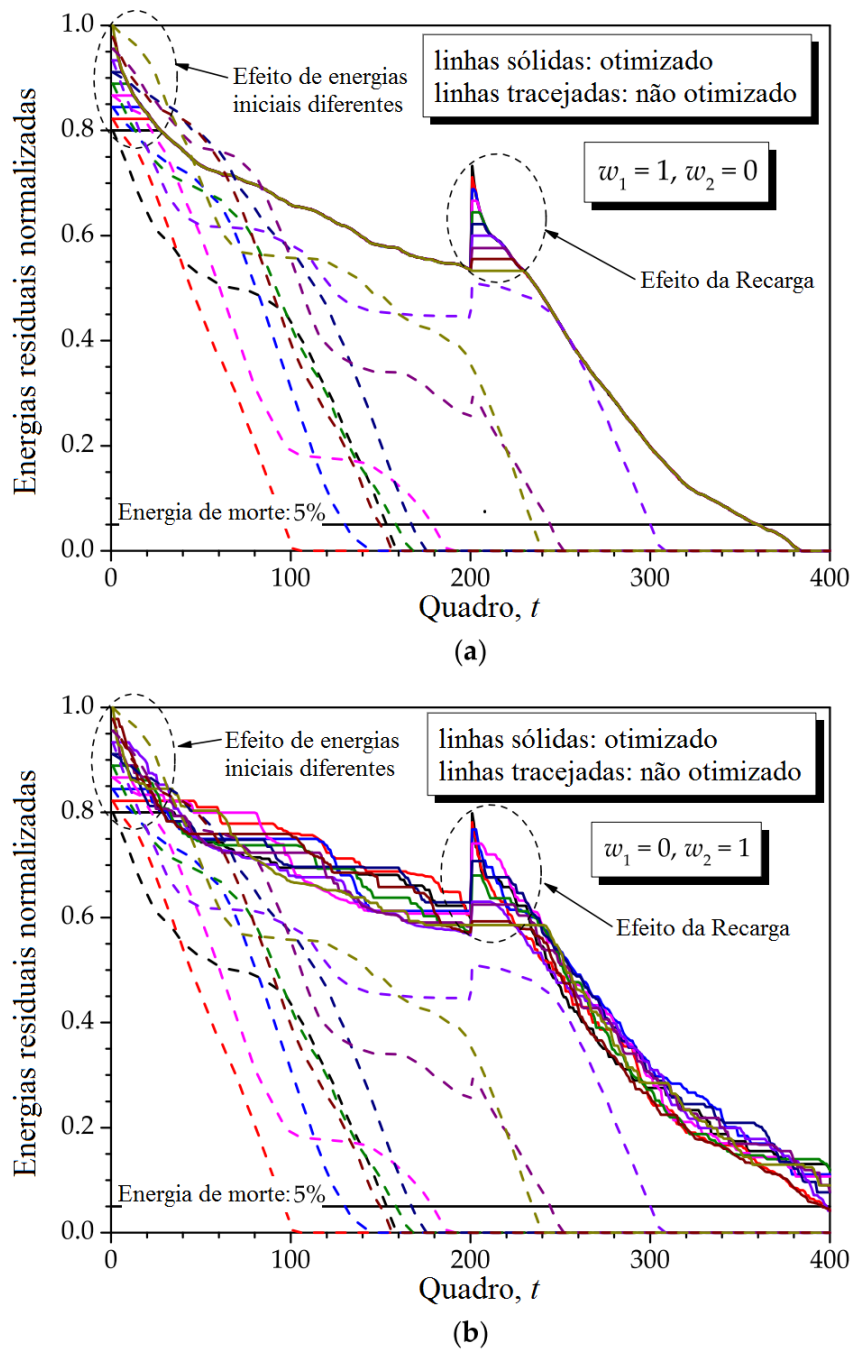


Figura 4.11: Energias residuais obtidas pelo método proposto com $(w_1, w_2) = (1, 0)$ (a) e $(w_1, w_2) = (0, 1)$ (b) com recarga e energias iniciais diferentes. A rede não otimizada é considerada como referência.

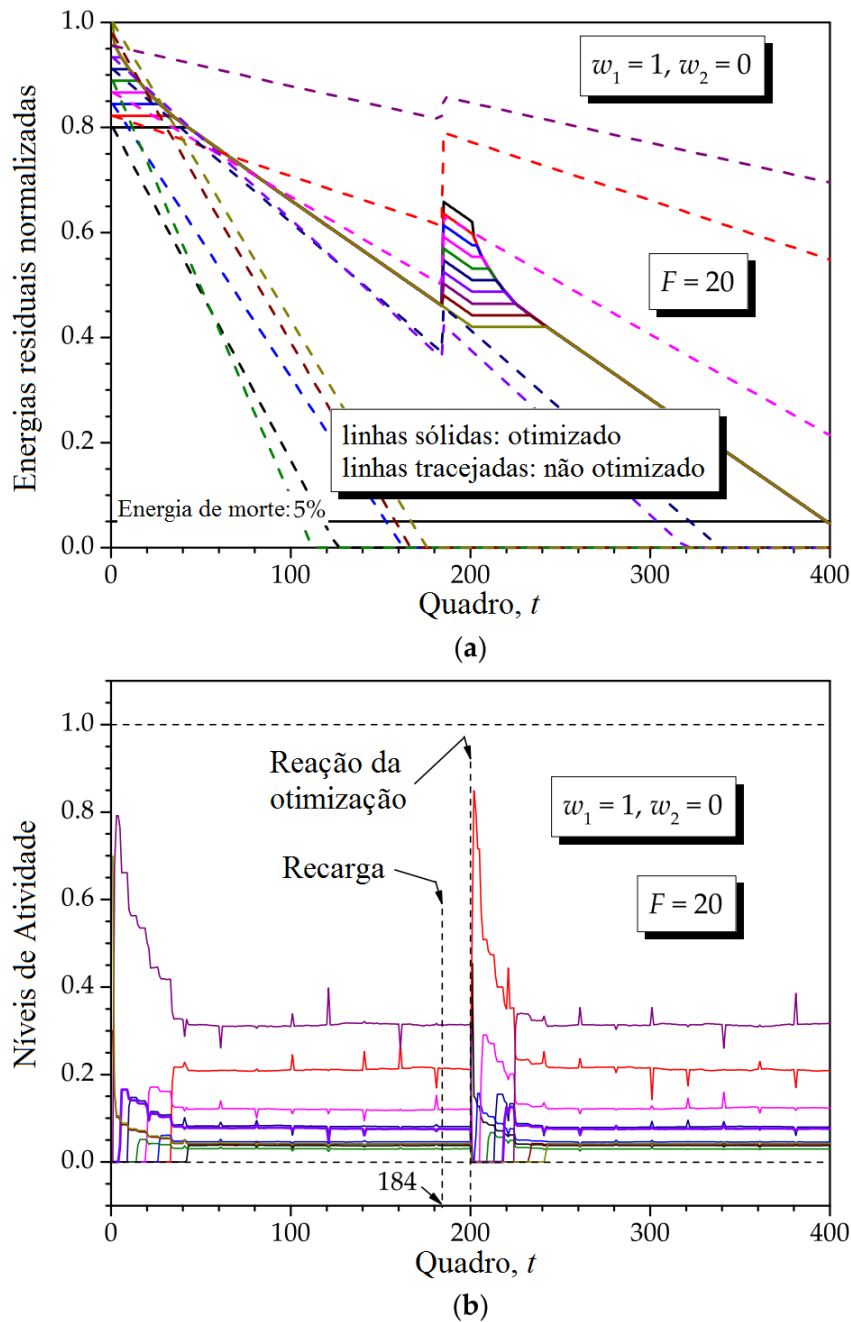


Figura 4.12: Energias residuais (a) e níveis de atividade (b) do método de otimização proposto para $(w_1, w_2) = (1, 0)$, com recarga em $t = t_r = 184$ e energias iniciais diferentes. A rede não otimizada é considerada no gráfico (a) como referência.

Vale ressaltar que o efeito da recarga só começa a ser levado em conta pela otimização durante o bloco de quadros subsequentes àquele em que ocorreu o evento de recarga. Isto não é evidente na Figura 4.11 porque $F = 1$. Na Figura 4.12, esta característica é demonstrada em termos das energias residuais e dos respectivos níveis de

atividade. Para traçar esta figura, foi adotado $F = 20$ e a mesma execução previamente considerada dos consumos com $\rho = 0.999999$. O conjunto de energias iniciais e valores de recarga foi o mesmo utilizado anteriormente, isto é, energias iniciais normalizadas e valores de recarga igualmente espaçados em $[0.8, 1]$ e $[0, 0.2]$, respectivamente. Por conveniência, o instante de recarga foi definido em $t = t_r = 184$, isto é, ocorre dezesseis quadros antes do início do décimo primeiro bloco de $F = 20$ quadros. A partir do gráfico (a) da Figura 4.12, um comportamento semelhante ao identificado na Figura 4.11 pode ser observado em relação às energias iniciais desiguais. No entanto, agora o efeito da recarga é diferente: pode ser notado que após a recarga, os nós sensores mantêm seus gastos de energia até $t = 200$, conforme definido pelo evento de otimização anterior, ou seja, as taxas de descarga são as mesmas, independente dos novos níveis de energia nas baterias dos nós sensores. Apenas em $t = 200$ a otimização fica ciente da recarga e controla os níveis de atividade para que os consumos comecem a ser equalizados novamente. A dinâmica dos níveis de atividade é mostrada no gráfico (b) da Figura 4.12, onde as variabilidades associadas com a adaptação às energias iniciais desiguais no início do intervalo de análise podem ser observadas, juntamente com a re-adaptação devida a recarga depois de $t = 200$. Os picos em cada múltiplo inteiro de $F = 20$ nos níveis de atividade são devidos à compensação de pequenas variações nos consumos durante o bloco anterior. Estas variações ocorrem uma vez que ρ não é exatamente um, e tendem a diminuir com $\rho \rightarrow 1$. Como já mencionado, na prática, tais variações sempre ocorrerão devido a outras causas, além da mobilidade. Os picos nos níveis de atividade demonstram a ação da otimização para compensar essas variações.

4.1.4 Efeito da densidade de nós

Conforme indicado no Capítulo 3, uma razão maior de N/B_{\max} implica nós sensores menos distantes uns em relação aos outros, isto é, uma rede mais densa. A variação da densidade do nó pode ser analisada variando-se N para um B_{\max} fixo ou variando B_{\max} para um N fixo. Ambas as análises são feitas na sequência, demonstrando a escalabilidade do método proposto. Antes de apresentar os resultados, será abordado um pouco mais sobre a densidade do nó, definindo-a, primeiramente, como a razão entre

o número de nós e a área onde eles são implantados. Seja d_{\min} e d_{\max} as distâncias mínimas e máximas, respectivamente, que um nó sensor pode estar do nó central. A distância mínima definirá B_{\min} e a distância máxima definirá B_{\max} . Assumindo que a cobertura sem fio do nó central é circular e que um nó sensor pode estar em qualquer posição dentro desta área circular, então, $d_{\min} = 0$ e d_{\max} é o raio da área de cobertura. Assim, a densidade do nó, em nós por metro quadrado, pode ser definida como na Equação (4.1):

$$D = \frac{N}{\pi d_{\max}^2} \quad (4.1)$$

Na prática, o consumo de energia será proporcional à potência de transmissão do nó sensor necessária para atender uma taxa de erro especificada no nó receptor, que por sua vez dependerá das especificações da camada física. Suponha que essa taxa de erro alvo seja alcançada se a potência do sinal recebido no nó central for P_{target} . A Equação (4.2) descreve modelo de atenuação no espaço da log-distância [42] (pp. 199-202):

$$P_{\text{target}} = \frac{P_{\text{ref}}(d_0)}{(d/d_0)^\eta} \quad (4.2)$$

onde $P_{\text{ref}}(d_0)$ é uma potência de referência a uma distância próxima da referência d_0 a partir do transmissor do nó sensor, η é o expoente de perda que depende do ambiente e d é a distância de análise. Os valores típicos de η variam de dois, no cenário de propagação em espaço livre, a quatro ou até mais, em áreas obstruídas. A energia consumida por um nó sensor a uma distância d do nó central será proporcional a $P_{\text{ref}}(d_0)$, ou seja, será proporcional a $(d/d_0)^\eta P_{\text{target}}$. Dado que P_{target} é constante e assumindo $d_0 = 1$ metro, então o consumo de energia de um nó sensor localizado a uma distância d do nó central será proporcional a d^η , como pode ser mostrado na Equação (4.3):

$$\begin{aligned} B_{\min} &= C d_{\min}^\eta, \\ B_{\max} &= C d_{\max}^\eta, \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde C é uma constante de proporcionalidade dependente do hardware e da bateria, que representa a conversão apropriada da potência de transmissão para a energia consumida. A partir deste resultado, é possível visualizar que d_{\max} é proporcional a $B_{\max}^{1/\eta}$. Com este resultado na Equação (4.1), obtém-se a Equação (4.4):

$$D \propto \frac{N}{B_{\max}^{2/\eta}} \quad (4.4)$$

Assumindo $\eta = 2$ para simplificar, a densidade da rede pode ser multiplicada por qualquer fator, multiplicando N ou dividindo B_{\max} por este fator. Nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, são considerados $B_{\min} = 0.001$, $N = 10$ e $B_{\max} = 1$, proporcionando uma densidade de nó $D \propto 10$. Obviamente, numa rede real, a densidade real será tipicamente menor do que 10 nós por metro quadrado, o que significa que a proporcionalidade acima é tipicamente menor do que um. Além disso, é preciso lembrar que os valores de energia foram redimensionados para antecipar a morte da rede, o que é consistente para uma densidade de nós tão alta.

A Figura 4.13 mostra as energias residuais produzidas pelo método proposto com um aumento de 10 vezes na densidade do nó em relação ao considerado na Figura 4.8, que foi escolhido como o representativo para a presente análise. O gráfico (a) da Figura 4.13 considera $B_{\min} = 0.001$, $N = 10$ e $B_{\max} = 0.1$, isto é, $D \propto 100$, enquanto que o gráfico (b) considera $N = 100$ e $B_{\max} = 1$, resultando também em $D \propto 100$. A partir destes resultados, é demonstrada a escalabilidade do método proposto, e é ilustrado que o tempo de vida da rede aumenta à medida que o número de nós aumenta, ou que seus consumos de energia diminuem. Para traçar os resultados na Figura 4.13, foram utilizadas duas execuções independentes de simulação dos consumos dos nós sensores durante o intervalo de análise correspondente.

Para melhor visualização dos resultados para efeitos de comparação, todos os dados são apresentados na Tabela 4.1. Nela é possível comparar os ganhos no tempo de vida das redes otimizadas em relação ao tempo de vida das redes não otimizadas, além de comparações dos ganhos de acordo com as modificações de cada parâmetro do modelo apresentado, como o número de frames F , a mobilidade de acordo com ρ , o número

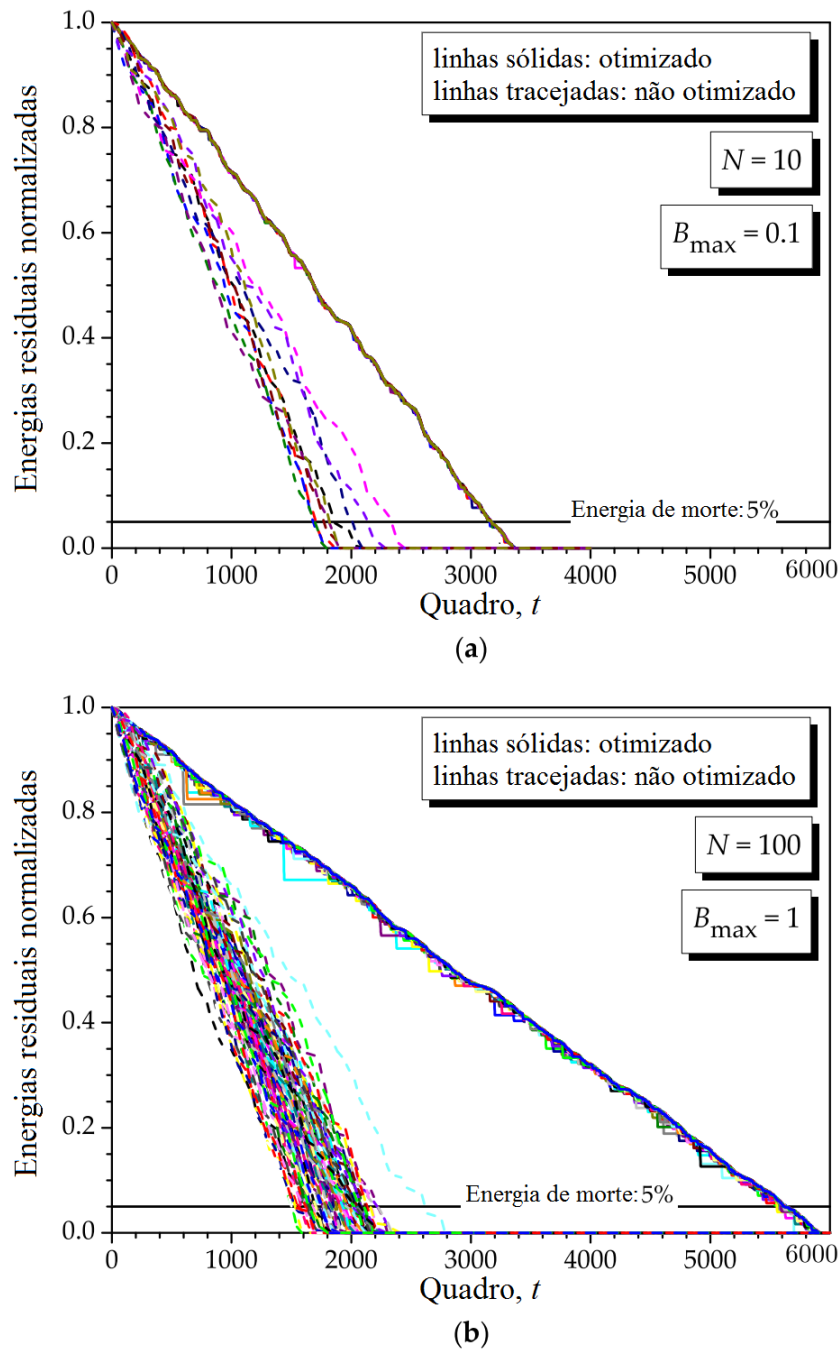


Figura 4.13: Energias residuais obtidas no método proposto para $(w_1, w_2) = (1, 0)$, $F = 10$, $B_{\min} = 0.001$ e $\rho = 0.98$, com $N = 10$ e $B_{\max} = 0.1$ **(a)**, e $N = 100$ e $B_{\max} = 1$ **(b)**. A rede não otimizada é considerada como referência.

de nós sensores N , dentre outros.

Tabela 4.1: Resumo de resultados apresentados. O instante de morte da rede otimizada é t_d e o instante de morte para rede não otimizada é t'_d .

Figura	$(w1, w2)$	Recarga	F	KF	N	ρ	B_{min}	B_{max}	t_d	t'_d
4.1	(1, 0)	não	1	400	10	0.98	0.001	1	375	115
4.2	(0, 1)	não	1	400	10	0.98	0.001	1	>400	115
4.3	(1, 2)	não	1	400	10	0.98	0.001	1	384	115
4.7	(1, 0)	não	5	400	10	0.98	0.001	1	360	115
4.8	(1, 0)	não	10	400	10	0.98	0.001	1	348	115
4.9	(1, 0)	não	20	400	10	0.98	0.001	1	296	115
4.10	(1, 0)	não	5,10,20	400	10	0.9999	0.001	1	397	120
4.11 (a)	(1, 0)	sim	1	400	10	0.98	0.001	1	360	96
4.11 (b)	(0, 1)	sim	1	400	10	0.98	0.001	1	395	96
4.12 (a)	(1, 0)	sim	20	400	10	0.9999	0.001	1	397	105
4.13 (a)	(1, 0)	não	10	6000	10	0.98	0.001	0.1	3155	1680
4.13 (b)	(1, 0)	não	10	6000	100	0.98	0.001	1	5556	1504

4.2 Complexidade de tempo

A eficácia de um método de otimização é geralmente medida pela complexidade computacional de sua solução, que revela o crescimento assintótico do tempo de processamento à medida que o número de dimensões aumenta. No entanto, a análise teórica desta complexidade pode trazer obstáculos matemáticos, que surgem, por exemplo, devido às propriedades teóricas do método, à sua implementação, à escolha da linguagem de programação e aos valores dos parâmetros [43, 44]. Isto é particularmente verdade no caso do problema de otimização (3.4): embora seja convexo, ele não tem solução de forma fechada, e na configuração utilizada o problema não foi resolvido utilizando um código para uma aplicação específica, desenvolvido por um algoritmo de otimização específico. Em vez disso, o problema foi resolvido utilizando o pacote CVX, que depende das capacidades dos solucionadores incorporados ao pacote. No entanto, nesta última subseção são apresentados os resultados de uma análise de complexidade empírica por meio de testes de tempo de execução. Os resultados desta análise não podem ser associados a tempos de processamento práticos em termos absolutos, mas podem dar uma idéia aproximada do aumento relativo do tempo de processamento da solução proposta. Para calcular os tempos de processamento, foram utilizadas as funções `tic` e `toc` do MATLAB, que fornecem medições de tempo confiáveis. A fim de reduzir os efeitos da aleatoriedade, as medições foram retiradas das

médias de 500 soluções de uma única instância do problema de otimização (3.4), para o número de nós sensores variando de $N = 50$ a $N = 1000$ em passos de 50 e fatores de ponderação $(w_1, w_2) = (1, 0)$, $(w_1, w_2) = (0, 1)$ e $(w_1, w_2) = (1, 1)$. As medições foram realizadas em um computador Dell (Dell, Hortolândia, SP) com processadores Intel Core i7-3632QM de 2,2 GHz com o sistema operacional Windows 7 Professional com Service Pack 1 e o MATLAB R2010b versão de 64 bits (7.11.0.584). Para um algoritmo de otimização cuja complexidade polinomial de tempo está no número de nós sensores, isto é, $\mathcal{O}(N^a)$, onde a é a constante de potência a ser determinada. Foi utilizada uma função de ajuste de curva de potência para encontrar a . Para exemplificar o critério adotado para avaliação da eficácia do método foi gerada a Figura 4.14. Nela pode ser observada a curva característica relacionada ao aumento no tempo de processamento em relação ao número de nós sensores presentes na rede. Os resultados estão resumidos na Tabela 4.2, onde se pode concluir que o maior aumento no tempo é $\mathcal{O}(N^{1.44})$, o que mostra que o método de otimização proposto tem uma complexidade de tempo com um expoente de valor baixo, o que significa pode ser implementado na prática.

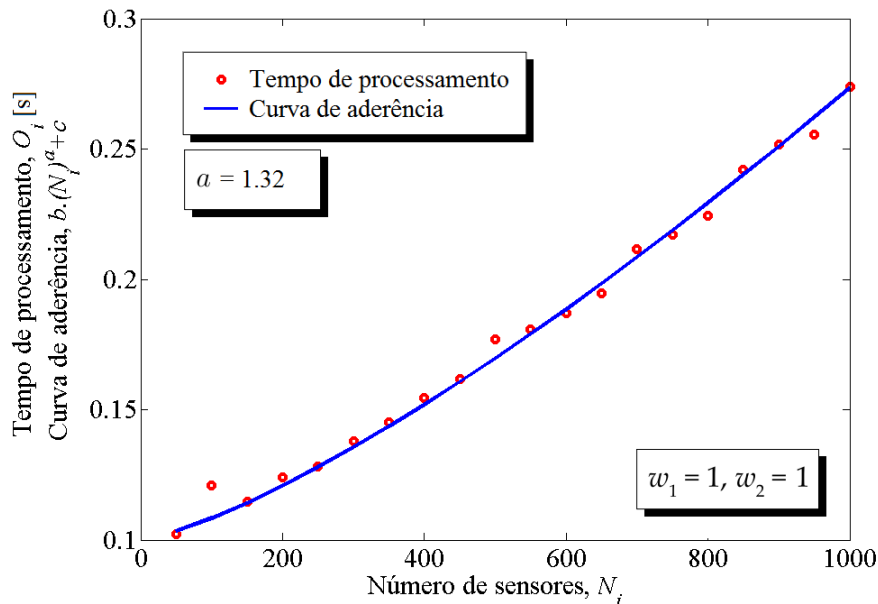


Figura 4.14: Curva de crescimento do tempo de processamento em relação ao número de nós sensores da rede.

Tabela 4.2: Complexidade de tempo empírica média do método de otimização para prolongamento no tempo de vida proposto. A coluna da direita mostra a ordem de crescimento a .

Pesos w_1, w_2	Ordem de crescimento a
1, 0	1.32
0, 1	1.44
1, 1	1.32

Capítulo 5

Conclusões e Propostas para Novas Pesquisas

Este trabalho apresentou um novo método para prolongar o tempo de vida útil de redes fixas ou móveis de sensores sem fio. O método controla dinamicamente os chamados níveis de atividade de comunicação dos nós sensores, de forma que frações das lacunas de tempo ou tempo-frequência num quadro são atribuídas de forma ótima aos nós sensores, para se comunicar com o nó central, ao mesmo tempo em que economiza energia. O método proposto utiliza a solução de um problema de otimização convexa em que a função objetivo a ser minimizada é a soma ponderada da máxima energia residual e da máxima energia residual descontada, onde o desconto atua em favor da atribuição de níveis de atividade mais elevados aos nós sensores que têm energias residuais mais elevadas e melhores canais para o nó central. O resultado é um equilíbrio entre a minimização da energia desperdiçada, a manutenção da vazão de dados e a minimização da energia gasta para relatar a informação sensorial ao nó central. Uma vez que o problema de otimização é convexo, com a possibilidade de ser transformado em um problema de programação linear, solucionadores maduros e rápidos disponíveis na prática, podem ser aplicados de forma eficiente. Uma análise da complexidade empírica foi realizada e revelou que o método de otimização proposto tem uma complexidade de tempo $\mathcal{O}(N^{1.44})$, significando que ele tem potencial para implementação

em redes reais. Além disso, o método proposto é flexível o suficiente para permitir o controle da frequência na qual as tarefas de otimização são realizadas, de acordo com a mobilidade esperada dos nós. Outro mérito, com apelo prático significativo do método proposto, é que ele usa apenas informações passadas sobre as energias residuais e das possíveis recargas, relatadas pelos nós sensores, não exigindo qualquer informação em tempo real.

A seguir seguem algumas oportunidades para pesquisas e trabalhos futuros:

- A modelagem da tarefa de comunicação através de teoria das filas e sua agregação com o modelo de otimização proposto é uma primeira abordagem. Desta agregação, pode-se analisar a influência da estratégia de otimização no tráfego de dados associado com um modelo de rede realista.
- A adoção de um modelo de mobilidade para os nós é um passo importante para a construção de uma análise de uma aplicação específica, pois o modelo terá um grande impacto no padrão de consumo de energia dos nós.
- A implementação de uma rede real operando sob o método de otimização proposto, com espaço para implementações de estratégias na *MAC* e de roteamento, que podem se beneficiar do método e de possíveis conexões com a Internet das Coisas (IoT), tendo como referência [45].
- A aplicação do modelo de otimização para o projeto de um modelo na camada de rede, a fim de considerar retransmissões ou comunicação multi-hop, também é um ponto interessante a ser considerado. Isso pode melhorar ainda mais o tempo de vida da rede, reduzindo o alto consumo de energia causado pela comunicação com os nós centrais distantes na arquitetura centralizada, mas exigindo nós sensores mais inteligentes para lidar com os protocolos associados à comunicação multi-hop.
- A estratégia de otimização proposta aqui poderia ser analisada sob diferentes critérios para definir a vida útil da rede, tomando como referência as definições já consideradas, por exemplo, em [13, 33]. Neste trabalho, assumiu-se que o

tempo de vida da rede é o tempo de vida mínimo em todos os nós ou, de forma equivalente, é determinado quando o primeiro sensor cessa a operação. No entanto, é uma tarefa específica da aplicação determinar quando uma rede deve ser considerada não funcional. Ele pode ser definido, por exemplo, quando uma porcentagem de sensores se tornem inativos ou há perda de cobertura para alguns nós sensores.

- A modelagem da recarga e da descarga das baterias também é uma investigação desafiadora, visando trazer a simulação de rede para um nível mais realista. Dois aspectos importantes não podem ser esquecidos nesta modelagem: a transmissão de energia de rádio-frequência (ou outro esquema de coleta de energia) e o efeito de capacidade de taxa [18], que está relacionado com a taxa de descarga da bateria: reduz significativamente a vida útil da bateria e, assim, reduz o tempo de vida da rede. As baterias à base de grafeno [46] são dispositivos promissores que podem influenciar dramaticamente estes modelos e prolongar consideravelmente a vida útil da rede para valores sem precedentes.

Referências Bibliográficas

- [1] Al-Jemeli, M.; Hussin, F.A. An Energy Efficient Cross-Layer Network Operation Model for IEEE 802.15.4-Based Mobile Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors J.* **2015**, *15*, 684–692.
- [2] Munir, S.; Ren, B.; Jiao, W.; Wang, B.; Xie, D.; Ma, J. Mobile Wireless Sensor Network: Architecture and Enabling Technologies for Ubiquitous Computing. In Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW '07), Niagara Falls, ON, Canada, 21–23 May **2007**; Volume 2, pp. 113–120.
- [3] Mitola, J., III; Maguire, G.Q., Jr. Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Pers. Commun. Mag.* **1999**, *6*, 13–18.
- [4] Qu, Z.; Xu, Y.; Yin, S. A novel clustering-based spectrum sensing in cognitive radio wireless sensor networks. In Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS), Shenzhen, China, 27–29 November **2014**; pp. 695–699.
- [5] Zhang, Z.; Huang, J.; Wang, H.; Fang, H. Power control and localization of wireless body area networks using semidefinite programming. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous HealthCare (Ubi-HealthTech), Beijing, China, 28–30 May **2015**; pp. 1–5.
- [6] Popovic, Z.; Falkenstein, E.; Costinett, D.; Zane, R. Low-Power Far-Field Wireless Powering for Wireless Sensors. *Proc. IEEE* **2013**, *101*, 1397–1409.

- [7] Li, J.W. Wireless power transmission: State-of-the-arts in technologies and potential applications (invited paper). In Proceedings of the 2011 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC), Melbourne, Australia, 5–8 December **2011**; pp. 86–89.
- [8] Mascarenas, D.L.; Flynn, E.B.; Todd, M.D.; Overly, T.G.; Farinholt, K.M.; Park, G.; Farrar, C.R. Experimental studies of using wireless energy transmission for powering embedded sensor nodes. *J. Sound Vib.* **2010**, *329*, 2421–2433.
- [9] Yun, Y.; Xia, Y. Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Networks with Mobile Sink in Delay-Tolerant Applications. *IEEE Trans. Mob. Comput.* **2010**, *9*, 308–318.
- [10] Rahman, M.N.; Matin, M.A. Efficient algorithm for prolonging network lifetime of wireless sensor networks. *Tsinghua Sci. Technol.* **2011**, *16*, 561–568.
- [11] Luo, J.; Hubaux, J. Joint Sink Mobility and Routing to Maximize the Lifetime of Wireless Sensor Networks: The Case of Constrained Mobility. *IEEE/ACM Trans. Netw.* **2010**, *18*, 871–884.
- [12] Rault, T.; Bouabdallah, A.; Challal, Y. WSN Lifetime Optimization through Controlled Sink Mobility and Packet Bufferization. In Proceedings of the 5th Global Information Infrastructure Symposium, Trento, Italy, 28–31 October **2013**.
- [13] Mak, N.H.; Seah, W.K.G. How Long is the Lifetime of a Wireless Sensor Network? In Proceedings of the 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Bradford, UK, 26–29 May **2009**; pp. 763–770.
- [14] Zhang, P.; Xiao, G.; Tan, H.P. Clustering algorithms for maximizing the lifetime of wireless sensor networks with energy-harvesting sensors. *Comput. Netw.* **2013**, *57*, 2689–2704.
- [15] Alfieri, A.; Bianco, A.; Brandimarte, P.; Chiasserini, C. Maximizing System Lifetime in Wireless Sensor Networks. *Eur. J. Op. Res.* **2007**, *181*, 390–402.

- [16] Ghosal, A.; Halder, S. Lifespan Prolonging Location-Wise Predetermined Deployment Strategy for Visual Sensor Networks. *J. Netw. Comput. Appl.* **2016**, *63*, 86–97.
- [17] Tashtarian, F.; Hossein Yaghmaee Moghaddam, M.; Sohraby, K.; Effati, S. On Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Networks in Event-Driven Applications With Mobile Sinks. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2015**, *64*, 3177–3189.
- [18] Pinto, A.R.; Poehls, L.B.; Montez, C.; Vargas, F. Power Optimization for Wireless Sensor Networks. In *Wireless Sensor Networks—Technology and Applications*; InTech: Rijeka, Croatia, **2012**; pp. 23–50.
- [19] Luo, F.; Jiang, C.; Zhang, H.; Wang, X.; Zhang, L.; Ren, Y. Node Energy Consumption Analysis in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Vancouver, BC, Canada, 14–17 September **2014**; pp. 1–5.
- [20] Rout, R.; Ghosh, S. Enhancement of Lifetime using Duty Cycle and Network Coding in Wireless Sensor Networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.* **2013**, *12*, 656–667.
- [21] Chen, Y.; Zhao, Q. On the lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Commun. Lett.* **2005**, *9*, 976–978.
- [22] Munir, A.; Gordon-Ross, A. Optimization Approaches in Wireless Sensor Networks. In *Sustainable Wireless Sensor Networks*; InTech: Rijeka, Croatia, **2010**; pp. 313–338.
- [23] Chang, J.H.; Tassiulas, L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.* **2004**, *12*, 609–619.
- [24] Chang, J.H.; Tassiulas, L. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In Proceedings of the INFOCOM 2000 Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Tel Aviv, Israel, 26–30 March **2000**; Volume 1, pp. 22–31.

- [25] Mehrabi, A.; Kim, K. Maximizing Data Collection Throughput on a Path in Energy Harvesting Sensor Networks Using a Mobile Sink. *IEEE Trans. Mobile Comput.* **2016**, *15*, 690–704.
- [26] HCF. *WirelessHART Specification 7.5: TDMA Data-Link Layer*; The HART Communication Foundation: Austin, Texas, USA, **2008**.
- [27] The International Society of Automation (ISA). *ISA-100.11a-2011: Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and Related Applications*; ISA: Eindhoven, The Netherlands, **2011**.
- [28] Petersen, S.; Carlsen, S. WirelessHART Versus ISA100.11a: The Format War Hits the Factory Floor. *IEEE Ind. Electron. Mag.* **2011**, *5*, 23–34.
- [29] IEEE. *802.15.4e-2012: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer*; IEEE: New York, NY, USA, **2012**.
- [30] Martinez, B.; Vilajosana, X.; Chraim, F.; Vilajosana, I.; Pister, K.S.J. When Scavengers Meet Industrial Wireless. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2015**, *62*, 2994–3003.
- [31] Gilli, M.; Maringer, D.; Schumann, E. *Numerical Methods and Optimization in Finance*; Elsevier Academic Press: London, UK, **2011**.
- [32] Schumann, E. Generating Correlated Uniform Variates. Available online: <http://comisef.wikidot.com/tutorial:correlateduniformvariates/> (accessed on 19 July **2016**).
- [33] Dietrich, I.; Dressler, F. On the Lifetime of Wireless Sensor Networks. *ACM Trans. Sens. Netw.* **2009**, *5*, 1–39.
- [34] Cheng, Z.; Perillo, M.; Heinzelman, W. General Network Lifetime and Cost Models for Evaluating Sensor Network Deployment Strategies. *IEEE Trans. Mob. Comput.* **2008**, *7*, 484–497.

- [35] Ren, J.; Zhang, Y.; Zhang, K.; Liu, A.; Chen, J.; Shen, X. Lifetime and Energy Hole Evolution Analysis in Data-Gathering Wireless Sensor Networks. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2015**, *PP*, 1–1.
- [36] Xiang, M.; Shi, W.; Jiang, C.; Zhang, Y. Energy efficient clustering algorithm for maximizing lifetime of wireless sensor networks. *AEU Int. J. Electron. Commun.* **2010**, *64*, 289–298.
- [37] Damaso, A.; Rosa, N.; Maciel, P. Reliability of Wireless Sensor Networks. *Sensors* **2014**, *14*, 15760–15785.
- [38] Boyd, S.; Vandenberghe, L. *Convex Optimization*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, **2004**.
- [39] Mattingley, J.; Boyd, S. Real-Time Convex Optimization in Signal Processing. *IEEE Signal Process. Mag.* **2010**, *27*, 50–61.
- [40] Grant, M.; Boyd, S. CVX: MATLAB Software for Disciplined Convex Programming, Version 2.1, Build 1110. Available online: <http://cvxr.com/cvx> (accessed on 19 July **2015**).
- [41] Simpson, C. *Characteristics of Rechargeable Batteries*; Texas Instruments: Dallas, TX, USA, **2011**.
- [42] Guimarães, D.A. *Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm*; Springer: Heidelberg, Germany, **2009**.
- [43] Drori, Y. Contributions to the Complexity Analysis of Optimization Algorithms. Ph.D. Thesis, Tel-Aviv University, Tel Aviv-Yafo, Israel, **2014**.
- [44] Espinoza, F.J.F. A New Interpolation Approach for Linearly Constrained Convex Optimization. Master's Thesis, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia, **2012**.
- [45] Hellbruck, H.; Pagel, M.; Kroller, A.; Bimschas, D.; Pfisterer, D.; Fischer, S. Using and operating wireless sensor network testbeds with WISEBED. In Pro-

ceedings of the 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net), Sicily, Italy, 12–15 June **2011**; pp. 171–178.

- [46] El-Kady, M.; Kaner, R. Introducing the micro-super-capacitor laser-etched graphene brings Moore’s law to energy storage. *IEEE Spectr.* **2015**, *52*, 40–45.

Apêndice A

Código fonte no MATLAB[®]-CVX

Este Apêndice contém o código fonte em MATLAB-CVX para resolver o problema de otimização (3.4), incorporado em uma simulação do MATLAB, que pode ser usado para gerar resultados como os apresentados ao longo do trabalho. Os parâmetros de saída são: a contagem de execução para as simulações; Os parâmetros do sistema; A expectativa de vida média e os correspondentes desvios padrão; e as médias dos tempos de vida para a rede otimizada e para a rede não otimizada. Também são apresentados gráficos que mostram os níveis de atividade atribuídos e as energias residuais para cada sensor.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
clear all; close all; clc; format long;  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%% PARÂMETROS DO SISTEMA  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
% Número de eventos de otimização, k = 1, ..., K:  
K = 80;  
  
% Número de quadros dentro de cada evento de otimização, f =  
    1, ..., F:  
F = 5;  
  
% Número de nós sensores, n = 1, ..., N:  
N = 10;  
  
% Máxima energia inicial de um nó sensor. Reduza para valores
```

```

    altos de N:
S_max = 10;

% Fração de S_max para que as energias iniciais nos nós
    sensores seja  $U \sim [(1-Si_r)*S_{max}, S_{max}]$ . Si_r = 0 para
    energias iniciais iguais:
Si_r = 0.0;

% Energia de morte, definida pela porcentagem de S_max:
Sd_r = 0.05;

% Instante de recarga, definido pela porcentagem do total de
    frames K*F:
tr_r = 0.46;

% Máxima energia de recarga, definida pela fração de S_max.
    Recargas são  $U \sim [0, r_r*S_{max}]$ :
r_r = 0.0;

% Valor mínimo e máximo para a matriz de consumo máximo de
    energia. Variações dentro do intervalo  $U \sim [B_{min}, B_{max}]$ :
B_min = 0.001; B_max = 1;

% Coeficiente de correlação entre os consumos de energia de
    um quadro para o próximo.  $0 \leq \rho < 1$ . Maior valor de
    correlação significa menor variação na mobilidade, níveis
    de atividade não utilizados, etc.:
rho = 0.98;

% Pesos das funções objetivo ( $w_1/w_2 > 1$  age em favor de
    energias residuais equalizadas;  $w_2/w_1 > 1$  tende a atribuir
    valores altos de níveis de atividade para nós com canais
    melhores E altos valores de energia residual, às vezes
    desativando nós com canais ruins E com baixas energias
    residuais.
w1 = 1; w2 = 0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CONFIGURE O SEGUNDO VALOR DE repeat > 1 PARA COMPUTAR
    REPETIDAMENTE A

```

```

% OTIMIZAÇÃO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for repeat = 1:1

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% CÁLCULOS INICIAIS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Tempo de vida médio esperado para a rede não otimizada
  (apenas para informação):
Min_lifetime_no = S_max/(B_max*(1/N))+1; Max_lifetime_no =
  S_max/(B_min*(1/N))+1;

% Matriz de correlação da energia de consumo atual:
M_corr=zeros(K*F,K*F);
for i=1:K*F; for j=1:K*F; M_corr(i,j) = 1-(abs(i-j)*(1-rho));
  end; end

% Matriz de correlação dos consumos distribuidos de forma
  Gaussiana:
M_corr = M_corr.*(M_corr>=0);

% Ajuste das correlações para consumos uniformemente
  distribuidos:
for i = 1:K*F; for j = max(K*F-1,i):K*F
if i ~= j; M_corr(i, j) = 2 * sin(pi * M_corr(i, j) / 6);
M_corr(j, i) = 2 * sin(pi * M_corr(j, i) / 6); end; end; end

% Induzindo a correlação:
Ch = chol(M_corr); G = randn(N,K*F); Br = G * Ch;

% Matriz de consumo atual com limites impostos:
Br = normcdf(Br)*(B_max-B_min) + B_min;

% Consumo máximo constante estimado durante os primeiros F
  quadros:
for f = 1:F; B(:,f) = Br(:,1); end

% Energias iniciais nos nós sensores para ambas as redes

```

```

    otimizadas e não otimizadas:
Si = S_max*ones(N,1).*(1-Si_r*rand(N,1)); Si_no = Si;

% Instante de recarga:
tr = floor(tr_r*K*F);

% Matriz de recarga:
R = zeros(N,K*F); R(:,tr) = r_r*S_max*rand(N,1);

% Pré-alocação para armazenar os valores de níveis de
    atividade e energias residuais para a rede otimizada:
Activity = []; Energy = [];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% EVENTOS DE OTIMIZAÇÃO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for k = 1:K

% Pré-alocação para os níveis de atividade e energias de cada
    evento de otimização:
S=[Si]; X=[];

% Solução da otimização:
for f=1:F
cvx_begin quiet
variables Xo(N,1) So(N,1)
minimize w1*max(So) + w2*max(So - B(:,f))
subject to
Xo >= 0
sum(Xo) == 1
So == Si - B(:,f).*Xo
cvx_end
X=[X Xo]; Si=So;
end

% Energias residuais atuais:
for f = 1:F; S(:,f+1) = S(:,f) - Br(:,f+(k-1)*F).*X(:,f) +
    R(:,f+(k-1)*F);
end; S = S.*(S>=0);

```



```

% Ná prática, cada linha da matriz S e possíveis valores de
  recarga, são valores enviados de cada nó sensor para o nó
  central.

% Atualiza a matriz de consumo máximo para ser utilizado no
  próximo evento de otimização (igual a atual matriz de
  máximo consumo, que na prática é obtida das informações
  dos nós sensores sobre os valores atuais de S e R,
  aplicando os valores atribuídos de níveis de atividade):
for f = 1:F; B(:,f) =
  (S(:,f)-S(:,f+1)+R(:,f+(k-1)*F))./X(:,f); end
% Note que para computar os valores de consumo, é necessário
  conhecer a recarga. Caso não seja, a recarga vai fazer com
  que o consumo pareça menor do que é realmente, ou até
  tenha valores negativos (se a recarga aumenta a energia
  residual para valores acima da anterior).

% Armazena os níveis de atividade e energias residuais na
  rede otimizada:
Activity = [Activity X]; Energy = [Energy S(:,(1:F))];

% Prepara as energias iniciais para o próximo evento de
  otimização como sendo os valores atuais de energia
  residual no final dos F quadros:
Si = S(:,F+1);

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% CÁLCULOS FINAIS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Energia de morte, definido como a fração Sd_r de S_max:
Sd = Sd_r*S_max;

% Instantes de morte da rede otimizada, e verificação para td
  fora do intervalo de análise:
TD = ceil(find(Energy <= Sd, 1)/N);
if isempty(TD) == 1; TD = K*F;
error('Instante de morte além de K*F. Re-defina os

```

```

    parâmetros do sistema.', 'WARNING');
end; td(repeat) = TD;

% Níveis de atividade para a rede não otimizada:
x_no = ones(N,1)*(1/N);

% Pré-alocação das energias residuais da rede não otimizada:
Energy_no = [Si_no];

% Evolution of the residual energies in the non-optimized:
for t = 1:K*F
Energy_no(:,t+1) = Energy_no(:,t) - Br(:,t) .* x_no + R(:,t);
end

% Death instants of the non-optimized network:
td_no(repeat) = ceil(find(Energy_no<=Sd,1)/N);

Energy_no = Energy_no.*(Energy_no>=0); % Zeroing negative
    energies.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% GRÁFICOS E RESULTADOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(1); plot(Activity'); hold on;
    plot(sum(Activity/N),'y','lineWidth',5);
legend('otimizado: linhas sólidas','média: linha
    grossa','Location','Best');
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');
axis([1 K*F 0 1.02*max(max(Activity))]); xlabel('Índice de
    quadros');
ylabel('Níveis de atividade'); title('Método de otimização
    proposto'); hold off;

figure(2); plot(Energy','lineWidth',2); hold on;
    plot(Energy_no','--');
plot(td,Sd,'ok','lineWidth',5);
    plot(td_no,Sd,'or','lineWidth',5); grid on;
axis([1 K*F 0 S_max]); xlabel('Índice de quadros');
    ylabel('Energias residuais');

```

```
legend('otimizado: linhas sólidas', 'não otimizado: linhas
      tracejadas', 'Location', 'Best');
title('Método de otimização proposto');
hold off;

figure(3); plot(Br(1:5,:), 'Linewidth', 3);
xlabel('Índice de quadros'); ylabel('Consumo máximo de 5 nós
      sensores'); hold off;

disp(['Tempo de vida otimizado: ', num2str(td)]);
disp(['tempo de vida não otimizado: ', num2str(td_no)]);
disp(['Contador de eventos: ', num2str(repeat)]);
disp(['Parâmetros do sistema: ', 'K=', num2str(K), '
      F=', num2str(F), ' N=', num2str(N), ' S_max=', num2str(S_max), '
      Si_r=', num2str(Si_r), ' Sd_r=', num2str(Sd_r), '
      tr_r=', num2str(tr_r), ' r_r=', num2str(r_r), '
      B_min=', num2str(B_min), ' B_max=', num2str(B_max), '
      rho=', num2str(rho), ' w1=', num2str(w1), ' w2=', num2str(w2)]);
disp(['Média do tempo de vida otimizado: ',
      num2str(sum(td)/sum(td>0))]);
disp(['Desvio padrão do tempo de vida otimizado: ',
      num2str(sqrt(var(td)))];
disp(['Média do aumento do tempo de vida: ',
      num2str(100*(sum(td./td_no)/sum(td>0)-1)), ' %']);

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

