

Gerenciamento Integrado de Energia e Controle de Topologia em Redes de Sensores Sem Fio

Paulo Sérgio Sausen

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Angelo Perkusich, D.Sc.

Orientador

Marco Aurélio Spohn, Ph.D.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Paulo Sérgio Sausen, Julho de 2008

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
3329	29.07.08

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S259g

2008 Sausen, Paulo Sérgio.

Gerenciamento integrado de energia e controle de topologia em redes de sensores sem fio / Paulo Sérgio Sausen. — Campina Grand, 2008.
111f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Angelo Perkusich, Prof. Dr. Marco Aurélio Spohn.

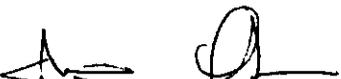
1. Redes de sensores sem fio. 2. Gerenciamento dinâmico de energia. 3. Controle de topologia. I. Título.

CDU – 004.772.4:621.39(81)

**GERENCIAMENTO INTEGRADO DE ENERGIA E CONTROLE DE
TOPOLOGIA EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

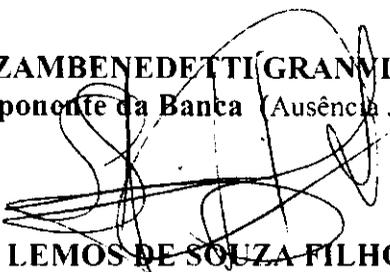
PAULO SÉRGIO SAUSEN

Tese Aprovada em 11.07.2008


ANGELO PERKUSICH, D.Sc., UFCG
Orientador


MARCO AURÉLIO SPOHN, Dr., UFCG
Orientador

LISANDRO ZAMBENEDETTI GRANVILLE, Dr., UFRGS
Componente da Banca (Ausência Justificada)


GUIDO LEMOS DE SOUZA FILHO, Dr., UFPB
Componente da Banca


JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG
Componente da Banca


JORGE CÉSAR ABRANTES FIGUEIREDO, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

**CAMPINA GRANDE – PB
JULHO - 2008**

Dedico esta tese a minha
esposa *Airam* que em
conjunto com o meu filho
Paulo Afonso sempre me
apoiaram nas minhas decisões,
mesmo que isso mudasse
completamente nossas vidas.

Resumo

Neste trabalho são apresentadas duas soluções para otimizar o roteamento, controle de topologia e o consumo de energia em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). A primeira solução inclui duas novas técnicas de Gerenciamento Dinâmico de Energia (GDE) desenvolvidas e avaliadas a partir de um modelo realista de descarga de bateria (i.e., modelo de Rakhmatov-Vrudhula). Ambas técnicas se baseiam na possibilidade de efetuar o desligamento parcial de componentes específicos do nó sensor a partir do nível de energia residual da bateria objetivando recuperar sua capacidade. A partir da análise de resultados de simulações conclui-se que a aplicação das técnicas de GDE pode aumentar significativamente o tempo de vida médio dos nós sensores de uma RSSF. A segunda solução consiste em um mecanismo original de controle de topologia que utiliza a múltipla dominação e dominação em distância na computação de *backbones* em RSSF. A utilização deste mecanismo possibilita, em muitos casos, a redução significativa no consumo de energia e no atraso médio dos pacotes transmitidos na rede. Tanto as técnicas de GDE como o mecanismo de controle de topologia foram analisadas através de simulações, utilizando o simulador *Network Simulator* (NS-2) e os resultados apresentados demonstram a eficácia de ambas soluções.

Abstract

This work presents two solutions for optimizing routing, topology control, and power consumption in Wireless Sensor Networks (WSN). The first solution includes two novel Dynamic Power Management (DPM) techniques designed and evaluated under a realistic discharge battery model (i.e., Rakhmatov-Vrudhula battery model). Both techniques take advantage of partially turning off some node components based on the remaining battery capacity, allowing battery capacity recovery due to the relaxation phenomena. An extensive performance analysis shows that the proposed DPM techniques can extend the node lifetime. The second solution presented in this work regards a novel multi-coverage with bounded distance topology control mechanism. This mechanism makes it feasible building power saving backbones for WSNs, and also reducing the average packet delay in the network. Both solutions were implemented and evaluated with the Network Simulator NS-2, and extensive simulation results show the advantages of applying the proposed solutions by themselves or when combined together in a broadcast routing protocol.

Glossário

BS	Base Station
C	Consumo
CDS	Connected Dominating Set
CT	Controle de Topologia
dBS	Distância à Base Station
DS	Dominating Set
DVS	Dynamic Voltage Scaling
GDE	Gerenciamento Dinâmico de Energia
GDE-BB	Gerenciamento Dinâmico de Energia Baseado na Capacidade da Bateria
GDE-DE	Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado
IC	Intervalo de Confiança
IR	Intervalo de Recuperação
L	Latência
MAC	Media Access Control
MANETs	Mobile Ad Hoc Networks
MB	Membro do Backbone
MCDS	Minimum Connect Dominating Set
ME	Mensagem de Eleição
MI	Mensagem de Informação
MMPE	Média Móvel com Peso Exponencial
MN	Mensagem de Notificação
MSInt	Módulo Sensor Inteligente
NS-2	Network Simulator
PD	Perfil de Descarga

PDR	Packet Delivery Rate
QoS	Qualidade de Serviço
RF	Rádio Frequência
RP	Redes de Petri
RPHD	Rede de Petri Híbrida Diferencial
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSFs	Redes de Sensores Sem Fio
SE	Switching Energy
SH	Sistemas Híbridos
SOIC	Small-Outline Integrated Circuit
UDG	Unit Disk Graph
URAD	Unidade Remota de Aquisição de Dados

Lista de Tabelas

2.1	Conexões possíveis para modelar SHs com as RPHDs.	33
3.1	Tempo de transição entre os modos de operação (em μs)	37
3.2	Valores corrente (em mA) para cada modo de operação.	38
3.3	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (38,4 Kbps/FSK).	40
3.4	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (19,2 Kbps/OOK).	40
3.5	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (115,2 Kbps/ASK).	41
3.6	Parâmetros do Nó Sensor	42
3.7	Transições diferenciais com suas respectivas funções e cálculos de descarga	44
3.8	Evolução da Marcação para o modelo apresentado na Figura 3.3	44
3.9	Energia recuperada/gasta (em mA-ms) para os intervalos de recuperação.	45
3.10	Corrente e tempos de transição dos modos do rádio nRF2401A TM	48
3.11	Especificações da Plataforma Experimental.	49
3.12	Resultados da aplicação da técnica GDE-DE na plataforma MSInt.	50
3.13	Modos de GDE-BB.	51
3.14	Transições diferenciais com suas respectivas funções e cálculos de descarga	52
3.15	Número de transmissões (Tx) com e sem adoção do GDE-BB.	55
4.1	Terminologias e Notações	59
4.2	Parâmetros da Simulação.	65
4.3	Parâmetros do Cenário 1.	66
4.4	Parâmetros do Cenário 2.	66
4.5	Grau de Cobertura do <i>backbone</i> (cenário 2)	71
5.1	Parâmetros da Simulação	76
5.2	Tempo de Transição (em μs) para os rádios da plataforma <i>Mica Motes</i>	77
5.3	Resultados das Simulações para o Cenário 1	79
5.4	Resultados das Simulações para o Cenário 2	80
5.5	Resultados das Simulações para o Cenário 3	80
5.6	Resultados das Simulações para o Cenário 4 (sem mobilidade)	81

5.7	Resultados das Simulações para o Cenário 5 (sem mobilidade)	81
5.8	Resultados das Simulações para o Cenário 6 (sem mobilidade)	82
5.9	Parâmetros da Simulação do Protocolo $(k, r) - CDS$	84
5.10	Resultados da Simulação do FLOOD $(k,1)$ -CDS: <i>Packet Delivery Ratio</i> (PDR), Consumo(C) em Joules, Latência(L) em segundos, Pacotes Descartados(D)	84
5.11	Característica da Rede	85
5.12	Comparação entre o Protocolo FLOOD e FLOOD $(2,1)$ -CDS	85
5.13	Comparação entre o Protocolo FLOOD e FLOOD GDE- $(2,1)$	88
5.14	Resumo dos resultados de simulação	88
B.1	Energia recuperada/gasta (em mA-ms) para os Intervalos de Recuperação.	106
B.2	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (38,4 Kbps/FSK).	107
B.3	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (19.2 Kbps /OOK).	107
B.4	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (115.2 Kbps/ASK).	107
B.5	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (38,4 Kbps/FSK).	108
B.6	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (19.2 Kbps /OOK).	109
B.7	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (115.2 Kbps/ASK).	109
B.8	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (38,4 Kbps/FSK).	110
B.9	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (19.2 Kbps /OOK).	110
B.10	Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (115.2 Kbps/ASK).	110

Lista de Figuras

2.1	Estrutura básica de um nó sensor	13
2.2	Exemplo de Formação de um DS(A) e CDS(B)	18
2.3	Diferentes estados de operação da bateria [1]	21
2.4	Capacidade da Bateria em Função do Perfil de Descarte.	24
2.5	Modelo Linear (A) versus Modelo de Rakhmatov-Vrudhula (B) para um perfil de 10 segundos.	25
2.6	Modelo Linear (A) versus Modelo de Rakhmatov-Vrudhula (B) para um perfil de 91 segundos.	26
2.7	Lugares e transições de uma RPHD.	27
2.8	Tipos de arcos de uma RPHD.	27
2.9	(a) Exemplo de modelo RPHD. (b) Evoluções contínuas resultantes do disparo de T_2	32
3.1	Análise do <i>Switching Energy</i>	37
3.2	Intervalo de Recuperação realizado após um Tx ou Rx.	42
3.3	Modelo RPHD da Técnica GDE-DE aplicada em um nó sensor.	43
3.4	Número de transmissões realizadas com e sem a aplicação da técnica GDE-DE.	46
3.5	Sistema de Monitoramento [2]	47
3.6	Módulo Sensor Inteligente (MSInt).	47
3.7	Plataforma de avaliação.	49
3.8	Modelo RPHD para a Técnica de GDE-BB.	51
3.9	Modelo RPHD do nó sensor com GDE-BB.	53
3.10	Consumo de energia e recuperação em relação ao GDE-BB1.	54
3.11	Transmissões realizadas com e sem adoção do GDE-BB.	55
4.1	(2,2)-CDS da rede utilizando a solução centralizada	61
4.2	Calculando (2,2) CDS com KR-CDS Distribuído.	64
4.3	Pacotes de Controle.	67
4.4	Resultados do (k,r)-CDS no cenário 1.	68

4.5	Resultados do (k,r)-CDS no cenário 2.	69
4.6	Grau de Redundância: Solução Centralizada (Cenário 2).	70
4.7	Grau de Redundância: Solução Distribuída (Cenário 2).	70
B.1	Consumo da bateria para a técnica GDE-DES com IR de 8 ms	108
B.2	Consumo da bateria para a técnica GDE-DES com IR de 16 ms.	109
B.3	Consumo da bateria para a técnica GDE-DES com IR de 32 ms.	111

Sumário

1	Introdução	6
1.1	Motivação	7
1.2	Objetivos	8
1.3	Contribuições	9
1.4	Estrutura do Documento	10
2	Conceitos Básicos	12
2.1	Redes de Sensores Sem Fio	12
2.1.1	Componentes	13
2.1.2	Características	14
2.1.3	Classificação	15
2.2	Dominação em Teoria dos Grafos	18
2.3	<i>Clustering</i> e Controle de Topologia	19
2.4	Modelos de Baterias	20
2.4.1	Modelo Rakhmatov-Vrudhula	23
2.5	Modelando Redes de Sensores Sem Fio	26
2.5.1	Redes de Petri Híbridas Diferenciais	27
2.5.2	Marcação de uma RPHD	29
2.5.3	Mapa de Temporização	29
2.5.4	Condições Particulares para a estrutura de uma RPHD	29
2.5.5	Regras de Evolução	30
2.5.6	Modelando SHs utilizando RPHDs	31
3	Gerenciamento Dinâmico de Energia Aplicado às RSSF	34
3.1	Gerenciamento Dinâmico de Energia	34
3.2	<i>Switching Energy</i>	36
3.2.1	Cálculo do <i>Switching Energy</i>	38
3.3	Técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado	41

3.3.1	Modelo RPHD da Técnica GDE-DE	41
3.3.2	Análise de desempenho da técnica GDE-DE	44
3.3.3	Análise experimental da técnica de GDE-DE	46
3.4	Técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia Baseada na Capacidade da Bateria	50
3.4.1	Modelo RPHD da técnica GDE-BB	51
3.4.2	Modelo RPHD do nó sensor para a técnica GDE-BB	52
3.4.3	Análise de desempenho da técnica de GDE-BB	54
4	Controle de Topologia com Múltipla Dominação e Dominação em Distância	57
4.1	Construção de <i>backbones</i> em RSSF	57
4.2	Mecanismo $(k, r) - CDS$ Centralizado	59
4.2.1	Exemplo de computação de um $(k, r) - CDS$ Centralizado	60
4.3	Mecanismo $(k, r) - CDS$ Distribuído	62
4.3.1	Exemplo de computação de um $(k, r) - CDS$ Distribuído	63
4.4	Avaliação de Desempenho	65
4.4.1	Análise dos Resultados	67
4.5	Prova do mecanismo $(k, r) - CDS$ Centralizado	71
4.6	Prova do mecanismo $(k, r) - CDS$ Distribuído	72
5	Estudo de Caso	74
5.1	Implementação da técnica de GDE-DE no protocolo FLOOD	75
5.1.1	Ambiente de Simulação	75
5.1.2	Implementação da Técnica de GDE-DE	77
5.1.3	Implementação do <i>Switching Energy</i>	77
5.1.4	Avaliação de desempenho do protocolo FLOOD GDE-DE	78
5.2	Aplicando a múltipla dominação e dominação em distância no ambiente das RSSF	81
5.2.1	Implementação do mecanismo $(k, r) - CDS$ no protocolo FLOOD	82
5.2.2	Avaliação do protocolo FLOOD $(k, r) - CDS$	83
5.3	Aplicação Conjunta da técnica de GDE-DE e do mecanismo $(k, r) - CDS$ no protocolo FLOOD	86
5.3.1	Implementação da técnica de GDE-DE e do mecanismo $(k, r) - CDS$ no protocolo FLOOD	86
5.3.2	Avaliação do protocolo FLOOD GDE- (k, r)	87
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	89

Referências Bibliográficas	92
A Lista das Publicações Relacionadas com a Tese	103
A.1 Eventos Internacionais	103
A.2 Eventos Nacionais	104
A.3 Periódicos Nacionais	105
A.4 Periódicos Internacionais	105
A.5 Capítulo de Livro	105
B Intervalos de Recuperação	106

Capítulo 1

Introdução

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é formada por um grande número de nós sensores distribuídos em uma área de interesse, interconectados por uma tecnologia de comunicação sem fio (e.g., radiofrequência). Cada nó sensor pode adquirir dados relativos ao estado de variáveis de interesse do ambiente monitorado, incluindo, por exemplo, temperatura, pressão, umidade, ruído e luminosidade [3]. Em síntese, as RSSFs possibilitam uma melhor compreensão do ambiente monitorado diferenciando-se das redes convencionais e das próprias Redes Sem Fio (*Wireless Networks*) em virtude das severas restrições de consumo de energia [4].

As RSSFs tem atraído grande interesse da comunidade científica em virtude do elevado número de aplicações. Por exemplo, na área de saúde destacam-se as aplicações de monitoramento de pacientes [5, 6]; na área de segurança as aplicações de detecção de intrusão [7, 8]; na área ambiental as aplicações de detecção de incêndios e monitoramento ambiental [9–12]. Enfim, as RSSFs estão presentes nas mais diversas áreas tanto que num futuro próximo elas devem tornar-se parte integral de nossas vidas, com importância maior do que a computação pessoal representa atualmente [13].

Muitos autores definem as RSSFs como uma variante das *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs), pois elas tendem a ser autônomas realizando o seu trabalho de forma cooperativa [14]. No entanto, cabe ressaltar que existem várias diferenças entre as redes de sensores e as MANETs; em especial, as severas restrições de processamento e energia. Diferentemente das redes *ad hoc* tradicionais a tarefa de recarregar, ou substituir a bateria dos nós numa RSSF é de difícil execução, tanto pelo elevado número de sensores que compõem estas redes, quanto pela sua localização em ambientes inóspitos, dada a natureza das aplicações. Por esse motivo, um dos grandes desafios no contexto de RSSFs é desenvolver protocolos que possibilitem aumentar a longevidade da rede, reduzindo o consumo de energia de seus componentes.

Na avaliação dos protocolos utilizados no ambiente das RSSFs podem ser utilizadas três

técnicas tradicionais: métodos analíticos, experimentos físicos e simulações. No entanto, em virtude das sérias restrições das RSSFs tais como energia limitada, processamento descentralizado, tolerância a falhas, entre outras, existe a necessidade da adoção de algoritmos complexos o que muitas vezes dificulta a utilização de métodos analíticos [15]. Já a construção de RSSFs reais para realizar experimentos torna-se inviável financeiramente em virtude do alto número de sensores (em algumas aplicações esse número chega na casa dos milhares) e seu custo elevado. Por exemplo, o custo de um nó sensor do tipo *Mica Motes* [16], um dos nós sensores mais utilizados e referenciados em pesquisas sobre RSSFs, é de aproximadamente cem dólares. Neste contexto, o uso de simuladores tornou-se padrão para a avaliação de protocolos nas RSSFs.

A grande maioria dos simuladores utiliza um modelo de descarga de bateria simples (i.e., modelo linear). A bateria é modelada como um depósito onde a energia apenas é consumida após cada operação do nó sensor. Essa abordagem pode ocasionar interpretações equivocadas na avaliação dos protocolos nas RSSFs, especialmente aqueles que levam em conta o tempo de vida da rede [17]. Esse equívoco é maior quando em conjunto com a adoção de um modelo linear de descarga de bateria, ignoram-se os valores referentes ao *Switching Energy* (SE).

O SE refere-se a energia envolvida no processo de transição entre dois modos de operação por parte do nó sensor. Por exemplo, a transição entre o modo de transmissão (Tx) e o modo repouso (*Sleep*). Dependendo do tipo de transição pode ocorrer perda ou recuperação na capacidade da bateria do nó sensor [18]. Geralmente, o SE é negligenciado nas simulações por ser considerado irrisório, ou para efeito de simplificação. No entanto, Sausen et al. [19] demonstram que os valores envolvidos no SE são representativos e que é um equívoco desconsiderá-los. Por exemplo, um erro de 6 % no consumo de energia de uma rede de sensores reflete-se na redução em dois meses no tempo de vida desta rede, a partir de uma expectativa de 3 anos [20].

1.1 Motivação

Em virtude do considerável número de aplicações [3, 5–11] que utilizam as RSSFs e, conseqüentemente, da grande variação dos requisitos destas aplicações, o desenvolvimento e a adequação de protocolos eficientes em energia para o ambiente das RSSFs tornam-se uma tarefa desafiadora.

Atualmente, existem vários protocolos [21–26] desenvolvidos com foco principal na economia de energia, ou seja, limitam-se apenas a economizar energia não considerando a possibilidade de obter recuperação na capacidade da bateria. A economia de energia é freqüentemente obtida através da aplicação de alguma técnica de gerenciamento de

energia, ou de controle de topologia. Ambas técnicas baseiam-se no desligamento parcial ou completo do nó sensor por determinados períodos de tempo. Essa metodologia muitas vezes provoca efeitos colaterais na rede, tais como, o aumento da latência ou perda dos pacotes transmitidos. Esses problemas ocorrem, em parte, devido aos longos períodos em que o nó sensor é colocado em modo de repouso e pela forma com que os protocolos são avaliados, a partir da utilização de simuladores de redes.

Os simuladores são ferramentas úteis na avaliação dos protocolos, principalmente porque substituem os experimentos físicos que possuem alto custo de implementação nas RSSFs, como comentado anteriormente. A utilização dos simuladores pressupõe uma série de simplificações, uma delas, freqüentemente utilizada, é a adoção de um modelo simples de descarga de energia (i.e., modelo linear) que entre outros problemas não leva em consideração o efeito de recuperação da bateria. Essa abordagem pode ocasionar interpretações equivocadas na avaliação do desempenho dos protocolos, especialmente naqueles que levam em conta o tempo de vida da rede.

O efeito de recuperação ocasiona o incremento na capacidade da bateria de um nó sensor. Ele ocorre durante períodos de tempo em que existe a redução da corrente solicitada da bateria. Tal redução possibilita a recuperação na capacidade da bateria em decorrência da reorganização dos íons em regiões da bateria que estavam esgotadas [1].

A utilização de técnicas de gerenciamento de energia e de controle de topologia podem, além de resultar em economia de energia, possibilitar a recuperação da capacidade da bateria dos nós de uma RSSF. No entanto, sua avaliação somente pode ser realizada com sucesso utilizando um simulador que incorpore um modelo eficiente de descarga de bateria (i.e., considere o efeito de recuperação). Neste contexto, novas soluções que possibilitam agregar eficiência de energia não apenas através da economia de energia, e principalmente que sejam avaliadas a partir de um modelo mais realista de descarga de energia, passam a ter uma importância significativa, especialmente, se forem de fácil adequação aos protocolos existentes.

1.2 Objetivos

Os objetivos desta tese são o desenvolvimento de duas novas técnicas de Gerenciamento Dinâmico de Energia (GDE) e avaliação destas utilizando um simulador de redes. No contexto desta tese utiliza-se o simulador *Network Simulator* (NS-2). O NS-2 foi modificado para trabalhar com um modelo realista de descarga de bateria (i.e., modelo de Rakhmatov-Vrudhula) e para considerar o consumo de energia envolvido no *Switching Energy* (SE). Ainda como parte da avaliação das técnicas realizou-se a implementação do GDE em uma plataforma real de sensores denominada *Intelligent Sensor Module* (ISM) [2].

Com base na pesquisa bibliográfica efetuada, este é o primeiro trabalho que apresenta o desenvolvimento, implementação e avaliação de técnicas de gerenciamento dinâmico de energia aplicada as RSSFs a partir de um modelo preciso de descarga de bateria levando em consideração o consumo de energia envolvido no *Switching Energy* (SE).

Um outro objetivo neste trabalho é desenvolver e avaliar um novo mecanismo de controle de topologia que utiliza o conceito de múltipla dominação e dominação em distância com a finalidade de minimizar o consumo de energia e o atraso dos pacotes transmitidos na rede. A avaliação deste mecanismo segue a metodologia adotada nas técnicas de GDE (i.e., utiliza o NS-2 modificado para trabalhar com o modelo de Rakhmatov-Vrudhula e com a computação do SE). O mecanismo de controle de topologia [27], apresentado neste trabalho, constituiu-se na primeira solução centralizada, e distribuída para computação de *backbones* em RSSFs utilizando múltipla dominação e dominação em distância.

1.3 Contribuições

No contexto desta tese são introduzidas contribuições relevantes ao desenvolvimento e análise de técnicas de gerenciamento de energia e controle de topologia eficientes em energia para o ambiente das RSSFs. Essas contribuições são apresentadas a seguir:

- Desenvolvimento de duas novas técnicas de gerenciamento dinâmico de energia aplicada as RSSFs, que ao contrário das técnicas tradicionais, tem seu foco na recuperação da capacidade da bateria dos nós sensores. Estas novas técnicas possibilitam aumentar significativamente o tempo de vida do nó sensor.
- Desenvolvimento de um protocolo de roteamento por difusão [28], que utiliza a técnica de gerenciamento dinâmico de energia avaliada a partir de um modelo realista de descarga de bateria.
- Implementação da técnica de GDE em uma plataforma real denominada *Intelligent Sensor Module* (ISM) [2]. Esta implementação possibilita comparar resultados obtidos a partir do NS-2 com uma plataforma de sensoramento real.
- Desenvolvimento de um mecanismo original de controle de topologia que utiliza a múltipla dominação e dominação em distância para computar o *backbone* de uma RSSF. Este novo mecanismo [27] reduz significativamente o atraso dos pacotes na rede ao mesmo tempo que minimiza o consumo de energia dos nós sensores.
- Integração do mecanismo de controle de topologia ao protocolo de roteamento por difusão desenvolvido a partir da utilização da técnica de GDE. Esta integração

permitiu a redução significativa do atraso dos pacotes de dados transmitidos na rede.

Outras contribuições derivadas a partir do desenvolvimento desta tese foram:

- Definição de um modelo que utiliza o formalismo das Redes de Petri Híbridas Diferencial (RPHD) para a técnica GDE [29], possibilitando a comprovação da correteza do mesmo e sua aplicação em protocolos de roteamento;
- Verificação formal do algoritmo utilizado no mecanismo de controle de topologia [27] através do uso da teoria dos grafos, possibilitando a comprovação da correteza do mesmo e sua aplicação em protocolos de roteamento e controle de topologia;
- Extensão do modelo de energia do simulador NS-2 para dar suporte ao modelo de descarga não linear de bateria (i.e., Modelo de Rakhmatov-Vrudhula) e adição da contabilização da energia envolvida no SE [30]. Essas alterações no NS-2 possibilitaram a avaliação mais precisa, sob o ponto de vista de consumo de energia, das técnicas de GDE e do mecanismo de controle de topologia.

Durante o desenvolvimento desta tese, resultados parciais das técnicas de GDE e do mecanismo de controle de topologia aqui apresentadas já foram publicadas em conferências e periódicos nacionais e internacionais [2, 17–19, 27–37]. Uma relação completa dos trabalhos publicados pode ser consultada no Apêndice A.

1.4 Estrutura do Documento

Esta tese propõe duas novas técnicas de gerenciamento dinâmico de energia e um mecanismo original de controle de topologia para tanto ela está organizada da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é abordada uma série de conceitos básicos necessários para a melhor compreensão da presente tese de doutorado;
- No Capítulo 3 são apresentados o desenvolvimento, a implementação e a avaliação de duas novas técnicas de Gerenciamento Dinâmico de Energia aplicadas às RSSFs;
- No Capítulo 4 são apresentados o desenvolvimento, a implementação e a avaliação do mecanismo de controle de topologia com múltipla dominação e dominação em distância;
- No Capítulo 5 é apresentado um estudo de caso que consiste na definição e avaliação de três variantes de um novo protocolo de roteamento *broadcast*. Estas variantes

foram desenvolvidas a partir da aplicação e adequação da técnica de GDE-DE [19] e do mecanismo $(k, r) - CDS$ [27] ao protocolo FLOOD [38];

- E finalmente no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros sugeridos para essa tese de doutorado.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Neste Capítulo, aborda-se uma série de conceitos básicos necessários para a compreensão da presente Tese de Doutorado. Caso o leitor esteja familiarizado com os conceitos relacionados a seguir, pode avançar para o próximo Capítulo. Este Capítulo está organizado da seguinte forma:

- Na Seção 2.1 é realizada uma introdução sobre Redes de Sensores Sem Fio, seus componentes, principais características e classificação;
- Na Seção 2.2 é apresentado um resumo sobre dominação em Teoria dos Grafos; em particular, a computação de conjuntos dominantes conectados em RSSFs;
- Na Seção 2.3 é abordado a utilização da estratégia de *Clustering* e controle de topologia nas RSSFs;
- Na Seção 2.4 são apresentados os principais modelos utilizados na modelagem do consumo de energia nos dispositivos alimentados por bateria. Será dada ênfase ao modelo de Rakhmatov-Vrudhula, que é o modelo utilizado nas simulações desta Tese;
- Na Seção 2.5 é realizada uma breve introdução sobre as ferramentas utilizadas para modelar Sistemas Híbridos e RSSF.
- Na Seção 2.5.1 é realizada uma pequena introdução sobre o formalismo das Redes de Petri Híbridas Diferenciais (RPHD).

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) geralmente compreende um grande número de nós sensores de pequenas proporções e com capacidade de processar dados e transmiti-los

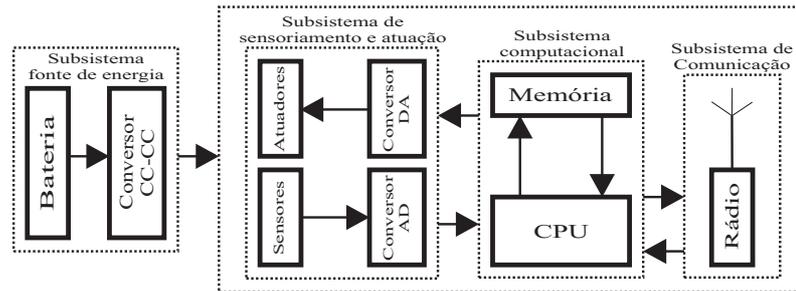


Figura 2.1: Estrutura básica de um nó sensor

através de enlaces de radiofrequência. Normalmente, os nós sensores possuem sérias restrições de energia por serem alimentados por baterias, as quais, em virtude da natureza das aplicações, não podem ser facilmente substituídas. Isto implica em fortes restrições no consumo de energia, tornando indispensáveis a utilização de componentes de baixo consumo de energia no desenvolvimento dos nós sensores, bem como protocolos de comunicação eficientes em energia [4, 39].

2.1.1 Componentes

Uma RSSF é formada por um grande número de nós sensores, cada um destes nós é composto por quatro subsistemas (na Figura 2.1 são apresentados esses subsistemas [25]):

- **Subsistema Computacional** consiste de um microprocessador ou microcontrolador. Nele são executados todos os dados relevantes ao monitoramento, e possui a capacidade de executar qualquer código arbitrário. Sua função é complementada com a utilização do componente Memória o qual armazena os dados e os códigos que são executados no nó sensor;
- **Subsistema de Comunicação** é composto por um rádio de curto alcance oferecendo comunicação sem fio. Existem três possibilidades de comunicação sem fio: comunicação por Rádio Frequência (RF), a mais utilizada, infravermelho e ótica [40].
- **Subsistema de Sensoriamento** formado por um grupo de sensores e atuadores. Este componente representa a interface com o mundo físico responsável por observar e controlar parâmetros físicos do ambiente monitorado.
- **Subsistema Fonte de Energia** é responsável pelo fornecimento de energia para o funcionamento de todo nó sensor, geralmente é composto por uma bateria e um conversor CC-CC, o qual fornece tensão constante para os demais subsistemas do nó sensor. É o subsistema mais crítico do nó sensor, pois em uma RSSF o tempo de vida do nó sensor e de toda a rede está diretamente vinculada à capacidade da

bateria. O término da carga da bateria, na maioria das vezes, implica na paralisação da rede como um todo [3].

2.1.2 Características

As RSSFs caracterizam-se por possuírem protocolos desenvolvidos especificamente para um determinado tipo de aplicação. Apesar dessa organização é possível relacionar algumas características comuns a quase todas as RSSFs. Tais características, que devem ser levadas em consideração no desenvolvimento de protocolos para o ambiente das RSSFs são listadas a seguir [41, 42]:

- **Restrições severas de recursos:** as RSSFs possuem restrições severas de recursos em relação ao consumo de energia, vazão, memória, tamanho de *buffers* e capacidade de processamento;
- **Tráfego não balanceado:** na grande maioria das aplicações o fluxo dos dados é unidirecional, ou seja tem sua origem nos nós sensores (que são muitos) com destino aos nós sorvedouros (que são poucos);
- **Redundância de dados:** as RSSFs caracterizam-se pela grande redundância na geração de dados. Procedimentos de agregação/fusão de dados são corriqueiros nestas redes. Em virtude disso, surge um efeito colateral indesejado pela maioria das aplicações que é o aumento da latência;
- **Dinâmica da rede:** dada a natureza da transmissão por radiofrequência agregada, a mobilidade dos nós sensores torna a topologia das RSSFs extremamente dinâmica. Mesmo em redes que não possuem mobilidade, ocorre freqüentes trocas de topologia em decorrência do término da carga da bateria ou mesmo de falhas no nó sensor.
- **Escalabilidade:** é normal as RSSFs serem compostas por centenas e até milhares de nós. Neste contexto, a escalabilidade deve estar sempre presente no desenvolvimento de protocolos para esse ambiente;
- **Múltiplos tipos de tráfego:** a adoção de uma rede de sensores heterogênea aumenta o desafio no desenvolvimento dos protocolos para as RSSFs pois adiciona vários tipos diferentes de tráfego na rede, cada um com seus requisitos específicos;
- **Consumo de energia versus retardo:** o consumo de energia do rádio em uma RSSF é no mínimo proporcional ao quadrado da distância máxima de transmissão, sendo que o consumo de energia aumenta em ambientes ruidosos ou em terrenos não planos. Em virtude disso o uso de roteamento *multi-hop* é quase um padrão

nas RSSFs, o que ocasiona maior dificuldade em balancear o consumo de energia ao retardo imposto por esse tipo de roteamento.

Outra importante característica nas RSSFs é que elas tendem a ser autônomas realizando o seu trabalho de forma cooperativa [14], motivo que frequentemente são comparadas com as redes ad-hoc. No entanto, cabe ressaltar que, existem várias diferenças entre elas. Algumas dessas diferenças são apresentadas a seguir [3]:

- O número de sensores em uma RSSF é maior (centenas de nós) em relação ao número de nós de uma rede ad-hoc (dezenas de nós);
- Os nós sensores são dispostos de forma densa;
- Os nós sensores tendem a serem suscetíveis a falhas;
- Existem trocas frequentes de topologia em uma RSSF, nem sempre em virtude da mobilidade do nó;
- Os nós sensores possuem sérias restrições de energia, processamento e memória;
- As RSSF não possuem a obrigatoriedade do identificador global, enquanto nas redes ad-hoc ele é padrão.

2.1.3 Classificação

A classificação de uma RSSF está vinculada aos seus objetivos e especialmente a sua aplicação. Qualquer solução que englobe a utilização das RSSFs deve levar em consideração os requisitos da aplicação para a qual ela foi concebida [43].

A estrutura de organização de uma RSSF pode ser classificada em diferentes grupos. Cada um com suas características e peculiaridades que os tornam específicos para determinada aplicação. Tais características influenciam diretamente na relação da aplicação com os modelos de comunicação e nos mecanismos de roteamento.

De acordo com Linnyer [44], as RSSFs podem ser classificadas segundo sua configuração, coleta dos dados, comunicação e processamento que executam. Especificamente quanto a configuração, uma RSSF pode ser caracterizada segundo:

- Composição

Homogênea: todos os nós possuem as mesmas características computacionais;

Heterogênea: a rede possui nós de diferentes capacidades computacionais;

- Organização

Hierárquica: quando todos os nós estão organizados em grupos (*clusters*);

Plana: rede em que os nós não estão organizados em grupos;

- Mobilidade

Estacionária: todos os nós permanecem estáticos;

Móvel: os nós podem mudar de posição;

- Densidade

Balanceada: rede que apresenta uma distribuição uniforme dos seus nós;

Densa: rede que apresenta uma alta concentração de nós por unidade de área;

Esparsa: apresenta uma baixa concentração de nós por unidade de área;

- Distribuição

Irregular: rede que apresenta uma distribuição não uniforme dos nós;

Regular: rede que apresenta uma distribuição uniforme dos nós.

Em relação à coleta de dados (sensoriamento) uma RSSF pode ser classificada em:

- Periódica: os nós sensores coletam dados em intervalos regulares pré-definidos;

- Contínua: os nós sensores coletam os dados de forma contínua.

- Reativa: os nós sensores coletam dados quando da ocorrência de um evento de interesse, ou quando solicitado pela aplicação;

- Tempo Real: os nós sensores coletam a maior quantidade de dados possível no menor intervalo de tempo.

Considerando a comunicação, as RSSFs podem ser classificadas em:

- Disseminação

Programada: os nós disseminam os dados em intervalos regulares;

Contínua: os nós disseminam os dados continuamente;

Sob Demanda: os nós disseminam os dados em resposta à consulta da aplicação, ou na ocorrência de um evento;

- Transmissão

Simplex: os nós sensores apenas transmitem os dados;

Half-duplex: os nós sensores podem transmitir ou receber dados, mas não simultaneamente;

Full-duplex: os nós sensores podem transmitir e receber dados simultaneamente;

- Alocação do Canal

Estática: neste tipo de rede a largura de banda é dividida de forma equitativa entre todos os nós.

Dinâmica: neste tipo de rede não existe atribuição fixa de largura de banda; os nós disputam o canal.

- Fluxo de Informações

Flooding: neste tipo de rede os dados são transmitidos utilizando o conceito de *broadcast*, ou seja, um nó sensor transmite para todos os seus vizinhos, que por sua vez transmite para todos os seus vizinhos, seguindo esse padrão até o dado alcançar o seu destino;

Multicast: neste tipo de rede os dados são transmitidos a todos os nós que fazem parte de um grupo;

Unicast: neste tipo de rede o nó transmite seus dados a apenas um outro nó;

Gossiping: neste tipo de rede, os nós sensores selecionam os nós para os quais transmitem seus dados;

Bargaining: neste tipo de rede, os nós transmitem os dados somente se o nó destino manifestar interesse, isto é, existe um processo de negociação.

E, finalmente, a classificação das RSSF segundo o processamento pode ser definido em termos de:

- *Infra-estrutura*: a rede de sensores executa mecanismos relacionados à infra-estrutura da rede, ou seja, utiliza mecanismos de controle de acesso, roteamento, criptografia e eleição de líderes;
- *Localizada*: os nós sensores além de executar mecanismos de infra-estrutura, executam algum processamento local, por exemplo, condicionamento dos dados coletados a partir da calibração do nó sensor;
- *Correlação*: a rede executa procedimentos relacionados aos dados, por exemplo, fusão, compressão e agregação.

2.2 Dominação em Teoria dos Grafos

Um desafio presente no ambiente das RSSFs consiste em selecionar um conjunto reduzido de nós que constituem um *backbone* da rede para dar suporte ao roteamento de pacotes. Um *backbone* é uma infraestrutura formada por um sub-conjunto de nós da rede que é capaz de transmitir e processar dados em alta velocidade. A possibilidade de desligamento parcial, ou total dos nós que não fazem parte do *backbone* é a principal motivação para a construção destas estruturas nas RSSFs. Como resultado imediato desta aplicação, tem-se a redução do consumo de energia, e o prolongamento do tempo de vida da rede.

Os protocolos (e.g., de acesso ao meio, roteamento, gerenciamento de energia e controle de topologia) que utilizam a técnica de criação de *backbones* inicialmente organizam a rede através da construção de um *Dominating Set*(DS). As redes ad hoc de uma forma geral não possuem um infraestrutura fixa. No entanto, mesmo não existindo um *backbone* físico, um *backbone* virtual pode ser formado numa RSSF.

Em vários trabalhos relacionados a redes *Ad Hoc* [45–47] e, mais recentemente, resultados envolvendo especificamente RSSF [48, 49], o problema da computação de *backbones* virtuais tem sido abordado através da computação de alguma variante de *Connected Dominating Sets* (CDS). Um conjunto de nós em uma rede qualquer é considerado um *Dominating Set* (DS) se todos os nós da rede fazem parte deste conjunto, ou então sejam adjacentes (i.e., vizinhos) a pelo menos um nó do DS. Um DS é dito formar um CDS caso o DS constitua um componente conectado da rede (i.e., o DS forma um *backbone* da rede). Por exemplo, os nós $\{1, 9\}$ da Figura 2.2(A) e os nós $\{1, 2\}$ da Figura 2.2(B) formam, respectivamente, um DS e um CDS.

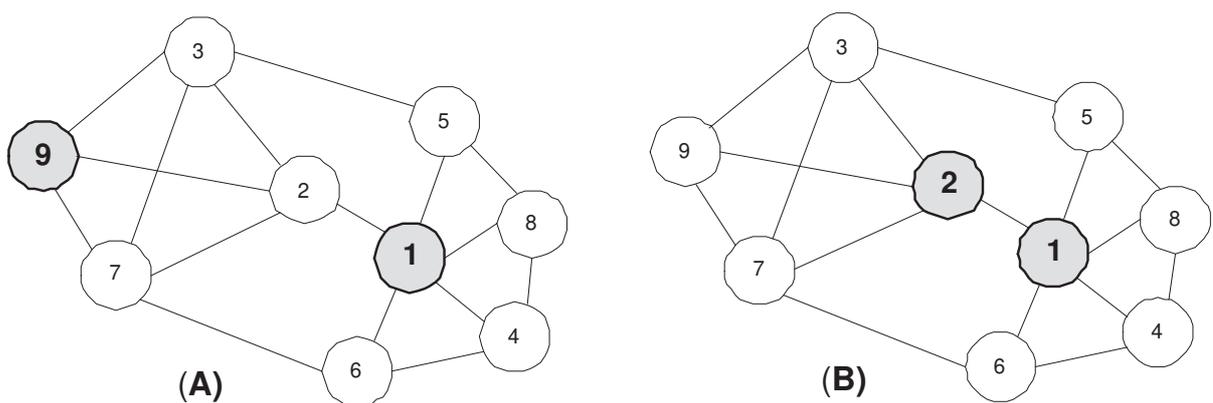


Figura 2.2: Exemplo de Formação de um DS(A) e CDS(B)

Os nós que compõem as RSSFs comunicam-se através do compartilhamento do meio de comunicação de forma direta (*single hop*) ou indireta (*multi-hops*). O compartilhamento do mesmo canal de comunicação por muitos nós reduz a capacidade da rede, pois o número de colisões aumenta com o número de nós competindo pelo meio. A partir da computação

de um *backbone* pode-se reduzir o número de nós ativos o que pode gerar uma redução significativa no consumo de energia ao mesmo tempo que melhora o desempenho da rede, influenciando diretamente na Qualidade de Serviço (QoS) da rede [50].

Uma RSSF pode ser modelada através do modelo *Unit Disk Graph* (UDG) [51] que é um modelo teórico de grafos amplamente aceito na modelagem de redes *ad hoc*. O UDG é definido da seguinte forma: dois nós quaisquer, A e B , são vizinhos se a distância Euclidiana entre suas coordenadas na rede é menor ou igual a R , onde R é o alcance de transmissão de cada nó (igual para todos os nós em redes homogêneas) [52].

Para modelar uma RSSF utilizando o modelo UDG assume-se que a rede é representada por um grafo $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de nós sensores, e E é o conjunto de enlaces. Associa-se cada nó em V a suas coordenadas no espaço Euclidiano. Considera-se que existe um enlace entre os nós u e v (i.e., $(u, v) \in E$) se e somente se a distância Euclidiana entre o par de nós for menor que o alcance de transmissão de seus rádios. Um conjunto V' forma um CDS de G caso todos os nós em $V - V'$ são vizinhos (i.e., dominados por) a pelo menos um nó em V' e o subgrafo induzido em V' é conectado.

Existe uma variedade de condições que podem ser impostas ao conjunto dominante V' em $G = (V, E)$. Entre elas, a múltipla dominação e dominação à distância [53]. A múltipla dominação requer que cada nó sensor em $V - V'$ seja dominado por pelo menos k nós sensores em V' para um k inteiro positivo. Já a dominação à distância requer que cada nó sensor em $V - V'$ esteja a uma distância máxima r de pelo menos um nó sensor em V' , para um r inteiro positivo.

A computação de um CDS de cardinalidade mínima para uma rede qualquer, ou seja, o *Minimum CDS* (MCDS), é um problema NP-Completo [54] e requer conhecimento global da topologia da rede. Soluções baseadas em estratégias distribuídas [55,56] têm sido direcionadas para aproximação do problema MCDS. No entanto, alguns resultados [57–59] demonstram que um certo nível de redundância na composição do CDS pode ser útil em termos da tolerância a falhas do *backbone*. Isto é sobretudo relevante às RSSF, onde falhas não são exceções devido à natureza dos dispositivos e a forma de comunicação adotada (i.e., comunicação sem fio).

2.3 *Clustering* e Controle de Topologia

Clustering é uma estratégia utilizada para criar uma hierarquia entre os nós de uma rede. As estruturas geradas a partir desta estratégia são denominadas *clusters*. A estratégia de formação de um *cluster* pode ser definida formalmente da seguinte forma: dado um grafo $G = (V, E)$, o processo de *clustering* inicialmente divide V em um conjunto de subconjuntos $\{V_1, V_2, \dots, V_k\}$ onde $V = \bigcup_{i=1}^k V_i$, tal que cada subconjunto V_i induz um

subgrafo conectado de G , que é um *cluster*. Note que um *cluster* pode se sobrepor a outro, e que cada *cluster* elege um nó que representa o *cluster*; este nó recebe o nome de *cluster-head* [60].

Já o Controle de Topologia (CT) pode ser definido como: a arte de coordenar os nós de uma rede tomando decisões em relação aos limites de transmissão, objetivando o aumento da conectividade e a redução do consumo de energia [61]. Neste contexto, o controle de topologia pode auxiliar no desenvolvimento de protocolos eficientes em energia diante das severas restrições encontradas nas RSSFs.

O problema do controle de topologias nas RSSFs é dividido em duas categorias: **cobertura** e **conectividade** [62]. Os protocolos que se encaixam na categoria de **cobertura** [63–65] preocupam-se em como a topologia dos nós sensores pode ser organizada de forma a maximizar o sensoriamento confiável de uma determinada área e, simultaneamente, economizando energia. Por outro lado, os protocolos classificados na categoria de **conectividade** restringe-se às trocas confiáveis de mensagem entre os nós da rede. Atualmente, são empregados dois mecanismos para o gerenciamento da conectividade numa RSSF: os mecanismos de controle de potência dos rádios dos sensores [66–68], e os mecanismos de Gerenciamento Dinâmico de Energia (GDE) [69–71] que basicamente alternam os modos de operação dos sensores (i.e., repouso/ativo).

A estratégia de *Clustering* e o controle de topologias estão muito próximos a nível conceitual. Enquanto o primeiro preocupa-se com a criação de um *backbone* virtual (i.e., o conjunto de *cluster heads* formam o DS da rede), o último define o *backbone* da rede a partir da utilização de algum mecanismo de construção de CDS [72].

2.4 Modelos de Baterias

A bateria é o principal componente do *Subsistema Fonte de Energia* (apresentado na Seção 2.1.1) responsável por fornecer energia a todo nó sensor. Em geral, uma bateria é constituída por células dispostas em série, paralelas, ou a combinação de ambas. Cada célula é formada por dois eletrodos ¹: um ânodo que possui polaridade negativa e um cátodo que possui polaridade positiva, separados por um eletrólito ². Durante a fase de descarga (i.e., quando a bateria fornece corrente elétrica a um circuito externo) o ânodo libera elétrons para o circuito enquanto o cátodo recebe elétrons do circuito. Esses elétrons têm origem a partir de reações eletroquímicas e são chamados de *espécies eletroativas* [1].

Na Figura 2.3 são apresentados os diferentes estados de operação de uma bateria, foi realizada uma simplificação na apresentação da estrutura de uma bateria na Figura 2.3

¹Condutor metálico por onde uma corrente elétrica entra ou sai de num sistema

²Condutor de eletricidade, sólido ou líquido, no qual o transporte de carga se realiza por meio de íons

sendo apenas apresentado a vizinhança de um eletrodo. Quando a bateria está completamente carregada a superfície do eletrodo contém a concentração máxima de *espécies eletroativas*. Ou seja, existe uma distribuição uniforme em toda a região linear de comprimento w do eletrólito conforme observa-se na Figura 2.3 (A).

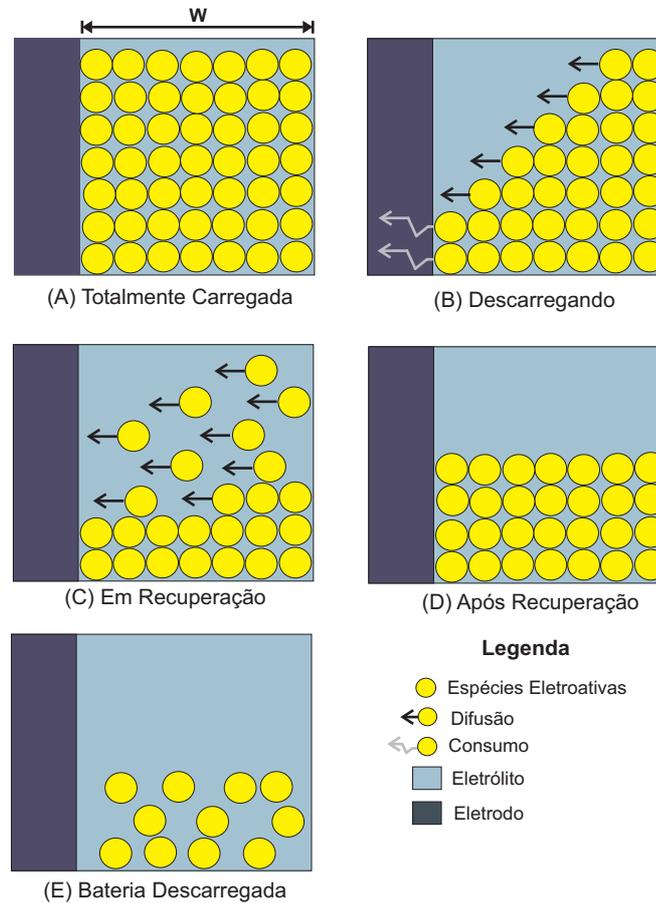


Figura 2.3: Diferentes estados de operação da bateria [1]

O processo de descarga da bateria inicia quando é conectado uma carga aos terminais da bateria, neste momento ocorre um fluxo externo de elétrons entre os eletrodos. As reações eletroquímicas resultantes deste processo causam a redução no número de *espécies eletroativas* próximas ao eletrodo. Neste momento, é formado um gradiente de concentração de *espécies eletroativas* não nulo ao longo do eletrólito sendo iniciada a difusão de espécies em direção ao eletrodo com a finalidade de reequilibrar a concentração, como pode ser observado na Figura 2.3 (B).

Quanto mais alta for a corrente de descarga, menor será a concentração de *espécies eletroativas* na superfície do eletrodo [73]. A medida que a concentração diminui, a tensão da bateria é reduzida. Quando a tensão da bateria atinge um limite inferior ao valor de corte (i.e., *cutoff threshold*) as reações eletroquímicas não podem mais ocorrer e a bateria para de fornecer carga ao sistema. Neste momento a bateria não está completamente descarregada, mas sim indisponível conforme mostrado na Figura 2.3 (E).

Em qualquer momento, antes da tensão atingir um limite inferior ao valor de corte, é possível ocorrer o *efeito de recuperação*, o que possibilita o aumento da vida útil da bateria. Para que isso ocorra é necessário a redução da corrente exigida da bateria. Note que não existe a necessidade de reduzir para zero o valor da corrente. Quando a corrente é reduzida, e devido a difusão das *espécies eletroativas* (veja Figura 2.3 (C)), a concentração próxima à superfície do eletrodo aumenta até o gradiente de concentração ser anulado. Neste momento a concentração de espécies apresenta novamente uma distribuição uniforme, porém com um valor de capacidade menor, o que indica que ocorreu o efeito de recuperação da capacidade da bateria, como pode ser observado na Figura 2.3 (D).

Cada bateria que faz parte do *Subsistema Fonte de Energia* caracteriza-se por três valores de tensão:

1. *Tensão de Circuito Aberto*: valor da tensão da bateria totalmente carregada;
2. *Tensão de Operação*: tensão da bateria em circuito fechado;
3. *Tensão de Corte*: valor em que a bateria é considerada descarregada.

A capacidade de uma bateria é especificada pela quantidade de materiais ativos nela presente. Essa capacidade pode ser expressa de três maneiras diferentes [74]:

1. *Capacidade Teórica*: baseia-se na quantidade de energia armazenada e é o limite máximo de energia que pode ser extraída na prática;
2. *Capacidade Padrão*: é a energia que pode ser extraída sob condições especificadas pelo fabricante;
3. *Capacidade Atual*: pode exceder a *capacidade padrão*, mas não pode exceder a *capacidade teórica* de uma bateria.

O desempenho de uma bateria em relação ao perfil de corrente de descarga depende de dois efeitos: (i) *efeito de taxa de capacidade*, que depende da *capacidade atual* da bateria, e da intensidade da sua corrente de descarga; (ii) *efeito de recuperação*, que depende da recuperação de carga durante períodos ociosos, ou seja, períodos em que a corrente solicitada é reduzida significativamente [74].

Modelos de bateria capturam as características reais de operação e podem ser utilizados para prever o comportamento de uma bateria real sob várias condições de carga e descarga. Estes modelos são úteis para o projeto de sistemas alimentados por baterias, porque permitem a análise do comportamento de descarga da bateria sob diferentes especificações do projeto.

Existem vários modelos de baterias com diferentes características e complexidade distintas. Existem os modelos estocásticos [75] que modelam o comportamento da bateria como um processo estocástico discreto no tempo em que o estado do processo representa o estado de carga da bateria; modelos eletroquímicos [76] que são baseados em equações diferenciais parciais complexas que exigem informações específicas da bateria o que dificulta muito a modelagem de determinados tipos de baterias; os modelos elétricos [77] que possuem uma caracterização rigorosa dos componentes do modelo como, por exemplo, tensão de circuito aberto, auto-carga, dependências como temperatura, número de ciclos, corrente, entre outras; e finalmente os modelos analíticos que se destacam por serem simples de implementar e relativamente rápidos na execução, quando comparados aos modelos anteriores.

Muitos modelos analíticos de baterias podem incluir modelos de carga constante e de carga variável, e conseguem capturar o *efeito de taxa de capacidade*, e o *efeito de recuperação*. Esses modelos são flexíveis em relação à implementação, e podem ser facilmente configurados para diferentes tipos de baterias.

O modelo analítico mais simples é o *modelo linear*, nele a bateria é tratada como um recipiente linear de corrente. Assim, a equação $C = C' - It_d$ permite calcular a capacidade restante C de uma bateria. Onde C' é capacidade no início da operação, I é a corrente constante de descarga durante a operação, e t_d é o tempo de duração da operação. A capacidade remanescente é calculada sempre que a taxa de descarga mudar.

Neste trabalho é utilizado o modelo analítico de Rakhmatov-Vrudhula [78] para estimar o tempo de vida da bateria de um nó sensor. Essa escolha foi feita devido o modelo de Rakhmatov-Vrudhula conseguir capturar o *efeito de taxa de capacidade* e o *efeito de recuperação*, bem como ser de fácil implementação quando comparado aos demais modelos. A seguir são apresentadas as características do modelo de Rakhmatov-Vrudhula.

2.4.1 Modelo Rakhmatov-Vrudhula

Rakhmatov e Vrudhula [78] apresentaram equações para o cálculo do tempo de vida de uma bateria de íon(s) de lítio alimentada por carga constante ou variável. Para estimar o tempo de vida da bateria somente dois parâmetros específicos são necessários, conforme podemos verificar na equação 2.1. O parâmetro α está relacionado a capacidade da bateria e o parâmetro β está relacionado ao comportamento não linear da bateria durante os períodos de carga e descarga.

A equação 2.1 descreve o impacto do perfil de descarga no tempo de vida da bateria. Onde I_{k-1} é a corrente de descarga durante o período $k-1$. A função A calcula o impacto do comportamento não linear na descarga da bateria, onde L é o tempo de vida da bateria, t_k é o tempo de duração do período k , e t_{k-1} é o tempo de duração para o período $k-1$.

Mais detalhes sobre a função A e sobre o algoritmo para calcular L podem ser obtidos em [78].

$$\alpha = \sum_{k=1}^n 2I_{k-1}A(L, t_k, t_{k-1}, \beta). \quad (2.1)$$

Handy e Timmermann [79] apresentam um algoritmo para a integração do modelo analítico de bateria Rakhmatov-Vrudhula com ambientes de simulação para redes sem fio e dispositivos móveis. Este mecanismo realiza a estimativa do tempo de vida de dispositivos alimentados por bateria de forma interativa não sendo necessário o conhecimento prévio de todo o perfil de descarga da bateria. A mesma abordagem é utilizada neste trabalho. Desta forma, efeitos não lineares da bateria, como o *efeito de taxa de capacidade* e o *efeito de recuperação*, podem ser levados em consideração. A principal contribuição desta abordagem está na possibilidade de desenvolver protocolos que prolonguem a vida útil de uma RSSF.

Ao contrário do trabalho de Handy e Timmermann, que utiliza parâmetros para uma bateria tipo *Lítio-Ion*, neste trabalho adotou-se $\alpha = 4918200$ e $\beta = 4034$. Estes parâmetros foram estimados com base nos dados de uma bateria alcalina [80] frequentemente utilizada na alimentação dos nós sensores de uma RSSF. A estimação dos parâmetros α e β seguem a mesma metodologia adotada por Rakhmatov e Vrudhula [78].

O tempo de vida de uma bateria é influenciado diretamente pelo perfil de descarga

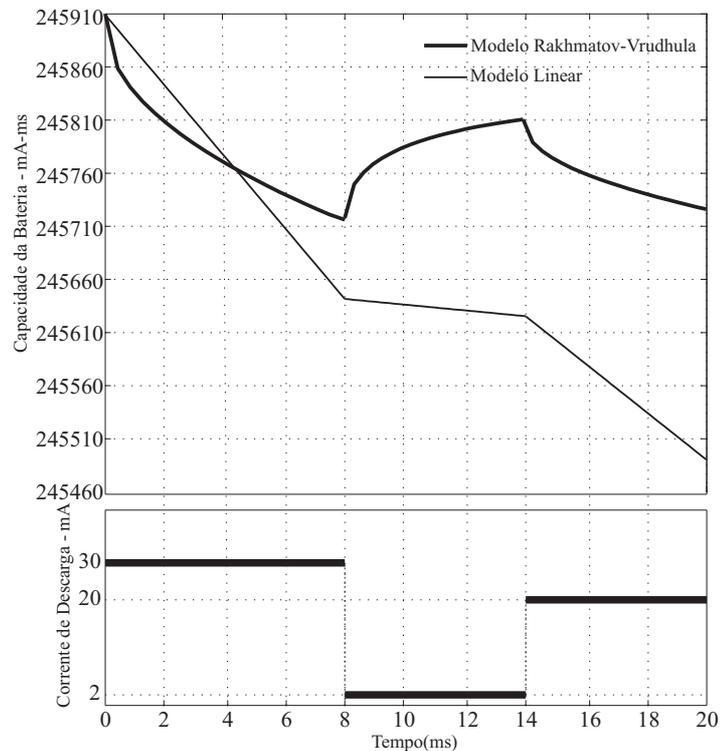


Figura 2.4: Capacidade da Bateria em Função do Perfil de Descarte.

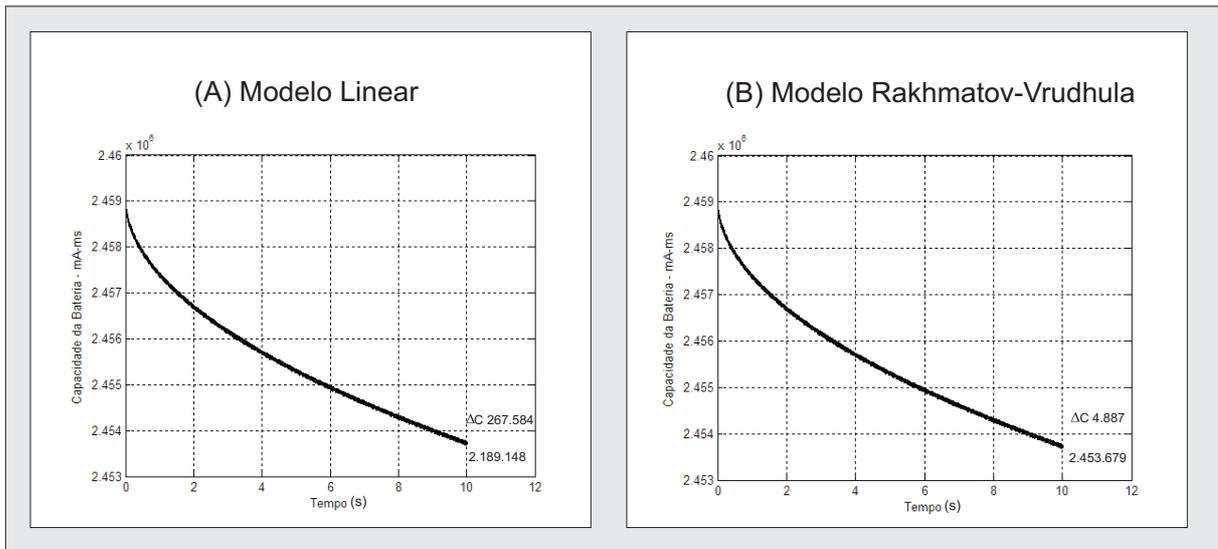


Figura 2.5: Modelo Linear (A) versus Modelo de Rakhmatov-Vrudhula (B) para um perfil de 10 segundos.

aplicado na mesma. Na Figura 2.4 é apresentado a capacidade da bateria capturado pelo modelo Rakhmatov-Vrudhula e pelo modelo linear considerando um perfil de descarga representado por $S_I = \{30, 2, 20\} \text{ mA}$ e $S_t = \{8, 6, 6\} \text{ ms}$. Desta forma, a descarga é 30, 2 e 20 mA para os intervalos de tempo de 8, 6 e 6 ms, respectivamente.

Pode-se verificar o efeito de recuperação (entre 8 e 14 ms na Figura 2.4) capturado pelo modelo Rakhmatov-Vrudhula quando ocorre uma redução na corrente de 30 mA para 2 mA. Já o modelo linear, para o mesmo intervalo, mostra apenas o consumo de energia em virtude de não capturar o efeito de recuperação. Note que para existir recuperação de carga basta que a corrente solicitada da bateria seja reduzida por um determinado intervalo de tempo. Não exigindo necessariamente que a corrente seja alterada para zero (desligar o dispositivo).

Na Figura 2.5 pode-se observar a disparidade entre os resultados obtidos utilizando os modelos *linear* e *Rakhmatov-Vrudhula* na previsão do consumo de energia de uma bateria. Note que o modelo linear fornece um consumo 50 vezes maior que o modelo Rakhmatov-Vrudhula para a variação na capacidade da bateria para um mesmo perfil de descarga com 10 segundos de duração. Em um segundo experimento, apresentado na Figura 2.6, foi mantido o mesmo perfil, apenas foi estendido o tempo de simulação até 91 segundos. Neste momento a simulação foi encerrada pois utilizando o modelo linear a capacidade da bateria atingiu o nível zero (veja a Figura 2.6 (A)). Já a simulação utilizando o modelo de Rakhmatov-Vrudhula apresentou uma redução de apenas 0,65% na capacidade da bateria (i.e., corresponde a um $\Delta C = 15.762$) conforme pode-se verificar na Figura 2.6 (B).

Essa grande divergência nos resultados deve-se ao fato de que o modelo linear, devido

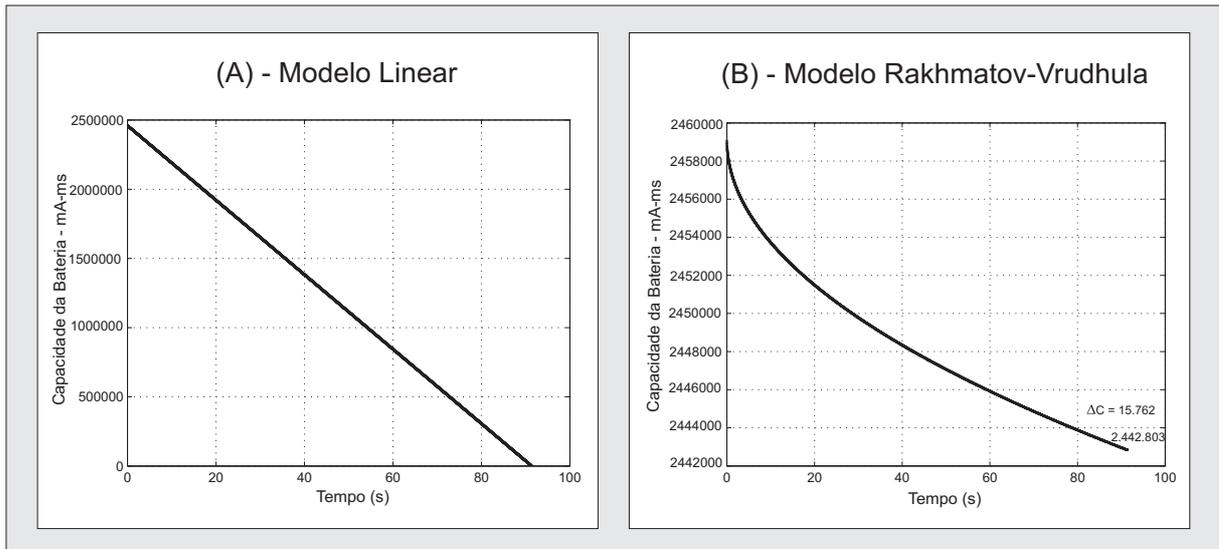


Figura 2.6: Modelo Linear (A) versus Modelo de Rakhmatov-Vrudhula (B) para um perfil de 91 segundos.

a sua simplicidade, não consegue capturar o comportamento não linear das baterias (i.e., a *taxa de capacidade* e o *efeito de recuperação*).

2.5 Modelando Redes de Sensores Sem Fio

As RSSFs são sistemas nos quais duas dinâmicas, uma a eventos discretos e outra contínua, coexistem e interagem [81]. Este tipo de comportamento caracteriza os sistemas denominados Sistemas Híbridos (SHs). Numa RSSF, a dinâmica a eventos discretos é representada tanto pelo *hardware* como pelo *software* presente nos nós sensores. Já a dinâmica contínua é representada pelo comportamento dos parâmetros do subsistema fonte de energia (i.e., bateria) que alimenta cada nó sensor e pelas variáveis ambientais monitoradas pela rede.

Vários modelos têm sido propostos com o objetivo de definir um formalismo matemático para trabalhar com o comportamento dinâmico e complexo dos SHs. De um modo geral, a metodologia adotada é a de estender o modelo autômato de estado finito com a introdução de dinâmicas contínuas mais complexas. A dinâmica contínua é frequentemente considerada no contexto das equações diferenciais e a dinâmica a eventos discretos é frequentemente modelada e analisada utilizando-se autômatos ou Redes de Petri (RP) [82].

A contribuição das RPs para a modelagem e análise de sistemas a eventos discretos é bem conhecida. No entanto, para modelar SHs, uma extensão de RP é necessária para representar os componentes da dinâmica contínua. Neste trabalho é utilizado um formalismo baseado nas RPs denominado Redes de Petri Híbridas Diferenciais (RPHD) [83].

O formalismo RPHD é baseado nos principais elementos da semântica do autômato híbrido e no poder de modelagem das RPs. A utilização das RPHDs no estudo das RSSFs possibilita modelar, explorando o poder de representação das RPs, as características da dinâmica a eventos discretos, ou seja, concorrência, sincronismo, conflito, exclusão mútua, relações de precedência, não determinismo e bloqueio.

2.5.1 Redes de Petri Híbridas Diferenciais

Nesta Seção será realizada uma pequena introdução sobre as Redes de Petri Híbridas Diferenciais (RPHD). Mais detalhes sobre o formalismo RPHD e exemplos de utilização podem ser obtidos em [17, 83–85].

Uma Rede de Petri Híbrida Diferencial (RPHD) é composta de dois tipos de lugares e dois tipos de transições: lugares e transições discretos, lugares e transições diferenciais. Um lugar diferencial é representado por três círculos concêntricos e uma transição diferencial por dois retângulos concêntricos. Um lugar e uma transição discretos são representados por um círculo e uma barra, respectivamente. O diagrama da Figura 2.7 ilustra os tipos de lugares e transições de uma RPHD.

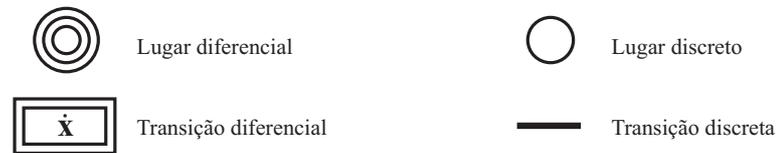


Figura 2.7: Lugares e transições de uma RPHD.

Uma RPHD possui três tipos de arcos. Dois tipos denominados *arco normal* e *arco inibidor*, enquanto que o terceiro é denominado *arco teste*. O *arco normal* e o *arco inibidor* podem ser usados para conectar os elementos discretos da rede, com exceção para o arco que conecta um lugar diferencial e uma transição discreta, onde é usado o *arco teste*. Na Figura 2.8 são mostrados os tipos de arcos de uma RPHD.

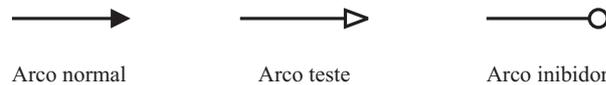


Figura 2.8: Tipos de arcos de uma RPHD.

Definição 1 Uma Rede de Petri Híbrida Diferencial é definida como $RPHD = (\mathbf{X}, P, T, f, A_N, A_I, A_T, Pre(P_i, T_j), Post(P_i, T_j), \mathcal{T}, H_{P_i, T_j}, J_{T_j, P_i}, M_0(t))$, onde

- $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_l]^T$, é o vetor de estado contínuo, onde $\mathbf{X} \subset \mathbb{R}^l$ e l é a dimensão do sistema;

- $\mathbf{X}_0 = [x_1(0), x_2(0), \dots, x_l(0)]^T$, é o vetor de estado contínuo inicial do sistema;
- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, é um conjunto finito e não vazio de lugares. Onde n é a cardinalidade de P ;
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, é um conjunto finito e não vazio de transições. Onde m é a cardinalidade de T ;
- $P \cap T = \emptyset$ e $P \cup T \neq \emptyset$;
- $f : P \cup T \rightarrow \{D, DF\}$, é chamada *função diferencial*, onde D significa discreto e DF significa diferencial, indica se um lugar P_i (uma transição T_j) é um lugar (transição) discreto ou um lugar (transição) diferencial. As notações $\{P_D, T_D\}$ e $\{P_{DF}, T_{DF}\}$, também são usadas para representar os conjuntos de elementos discretos e diferenciais, respectivamente;
- $P = P_D \cup P_{DF}$ e $T = T_D \cup T_{DF}$;
- O conjunto de lugares discretos ($f(P_i) = D$) modela o estado discreto de um SH;
- Uma transição discreta ($f(T_j) = D$) modela a ocorrência de um evento discreto num SH;
- Um lugar diferencial ($f(P_i) = DF$) modela o estado contínuo de um SH;
- Uma transição diferencial ($f(T_j) = DF$) modela o cálculo da evolução contínua de um SH;
- $A_N \subseteq ((P_D \times T_D) \cup (T_D \times P_D)) \cup ((P_D \times T_{DF}) \cup (T_{DF} \times P_D))$, é um conjunto de *arcos normais*;
- $A_I \subseteq (P_D \times T_D)$, é um conjunto de *arcos inibidores*;
- $A_T \subseteq (P_{DF} \times T_D) \cup (T_D \times P_{DF})$, é um conjunto de *arcos teste*;
- $Pre(P_i, T_j) : P_D \times T_D \rightarrow \mathbb{N}$, é uma função que define os *arcos normais* de um lugar P_i para uma transição T_j .
- $Post(P_i, T_j) : P_D \times T_D \rightarrow \mathbb{N}$, é uma função que define os *arcos normais* de uma transição T_j para um lugar P_i .
- \mathcal{T} é um mapa de temporização para as transições discretas. Diferentemente do que propõe [86], no presente caso não é necessário definir um *atraso* para as transições diferenciais;

- $H_{P_i, T_j} : P_{DF} \times T_D \rightarrow \mathbf{X}$, é uma *função de habilitação*¹ associada ao *arco teste* que conecta um lugar diferencial de entrada P_i à transição discreta T_j . A habilitação de T_j é definida de acordo os valores das variáveis de estado x_k associadas com a marcação do lugar P_i ;
- $J_{T_j, P_i} : T_D \times P_{DF} \rightarrow \mathbf{X}$, é uma *função de junção*¹ associada ao *arco teste* que conecta uma transição discreta T_j a um lugar diferencial de saída P_i . J_{T_j, P_i} define os novos valores das variáveis de estado x_k associadas com a marcação do lugar diferencial P_i após o disparo de T_j . Para os casos em que J_{T_j, P_i} não é definida, J_{T_j, P_i} é a função identidade;
- $M_0(t) : P \rightarrow \mathbb{N}$ ou \mathbb{R}^l , representa a marcação inicial da rede em $t = 0$. Para um lugar específico P_i , a marcação inicial é representada por $m_0(P_i)(t)$.

A evolução no tempo de \mathbf{X} é dada por $\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, t)$. Para cada transição diferencial, é atribuída uma condição de fluxo $\dot{\mathbf{X}}$, a qual é utilizada no cálculo da respectiva evolução contínua.

2.5.2 Marcação de uma RPHD

A marcação de uma RPHD é representada por $m(P_i)(t)$, ou seja, a marcação de um lugar P_i no tempo t depende do tipo de lugar.

- Para um lugar discreto, a marcação é um inteiro não negativo, ou seja, se $f(P_i) = D$, então $m(P_i)(t) \in \mathbb{N}$.
- Para um lugar diferencial, a marcação é um vetor real, ou seja, se $f(P_i) = DF$, então $m(P_i)(t) = \mathbf{X}$ e $m_0(P_i)(t) = \mathbf{X}_0$. A marcação de um lugar diferencial representa o vetor de estado contínuo do SH.

2.5.3 Mapa de Temporização

Para uma transição discreta: se $f(T_j) = D$, então $\mathcal{T}(T_j) = d_j \in \mathbb{R}^{\geq 0}$, onde d_j é o tempo de atraso associado a transição T_j . Se $d_j = 0$, então a transição T_j executará o seu disparo imediatamente após ser habilitada.

2.5.4 Condições Particulares para a estrutura de uma RPHD

Sejam $\bullet T_j$ ($\bullet P_i$) e T_j^\bullet (P_i^\bullet) os conjuntos de predecessores e sucessores da transição T_j (do lugar P_i), respectivamente.

¹Em [87], estas funções são associadas à transições discretas.

1. Se um *arco normal* conecta um lugar discreto a uma transição diferencial, deve existir outro *arco normal* conectando esta transição diferencial ao mesmo lugar discreto. Além disso, esses *arcos normais* devem ter o mesmo peso. Formalmente, se $f(P_i) = D$ e $f(T_j) = DF$ tal que $P_i \in \bullet T_j$ (resp. $P_i \in T_j^\bullet$), então $P_i \in T_j^\bullet$ (respectivamente $P_i \in \bullet T_j$) e $Pre(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j)$. Esta condição considera que a marcação de todos os lugares discretos é um inteiro para qualquer evolução da rede. Esta condição pode ser observada no modelo RPHD mostrado na Figura 2.9(a). Neste caso, os dois arcos conectando o lugar discreto P_1 e a transição diferencial T_2 garantem a integridade da marcação de P_1 .
2. Um *arco normal* pode conectar uma transição diferencial a um lugar diferencial, mas o contrário, não é permitido. Formalmente, se $f(P_i) = DF$ e $f(T_j) = DF$, então $\bullet T_j \cap P_i = \emptyset$. Esta condição, contudo, não limita o poder de modelagem porque: a) o estado de um lugar diferencial não influencia diretamente a habilitação/deshabilitação de uma transição diferencial; b) a evolução da marcação do lugar P_i é determinada pela dinâmica contínua associada à transição T_j de entrada e não pelo sentido do *arco normal* que os conecta. Esta condição é ilustrada no modelo RPHD da Figura 2.9(a). Note que a habilitação de T_2 não depende da marcação de P_2 , e que embora exista um arco direcionado de T_2 para P_2 , isto não implica que a marcação contínua de P_2 deverá, obrigatoriamente, crescer. Para confirmar este fato, o leitor deve observar a evolução das variáveis de estado contínuo x_1 e x_2 na Figura 2.9(b).

2.5.5 Regras de Evolução

A evolução de uma RPHD é definida pelo disparo de transições. Para cada tipo de transição, as condições para habilitação e disparo são diferentes.

Condições de Habilitação

Definição 2 *Uma transição T_j está habilitada no tempo t se e somente se:*

1. Se T_j é uma transição discreta, cada lugar discreto de entrada tem uma marcação pelo menos igual ao peso do *arco normal* correspondente. Para aqueles lugares discretos de entrada que conectam-se através de *arcos inibidores*, esses lugares têm uma marcação inferior ao peso dos *arcos inibidores* correspondentes. Além disso, para cada lugar diferencial de entrada, a respectiva *função de habilitação* H_{P_i, T_j} tem predicado verdadeiro, ou seja, se $f(T_j) = D$, então $\forall P_i \in P_D \cap \bullet T_j$, $m(P_i)(t) \geq Pre(P_i, T_j)$, e $\forall P_i \in P_{DF} \cap \bullet T_j$, $H_{P_i, T_j} = \text{verdade}$;
2. Se T_j é uma transição diferencial, cada lugar discreto de entrada tem uma marcação pelo menos igual ao peso do *arco normal* correspondente, ou seja, se $f(T_j) = DF$,

então $\forall P_i \in P_D \cap \bullet T_j$, $m(P_i)(t) \geq Pre(P_i, T_j)$. Veja o modelo RPHD mostrado na Figura 2.9(a), onde o lugar discreto P_1 tem uma marcação suficiente para habilitar a transição diferencial T_2 .

Nota 1 Não é permitido atribuir simultaneamente à uma transição discreta ($T_j \in T_D$) um tempo de atraso d_j e uma função de habilitação H_{P_i, T_j} .

Condições de Disparo

Quando uma transição discreta dispara, um número de fichas igual ao peso do *arco normal* que liga cada lugar discreto de entrada à transição discreta é removido do respectivo lugar discreto de entrada, enquanto um número de fichas igual ao peso do *arco normal* que liga à transição cada lugar discreto de saída é adicionado ao respectivo lugar discreto de saída. Formalmente, se T_j está habilitada no tempo t , $f(T_j) = D$ e $\mathcal{T}(T_j) = d_j$, então T_j dispara no tempo $t + d_j$, $\forall P_i \in \bullet T_j$, $m(P_i)(t + d_j) = m(P_i)(t) - Pre(P_i, T_j)$ e $\forall P_i \in T_j^\bullet$, $m(P_i)(t + d_j) = m(P_i)(t) + Post(P_i, T_j)$.

Quando uma transição diferencial dispara, a marcação de um lugar diferencial de saída é atualizada com um novo vetor de estado contínuo. Formalmente, para $f(P_i) = DF$ e $f(T_j) = DF$, se T_j está habilitada no tempo t , então T_j dispara durante Δt , onde Δt é o intervalo de tempo no qual T_j permanece habilitada e τ é o passo de integração utilizado. Assim, $\forall P_i \in T_j^\bullet$, $m(P_i)(t + \tau) = \mathbf{X}$, onde \mathbf{X} é o novo vetor de estado contínuo calculado. O modelo apresentado na Figura 2.9(a) ilustra o disparo de uma transição diferencial. A transição diferencial T_2 possui uma condição de fluxo $\dot{\mathbf{X}}$ representada pelo sistema de equações diferenciais de segunda ordem

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1 - x_2 + 1 \\ x_1 \end{bmatrix}$$

com condição inicial igual a $m_0(P_2)(t) = \mathbf{X}_0 = [0 \ 0]^T$. Durante o disparo de T_2 , a marcação de P_2 é atualizada de acordo com a evolução contínua mostrada na Figura 2.9(b).

2.5.6 Modelando SHs utilizando RPHDs

Modelar SHs é uma tarefa relativamente complexa. A concepção de modelos para esses sistemas exige do projetista uma visão clara das dinâmicas envolvidas e da forma como estas interagem. No caso das RPHDs, a modelagem de SHs, consiste das seguintes etapas:

1. *Modelagem da dinâmica a eventos discretos*: segue a mesma lógica utilizada para modelar Sistemas a Eventos Discretos (SEDs), ou seja, devem ser definidas as atividades e eventos discretos que caracterizam a dinâmica a eventos discretos do SH.

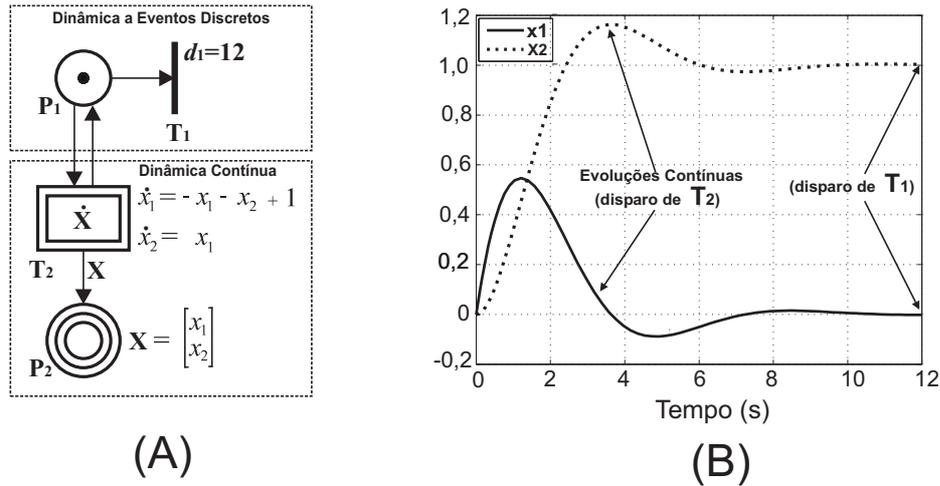


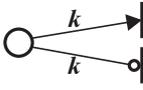
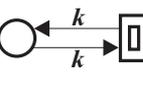
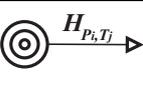
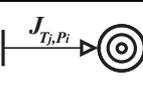
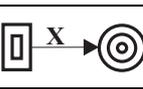
Figura 2.9: (a) Exemplo de modelo RPHD. (b) Evoluções contínuas resultantes do disparo de T_2 .

O modelo a eventos discretos pode ser construído respeitando-se as relações de dependência entre atividades e eventos. Além disso, restrições de tempo podem ser incluídas para caracterizar as durações de atividades;

2. *Modelagem da dinâmica contínua:* numa RPHD, o par formado por um lugar diferencial e uma transição diferencial, é suficiente para representar uma dinâmica contínua. O cálculo da evolução contínua está associado a uma transição diferencial. Esse cálculo é realizado durante a habilitação e disparo da referida transição diferencial;
3. *Modelagem da interação entre as dinâmicas:* após a construção dos modelos para as duas dinâmicas, é necessário definir a forma como as mesmas interagem. Essa interação depende fundamentalmente do comportamento híbrido do sistema em questão. A interface entre as dinâmicas de um SH em uma RPHD é realizada de duas formas:
 - (a) Através de *arcos normais* (dinâmica a eventos discretos \rightarrow dinâmica contínua): esses arcos conectam lugares discretos à transições diferenciais. São responsáveis pelas condições de habilitação das mesmas e devem atender às condições definidas na Seção 2.5.4, ítem 1; e
 - (b) Através de *arcos teste* (dinâmica contínua \leftrightarrow dinâmica a eventos discretos): esses arcos conectam lugares diferenciais à transições discretas. Nesses arcos são definidas as funções H_{P_i, T_j} e J_{T_j, P_i} .

Utilizando-se as RPHDs, também é possível modelar os comportamentos híbridos básicos tais como *switches* e *jumps* (também chamados de *impulsos*). Switches e jumps

Tabela 2.1: Conexões possíveis para modelar SHs com as RPHDs.

Conexão	Possível	Operação	Domínio
	Sim	Dinâmica a eventos discretos	$k \in \mathbb{N}$
	Sim	Dinâmica a eventos discretos	$k \in \mathbb{N}$
	Sim	Interação (dinâmica a eventos discretos \Rightarrow dinâmica contínua)	$k \in \mathbb{N}$
	Sim	Interação (dinâmica contínua \Rightarrow dinâmica a eventos discretos)	$H_{P_i, T_j} \in \mathbf{X}$
	Sim	Interação (dinâmica a eventos discretos \Rightarrow dinâmica contínua)	$J_{T_j, P_i} \in \mathbf{X}$
	Sim	Dinâmica contínua	$\mathbf{X} \subset \mathbb{R}^l$

são fenômenos discretos que surgem no estudo de SHs, e podem ser *autônomos* ou *controlados* [88]. Em um *switch*, a dinâmica contínua é modificada devido a uma evolução no estado discreto. Enquanto que num *jump*, a dinâmica contínua é modificada sem que ocorra uma evolução da dinâmica a eventos discretos.

Na Tabela 4.3³, são mostradas as conexões possíveis para o formalismo RPHDs, bem como as suas características para o processo de modelagem de SHs.

³ \mathbb{N} é o conjunto dos números naturais.

Capítulo 3

Gerenciamento Dinâmico de Energia Aplicado às RSSF

Neste Capítulo são apresentados o desenvolvimento, a implementação e a avaliação de duas novas técnicas de Gerenciamento Dinâmico de Energia (GDE) aplicadas às RSSFs a partir de um modelo preciso de descarga de bateria levando em consideração o consumo de energia envolvido no *Switching Energy* (SE). Este Capítulo está organizado da seguinte forma:

- Na Seção 3.1 é realizada uma introdução sobre GDE onde são apresentados os trabalhos correlatos a essa temática no contexto das RSSFs;
- Na Seção 3.2 é introduzido o conceito de *Switching Energy* (SE) e as suposições usadas para realizar seu cálculo;
- Na Seção 3.3 é apresentada a técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado dos nós sensores (GDE-DE). A seguir é apresentado o modelo desta técnica que utiliza o formalismo das RPHDs e os resultados da aplicação da técnica GDE-DE em um nó sensor. E, finalmente, ainda como parte da avaliação da técnica GDE-DE, é apresentada a aplicação da técnica GDE-DE em uma plataforma real de sensores denominada MSInt [2].
- Na Seção 3.4 é apresentada a técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia Baseado na Capacidade da Bateria (GDE-BB), sua modelagem em RPHD e os resultados obtidos a partir de simulações da aplicação da técnica de GDE-BB em um nó sensor;

3.1 Gerenciamento Dinâmico de Energia

A utilização de técnicas de Gerenciamento Dinâmico de Energia (GDE) [89] podem, além de economizar energia, recuperar a capacidade da bateria dos nós sensores prolongando o

tempo médio de vida da rede.

Existem várias técnicas para conservação de energia que podem ser aplicadas às RSSFs. Essas técnicas são classificadas como estáticas ou dinâmicas. As técnicas estáticas (e.g., *Energy-Aware Protocols* [90]) mantêm as mesmas características no transcorrer da atividade da rede. Em contrapartida, as técnicas dinâmicas evoluem durante o funcionamento da rede, possibilitando melhor conservação de energia pelo nó sensor em tempo de execução. Estas técnicas envolvem a utilização de modos distintos de operação do sensor. O princípio básico consiste em colocar em repouso os componentes do nó sensor quando estes não são necessários. O ideal é que o nó sensor entre em estado de *repouso* (i.e., *sleep*) tão logo seja possível; ou seja, repousar assim que o nó terminar as suas atividades momentâneas. O retorno ao modo de operação completa ocorre apenas na ocasião de algum evento de seu interesse, implicando na manutenção do componente de sensoriamento no modo ativo. Portanto, de fato o nó sensor é mantido num estágio intermediário (i.e., *repouso parcial*) e não completamente desligado.

O desligamento temporário também pode resultar em efeitos colaterais. Por exemplo, perda de Qualidade de Serviço (QoS) da aplicação devido ao retardo imposto por esse procedimento ou inconsistência ocasionada pela falta de aquisição de dados durante o período de desligamento. Ou então, de forma análoga, perda de conectividade caso o desligamento seja realizado por longos períodos, ou sem nenhuma coordenação (i.e., o desligamento afeta o roteamento de pacotes).

Diferentes técnicas de GDE [91] objetivam reduzir o consumo de energia em sistemas que utilizam baterias, mas somente algumas consideram eventos externos no processo de otimização. Uma destas abordagens [81] aplica o gerenciamento de energia utilizando o formalismo de autômatos híbridos levando em consideração alguns requisitos da aplicação na tomada de decisão sobre o desligamento dos nós sensores. No entanto, esta abordagem não considera o roteamento *multi-hop* dos nós sensores, tão pouco o nível da carga de bateria na tomada das decisões de desligamento dos nós sensores.

A técnica *Dynamic Voltage Scaling* (DVS) [89] propõe reduzir o consumo de energia do módulo processador do nó sensor. Nesta solução, a decisão sobre o desligamento fica restrita ao nó sensor sem nenhuma intervenção externa. Uma extensão ao DVS considera a capacidade da bateria e a área de cobertura no processo de transição entre os modos de operação do nó sensor [24].

Observa-se que em nenhum dos trabalhos citados foi explicitado o modelo de descarga da bateria em questão. Para se obter um modelo que represente de forma mais realista o ambiente de uma RSSF, em especial os ganhos obtidos utilizando técnicas de GDE, é importante utilizar um modelo de descarga de bateria preciso. Este modelo deve considerar o comportamento não linear, o efeito de taxa de descarga e, principalmente, o

efeito de recuperação da bateria. Caso contrário, não é possível capturar o ganho real proporcionado pela técnica de GDE.

Ma e Yang [92,93] apresentam um modelo analítico de bateria derivado do modelo de Rakhmatov-Vrudhula [78] que, segundo os autores, constituiu-se no primeiro trabalho que considera a descarga da bateria em redes de sensores de forma interativa. Cabe ressaltar que o modelo original de Rakhmatov-Vrudhula [78] não computa a descarga da bateria de forma interativa, existindo a necessidade de se conhecer *a priori* o perfil de descarga da bateria. Essa limitação, que impedia a sua utilização de forma interativa em simuladores de redes (e.g., NS-2) foi contornada por Handy e Timmermann [79] e estendida por Sausen et al. [19] para computar a descarga de baterias alcalinas (aplicadas em grande parte dos nós sensores).

Ma e Yang [92] afirmam que o seu modelo analítico possui reduzida complexidade computacional e resultados que se aproximam de outros modelos analíticos não interativos (e.g., modelo de Rakhmatov-Vrudhula) para um determinado perfil de descarga. No entanto, não se aprofundam nessa análise comparativa demonstrando o quanto o modelo apresentado é mais eficiente que os modelos existentes, em especial ao modelo de Rakhmatov-Vrudhula que, segundo Ma and Yang, é um modelo analítico preciso de descarga de bateria, apenas apresentando um elevado custo computacional.

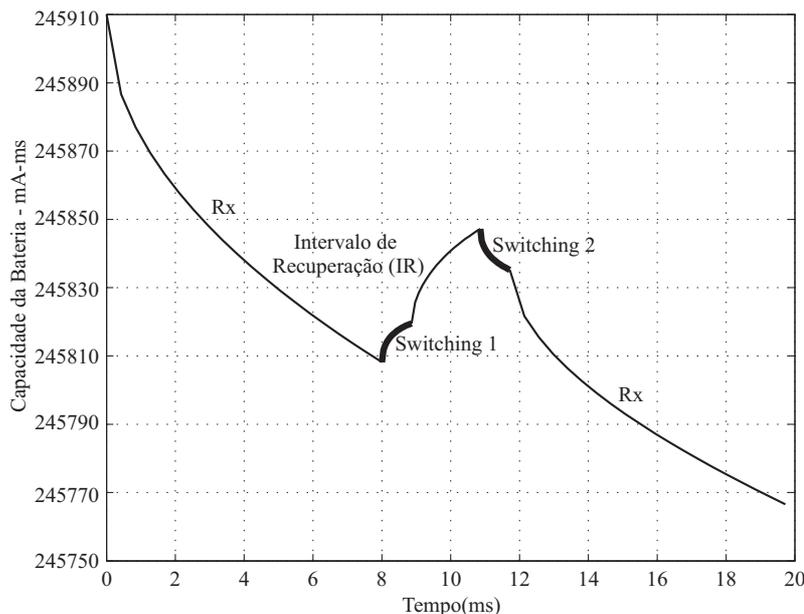
Neste trabalho utiliza-se o modelo de Rakhmatov-Vrudhula [78] no desenvolvimento, implementação e avaliação de duas novas técnicas de GDE, objetivando apresentar os ganhos efetivos de energia oferecidos pelas técnicas de GDE apresentadas.

3.2 *Switching Energy*

O *Switching Energy* (SE) refere-se a energia envolvida no processo de transição entre dois modos de operação por parte do nó sensor. Por exemplo, a transição entre o modo de recepção (Rx) e o modo repouso (*Sleep*). Dependendo do tipo de transição pode ocorrer perda ou recuperação na capacidade da bateria do nó sensor. Neste trabalho, o parâmetro SE é representado em mA-ms¹

Na Figura 3.1 é apresentada a análise do *Switching Energy*. Neste exemplo, é utilizado um perfil de descarga composto por 3 operações (i.e., Rx → *Sleep* → Rx) e duas transições: (i) *Switching 1* (i.e., Rx → *Sleep*); (ii) *Switching 2* (i.e., *Sleep* → Rx). Quando ocorre a primeira transição entre modos de operação (i.e., Rx → *Sleep*) representada na Figura 3.1 pelo ***Switching 1*** ocorre uma **recuperação** na capacidade da bateria. Isso acontece em virtude do *efeito de recuperação* apresentado na Seção 2.4.1. Logo a seguir, quando

¹Leia-se: mA vezes ms. A adoção dessa unidade deve-se ao fato de que um nó sensor, normalmente, solicita correntes da ordem de mA durante intervalos de tempo da ordem de ms.

Figura 3.1: Análise do *Switching Energy*Tabela 3.1: Tempo de transição entre os modos de operação (em μs)

Rádio	Taxa de Transferência/Modulação	Tx \rightarrow Sleep	Rx \rightarrow Sleep	Sleep \rightarrow Tx	Sleep \rightarrow Rx
TR1000	19,2 Kbps/OOK	10	10	16	20
TR1000	115,2 Kbps/FSK	10	10	16	20
CC1000	38,4 Kbps/OOK	10	10	850	850

o nó sensor realiza sua segunda transição entre modos de operação (i.e., *Sleep* \rightarrow Rx) representada na Figura 3.1 pelo **Switching 2** ocorre um consumo de energia que reflete em uma **redução** na capacidade da bateria.

Durante o período que o nó permanece em modo de repouso (i.e., *Sleep*), representado na Figura 3.1 pelo **Intervalo de Recuperação (IR)**, observa-se que existe uma significativa recuperação na capacidade da bateria. É importante mencionar que somente é possível verificar essa recuperação devido a adoção de um modelo preciso de descarga de bateria. No caso deste trabalho, o modelo de Rakhmatov-Vrudhula. A adoção de um modelo simples (e.g., modelo linear) pode ocasionar interpretações equivocadas quando a transição de modos de operação é analisada. Por exemplo, achar que o *Switching Energy* apenas consome energia reduzindo a capacidade da bateria.

Atualmente, existem poucos trabalhos [18, 20, 94] que levam em consideração o *Switching Energy* na avaliação do desempenho das RSSF em termos de consumo de energia. Geralmente, o SE é desprezado objetivando a simplificação da simulação. Entretanto, em virtude das severas restrições de energia das RSSF é de fundamental importância a

Tabela 3.2: Valores corrente (em mA) para cada modo de operação.

Rádio	Taxa de Transferência/Modulação	I_{Tx}	I_{Rx}	I_{Sleep}
TR1000	19,2 Kbps / OOK	12,00	4,50	0,005
TR1000	115,2 Kbps / FSK	12,00	4,80	0,005
CC1000	38,4 Kbps / OOK	27,00	10,00	0,001

análise de todos os parâmetros que possam influenciar no tempo de vida da rede. Neste contexto, desconsiderar o SE na avaliação do tempo de vida de uma RSSF torna-se um enorme equívoco.

Para realizar o cálculo do SE são necessários os parâmetros de tempo de transição entre os modos de operação do nó sensor e sua respectiva corrente. Na Tabela 3.1 são apresentados os tempos de transição para cada um dos modos de operação do rádio TR1000 [95] e CC1000 [96]. Estes rádios, integram grande parte dos nós sensores (e.g., *Berkeley Mica* e *Mica2 Motes*) utilizados atualmente nas pesquisas sobre RSSF. São apresentados apenas os tempo de transição entre os modos utilizados neste trabalho (i.e., Transmissão(Tx), Recepção(Rx) e Repouso(*Sleep*)). Os valores de corrente correspondentes a cada um dos modos de operação para os rádios TR1000 e CC1000 são apresentados na Tabela 3.2.

3.2.1 Cálculo do *Switching Energy*

Nesta Seção é apresentada a metodologia utilizada para realizar o cálculo do *Switching Energy* (SE). Para avaliar o impacto do SE no tempo de vida da bateria de um nó sensor, utilizou-se dois Perfis de Descarga (PD) aplicados a dois modelos de rádio (i.e., TR1000 e CC1000). Conforme mencionado anteriormente, ambos modelos equipam a grande maioria dos nós sensores atualmente utilizados nas pesquisas e simulações envolvendo RSSFs. Os Perfis de Descarga realizam o *sleep* sempre após uma transmissão, conforme observa-se a seguir.

$$PD_1 = Tx \rightarrow Sleep \rightarrow Tx$$

$$PD_2 = Tx \rightarrow Sleep \rightarrow Rx$$

Infelizmente, os fabricantes dos rádios não disponibilizam todas as informações necessárias sobre os modelos de rádios utilizados neste trabalho impossibilitando o correto cálculo do SE. Com o objetivo de contornar esse problema, neste trabalho, serão adotadas três suposições (a mesma estratégia já foi adotada em trabalhos anteriores [94, 97]) que são descritas a seguir:

Suposição 1: A energia consumida pelo modo A durante a transição para o modo B é a energia gasta pelo modo A durante o período de transição, que é:

$$SE_{A \rightarrow B} = P_A T_{B \rightarrow A} + P_B T_{A \rightarrow B}$$

Onde, P_A e P_B são as correntes solicitadas durante os modos A e B respectivamente, e $T_{A \rightarrow B}$ e $T_{B \rightarrow A}$ são os tempo de transição para os dois modos, respectivamente.

Os valores dos vetores de entrada utilizados pelo modelo Rakhmatov-Vrudhula (Equação 2.1) de acordo com a **Suposição 1** são:

$$\begin{aligned} PD_1 &= \begin{cases} S_I = \{I_{Tx}, \mathbf{I}_{Tx}, \mathbf{I}_{Sleep}, I_{Sleep}, \mathbf{I}_{Sleep}, \mathbf{I}_{Tx}, I_{Tx}\} \text{ mA} \\ S_t = \{t_{Tx}, \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx}, \mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep}, t_{Sleep}, \mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep}, \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx}, t_{Tx}\} \text{ ms} \end{cases} \\ PD_2 &= \begin{cases} S_I = \{I_{Tx}, \mathbf{I}_{Tx}, \mathbf{I}_{Sleep}, I_{Sleep}, \mathbf{I}_{Sleep}, \mathbf{I}_{Rx}, I_{Rx}\} \text{ mA} \\ S_t = \{t_{Tx}, \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx}, \mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep}, t_{Sleep}, \mathbf{t}_{Rx \rightarrow Sleep}, \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Rx}, t_{Rx}\} \text{ ms} \end{cases} \end{aligned}$$

Suposição 2: A energia consumida pela transição do modo A para o modo B é a energia consumida pelo modo B durante o tempo de transição, que é:

$$SE_{A \rightarrow B} = P_A T_{A \rightarrow B} + P_B T_{B \rightarrow A}$$

Os valores dos vetores de entrada utilizados pelo modelo Rakhmatov-Vrudhula (Equação 2.1) de acordo com a **Suposição 2** são:

$$\begin{aligned} PD_1 &= \begin{cases} S_I = \{I_{Tx}, \mathbf{I}_{Tx}, \mathbf{I}_{Sleep}, I_{Sleep}, \mathbf{I}_{Sleep}, \mathbf{I}_{Tx}, I_{Tx}\} \text{ mA} \\ S_t = \{t_{Tx}, \mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep}, \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx}, t_{Sleep}, \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx}, \mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep}, t_{Tx}\} \text{ ms} \end{cases} \\ PD_2 &= \begin{cases} S_I = \{I_{Tx}, \mathbf{I}_{Tx}, \mathbf{I}_{Sleep}, I_{Sleep}, \mathbf{I}_{Sleep}, \mathbf{I}_{Rx}, I_{Rx}\} \text{ mA} \\ S_t = \{t_{Tx}, \mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep}, \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx}, t_{Sleep}, \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Rx}, \mathbf{t}_{Rx \rightarrow Sleep}, t_{Rx}\} \text{ ms} \end{cases} \end{aligned}$$

Suposição 3: A energia consumida pela transição do modo A para o modo B é a média da energia consumida pelos modos A e B durante o tempo de transição, que é:

$$SE_{A \rightarrow B} = \frac{(P_A + P_B)(T_{A \rightarrow B} + T_{B \rightarrow A})}{2}$$

Os valores dos vetores de entrada utilizados pelo modelo Rakhmatov-Vrudhula (Equação 2.1) de acordo com a **Suposição 3** são:

$$PD_1 = \begin{cases} S_I = \{I_{Tx}, (\mathbf{I}_{Tx} + \mathbf{I}_{Sleep})/2, I_{Sleep}, (\mathbf{I}_{Sleep} + \mathbf{I}_{Tx})/2, I_{Tx}\} \text{ mA} \\ S_t = \{t_{Tx}, (\mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep} + \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx}), t_{Sleep}, (\mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx} + \mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep}), t_{Tx}\} \text{ ms} \end{cases}$$

$$PD_2 = \begin{cases} S_I = \{I_{Tx}, (\mathbf{I}_{Tx} + \mathbf{I}_{Sleep})/2, I_{Sleep}, (\mathbf{I}_{Sleep} + \mathbf{I}_{Rx})/2, I_{Rx}\} \text{ mA} \\ S_t = \{t_{Tx}, (\mathbf{t}_{Tx \rightarrow Sleep} + \mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Tx}), t_{Sleep}, (\mathbf{t}_{Sleep \rightarrow Rx} + \mathbf{t}_{Rx \rightarrow sleep}), t_{Rx}\} \text{ ms} \end{cases}$$

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores envolvidos quando são aplicadas as três suposições a partir dos Perfis de Descarga pré-definidos (i.e., PD1 e PD2). O rádio utilizado, para esse experimento, foi o rádio CC1000 com um Intervalo de Recuperação de 64 ms, modulação FSK e taxa de transferência de 38,4 Kbps. Valores positivos representam um ganho de capacidade de bateria para o nó sensor e valores negativos representam uma redução na capacidade da bateria. Para esse modelo de rádio em particular é observado um ganho na capacidade da bateria (veja $E(GDE)$) para todas as três suposições quando utilizado um $IR = 64$ ms. Para efeito de comparação os resultados para os Intervalos de Recuperação de 8, 16 e 32 ms são apresentados no Apêndice B.

Tabela 3.3: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (38,4 Kbps/FSK).

Suposição	PD	$E(IR_4)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	163,6447	-3,3736	-64,2753	-67,6489	95,9958
	2	163,6447	-3,3736	-32,9289	-36,3025	127,3422
2	1	109,7953	54,1369	-6,7890	47,3479	157,1432
	2	109,7953	54,1369	-3,3890	50,7479	160,5432
3	1	140,0290	22,0725	-32,2230	-10,1505	129,8786
	2	140,0290	22,0725	-16,4578	5,6147	145,6437

Nas Tabela 3.4 e 3.5 são apresentados o resultados para o rádio TR1000 considerando uma taxa de transferência de 19,2 Kbps. Em virtude deste modelo de rádio permitir o uso de duas modulações (i.e., OOK e ASK) ambas foram simuladas. Existe uma pequena diferença entre os resultados apresentados pelas duas modulações, mas observa-se que em todas existe recuperação de energia quando utiliza-se um Intervalo de Recuperação de 64 ms. O resultados para os demais valores de IR (i.e., 8, 16 e 32 ms) são apresentados no Apêndice A.

Tabela 3.4: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (19,2 Kbps/OOK).

Suposição	PD	$E(IR_4)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	78,2440	3,3343	-4,4177	-1,0834	77,1606
	2	78,2440	3,3343	-2,8177	0,5166	78,7606
2	1	77,3313	4,2601	-3,4918	0,7683	78,0996
	2	77,3313	4,2601	-1,9913	2,2688	79,6001
3	1	78,9279	2,6570	-2,8146	-0,1576	78,7703
	2	78,9279	2,6570	-1,7241	0,9329	79,8608

Tabela 3.5: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (115,2 Kbps/ASK).

Suposição	PD	$E(IR_4)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	78,2440	3,3343	-4,4177	-1,0834	77,1606
	2	78,2440	3,3343	-2,9025	0,4318	78,6758
2	1	77,3313	4,2601	-3,4918	0,7683	78,0996
	2	77,3313	4,2601	-2,0513	2,2088	79,5401
3	1	78,6127	2,6570	-1,7760	0,1576	78,7703
	2	78,9279	2,6570	-1,5772	0,8810	79,8089

3.3 Técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado

A técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado dos nós sensores (GDE-DE) baseia-se no desligamento parcial do nó sensor (i.e., coloca o sensor em repouso) a partir do nível de carga da bateria que alimenta o nó. A medida que a capacidade da bateria diminui, atingindo o nível previamente definido, o modo de operação do nó sensor sofre modificações. Tais modificações baseiam-se no desligamento parcial do subsistema de comunicação. O motivo de colocar apenas o subsistema de comunicação em repouso é em virtude do consumo deste. Segundo vários trabalhos [20,23–25] e conforme informações do próprio fabricante [16] dos nós sensores da família *Mica Motes* (i.e., nó sensor utilizado nas simulações desta Seção) o subsistema que exige maior corrente da bateria é o subsistema de comunicação.

O objetivo de colocar o subsistema de comunicação em repouso é reduzir a corrente solicitada da bateria e com isso obter recuperação da capacidade da mesma (i.e., *efeito de recuperação*, veja Seção 2.4.1). Para os modelos de rádio considerados neste trabalho, o modo de operação que mais demanda corrente elétrica é o modo de Transmissão (Tx), conforme pode-se observar na Tabela 3.2.

Na Figura 3.2 são mostrados os ganhos de energia obtidos quando o Intervalo de Recuperação (IR) é realizado após uma transmissão ou após uma recepção (Rx). O maior ganho é obtido quando o IR ocorre após uma transmissão (i.e., 99,84 mA-ms). Portanto, o desligamento parcial do subsistema de comunicação deve ser realizado sempre após uma transmissão. Desta forma, o *efeito de recuperação* torna-se realmente efetivo.

3.3.1 Modelo RPHD da Técnica GDE-DE

A técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado dos nós sensores (GDE-DE) foi modelada utilizando o formalismo das Redes de Petri Híbrida Diferencial (RPHD) [29]. A utilização desse formalismo possibilita investigar o comportamento dos sistemas modelados de forma automática, incluindo simulação.

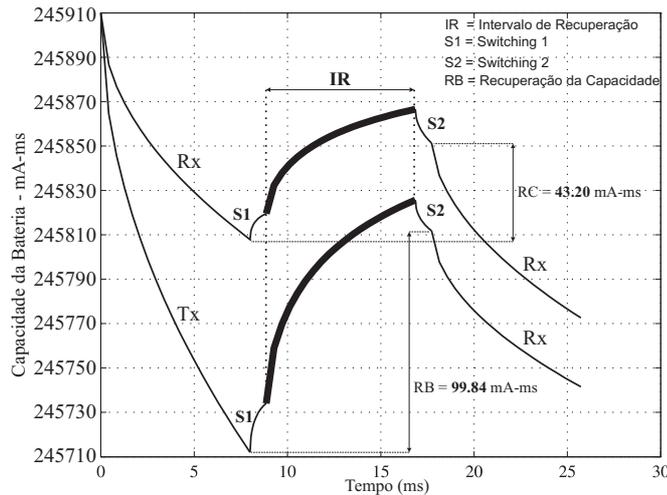


Figura 3.2: Intervalo de Recuperação realizado após um Tx ou Rx.

A técnica GDE-DE [19] é baseada no desligamento do rádio do nó sensor quando o valor da capacidade da bateria atinge um limite pré-definido. Para esse experimento foi utilizado um valor menor ou igual a capacidade máxima da bateria que alimenta o nó sensor (i.e., 245910) conforme pode-se observar na Figura 3.3. Cabe ressaltar que esse valor pode ser alterado pela aplicação, inclusive sendo possível definir diferentes níveis de valores para ativar diferentes ações, mais detalhes sobre essas configurações serão apresentadas na Seção 3.4.

Na Figura 3.3 é apresentado o modelo RPHD para a técnica GDE-DE. O desligamento parcial do nó sensor é representado pelo lugar P_{14} . Esse desligamento é iniciado a partir da capacidade de bateria do nó sensor, representada pelo lugar P_{16} (é assumido que apenas a unidade de comunicação (i.e., rádio) é colocada em modo de repouso). Todos os parâmetros de simulação (veja Tabela 3.6) são obtidos da especificação dos sensores da família Mica Motes [16].

Tabela 3.6: Parâmetros do Nó Sensor

Subsistema	Especificação
Computacional	Modo Ativo = 8 mA, Modo Inativo = 15 μ A
Comunicação	Tx = 27 mA, Rx = 10 mA, Repouso (sleep) = 1 μ A
Fonte de Energia	2 Baterias Alcalinas (C=245910 mA·ms, V_{oc} =1,5V, V_{co} =0,8V)

A integração entre as dinâmicas a eventos discretos e a dinâmica contínua é capturada pelo modelo RPHD (veja a Figura 3.3) da seguinte forma. Cada estado da dinâmica a eventos discretos define a respectiva dinâmica contínua que deve evoluir enquanto o sistema estiver naquele estado. A evolução contínua dá-se através da habilitação das

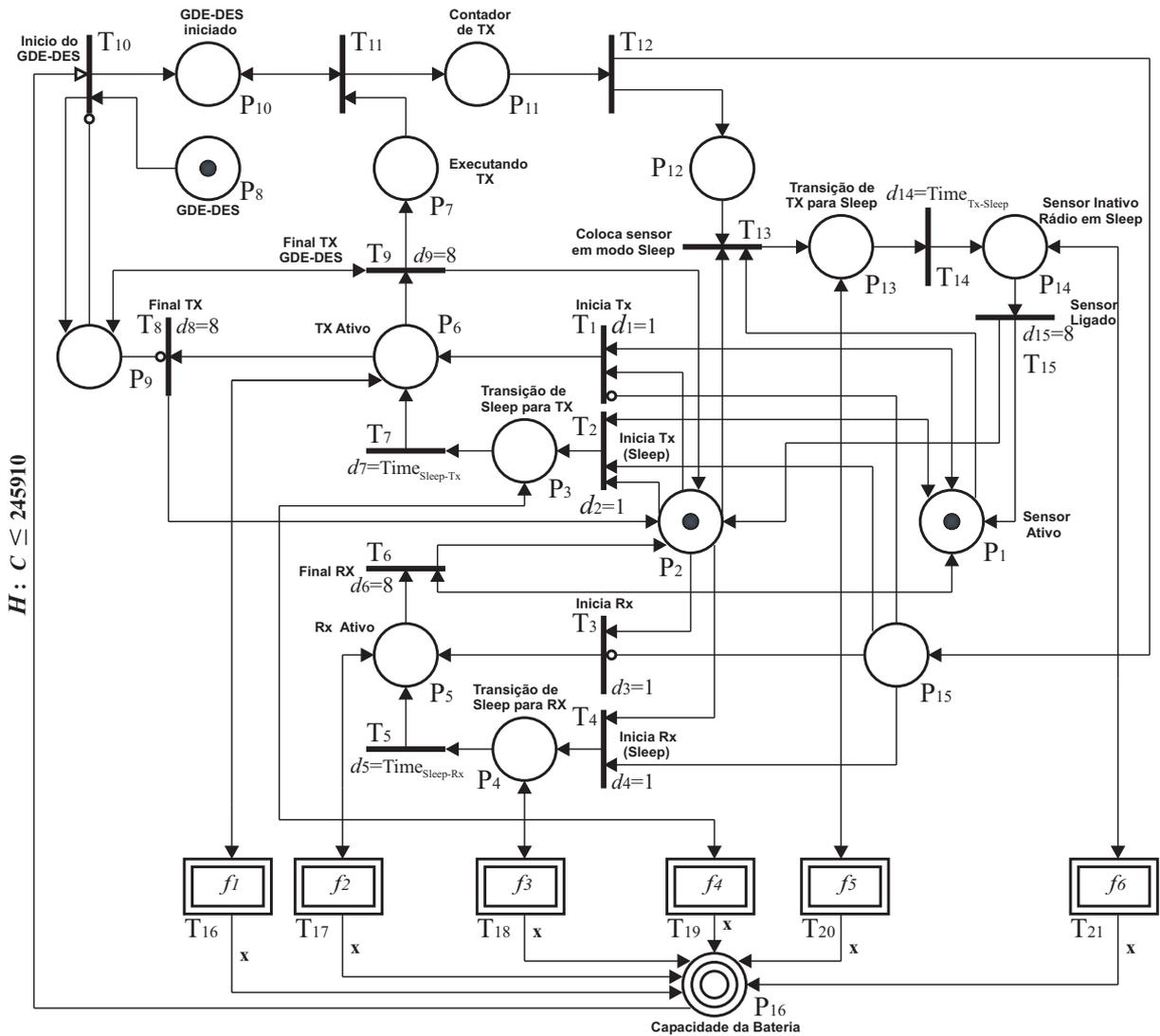


Figura 3.3: Modelo RPHD da Técnica GDE-DE aplicada em um nó sensor.

transições diferenciais que ativa a respectiva função f_j (Veja Tabela 3.7). Cada uma das funções f_j ($j = 1 \dots 6$), quando ativada executa a seguinte ação:

1. insere um valor de corrente I_i e um intervalo de tempo Δt_i nos respectivos conjuntos S_i e S_t ;
2. ativa a execução do algoritmo iterativo de cálculo do tempo de vida da bateria (veja a Seção 2.4.1) para o novo perfil de descarga. Portanto, com a evolução da dinâmica a eventos discreto, o perfil de descarga é atualizado e a capacidade restante da bateria é calculada.

Por exemplo, na Figura 3.3 o modelo RPHD possui a marcação inicial $M_0(t) = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 245910]^T$, indicando que o sensor e o rádio estão ativos. O disparo da transição T_{10} resulta na marcação $M_1(t) = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 245910]^T$, esta marcação representa o estado em que o nó sensor opera no modo GDE-DE (uma ficha é colocada

Tabela 3.7: Transições diferenciais com suas respectivas funções e cálculos de descarga

Transição	Função	Cálculo da Descarga
T_{16}	f_1	Transmissão (Tx)
T_{17}	f_2	Recepção (Rx)
T_{18}	f_3	Transição (Sleep \rightarrow Rx)
T_{19}	f_4	Transição (Sleep \rightarrow Tx)
T_{20}	f_5	Transição (Tx \rightarrow Sleep)
T_{21}	f_6	Repouso (Sleep)

no lugar P_9 e no lugar P_{10} ; e $H : C \leq 245910$ é verdadeiro). Dentre as várias seqüências possíveis de eventos que podem ser geradas a partir da marcação $M_1(t)$ foi considerada a seqüência apresentada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Evolução da Marcação para o modelo apresentado na Figura 3.3

Transição Disparada	Marcação Final
T_1	$M_2(t)=[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 245910,00]^T$
T_{16}	$M_3(t)=[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 245712,01]^T$
T_9	$M_4(t)=[1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 245712,01]^T$
T_{11}	$M_5(t)=[1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 245712,01]^T$
T_{12}	$M_6(t)=[1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 245712,01]^T$
T_{13}	$M_7(t)=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 245712,01]^T$
T_{20}	$M_8(t)=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 245734,08]^T$
T_{14}	$M_9(t)=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 245734,08]^T$
T_{21}	$M_{10}(t)=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 245825,66]^T$
T_{15}	$M_{11}(t)=[1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 245825,66]^T$

A seqüência de eventos listadas na Tabela 3.8 resulta na transição do nó sensor para o estado inativo (i.e., uma ficha no lugar P_{14}) na seqüência ocorre o disparo da transição diferencial T_{21} que é responsável pelo cálculo do valor da capacidade da bateria, enquanto o nó permanecer no estado de repouso (i.e., sleep). O nó sensor permanece no modo de repouso por 8 ms (i.e., $d_{15} = 8$). Na seqüência, o disparo da transição T_{15} coloca o nó sensor em modo ativo. Note que a transição diferencial T_{20} é responsável por calcular o SE entre os modos de operação Tx e $Sleep$.

3.3.2 Análise de desempenho da técnica GDE-DE

Os resultados apresentados nesta Seção foram obtidos através de simulações utilizando o CPNTools [98] integrado com o Matlab [99]. Os parâmetros de simulação do nó sensor

utilizado nas simulações são apresentados na Tabela 3.6. O rádio utilizado neste experimento é o CC1000 [96]. Este rádio equipa os nós sensores *Mica Motes* [16] e possui uma taxa de transferência de dados de 38,4 *kbps*. O tamanho do pacote de dados foi definido em 40 *Bytes* o que significa que o tempo de transmissão de um pacote de dados tem duração de aproximadamente 8 *ms*.

Para definir o tempo de duração de cada modo GDE foram utilizados quatro Intervalos de Recuperação (IR). Na Tabela 3.9 são apresentados os valores para esses intervalos, a capacidade recuperada (i.e., $E(IR_k)$) para cada IR, a capacidade recuperada (valores positivos) ou gasta (valores negativos) durante a primeira e a segunda transição entre modos de operação (i.e., $SE(S1)$ e $SE(S2)$, respectivamente), e o total da capacidade recuperada ou gasta durante todo o processo de transição entre modos (i.e., $E(GDE)$). A coluna $\Delta\%(E(GDE))$ representa a variação em termos percentuais entre o ganho de IR_{k-1} e IR_k .

A Tabela 3.9 apresenta os ganhos somente para quatro Intervalos de Recuperação até o limite de 64 *ms*. A partir desse valor, os ganhos começam a diminuir a medida que multiplica-se por dois o IR. Não apresentando mais um ganho significativo que justifique o tempo de indisponibilidade do nó sensor (i.e., enquanto o rádio estiver em modo de repouso o nó sensor não pode comunicar-se com os demais nós). Os resultados para os demais intervalos de recuperação até o limite de 8192 *ms* são apresentados no Apêndice B.

Tabela 3.9: Energia recuperada/gasta (em mA-ms) para os intervalos de recuperação.

k	IR_k (ms)	$SE(S1)$	$E(IR_k)$	$SE(S2)$	$E(GDE)$	$\Delta\%(E(GDE))$
1	8	22,0725	91,5731	-13,7975	99,8481	—
2	16	22,0725	110,4824	-15,3337	117,2212	17,40
3	32	22,0725	126,9050	-16,1131	132,8644	13,34
4	64	22,0725	140,0290	-16,4578	145,6437	9,62

Para mostrar a técnica de GDE-DE em funcionamento, foi adotado um cenário de descarga da bateria onde foram consideradas apenas transmissões. Essa estratégia foi adotada com o objetivo de acelerar a descarga total da bateria. Isso ocorre pois a transmissão é o modo de operação que exige o maior valor de descarga (i.e., maior corrente), possibilitando esgotar a capacidade da bateria em um tempo menor quando comparado aos outros modos de operação do nó sensor.

A metodologia adotada foi de realizar tantas transmissões quanto fossem necessárias até esgotar a capacidade da bateria (i.e., capacidade igual a zero). Ao mesmo tempo é armazenado o número de transmissões realizadas com e sem a adoção da técnica GDE-DE. Na Figura 3.4 são apresentados os resultados para as simulações. Os resultados mostram que, com a adoção da técnica de GDE-DE, é possível realizar um número maior

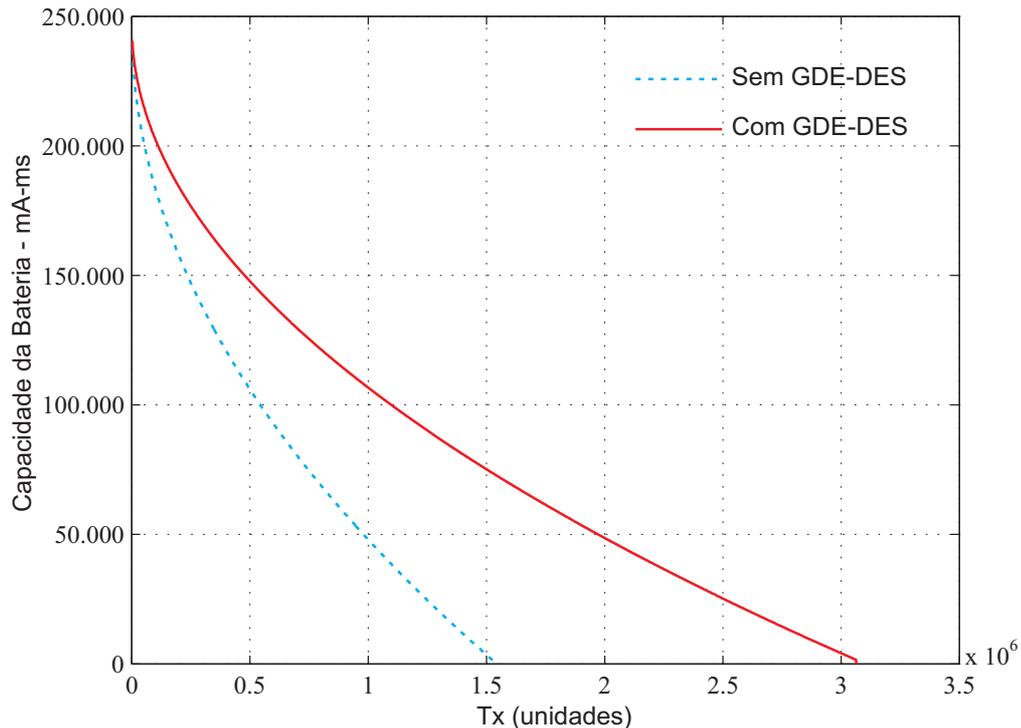


Figura 3.4: Número de transmissões realizadas com e sem a aplicação da técnica GDE-DE.

de transmissões quando comparado com a não adoção da técnica. Mesmo aplicando a técnica GDE-DE com Intervalo de Recuperação reduzido (i.e., 8 ms) é possível duplicar o tempo de vida da bateria do nó sensor conforme observa-se na Figura 3.4.

3.3.3 Análise experimental da técnica de GDE-DE

Para avaliar o desempenho da técnica de GDE-DE em uma plataforma real de sensoria-mento foi utilizado um sistema de monitoramento desenvolvido por Salvadori et al [2]. O sistema proposto (veja Figura 3.5) é formado por três subsistemas:

1. *Subsistema de Aquisição de Dados* que é formado pelos dispositivos responsáveis pela aquisição e pré-processamento dos dados coletados. Este subsistema é composto por dois dispositivos (veja Figura 3.5). O primeiro deles é a Unidade Remota de Aquisição de Dados (URAD) e o segundo dispositivo é o Módulo Sensor Inteligente (MSInt);
2. *Subsistema Controlador Supervisório* é formado apenas por um computador que é responsável pelo controle do sistema. Neste subsistema encontram-se todas as rotinas de manipulação e apresentação dos dados coletados;
3. *Subsistema Servidor Remoto* é formado por um ou mais computadores embarcados baseados na arquitetura *PC-104* [100] que possuem um arquitetura robusta especialmente desenvolvida para suportar condições severas. Este subsistema realiza o

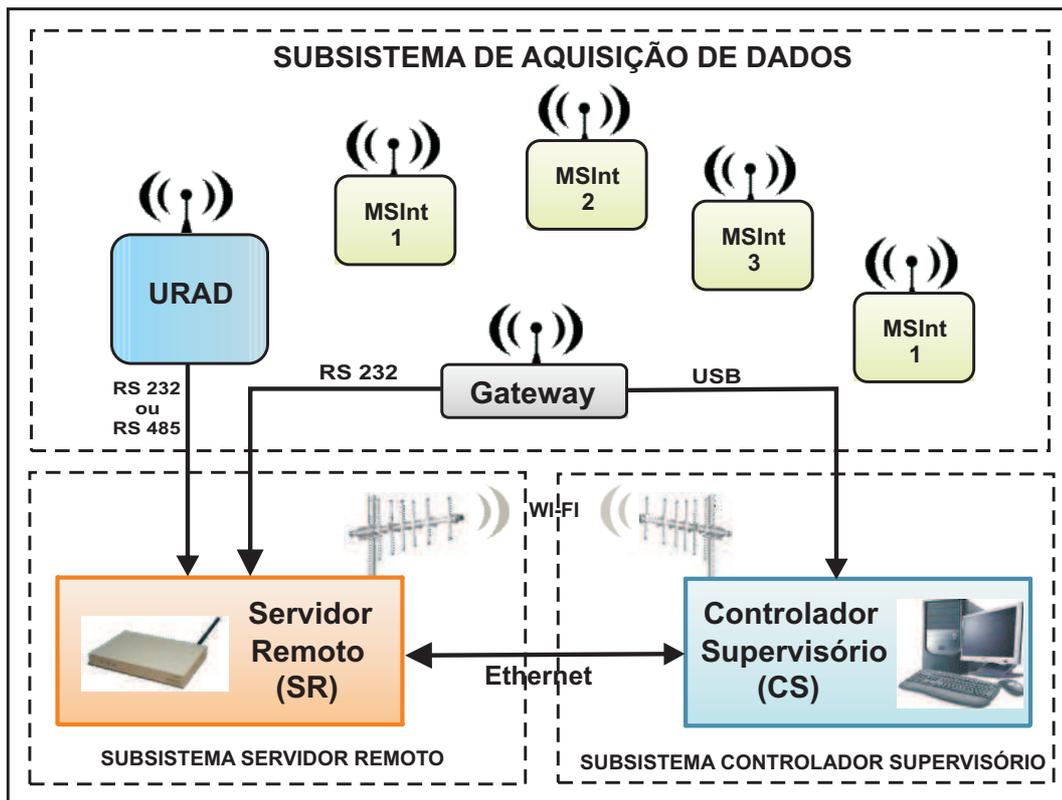


Figura 3.5: Sistema de Monitoramento [2]

pré-processamento dos dados coletados e sua transmissão para o Controlador Supervisório.

Para a definição da plataforma de avaliação da técnica de GDE-DE foi utilizado apenas o *Subsistema de Aquisição de Dados*, mais precisamente o módulo MSInt (veja Figura 3.6). A técnica de GDE-DE foi implementada no módulo MSInt que possui as características semelhantes ao nó sensor *Mica Motes*. Relembrando, o nó sensor *Mica Motes* serviu de base para as simulações da técnica GDE-DE quando utilizado o modelo RPHD do nó sensor (ver Seção 3.3).

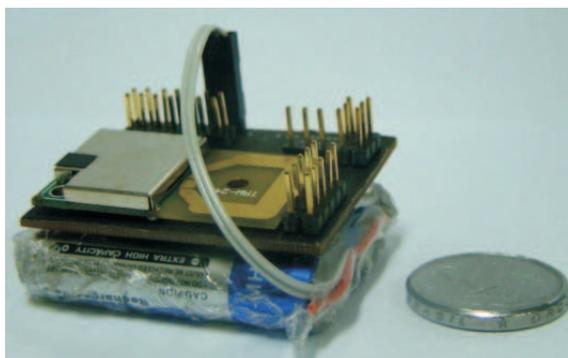


Figura 3.6: Módulo Sensor Inteligente (MSInt).

Módulo Sensor Inteligente (MSInt)

Geralmente o termo sensor inteligente é aplicado a um dispositivo que contém um ou mais sensores com capacidade de processar dados e transmiti-los. O MSInt (veja Figura 3.6) é composto de um subsistema principal, um subsistema de sensoriamento, um subsistema de comunicação e um subsistema de fonte de energia.

O subsistema principal é composto por um microcontrolador (i.e., PIC18F4520) que é responsável pelo gerenciamento de todos os demais subsistemas do MSInt. O subsistema de sensoriamento é composto por um sensor de temperatura (i.e., LM35) com interface SOIC (i.e., *Small-Outline Integrated Circuit*) de 8 pinos, outros tipos de sensores podem ser adicionados ao MSInt por meio desta interface. O subsistema de comunicação é formado pelo *transceiver* nRF2401A que é responsável pela comunicação sem fio do dispositivo. E finalmente o subsistema de fonte de energia é composto por duas pilhas do tipo AAA. Uma análise criteriosa da escolha dos componentes que formam o MSInt é apresentada por Salvadori et al [2].

Resultados Experimentais da Aplicação da técnica GDE-DE nos MSInt

Para avaliar o impacto da técnica de GDE-DE no tempo de vida médio de um dispositivo MSInt foi construída uma plataforma de avaliação (i.e., *testbed*) apresentada na Figura 3.7. Esta plataforma é composta de dois módulos MSInt, denominados MSInt-Tx e MSInt-Rx. O módulo MSInt-Tx é um modulo alimentado por bateria externa (i.e., duas pilhas comuns do tipo AAA) sendo o responsável por realizar a transmissão dos pacotes (i.e., Tx), já o módulo MSInt-Rx realiza a operação de recebimento dos pacotes (i.e., Rx). O módulo MSInt-RX possui alimentação fornecida por uma fonte externa conforme pode-se observar na Figura 3.7.

Tabela 3.10: Corrente e tempos de transição dos modos do rádio nRF2401A™

Taxa de Transmissão	Tx→Sleep	Sleep→Tx	Sleep	Tx	Fonte
1 Mbps	200 μS	195 μS	32 μA	10,5 mA	Datasheet
1 Mbps	210 μS	125 μS	38 μA	29,2 mA	Test-bed

A metodologia adotada na avaliação da técnica de GDE-DE segue os mesmos parâmetros utilizados nas simulações apresentadas nas Seções 3.3.2. Ou seja, é definido um cenário com dois MSInt onde um deles (i.e., MSInt Tx) apenas realiza transmissões para o outro MSInt (i.e., MSInt Rx). Foram executadas 10 experimentos, em cada uma delas foi anotado o número de transmissões realizadas em cada experimento até que o MSInt tivesse sua bateria completamente descarregada. Os parâmetros utilizados nos experimentos são apresentados na Tabela 3.11.

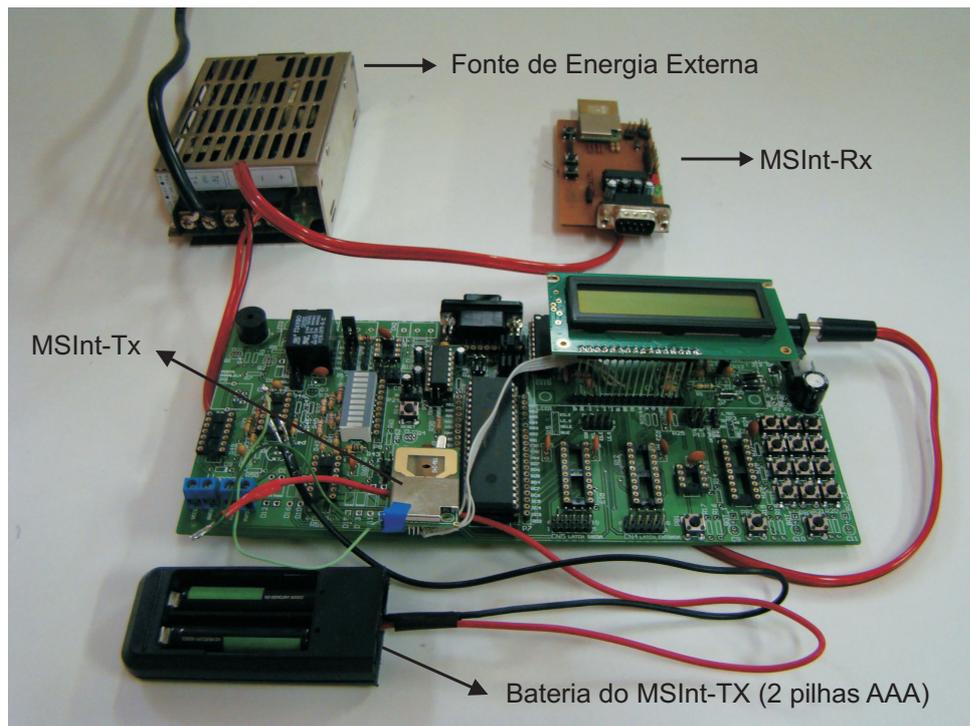


Figura 3.7: Plataforma de avaliação.

Tabela 3.11: Especificações da Plataforma Experimental.

Parâmetros	Descrição
Número de Nós Sensores	2
Alcance do Rádio	Até 250 m
Tempo de Simulação	Até a bateria ser completamente descarregada
Número de experimentos	10
Consumo do rádio	Tx=29.2mA, Sleep=38 μ A

Com o objetivo de reduzir o tempo dos experimentos foi adotado um Intervalo de Recuperação (IR) de 2 *ms* que é compatível com o tempo de transição entre os modos de operação do rádio utilizado pelo módulo MSInt que são apresentados na Tabela 3.10. Nesta tabela são apresentados dois valores de corrente e de tempo de transição, os valores apresentados na primeira linha da Tabela 3.10 referem-se aos valores fornecidos pelo fabricante (i.e., *datasheet*), já na segunda linha são apresentados os valores obtidos através de medições na plataforma de avaliação.

Com um IR de apenas 2 *ms* mesmo aplicações sensíveis ao atraso na transmissão de pacotes podem fazer uso da técnica de GDE-DE e conseqüentemente estender o tempo de vida da bateria. O ganho em termos de capacidade de bateria para o experimento realizado neste trabalho possibilitou um incremento no número total de pacotes transmitidos na ordem de 50% conforme pode-se observar na Tabela 3.12. Esse ganho é obtido em

Tabela 3.12: Resultados da aplicação da técnica GDE-DE na plataforma MSInt.

Sem GDE-DE		Com GDE-DE	GDE-DE Ganho	
N.	Número Total de Tx	Número Total de Tx	Diferença (Tx)	Ganho (%)
1	94.250.586	128.521.041	34.270.455	36,36
2	81.828.572	128.829.575	47.001.003	57,44
3	86.080.508	158.313.815	72.233.307	83,91
4	92.643.125	128.829.264	36.186.139	39,06
5	80.900.283	138.218.252	57.317.969	70,85
6	85.818.064	125.827.543	40.009.479	46,62
7	85.207.949	125.830.832	40.622.883	47,67
8	82.507.068	135.782.970	53.275.902	64,57
9	78.814.007	111.601.677	32.787.670	41,60
10	84.029.330	132.021.327	47.991.997	57,11
I.C	85.207.994±3.518.223	131.377.630±8.483.601	46.169.680±4.965.378	54,18±10,91

decorrência do efeito de relaxação da bateria ocorrido durante os períodos em que o nó é colocado em modo de repouso durante os IR. Obviamente se for adotado um IR maior o ganho obtido será maior, de forma proporcional ao tempo de repouso do nó sensor. Os valores apresentados na Tabela 3.12 foram obtidos a partir da execução de 10 experimentos. Considerando o Intervalo de Confiança (IC) de 95% para o valor médio no número total de pacotes transmitidos.

3.4 Técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia Baseada na Capacidade da Bateria

A técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia Baseada na Capacidade da Bateria (GDE-BB) [18] é uma evolução da técnica de GDE-DE. A técnica GDE-BB consiste em realizar os desligamentos de forma escalonada a partir de vários níveis de capacidade da bateria e periodicidade de transmissões realizadas. Inicialmente a técnica de GDE-DE contemplava apenas um nível de capacidade e realizava o desligamento parcial do nó sensor após cada transmissão. Neste trabalho são adotadas três periodicidades distintas de desligamento parcial do nó sensor existindo desta forma três modos diferentes de GDE-BB. Cada um destes modos é ativado a partir de diferentes níveis de capacidade da bateria.

Para modelar a técnica de GDE-BB foi utilizado o formalismo das RPHD. Diferentemente da metodologia adotada na modelagem da técnica GDE-DE, optou-se por separar o modelo da técnica do modelo do nó sensor durante a modelagem, realizando sua união a partir de lugares de fusão para posterior simulação. A seguir serão apresentadas ambos

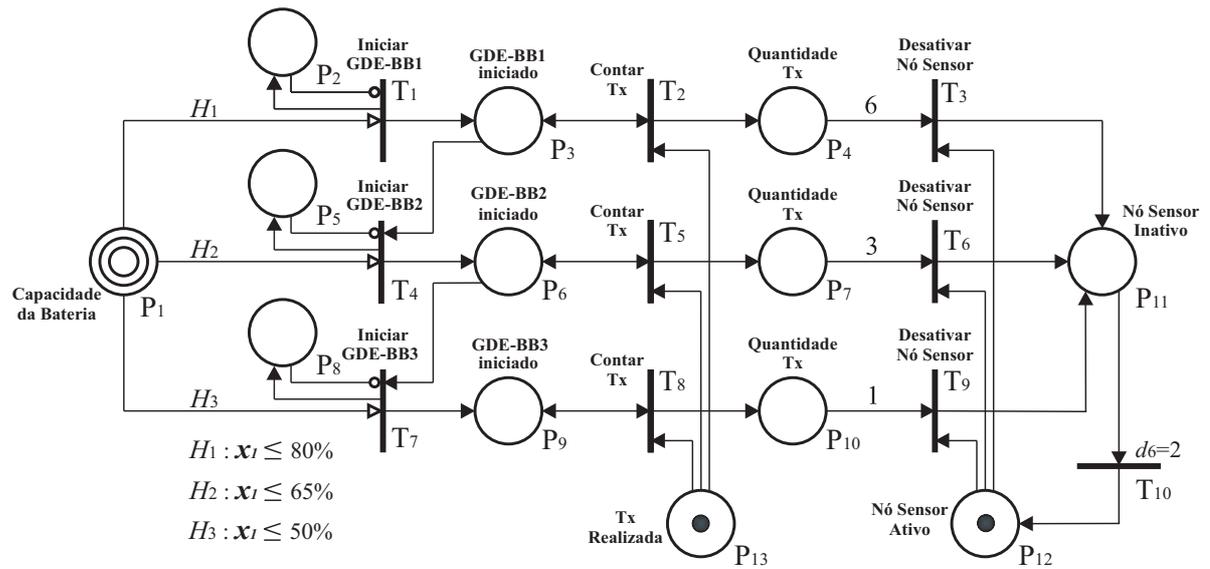


Figura 3.8: Modelo RPHD para a Técnica de GDE-BB.

modelos.

3.4.1 Modelo RPHD da técnica GDE-BB

Na Figura 3.8 é apresentado o modelo RPHD para a técnica de GDE-BB. O desligamento parcial do nó sensor é representado no modelo pelo lugar P_{11} . Esse desligamento é iniciado a partir da informação da capacidade da bateria do nó sensor, representada pelo lugar P_1 . Dependendo da capacidade da bateria é adotado um dos três modos de GDE-BB apresentados na Tabela 3.13. A habilitação de cada um desses modos é representada no modelo pelos lugares P_3, P_6 e P_9 . Os modos GDE-BB diferenciam-se pela quantidade de transmissões (P_4, P_7 ou P_{10}) que devem ser realizadas (P_{13}) antes de um desligamento. O desligamento do nó sensor é realizado de forma parcial, mais especificamente, apenas o subsistema de comunicação (i.e., rádio) é colocado em repouso.

Tabela 3.13: Modos de GDE-BB.

Modos	Especificação	Frequência
GDE-BB1	Ativo quando a capacidade da bateria $\leq 80\%$	Após 6 transmissões
GDE-BB2	Ativo quando a capacidade da bateria $\leq 65\%$	Após 3 transmissões
GDE-BB3	Ativo quando a capacidade da bateria $\leq 50\%$	Após 1 transmissão

Outros modos de GDE podem ser adicionados a técnica GDE-BB. Além disso, o modelo RPHD para a técnica GDE-BB pode ser integrado ao modelo que descreve os modos de operação de um nó sensor. Essa integração é apresentada na próxima Seção.

3.4.2 Modelo RPHD do nó sensor para a técnica GDE-BB

Nesta Seção é apresentado o modelo RPHD para um nó sensor que utiliza a técnica GDE-BB. O modelo RPHD para o nó sensor baseia-se em um cenário onde o nó periodicamente coleta dados do ambiente e transmite-os para um receptor. As condições de operação admitidas para o modelo são as seguintes:

- O subsistema computacional possui dois estados de operação, **Ativo** e o **Inativo**;
- O subsistema de comunicação (i.e., rádio) é colocado em repouso durante a execução de qualquer modo de GDE-BB.

Como mencionado na Seção 3.3 os parâmetros adotados para o nó sensor, modelado neste trabalho, baseiam-se na especificação *Berkeley Mote* na sua versão comercial produzida e comercializada pela *Crossbow Technology* [16]. As quais são listadas na Tabela 3.6.

O modelo RPHD para o nó sensor é mostrado na Figura 3.9. Esse modelo é resultado da integração, através de *lugares de fusão*, entre o modelo básico de um nó sensor e o modelo mostrado na Figura 3.8 que define os modos de operação do protocolo GDE-BB.

A integração entre a dinâmica a eventos discreto e a dinâmica contínua é capturada pelo modelo RPHD (veja Figura 3.9) da seguinte forma. Cada estado da dinâmica a eventos discretos define a respectiva dinâmica contínua que deve evoluir enquanto o sistema estiver naquele estado. A evolução contínua dá-se através da habilitação das transições diferenciais que ativa a respectiva função f_j (Veja Tabela 3.14). Cada função f_j ($j = 1 \dots 6$), quando ativada executa o seguinte: (i) insere um valor de corrente I_i e um intervalo de tempo Δt_i nos respectivos conjuntos S_i e S_t ; (ii) ativa a execução do algoritmo iterativo de cálculo do tempo de vida da bateria (veja a Seção 2.4.1) para o novo perfil de descarga. Portanto, com a evolução da dinâmica a eventos discreto, o perfil de descarga é atualizado e a capacidade restante da bateria é calculada.

Tabela 3.14: Transições diferenciais com suas respectivas funções e cálculos de descarga

Transição	Função	Cálculo da Descarga
T_{22}	f_1	Transmissão (Tx)
T_{23}	f_2	Recepção (Rx)
T_{24}	f_3	Transição (<i>Sleep</i> → Rx)
T_{25}	f_4	Transição (<i>Sleep</i> → Tx)
T_{26}	f_5	Transição (Tx → <i>Sleep</i>)
T_{27}	f_6	Repouso (<i>Sleep</i>)

Por exemplo, o modelo apresentado na Figura 3.9 possui marcação inicial $M_0(t) = [1100000000000000000000000245910]^T$, indicando que o sensor e o subsistema de comu-

nicação (i.e., rádio) estão ativos. A partir da marcação $M_0(t)$, por exemplo, é executado a seqüência de eventos T_1T_{22} ativando a função f_1 . Os conjuntos S_I e S_t obtidos neste caso são: $S_I = \{27\}$ mA e $S_t = \{8\}$ ms, ou seja, da fonte de energia está sendo consumida uma corrente de 27 mA (veja Tabela 3.6) durante um intervalo de tempo de 8 ms.

Na fase inicial de funcionamento do nó sensor, considerando que a bateria está com sua capacidade máxima, o nó sensor pode trabalhar com todos os seus subsistemas ativos sem nenhuma restrição de operação, ou seja, sem emprego de nenhum modo de GDE-BB. Entretanto, quando a capacidade da bateria atinge um valor menor ou igual 80% ($H_{P_{21},T_{13}} : 65\% < x_1 \leq 80\%$ é verdadeiro), a transição T_{13} é habilitada e o seu disparo coloca uma ficha no lugar P_{10} habilitando o modo GDE-BB1. Esse mesmo procedimento repete-se quando a capacidade da bateria atinge 65% e 50% habilitando as transições T_{16} e T_{19} , respectivamente.

3.4.3 Análise de desempenho da técnica de GDE-BB

Para demonstrar a utilização da técnica GDE-BB proposta, foi admitida a seguinte marcação $M(t)=[1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 196503]^T$ para o modelo RPHD mostrado na Figura 3.9. Essa marcação representa o estado em que o nó sensor opera no modo GDE-BB1 e 5 transmissões já foram realizadas (i.e., $m_D(P_{11})(t) = 5$). Dentre as várias seqüências de eventos que podem ser geradas a partir da marcação M , foi considerada a seguinte: $T_1T_{22}T_9T_{14}T_{15}T_{10}T_{26}T_{11}T_{27}T_{12}T_4T_{24}T_5T_{23}T_6$.

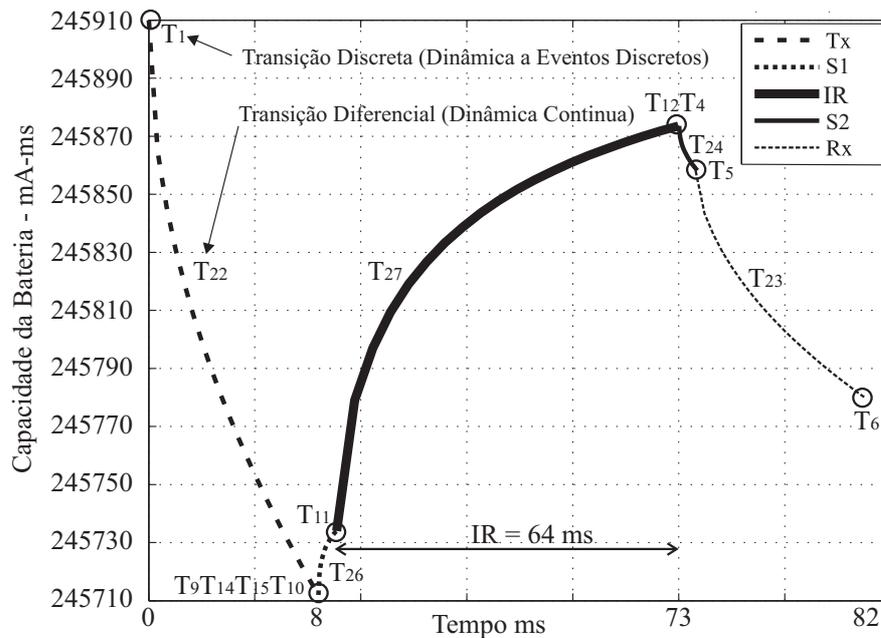


Figura 3.10: Consumo de energia e recuperação em relação ao GDE-BB1.

Esta seqüência de eventos resulta na mudança do modo de operação do nó sensor para

Tabela 3.15: Número de transmissões (Tx) com e sem adoção do GDE-BB.

Modo	Número Total de Transmissões(Tx)	Ganho (%)
Sem GDE-BB (Ref.)	1.542.700	—
GDE-BB (IR = 8 ms)	2.796.400	81,27
GDE-BB (IR = 16 ms)	4.039.000	161,81
GDE-BB (IR = 32 ms)	6.514.700	322,29
GDE-BB (IR = 64 ms)	10.640.300	589,72

o modo inativo e na habilitação da transição diferencial T_{27} . Esta transição é responsável pelo cálculo da capacidade da bateria enquanto o nó sensor permanecer em repouso. O sistema permanece nesse estado por 64 ms. A seguir, com o disparo de T_{12} o nó sensor é reativado. Na Figura 3.10 são apresentados os valores do consumo e da taxa de recuperação da bateria em relação a aplicação da técnica de GDE1 a partir da marcação $M(t)$.

Para mostrar a técnica GDE-BB em funcionamento, foi adotado o mesmo cenário e a metodologia utilizada nas simulações da técnica de GDE-DE apresentada na Seção 3.3.2. Na Figura 3.11 e na Tabela 3.15 são apresentados os resultados das simulações. Os resultados mostram que, com a adoção do GDE-BB, é possível realizar um número maior de transmissões quando comparado com a não adoção da técnica. Nota-se também que a medida que o Intervalo de Recuperação (IR) é incrementado existe um aumento significativo na recuperação de energia que repercute no aumento de transmissões extras. Na

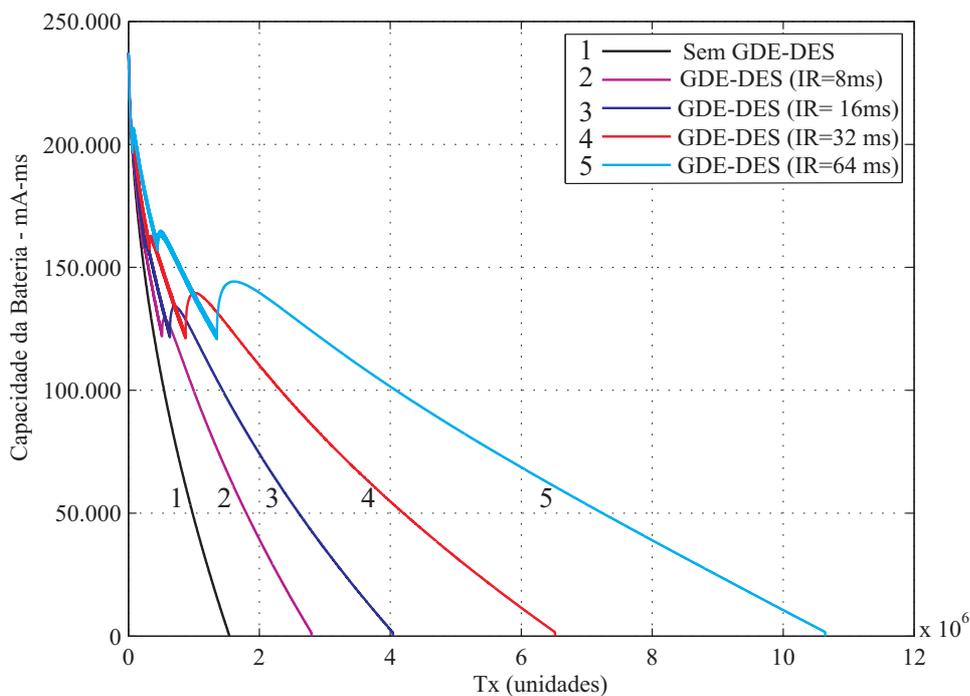


Figura 3.11: Transmissões realizadas com e sem adoção do GDE-BB.

Tabela 3.15 é apresentado, com mais detalhes, o número de transmissões extras possíveis utilizando o protocolo GDE-BB com diferentes valores para o IR.

Mesmo aplicando a técnica GDE-BB com Intervalo de Recuperação pequeno (i.e., 8 ms) é possível quase duplicar o tempo de vida da bateria do nó sensor. Este ganho pode multiplicar-se até 5,9 vezes quando é utilizado um IR de 64 ms.

Capítulo 4

Controle de Topologia com Múltipla Dominação e Dominação em Distância

O $(k, r) - CDS$ é um mecanismo original de controle de topologia que utiliza a múltipla dominação e dominação em distância para computar o *backbone* de uma RSSF. O parâmetro k define a redundância de membros no *backbone* e o parâmetro r define a distância máxima (em saltos) de qualquer nó sensor a um membro do *backbone*. O mecanismo $(k, r) - CDS$, pode ser aplicado na elaboração de novos protocolos de roteamento, controle de acesso ao meio (*Media Access Control* - MAC) e de controle de topologias para as RSSF. Possibilitando, em muitos casos, a redução significativa no consumo de energia e no atraso médio dos pacotes transmitidos na rede.

4.1 Construção de *backbones* em RSSF

Um desafio no ambiente das RSSF consiste em selecionar um conjunto reduzido de nós que constituem um *backbone* da rede para dar suporte a, por exemplo, o roteamento de pacotes. Um *backbone* é uma infraestrutura formada por um sub-conjunto de nós da rede que é capaz de transmitir e processar dados em alta velocidade. A possibilidade de desligamento parcial ou total dos nós que não façam parte do *backbone* é a principal motivação para a construção destas estruturas nas RSSF. Como resultado imediato desta aplicação, tem-se a redução do consumo de energia e o prolongamento do tempo de vida da rede.

A utilização de *backbones* também pode acarretar na redução do retardo médio da comunicação entre sensores e sorvedouros. O compartilhamento do mesmo canal de comunicação por muitos nós reduz a capacidade da rede (i.e., o número de colisões aumenta com

o número de nós competindo pelo meio). Reduzindo o número de nós ativos, economiza-se energia e obtém-se um melhor desempenho da rede, influenciando diretamente na Qualidade de Serviço (QoS) que pode ser oferecida a seus clientes.

Em vários trabalhos relacionados a redes *Ad Hoc* [45–47] e, mais recentemente, resultados envolvendo especificamente RSSF [48, 49], o problema da computação de *backbones* tem sido abordado através da computação de alguma variante de *Connected Dominating Sets* (CDS). Um conjunto de nós em uma rede qualquer é considerado um *Dominating Set* (DS) caso todos os nós da rede façam parte deste conjunto, ou então sejam adjacentes (i.e., vizinhos) a pelo menos um nó do DS. Um DS é dito formar um CDS caso o DS constitua um componente conectado da rede (i.e., o DS forma um *backbone* da rede).

A computação de um CDS de cardinalidade mínima para uma rede qualquer, ou seja, o *Minimum CDS* (MCDS), é um problema NP-Completo [54] e requer conhecimento global da topologia da rede. Soluções baseadas em estratégias distribuídas [55, 56] têm sido direcionadas para aproximação do problema MCDS. No entanto, alguns resultados [57–59] demonstram que um certo nível de redundância na composição do CDS pode ser útil em termos da tolerância a falhas do *backbone*. Isto é sobretudo relevante às RSSF, onde falhas não são exceções devido a natureza dos dispositivos.

Dai e Wu [49] apresentam uma solução para computar *k-connected k-dominating set* na construção de *backbones* em redes sem fio. Este protocolo introduz um nível controlado de redundância ao *backbone*, garantindo múltiplos nós dominantes conectados por k enlaces. Desta forma, o *backbone* suporta a falha de até $k - 1$ enlaces mantendo-se conectado. A limitação desta abordagem é que assume-se um alto grau de redundância de enlaces entre os nós da rede.

Mecanismos que introduzem um certo nível de redundância na construção de *backbones* podem ser utilizados na otimização dos protocolos de roteamento para o ambiente das RSSF. Conseqüências diretas da aplicação destas estruturas às RSSF são melhores níveis de tolerância a falhas e Qualidade de Serviço. Um caso especial neste contexto é a adoção de parâmetros de distância máxima dos nós clientes ao *backbone*. Desta forma, consegue-se definir simultaneamente o grau de redundância bem como a distância máxima dos sensores ao *backbone*. Potencialmente, esta configuração permite reduzir o retardo médio dos pacotes transmitidos pelos nós sensores, refletindo no consumo de energia e introduzindo um comparativo entre retardo e consumo de energia.

Neste Capítulo é apresentada a primeira solução centralizada e distribuída para computar o $(k, r) - CDS$ para qualquer topologia conectada. O mecanismo $(k, r) - CDS$ é utilizado para criar *backbones* em RSSF com parâmetros de cobertura k e distância máxima de r saltos. A solução centralizada do $(k, r) - CDS$ fornece uma aproximação à solução ótima, uma vez que esta é NP-Completa, sendo utilizada como base de

Tabela 4.1: Terminologias e Notações

$G = (V, E)$	Grafo G , onde V é o conjunto de nós (vértices) e E é o conjunto de enlaces (arestas)
Vizinho	Nós adjacentes (i.e., um salto) a um nó qualquer u são denominados vizinhos de u
Grau	Número de vizinhos de um nó
N_r^u (<i>Vizinhança</i>)	Vizinhança de um nó u qualquer, formada por todos os nós até r saltos de u
Diâmetro	É a maior distância entre quaisquer pares de nós da rede.
id	Identificador único de um nó
CDS (<i>backbone</i>)	<i>Connected Dominating Set</i> , forma um <i>backbone</i> da rede
(k,r)-CDS	<i>Connected Dominating Set</i> com as propriedades de dominação por distância (parâmetro r) e múltipla dominação (parâmetro k)
BS	Base Station
dBS	Distância de um nó a Base Station
MB	Membros do <i>backbone</i>
MI	Mensagem de Informação contendo a dSink do nó emissor
ME	Mensagem de Eleição contém os MB de um determinado nó
MN	Mensagem de Notificação informa que o nó foi eleito como MB

comparação à solução $(k, r) - CDS$ Distribuída.

Para exemplificar a utilização do mecanismo $(k, r) - CDS$ será assumido a utilização de uma rede de sensores com comunicação através de um canal compartilhado e utilizando antenas omni-direcionais, assumindo-se o mesmo raio de transmissão (*transmission range*) para todos os nós. A topologia da rede é representada como um grafo $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de nós sensores (vértices) e E é o conjunto de enlaces (arestas). A Tabela 4.1 apresenta as principais notações e terminologias utilizadas neste Capítulo.

4.2 Mecanismo $(k, r) - CDS$ Centralizado

A solução $(k, r) - CDS$ Centralizada pressupõe o conhecimento de toda a topologia da rede. O mecanismo $(k, r) - CDS$ é uma adaptação do protocolo de CDS proposto por Guha e Khuller [101]. A heurística adotada na solução do $(k, r) - CDS$ Centralizado é baseada no método guloso (i.e., *Greedy Algorithms*), comumente utilizado em problemas de otimização que objetivam encontrar um conjunto de candidatos otimizando o valor de uma dada métrica.

O mecanismo $(k, r) - CDS$ Centralizado garante que todos os nós da rede, com exceção dos nós que formam o *backbone*, sejam cobertos por k membros do *backbone* distantes a no máximo r saltos. Assume-se que todos os nós têm um identificador (i.e., *id*) único e que possuem a visão completa da topologia da rede.

Durante a execução do mecanismo, os nós são coloridos refletindo os seus estados no

processo de seleção, podendo assumir os seguintes valores:

- Branco: todo nó inicialmente possui essa cor;
- Cinza: o nó é candidato a membro do *backbone*;
- Preto: o nó é um membro do *backbone*.

A heurística adotada para a seleção dos nós do $(k, r) - CDS$ pode ser descrita da seguinte forma:

1. Inicialmente todos os nós da rede são coloridos em Branco.
2. O nó com a maior *vizinhança* até uma distância r (i.e., $u \in V$ com valor máximo de $|N_r^u|$) é colorido em Preto. Empates são resolvidos lexicograficamente pelo *id* mais alto.
3. A seguir, todos os nós adjacentes (i.e., *vizinhos*) ao nó Preto são coloridos em Cinza.
4. Seleciona-se o nó Cinza com o maior número de *vizinhos* Brancos, colorindo-o de Preto. Empates são resolvidos através do *id* mais alto. Esse procedimento é repetido até que o item 6 seja satisfeito.
5. Na ausência de nós Brancos, utiliza-se o número de nós Cinzas (não cobertos) como critério de seleção do próximo membro do *backbone*.
6. O processo termina quando todos os nós (Brancos ou Cinzas) forem cobertos por pelo menos k membros do *backbone* (nós Pretos) a no máximo r saltos. Ou seja, quando todos os nós da rede, com exceção dos membros do *backbone*, atenderem as especificações (k, r) -CDS.

4.2.1 Exemplo de computação de um $(k, r) - CDS$ Centralizado

A Figura 4.1 apresenta a computação de um $(2, 2) - CDS$ para a topologia em questão. Os nós coloridos em Preto são membros do *backbone*. Para esta configuração, todos os nós que não fazem parte do *backbone* estão cobertos por pelo menos dois nós do *backbone* distantes a no máximo dois saltos.

Inicialmente todos os nós da rede são coloridos em Branco e tem seu *grau* contabilizado (Figura 4.1(A)). Por exemplo, o nó com *id* 3 possui a marcação $(7, -, 0)$, indicando que ele tem 7 vizinhos dentro de uma distância de dois saltos (i.e., $r = 2$) não sendo coberto inicialmente por nenhum nó Preto.

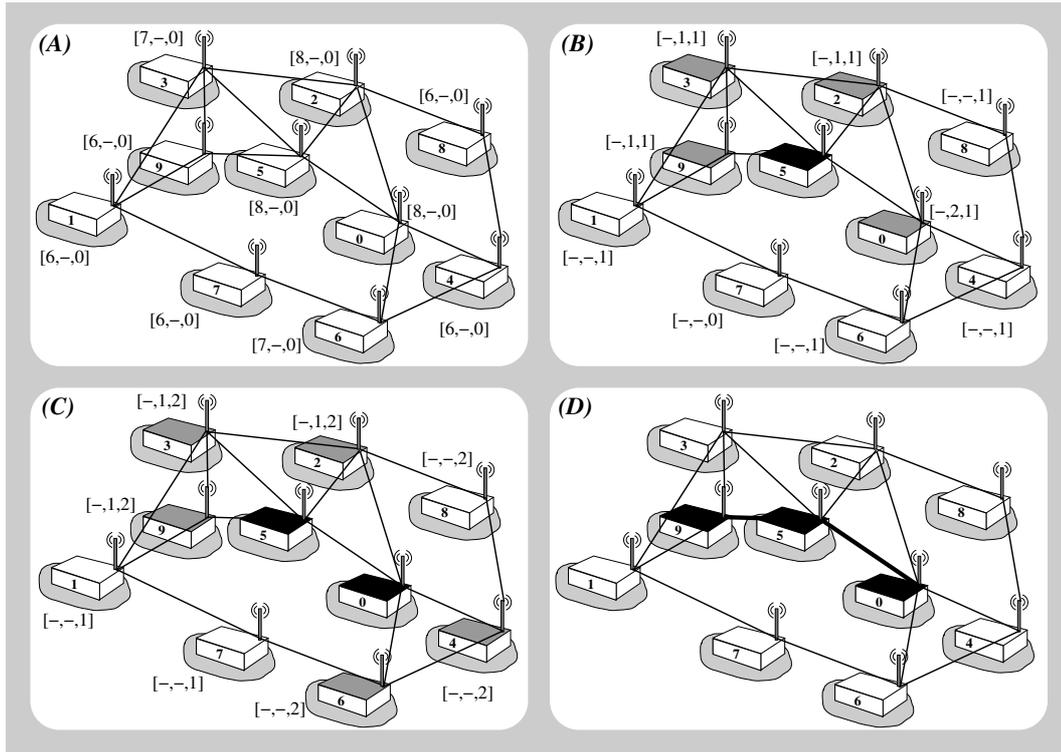


Figura 4.1: (2,2)-CDS da rede utilizando a solução centralizada

O nó com a maior *vizinhança* até dois saltos (i.e., $u \in V$ com valor máximo de $|N_2^u|$) é colorido em Preto (Figura 4.1(B)). Pode-se verificar que existem três nós empatados (i.e., nós 0, 2 e 5). No entanto, o nó com *id* 5 é selecionado aplicando o critério de desempate (i.e., maior *id*). Em seguida, os vizinhos do nó 5 são coloridos em Cinza e os nós em sua vizinhança (i.e., até dois saltos) são marcados como cobertos por um nó do *backbone*.

A seguir, o nó Cinza que possui maior número de vizinhos Brancos é selecionado e colorido em Preto. Conseqüentemente, seus vizinhos são coloridos de Cinza (Figura 4.1(C)). No exemplo, o nó 0 é selecionado membro do *backbone* pois possui 2 vizinhos Brancos (nós 4 e 6). Os demais nós Cinzas possuem apenas um vizinho Branco. Feita a seleção do nó 0, todos seus vizinhos até 2 saltos (i.e., nós 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9) tem seus parâmetros de cobertura incrementado (nós Pretos não precisam ser cobertos pois formam o *backbone*).

O processo se repete, selecionando o nó Cinza que possui o maior número de vizinhos Brancos (Figura 4.1(D)). Neste caso, o nó 9 é escolhido pelo critério de desempate. Com esta seleção, o processo de computação do *backbone* é finalizado, pois todos os nós da rede estão cobertos por 2 nós Pretos dentro de uma distância de até 2 saltos. O *backbone* fica então composto pelos nós 0, 5, e 9.

4.3 Mecanismo $(k, r) - CDS$ Distribuído

A solução $(k, r) - CDS$ Distribuída, ao contrário da solução centralizada, não necessita conhecimento global da topologia na computação do *backbone* da rede. Cada nó necessita conhecer apenas a sua vizinhança até r saltos. A definição do mecanismo $(k, r) - CDS$ estende o mecanismo (k, r) -DS [102] proposto para redes *ad hoc* na construção de estruturas com múltiplos *cluster-heads* (CH) por *cluster*, e com raio máximo definido (i.e., a distância máxima dos membros aos seus *cluster-heads* é limitada), mas sem o requisito de conectar os CH; ou seja, a solução proposta computa apenas um DS da rede.

O mecanismo $(k, r) - CDS$ distribuído computa o *backbone* da rede garantindo que todos os nós, com exceção dos membros do *backbone*, sejam cobertos por pelo menos k membros deste distantes a no máximo r saltos. Uma importante característica presente no mecanismo $(k, r) - CDS$ distribuído é que o *backbone* é construído a partir da *Base Station* (BS).

A BS pode ser qualquer nó da rede, inclusive podendo existir mais de uma. Entretanto, neste trabalho assumimos a existência de apenas uma BS, a qual é escolhida de forma aleatória entre todos os nós que compõem a rede. Assume-se que todos os nós têm um identificador (i.e., *id*) único e que possuem um conhecimento da vizinhança até r saltos. A execução do mecanismo é dividida em duas fases, resumidamente descritas como:

- Fase 1: esta fase tem dois objetivos. Primeiro, os nós aprendem a sua distância a BS (i.e., dBS). Segundo, os nós obtêm informação sobre a vizinhança dentro de uma distância máxima de r saltos.
- Fase 2: esta é a fase da eleição dos membros do *backbone*. Cada nó elege k nós localizados até r saltos como os seus membros do *backbone*. Os critérios utilizados nesta eleição serão detalhados adiante. Os nós eleitos são notificados e a relação dos membros do *backbone* é difundida para todos os vizinhos do nó que realiza a eleição.

Fase 1

O primeiro objetivo da Fase 1 é informar aos nós da rede a sua distância a BS. A BS inicia o processo difundindo aos seus vizinhos uma mensagem definida como **Mensagem de Informação (MI)** contendo a **Distância a Base Station (dBS)** (inicialmente contendo $dBS = 0$). Cada vizinho ao receber esta mensagem atualiza a sua distância a BS, incrementa a dBS e difunde a informação aos seus próprios vizinhos. Caso um nó venha a receber mais de uma mensagem de notificação, assume-se sempre a mensagem dBS de menor valor como sendo a mais atualizada. Neste caso, o nó propaga a informação de menor dBS aos seus vizinhos, os quais repetem o processo. Assumindo que todas as

transmissões são confiáveis, após um período finito de retransmissões todos os nós da rede obtém a suas respectivas distâncias a BS.

O segundo objetivo da Fase 1 consiste em obter a topologia da vizinhança, o que requer r etapas de troca de mensagens. Em cada etapa os nós difundem a informação sobre os vizinhos (e respectivas distâncias) conhecidos até então. Após r etapas todos os nós conhecem os seus vizinhos dentro de uma distância r . A distância de cada nó a BS também é informada na lista de vizinhos, a fim de que cada nó obtenha a distância a BS para todos os nós na sua vizinhança.

Fase 2

Após o termino da Fase 1, inicia-se a Fase 2 onde cada nó irá eleger e propagar a informação sobre os seus k nós eleitos para compor o *backbone* da rede. Essa eleição é realizada a partir das informações obtidas na Fase 1.

A BS inicia a Fase 2 elegendo os k nós mais próximos (i.e., com a menor dBS em sua vizinhança). Em caso de empate, primeiramente é eleito o nó com maior *grau*. Persistindo o empate, elege-se o nó com o maior *id*. A BS gera e transmite a todos os seus vizinhos uma mensagem denominada **Mensagem de Eleição (ME)** contendo os k nós eleitos em uma lista denominada **Membros do Backbone (MB)**.

Todo nó ao receber uma mensagem ME realiza, uma única vez, a eleição de seus membros do *backbone*. Os critérios são semelhantes aos utilizados pela BS, com a restrição de que só podem ser eleitos os nós que já fazem parte do *backbone*, ou então que sejam adjacentes (i.e., vizinhos) a um membro do *backbone*. Essa restrição garante a propriedade da conectividade do *backbone* (i.e., a formação de um CDS).

Após a eleição, o nó adiciona os novos eleitos ao campo MB e difunde a mensagem a todos os seus vizinhos. Uma **Mensagem de Notificação (MN)** é gerada para todos os novos membros adicionados ao *backbone*. Esse procedimento é repetido até que todos os nós da rede tenham participado da eleição. Em qualquer etapa do processo, um nó que já tenha realizado sua eleição e que, posteriormente, receber uma segunda mensagem ME simplesmente a ignora ¹.

4.3.1 Exemplo de computação de um $(k, r) - CDS$ Distribuído

Na Figura 4.2 é apresentada a computação do *backbone* para uma RSSF considerando a configuração $(2, 2) - CDS$. Os nós coloridos em Preto são membros do *backbone*.

¹Note que até este momento não existe preocupação com uma nova eleição para compor um novo *backbone*. Caso isto seja necessário, basta adicionar um campo que identifique a eleição em questão (e.g., o número desta) na mensagem ME.

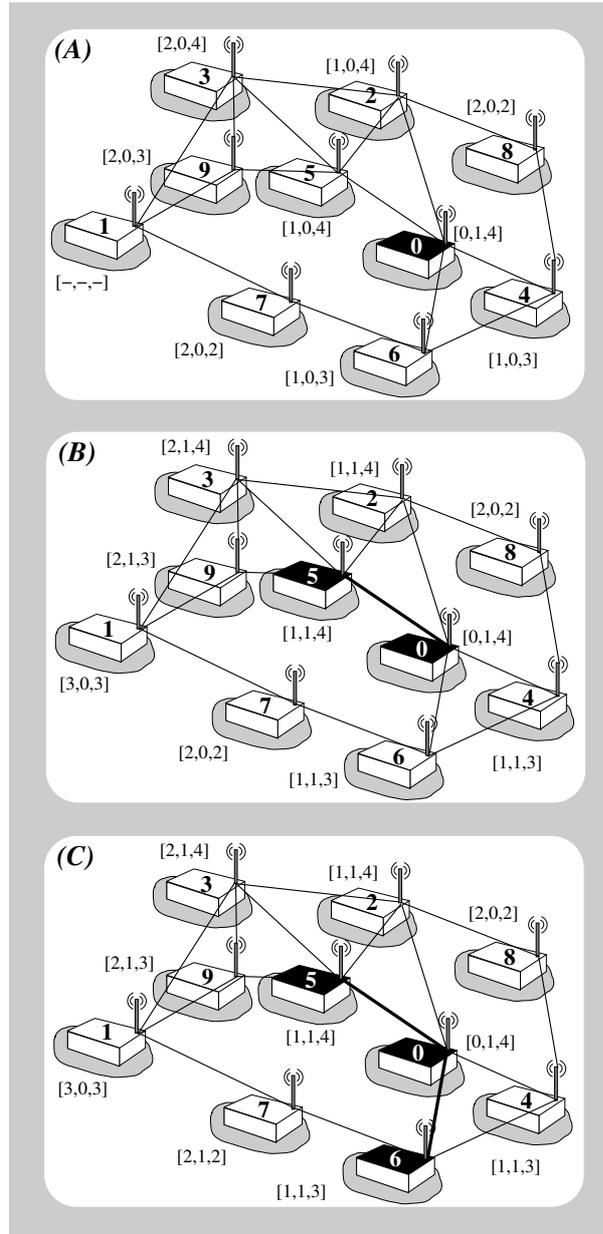


Figura 4.2: Calculando (2,2) CDS com KR-CDS Distribuído.

Inicialmente apenas o nó 0 aparece em Preto indicando que ele é a BS (Figura 4.2(A)). Considerando que $r = 2$, todos os nós conhecem sua vizinhança até 2 saltos. O primeiro campo na marcação ao lado de cada nó identifica o valor da dBS . O segundo campo indica se o nó é membro do *backbone* (valor 1), ou se o nó não é membro nem vizinho de um membro (valor 0). O terceiro campo indica o **grau** do nó.

A partir das informações obtidas na Fase 1, a BS elege seus dois membros do *backbone* (Figura 4.2(B)). Esta informação é repassada aos seus vizinhos através de uma mensagem ME, dando início a Fase de Eleição dos nós que compõem o *backbone* (Fase 2).

O primeiro nó eleito é a própria BS, pois ele possui $dBS = 0$. O nó 5 é o segundo nó eleito porque este possui o maior *id*, uma vez que o nó 2 empata em distância (i.e., dBS)

e em **grau** com o nó 5. A eleição dos nós 0 e 5 reflete na marcação dos nós 2, 3, 4, 5, 6 e 9, indicando que eles são membros ou vizinhos de um membro do *backbone*. Na sequência, todos os vizinhos da BS realizam a sua eleição. Desta forma, todos os nós com $dBS = 1$ (i.e., os nós 2, 4, 5 e 6) elegem os nós 0 e 5 como seus membros do *backbone*, e a mensagem ME após ser atualizada é repassada aos vizinhos.

Na Figura 4.2(C) verifica-se que os nós que possuem $dBS = 2$ (i.e., os nós 3, 8 e 9) elegem os nós 0 e 5. Por sua vez, o nó 7 escolhe os nós 0 e 6.

A marcação do nó 7 é atualizada indicando que este é vizinho de um membro do *backbone* (Figura 4.2(C)). O nó 1, que possui o $dBS = 3$, recebe a mensagem ME e elege os nós 5 e 6 como seus membros do *backbone*. Com isso, encerra-se a fase de eleição do mecanismo $(k, r) - CDS$ Distribuído pois todos os vizinhos do nó 1 também já concluíram a eleição. O *backbone* da rede fica então constituído pelos nós 0, 5 e 6.

4.4 Avaliação de Desempenho

As simulações dos mecanismos $(k, r) - CDS$ Centralizado e Distribuído foram realizadas utilizando um simulador específico desenvolvido em linguagem C. As topologias de rede analisadas são conectadas e baseadas no modelo *unit disk graph* [103]. O modelo *unit disk graph* é um modelo teórico de grafos amplamente aceito para modelar redes de sensores e redes *ad hoc*, sendo definido da seguinte forma neste contexto: dois nós quaisquer, A e B , são vizinhos se a distância Euclidiana entre suas coordenadas na rede é menor ou igual a R , onde R é o alcance de transmissão de cada nó (igual para todos os nós em redes homogêneas) [52].

Realizou-se uma série de simplificações no simulador com o intuito de comparar a eficiência das heurísticas propostas. A primeira delas, assume um protocolo MAC livre de colisões que garante a entrega de todos os pacotes transmitidos. Tal hipótese é igualmente assumida em trabalhos relacionados [102, 104, 105]. Assume-se também que as topologias avaliadas são estáticas (i.e., sem mobilidade). Um resumo dos parâmetros de simulação adotados neste Capítulo é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros da Simulação.

Alcance da Transmissão	15 m
Modelo de Comunicação	<i>unit disk graphs</i>
Número de nós	Veja Tabelas 4.3 e 4.4
Distribuição dos nós	Randômica
Mobilidade	Estático
Experimentos	30

Por não existir uma solução ótima de (k, r) -CDS, utiliza-se o mecanismo centralizado proposto como base de comparação para a solução distribuída. As simulações compreendem uma série de experimentos variando os parâmetros de distância (i.e., r) e cobertura (i.e., k). Todos os experimentos foram executados 30 vezes em dois cenários diferentes objetivando uma amostra estatística representativa. Considera-se que todos os nós sensores tem o mesmo alcance de transmissão, sendo este definido em 15 metros segundo as especificações da plataforma *Mica Motes* [16].

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 são apresentados os valores do desvio padrão para os parâmetros **diâmetro** e **grau** obtidos a partir de 30 amostras para cada cenário. O **diâmetro** da rede é a maior distância entre quaisquer pares de nós que compõem a rede. O **grau** representa o número médio de vizinhos que cada nó possui.

No primeiro cenário, descrito na Tabela 4.3, fixou-se o tamanho do terreno em $100m \times 100m$ aumentando gradativamente o número de nós de 200 até 1000 nós sensores. Com isso, obteve-se um aumento na densidade da rede juntamente com uma pequena variação no **diâmetro** médio da rede, e um aumento significativo no **grau** médio a medida que a densidade aumenta.

Tabela 4.3: Parâmetros do Cenário 1.

Nós	Diâmetro	Grau	Terreno(m)
200	$11,7 \pm 0,7$	$11,8 \pm 0,6$	100 X 100
400	$10,9 \pm 0,4$	$24,2 \pm 0,7$	100 X 100
600	$10,6 \pm 0,5$	$36,6 \pm 0,8$	100 X 100
800	$10,3 \pm 0,5$	$49,0 \pm 0,9$	100 X 100
1000	$10,1 \pm 0,3$	$61,4 \pm 0,9$	100 X 100

No segundo cenário, optou-se por incrementar o número de nós da rede e o tamanho do terreno conforme apresentado na Tabela 4.4. Com isso o **grau** médio da rede apresenta uma pequena variação, e o **diâmetro** da rede aumenta significativamente.

Tabela 4.4: Parâmetros do Cenário 2.

Nós	Diâmetro	Grau	Terreno(m)
200	$11,9 \pm 0,7$	$12,2 \pm 0,6$	100 x 100
425	$18,0 \pm 0,7$	$11,7 \pm 0,5$	150 x 150
750	$23,2 \pm 0,6$	$12,0 \pm 0,0$	200 x 200
1185	$29,4 \pm 0,7$	$12,0 \pm 0,0$	250 x 250
1720	$35,4 \pm 1,0$	$12,3 \pm 0,5$	300 x 300

4.4.1 Análise dos Resultados

Para comparar os dois mecanismos propostos utilizou-se as seguintes métricas:

1. *Overhead* de mensagens de controle: número total de mensagens de controle trocadas entre os nós durante a descoberta da topologia (mecanismo Centralizado) e durante as duas Fases do mecanismo Distribuído;
2. Número Total de nós que formam o *backbone*: número de nós que cada mecanismo elege para formar o *backbone*;
3. Grau de Redundância: número médio de membros do *backbone* que cobrem qualquer nó da rede. Resultado do parâmetro de multi dominação (i.e., k) demonstra uma melhor distribuição dos membros do *backbone*.

Na Figura 4.3 apresenta-se os resultados do *Overhead* referente ao cenário 1. Resultados referente ao cenário 2 não são apresentados em virtude da sua similaridade com os resultados do cenário 1.

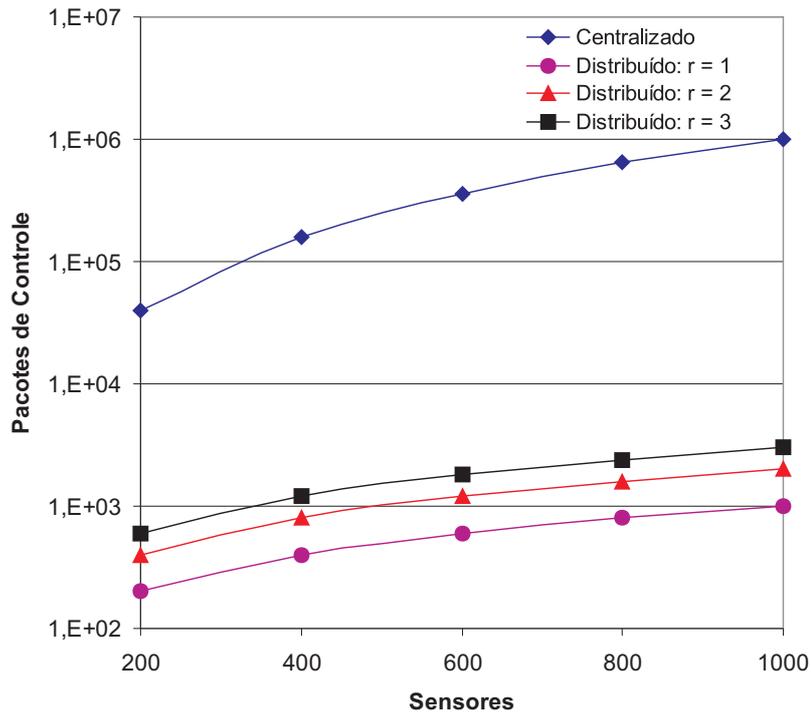


Figura 4.3: Pacotes de Controle.

O *overhead* de controle no mecanismo centralizado refere-se ao processo de descoberta da topologia. Após esta fase, cada nó pode computar isoladamente o *backbone* da rede para qualquer configuração de parâmetros (k, r). O mecanismo $(k, r) - CDS$ Centralizado apresenta complexidade $O(n^2)$ em mensagens de controle, onde n é o número de nós sensores que compõem a rede.

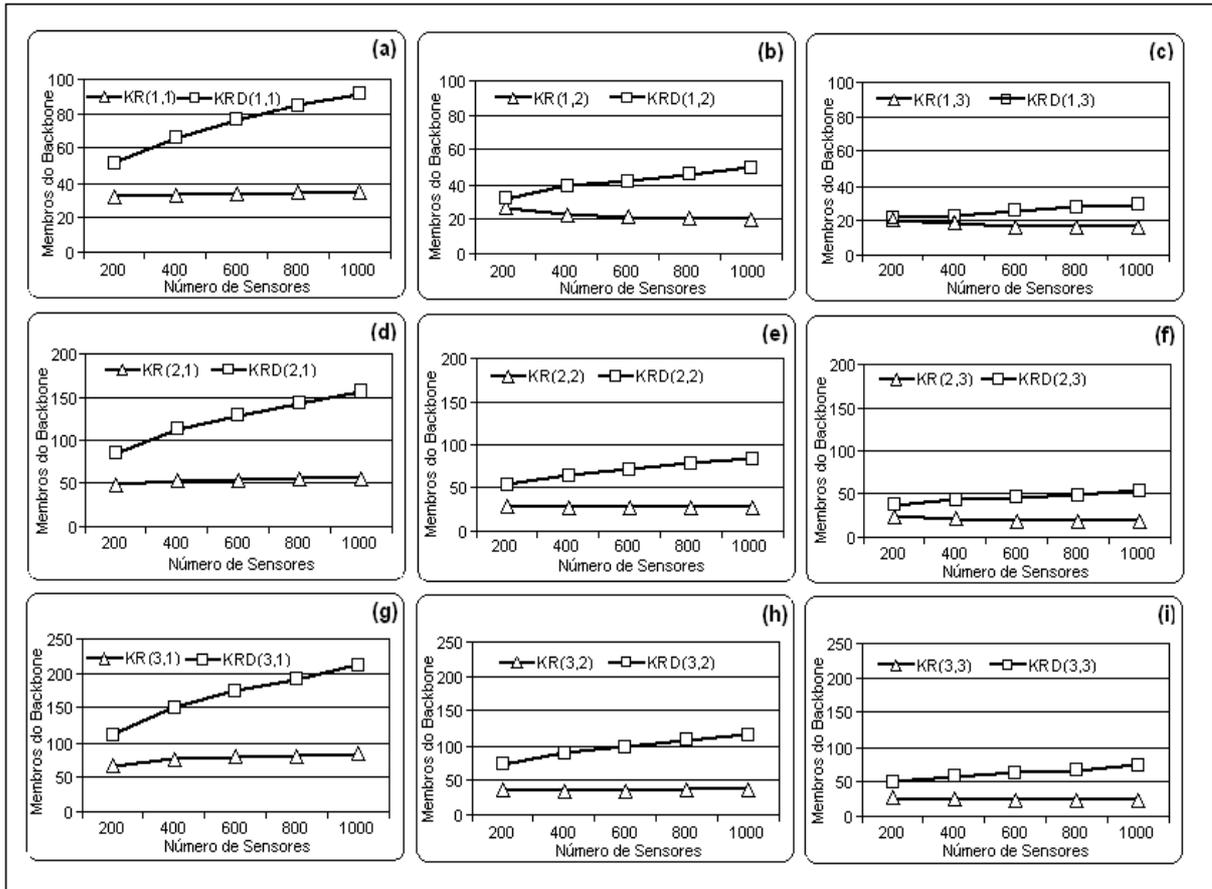


Figura 4.4: Resultados do (k,r) -CDS no cenário 1.

Para o mecanismo Distribuído, o *overhead* de controle varia com o valor do parâmetro r . Ou seja, o número de mensagens trocadas varia proporcionalmente com o parâmetro r , resultando em uma complexidade de mensagens da ordem de $O(n \cdot r)$, onde n é o número de nós sensores que compõem a rede e r é o parâmetro de distância.

Na Figura 4.4 apresenta-se os resultados da simulação referentes ao cenário 1. Neste cenário a densidade da rede é incrementada e o diâmetro permanece praticamente fixo (veja Tabela 4.3).

Os resultados obtidos (Figura 4.4) mostram que o mecanismo Centralizado tem um melhor desempenho em todos os experimentos. Isto se deve sobretudo ao fato que o mecanismo centralizado utiliza a topologia completa da rede possuindo desta forma mais informação disponível durante a computação do *backbone*.

A medida que o parâmetro de distância r aumenta, observa-se que o desempenho do mecanismo Distribuído se aproxima do desempenho do mecanismo Centralizado (Figuras 4.4 (c), (f) e (i)). A menor diferença no desempenho entre as duas heurísticas (aproximadamente 3%) é observada para redes com 200 nós (Figura 4.4 (c)), situação em que o mecanismo centralizado elege em média 20,8 nós, enquanto que o mecanismo

distribuído elege em média 21,4 nós.

O desempenho do mecanismo Centralizado em relação ao Distribuído fica mais evidente a medida que a densidade da rede aumenta, com destaque aos resultados dos experimentos com 1000 nós sensores (Figura 4.4).

A degradação no desempenho do mecanismo Distribuído, a medida que a densidade aumenta, justifica-se em virtude do processo de eleição que estabelece que cada nó sensor eleja k nós da sua vizinhança até r saltos para compor o *backbone*. Conseqüentemente, aumentando a densidade da rede aumenta-se o número total de nós eleitos.

Pretende-se adotar algum mecanismo de **poda** (i.e., *pruning*) em futuras versões do mecanismo (k, r) -CDS Distribuído. Desta forma, espera-se uma redução no número total de membros do *backbone* devido ao caráter de eliminação de nós redundantes intrínseco ao mecanismo de poda.

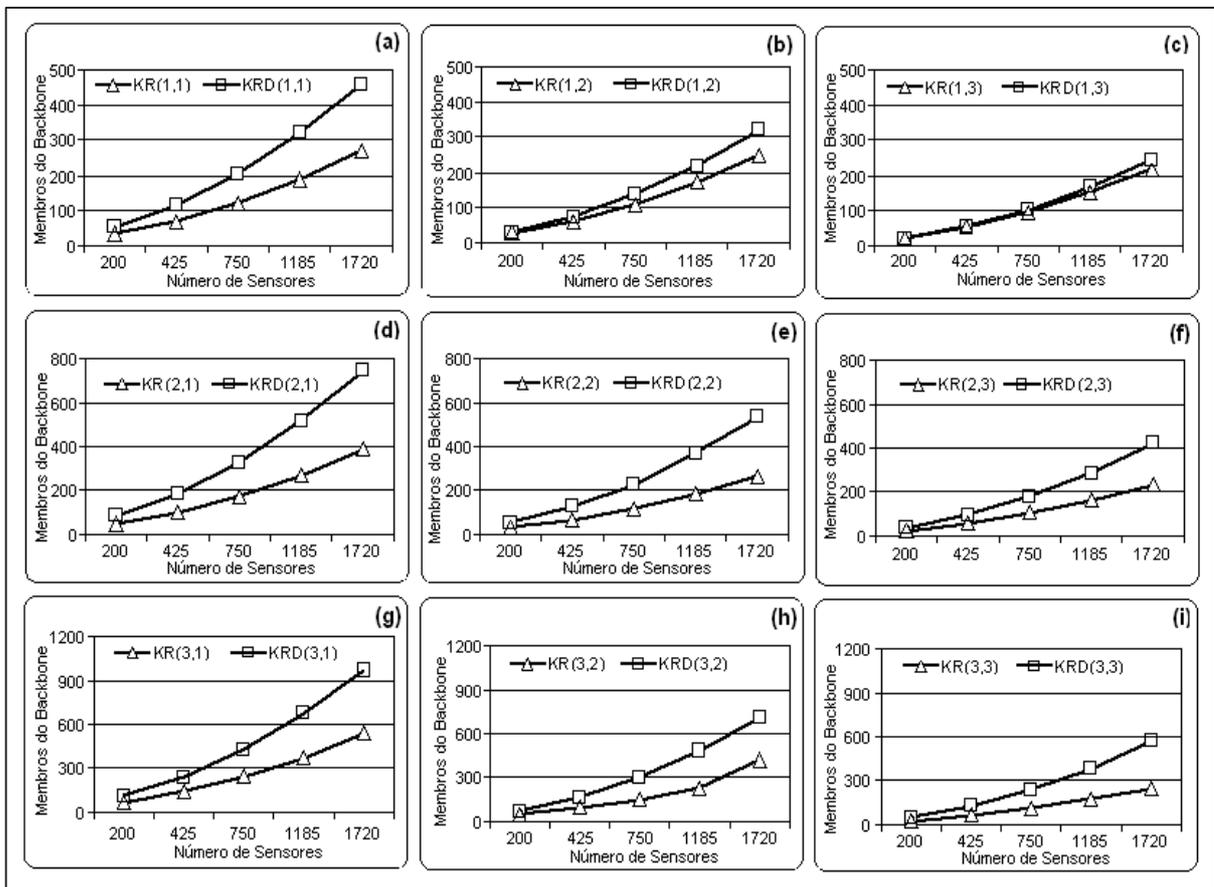


Figura 4.5: Resultados do (k,r) -CDS no cenário 2.

Na Figura 4.5 apresenta-se os resultados das simulações referentes ao segundo cenário. Neste cenário, optou-se por manter a densidade fixa, mas variando o diâmetro da rede (veja Tabela 4.4). Com isso, verifica-se um aumento significativo no número de nós que formam o *backbone* tanto no mecanismo Centralizado como no Distribuído. Isto se deve, sobretudo, a melhor distribuição dos nós sensores. Por exemplo, no cenário 1 a rede

apresenta os valores 11,7 e 61,4 como o maior **diâmetro** médio e o maior **grau** médio, respectivamente (Tabela 4.3). Já no segundo cenário, o maior valor médio para o **grau** atinge 12,3 para um **diâmetro** médio de 35,4 (Tabela 4.4).

O mecanismo Centralizado novamente obteve o melhor desempenho em todos os experimentos realizados no cenário 2. No entanto, observa-se uma diminuição na diferença entre os resultados das duas heurísticas, com atenção especial ao experimento apresentado na Figura 4.5(c).

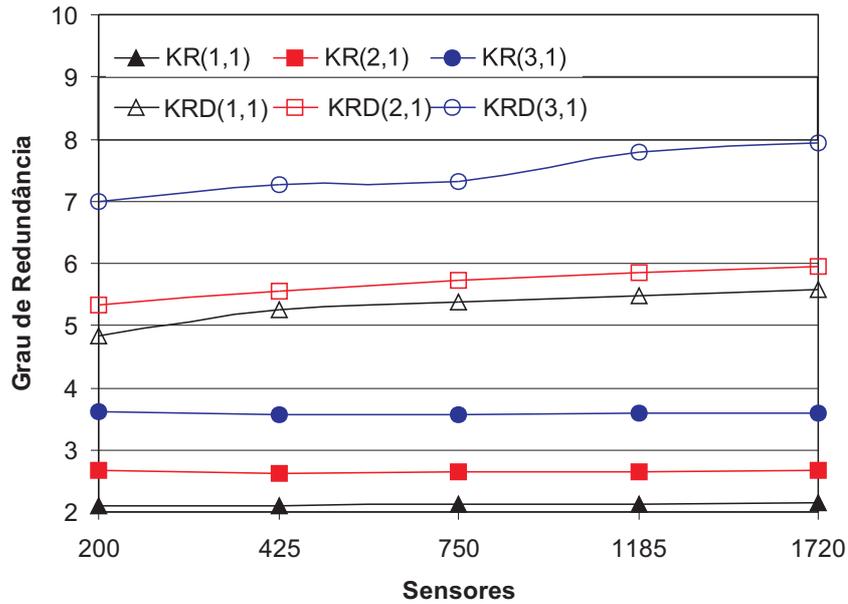


Figura 4.6: Grau de Redundância: Solução Centralizada (Cenário 2).

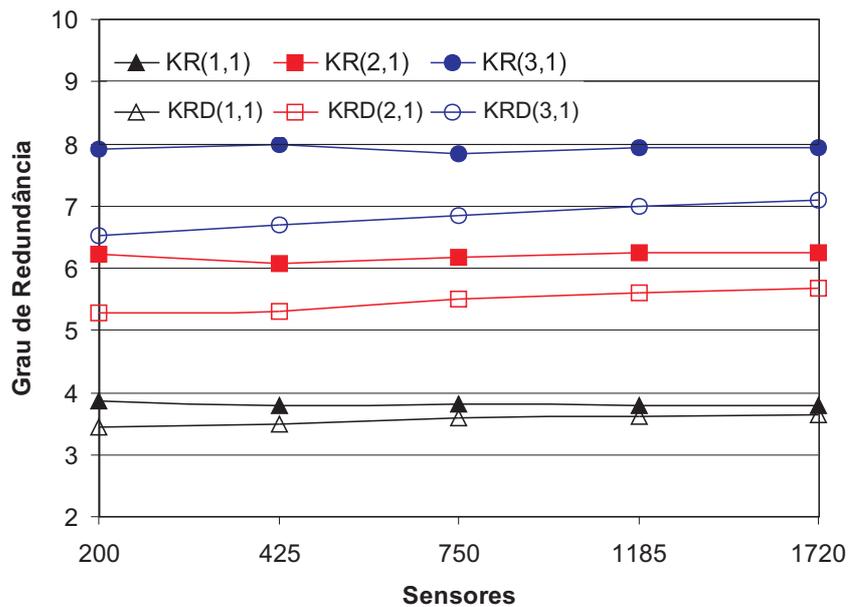


Figura 4.7: Grau de Redundância: Solução Distribuída (Cenário 2).

Tabela 4.5: Grau de Cobertura do *backbone*(cenário 2)

Nós	Centralizado			Distribuído		
	KR(1,1)	KR(2,1)	KR(3,1)	KR(1,1)	KR(2,1)	KR(3,1)
200	100 %	64,34%	59,33%	100 %	99,68%	98,62%
425	100 %	66,81%	59,58%	100 %	99,61%	98,55%
750	100 %	66,13%	59,37%	100 %	99,57%	99,02%
1185	100 %	66,48%	59,78%	100 %	99,65%	99,28%
1720	100 %	66,16%	59,81%	100 %	99,71%	99,41%

São apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.7 os resultados da métrica Grau de Redundância para as soluções Centralizada e Distribuída, respectivamente. Os resultados demonstram o nível de redundância tanto para os membros do *backbone* quanto para os nós que compõem a rede. Mesmo que o mecanismo $(k, r) - CDS$ não exija que os membros do *backbone* sejam cobertos, foi investigado nesta métrica o que acontece em termos de cobertura do *backbone* para ambos mecanismos. Para o mecanismo centralizado (veja Figura 4.6) o grau de redundância dos nós que compõem a rede é superior aos nós que compõem o *backbone*. Por outro lado, o mecanismo distribuído (veja Figura 4.7) computa o *backbone* da rede com um maior grau de redundância em relação aos nós que compõem a rede. Isso ocorre devido ao mecanismo de eleição dos membros do *backbone*, onde todos os nós elegem seus membros que irão compor o *backbone*.

Na Tabela 4.5 é apresentado o grau de cobertura dos membros do *backbone* para o cenário 2. Observa-se que o mecanismo distribuído computa o *backbone* da rede e obtém uma cobertura quase total para todas as configurações consideradas neste experimento.

Como antecipado, a solução centralizada apresenta os melhores resultados, em especial, no número total de nós que formam o *backbone*. No entanto, cabe ressaltar que soluções centralizadas que exigem conhecimento global da topologia da rede não são praticáveis em RSSF devido ao altíssimo *overhead* de controle resultante do processo de disseminação da topologia da rede.

4.5 Prova do mecanismo $(k, r) - CDS$ Centralizado

Nesta Seção prova-se que o mecanismo $(k, r) - CDS$ Centralizado computa corretamente o *backbone* para qualquer topologia. Considera-se que a RSSF é modelada por um grafo $G=(V,E)$, onde V é o conjunto de nós sensores e E é o conjunto de enlaces. Associa-se cada nó em V a suas coordenadas no espaço Euclidiano. Considera-se que existe um enlace entre os nós u e v (i.e., $(u, v) \in E$) se e somente se a distância Euclidiana entre o par de nós for menor que o raio de transmissão de seus rádios.

Um conjunto V' forma um CDS de G caso todos os nós em $V - V'$ são vizinhos (i.e., dominados por) de pelo menos um nó em V' e o subgrafo induzido em V' é conectado.

Lema 3 *A extensão de um componente de grafo conectado quando da inclusão de nós adjacentes ao componente mantém o componente conectado.*

Prova. A prova é por indução no número de nós do componente conectado (i.e., cardinalidade do componente). Parte-se do princípio que um componente de cardinalidade um (i.e., composto de apenas um nó) é conectado. Assume-se que um componente de $k < n$ nós está conectado. A inclusão de um nó a um componente conectado de cardinalidade $k = n - 1$ resulta em um componente de cardinalidade n . Sabendo-se que todo e qualquer nó adicionado ao componente conectado é necessariamente adjacente a pelo menos um nó do componente, a propriedade da conectividade do componente se mantém. ■

Teorema 4 *O mecanismo $(k, r) - CDS$ Centralizado computa corretamente o backbone para qualquer grafo $G = (V, N)$ conectado.*

Prova. Para acompanhar a cobertura dos nós do grafo, utiliza-se k conjuntos, $D_0, D_1, D_2, \dots, D_k$, onde D_i representa os nós cobertos por pelo menos i nós do *backbone* dentro de uma distância até r . Inicialmente, todos os nós de G são inseridos em D_0 . A inclusão de um novo membro ao *backbone* pode resultar na promoção de um ou mais nós em D_i para D_{i+1} para todo $i < k$. Nós eleitos para o *backbone* são inseridos imediatamente em D_k . O primeiro nó do backbone, b_0 , é o nó de maior **grau** no grafo. Para situações que resultem em empate, seleciona-se o nó com o maior identificador (i.e., **id**). A cada iteração escolhe-se dentre os nós vizinhos ao *backbone* o nó que apresenta a maior cobertura (i.e., possui o maior número de vizinhos em D_i para todo $i < k$). A propriedade de conectividade é garantida pelo Lema 3. O processo termina quando todos os nós estiverem cobertos ou pertencem ao *backbone* (i.e., $V = D_k$). A cada iteração, um novo membro do *backbone* é selecionado ou todos os nós estão cobertos. Considerando que o número de nós é finito e igual a n (i.e., $n = |V|$), o número de iterações é no máximo n ; conseqüentemente, o algoritmo conclui em um tempo finito. ■

4.6 Prova do mecanismo $(k, r) - CDS$ Distribuído

Para provar a corretude do mecanismo $(k, r) - CDS$ Distribuído, mostra-se que ele é **safe** (i.e., o mecanismo computa $(k, r) - CDS$ da rede) e que ele é **live** (i.e., ele completa sua execução em um período de tempo finito).

Lema 5 *A Fase 1 do mecanismo $(k, r) - CDS$ possui complexidade $O(n \cdot r)$ em troca de mensagens, onde n é o número de nós da rede e r é o parâmetro distância do $(k, r) - CDS$.*

Prova. A Fase 1 é dividida em etapas. Durante cada etapa todos os nós enviam mensagens aos seus vizinhos imediatos (i.e., um salto). Assumindo que a Fase 1 exige r etapas e que a rede é composta por n nós, o mecanismo $(k, r) - CDS$ Distribuído requer a troca de $n \times r$ mensagens para finalizar a primeira fase. Portanto a complexidade da Fase 1 é de $O(n \cdot r)$ mensagens. ■

Lema 6 *Após r transmissões bem sucedidas de uma mensagem m qualquer esta é propagada até r saltos do nó de origem.*

Prova. Isto é provado por indução na distância d ao nó de origem n_0 . Inicialmente, tem-se $d = 0$ para o nó de origem. Considere um nó v a uma distância r de n_0 . O nó u , a uma distância $r - 1$ de n_0 , recebe a mensagem. Em seguida, o nó u envia a mensagem a todos os seus vizinhos, inclusive ao nó v um de seus vizinhos. Finalmente, o nó v recebe a mensagem. ■

Teorema 7 *A Fase 2 do mecanismo $(k, r) - CDS$ Distribuído computa corretamente o backbone para qualquer grafo $G = (V, E)$ conectado.*

Prova. É assumido que os nós conhecem seus vizinhos até r saltos (i.e., N_r^i), bem como a distância de todos os nós em N_r^i a i_0 que é a Estação Base (Lema 6). Seleciona-se i_0 como sendo o primeiro nó do *backbone*. A seguir, o nó i_0 escolhe $k - 1$ nós do conjunto $N_r^{i_0}$ para se agregar ao *backbone*, atendendo a seguinte propriedade: primeiro são selecionados $x \leq (k - 1)$ nós adjacentes a i_0 e, subsequentemente, aplica-se o mesmo procedimento ao conjunto de nós já selecionados, repetindo-se o processo até que $k - 1$ nós tenham sido escolhidos. Considerando que somente nós adjacentes ao sub-conjunto selecionado podem vir a ser escolhidos, garante-se a propriedade da conectividade do *backbone* (Lema 3). Após o nó i_0 eleger seus $k - 1$ membros do *backbone*, ele divulga essa informação aos seus vizinhos. Todos os outros nós da rede ao receberem a informação dos membros do *backbone* elegem seus k membros, adicionam seus escolhidos ao *backbone* e repassam essa informação aos seus vizinhos. Cada nó realiza a eleição uma única vez e, caso venham a receber uma nova mensagem de nós eleitos, esta é ignorada. Cada nó i eleger k membros do conjunto N_r^i com a menor distância até o nó i_0 e que, necessariamente, já façam parte do *backbone* ou então que sejam vizinhos de um membro do *backbone*. Desta forma é garantida a propriedade de conectividade (Lema 3). O processo encerra quando todos os nós da rede realizarem sua eleição. ■

Capítulo 5

Estudo de Caso

Neste Capítulo apresenta-se um estudo de caso que consiste na definição e avaliação de três variantes de um novo protocolo de roteamento *broadcast*. Estas variantes foram desenvolvidas a partir da aplicação e adequação da técnica de GDE-DE [19] e do mecanismo $(k, r) - CDS$ [27] ao protocolo FLOOD [38]. Para avaliar o desempenho dos novos protocolos, utilizou-se o simulador de redes NS-2 [106]. O NS-2 foi modificado especialmente para este experimento, sendo adicionado ao seu modelo de energia o modelo de descarga de bateria de Rakhmatov-Vrudhula [1] e a contabilização do *Switching Energy* [19].

Inicialmente foi desenvolvido um novo protocolo de roteamento a partir da aplicação da técnica de GDE-DE ao protocolo FLOOD. Este novo protocolo será apresentado na Seção 5.1 e foi desenvolvido com o objetivo de melhorar o desempenho do FLOOD no que se refere ao tempo de vida da rede. Este objetivo é alcançado a partir do desligamento parcial dos nós sensores após cada transmissão. Essa técnica mostrou-se eficiente não apenas em economizar energia mas também em recuperar a capacidade da bateria. Entretanto, observou-se um incremento na latência média da rede.

Para contornar esse problema e atender a aplicações sensíveis ao atraso, desenvolveu-se um novo protocolo baseado no mecanismo $(k, r) - CDS$ que será apresentado na Seção 5.2. Este protocolo utiliza o conceito de múltipla dominação e dominação em distância para computar o *backbone* da rede. Esta técnica diminui significativamente o número de nós que realizam o *broadcast* reduzindo desta forma a latência média da rede. Como efeito colateral da aplicação do mecanismo $(k, r) - CDS$, observou-se um acréscimo no consumo de energia quando comparado ao protocolo FLOOD GDE-DE.

O terceiro protocolo foi desenvolvido a partir da aplicação conjunta da técnica de GDE-DE com o mecanismo $(k, r) - CDS$. Este protocolo, que é apresentado na Seção 5.3, permite tirar proveito de ambas soluções (i.e., técnica de GDE-DE e do mecanismo $(k, r) - CDS$) apresentando um bom desempenho em termos de consumo de energia, latência média dos pacotes transmitidos, e taxa de entrega de pacotes. Nas próximas Seções os

três novos protocolos derivados do protocolo FLOOD serão apresentados e avaliados.

5.1 Implementação da técnica de GDE-DE no protocolo FLOOD

Nas Seções 3.3 e 3.4 foram apresentadas e avaliadas, respectivamente, a técnica GDE-DE [19] e a técnica GDE-BB [18]. Ambas técnicas foram modeladas e simuladas apenas a nível de um único nó sensor. Nesta Seção será apresentado um estudo comparativo da aplicação da técnica GDE-DE [19] ao protocolo FLOOD [38] em uma rede de sensores formada por 50 sensores.

A partir da adequação da técnica GDE-DE ao protocolo FLOOD será definido um novo protocolo de roteamento para as RSSFs denominado FLOOD GDE-DE. O protocolo FLOOD [38] é um protocolo simples, que segue a abordagem *blind flooding*. Nesta abordagem, cada nó da rede após receber a primeira cópia de um pacote de difusão (i.e., *broadcast*) realiza a sua retransmissão (i.e., *re-broadcast*). Para realizar a análise do desempenho da técnica de GDE-DE foi incorporado ao modelo de energia do simulador NS-2 [106] o modelo de descarga de bateria de Rakhmatov-Vrudhula [78]. Adicionalmente, foi estendido o modelo de energia do NS-2 para possibilitar a contabilização do *Switching Energy* (SE). Relembrando, o SE (apresentado na Seção 3.2) é a energia envolvida nas trocas de modos de operação pelo nó sensor. Especificamente neste trabalho, contabilizou-se as transições entre as transmissões (i.e., Tx) e o repouso (i.e., *Sleep*) do nó sensor.

Foram realizadas pequenas adequações na técnica de GDE-DE [18] com a finalidade de adicioná-la ao protocolo FLOOD [38]. A principal adequação foi a substituição do *Intervalo de Recuperação* (IR) fixo por um intervalo dinâmico que se adapta ao tráfego da rede. Mais detalhes sobre o cálculo do IR dinâmico serão apresentados nas próximas Seções.

5.1.1 Ambiente de Simulação

Conforme comentado anteriormente, objetivando a correta análise de desempenho do protocolo FLOOD foi adicionado ao modelo de energia do simulador NS-2 versão 2.27 o modelo de Rakhmatov-Vrudhula (originalmente o NS-2 possui apenas o modelo linear) e a computação do *Switching Energy*. A partir dessas alterações, realizou-se várias simulações comparando a descarga da bateria de todos os nós que compõem a RSSF. Todos os nós possuem as mesmas características (i.e., rede homogênea). Os parâmetros para os nós sensores foram obtidos da especificação de um dispositivo do tipo *Berkeley Mote* na sua

versão comercial produzida pela *Crossbow Technology* [16], apresentando as seguintes especificações: Processador ATMEL ATmega128L, Modo ativo = 8 mA e Modo inativo = 15 μ A; Rádio CC1000, Modo transmissão (Tx) = 27 mA, Modo recepção (Rx) = 10 mA, Modo inativo = 10 mA e Modo sleep = 1 μ A e fonte de energia composta de duas baterias alcalinas tipo AA. Um resumo completo dos parâmetros de simulação podem ser verificados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros da Simulação

Parâmetro	Descrição
Processamento	Ativo = 8 mA, Inativo = 15 μ A
Número de Nós	50 nós
Terreno	1500m \times 300m
Alcance do Rádio	250 m
Tempo de Simulação	300 s
Experimentos	10
Distribuição dos nós	Randômica
Modelo de Mobilidade	Modelo <i>Random Waypoint</i>
Velocidade	1 m/s
Rádio	Tx=27mA,Rx =10mA,Sleep=1 μ A
Capacidade da Bateria	300 Joules
Cenário 1	1 fonte de Tráfego
Cenário 2	5 fontes de Tráfego
Cenário 3	10 fontes de Tráfego

A RSSF utilizada nas simulações é composta de 50 nós dispostos de forma randômica numa área de 1500m \times 300m. As simulações são repetidas 10 vezes, com diferentes topologias, para se obter uma amostragem estatística aceitável. O tempo de simulação de cada experimento é de 300 s. Como protocolo de acesso ao meio é utilizado o IEEE 802.11 e como modelo de mobilidade utiliza-se o modelo *random waypoint* sem pausa com velocidade constante de 1 m/s. Como protocolo de roteamento *broadcast* foi utilizado o protocolo FLOOD [38].

Para reduzir as chances de colisões durante as transmissões, estas são programadas com um retardo médio de 10 ms. A metodologia utilizada nas simulações consiste em escolher, de forma aleatória, um, cinco ou dez nós sensores como fontes de *broadcast*. Esses sensores transmitem dois pacotes de 512 Bytes a cada segundo para toda rede durante todo o tempo de simulação. Ao final de 300 s foi calculado o consumo médio de energia da rede tanto para o protocolo FLOOD original como para o protocolo FLOOD com a técnica de GDE-DE implementada (i.e., FLOOD GDE-DE).

5.1.2 Implementação da Técnica de GDE-DE

A principal adequação realizada na técnica de GDE-DE durante a implementação no NS-2 foi no período de duração do Intervalo de Recuperação (IR), que originalmente era fixo. Neste experimento, optou-se em adotar um IR variável com um valor mínimo de 2 *ms*. O valor mínimo de 2 *ms* se justifica em virtude do tempo de transição entre os modos de operação do rádio adotado na simulação, no caso o *CC1000* (ver valores na Tabela 5.2).

Tabela 5.2: Tempo de Transição (em μs) para os rádios da plataforma *Mica Motes*.

Rádio	Velocidade	Tx→Sleep	Rx→Sleep	Sleep→Tx	Sleep→Rx
TR1000	19,2 Kbps	10	10	16	20
TR1000	115,2 Kbps	10	10	16	20
CC1000	38,4 Kbps	10	10	850	850

O cálculo do IR é obtido a partir da variação do tempo entre as chegadas dos pacotes, levando-se em consideração os diferentes fluxos de dados que cada nó recebe. Para definir o valor do IR é utilizada a Equação 5.1, onde o *TempoAmostra* refere-se ao tempo de chegada do último pacote para o nó em questão, *MMPE* é a Média Móvel com Peso Exponencial calculada a partir da Equação 5.2 e *C* é uma constante que possui o valor 4 para esse experimento. Esta constante define o peso em que o IR será reduzido a partir do *DesvMMPE* calculado pela Equação 5.3.

$$IR = (TempoAmostra + MMPE) - (C * DesvMMPE). \quad (5.1)$$

Para calcular a Média Móvel com Peso Exponencial (MMPE) é utilizado um $\alpha = 0.1$ que equivale a dar um peso maior (i.e., 90 %) para o histórico das médias conforme pode-se verificar na Equação 5.2, onde *Amostra* é a última medida do tempo entre a chegada de dois pacotes consecutivos de um mesmo fluxo para um mesmo nó sensor.

$$MMPE = (1 - \alpha) * MMPE + \alpha * Amostra. \quad (5.2)$$

A fim de se obter uma boa aproximação do *IR*, também se calcula o Desvio da Média Móvel com Peso Exponencial (*DesvMMPE*) como apresentado na Equação 5.3, na qual é utilizado um $\beta = 0.2$.

$$DesvMMPE = (1 - \beta) * DesvMMPE + \beta * |Amostra - MMPE|. \quad (5.3)$$

5.1.3 Implementação do *Switching Energy*

O *Switching Energy* (SE) refere-se a energia envolvida no processo de transição entre dois modos de operação por parte do nó sensor. Por exemplo, a transição entre o modo de

recepção (Rx) e o modo repouso (*Sleep*). Dependendo do tipo de transição pode ocorrer perda ou recuperação na capacidade da bateria do nó sensor [19].

Atualmente, existem poucos trabalhos [18, 20, 94] que levam em consideração a computação do *Switching Energy* na avaliação do desempenho dos protocolos. Geralmente, o SE é desprezado objetivando a simplificação da simulação. Entretanto, em virtude das severas restrições de energia das RSSF é de fundamental importância a análise de todos os parâmetros que possam influenciar no tempo de vida da rede. Neste contexto, desconsiderar o SE na avaliação do tempo de vida de uma RSSF torna-se um enorme equívoco. Por esse motivo, neste experimento, o SE foi considerado e implementado no NS-2 a partir da terceira suposição apresentada na Seção 3.2.1. Nesta suposição é considerado a energia média consumida pela transição do modo *A* para o modo *B* calculado conforme a Equação 5.4.

$$SE_{A \rightarrow B} = \frac{(P_A + P_B)(T_{A \rightarrow B} + T_{B \rightarrow A})}{2}, \quad (5.4)$$

na qual, P_A e P_B são as correntes solicitadas durante os modos *A* e *B* respectivamente, e $T_{A \rightarrow B}$ e $T_{B \rightarrow A}$ são os tempo de transição para os dois modos, respectivamente.

5.1.4 Avaliação de desempenho do protocolo FLOOD GDE-DE

A utilização do modelo de Rakhmatov-Vrudhula neste experimento apresentou a vantagem de capturar o comportamento não linear de uma bateria, permitindo um estudo mais realista das RSSFs através da utilização de um modelo de bateria mais preciso. Portanto, foi possível verificar a eficácia da técnica GDE proposta, o que não seria possível com a utilização de um modelo mais simples de bateria, tal como o modelo linear.

Entretanto, o ganho em qualidade teve como consequência um elevado custo computacional para simular a descarga completa de uma bateria. Assim, neste experimento, ao invés de buscar o resultado final para o ganho no tempo de vida do nó sensor com a aplicação da técnica GDE-DE, optou-se por limitar a simulação a 300 segundos e avaliar três métricas de desempenho:

1. *Packet Delivery Rate* (PDR) que refere-se a taxa de entrega dos pacotes na rede;
2. O Consumo (C) de energia (medido neste experimento em Joules);
3. A Latência (L) dos pacotes medida em segundos.

Também foram definidos, inicialmente, 3 cenários distintos para a simulação, sendo a diferença básica entre os cenários o número de fontes geradoras de tráfego *broadcast*. Para cada cenário foram executadas 10 simulações alterando de forma aleatória a topologia

em cada execução. Considerando o Intervalo de Confiança (IC) de 95% para o valor médio de cada uma das métricas avaliadas (veja Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5), constata-se que a amostragem estatística é razoável.

No cenário 1, onde existe apenas uma fonte geradora de tráfego, verifica-se que com a aplicação da técnica de GDE-DE obteve-se um ganho médio acima de 11% em termos de economia de energia ao mesmo tempo que foi mantida a taxa de entrega dos pacotes (PDR) e a latência (L), conforme pode-se verificar na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados das Simulações para o Cenário 1

N.	FLOOD Original			FLOOD GDE-DE			Ganho GDE-DE		
	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR	C(%)	L(%)
1	99,68	0,2635	0,022	99,68	0,2333	0,022	0	11,44	0
2	99,70	0,2635	0,038	99,7	0,2328	0,038	0	11,66	0
3	99,95	0,2635	0,028	99,95	0,2325	0,028	0	11,78	0
4	99,88	0,2635	0,040	99,88	0,2318	0,040	0	12,05	0
5	99,74	0,2635	0,023	99,74	0,2331	0,023	0	11,53	0
6	100	0,2635	0,023	100	0,2331	0,023	0	11,57	0
7	99,72	0,2635	0,042	99,72	0,2330	0,042	0	11,59	0
8	100	0,2636	0,025	100	0,2332	0,025	0	11,52	0
9	99,89	0,2635	0,036	99,89	0,2328	0,036	0	11,64	0
10	99,82	0,2634	0,031	99,82	0,2333	0,031	0	11,44	0
IC	99,84±0,09	0,2635±0,00	0,031±0,01	99,84±0,09	0,2329±0,00	0,031±0,01	0±0,00	11,62±0,13	0±0,00

Já para o cenário 2 onde o número de fontes é incrementado cinco vezes (i.e., 5 fontes de tráfego) o ganho médio de energia praticamente dobrou chegando a 20,85% (veja Tabela 5.4). Como efeito colateral desse ganho, nota-se uma pequena redução no PDR médio (i.e., 1,49%) a qual acarretou numa, também pequena, redução (i.e., 2,98%) na latência média dos pacotes.

O melhor desempenho em relação a economia de energia foi obtida nas simulações com o cenário 3. Como mostrado na Tabela 5.5, obteve-se um desempenho superior a 29% quando adicionada a técnica de GDE-DE ao protocolo FLOOD. Como ponto contrário, a latência média dos pacotes apresenta o pior índice das simulações. No entanto, se for analisado que para esse cenário existem 10 fontes injetando 2 pacotes por segundo na rede e mesmo assim consegue-se manter o PDR, uma latência média de 0,7 s não pode ser considerada tão alta dependendo da aplicação.

Para avaliar o impacto da mobilidade no desempenho de ambos protocolos (i.e., FLOOD e FLOOD GDE-DE) foram adicionados mais três cenários de simulação seguindo os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 5.1, com exceção do parâmetro de mobilidade que passa a não existir. Ou seja, os cenários 4, 5 e 6 não possuem mobilidade, todos os nós são estáticos. Esse tipo de cenário é bastante comum em RSSF, especialmente em

Tabela 5.4: Resultados das Simulações para o Cenário 2

FLOOD Original			FLOOD GDE-DE			Ganho GDE-DE			
N.	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR(%)	C(J)	L (seg.)	PDR	C(%)	L(%)
1	95,14	0,2661	0,051	93,83	0,2098	0,049	-1,31	21,15	3,90
2	95,28	0,2660	0,058	93,93	0,2102	0,059	-1,35	20,96	-1,76
3	95,73	0,2660	0,056	94,33	0,2103	0,055	-1,41	20,96	2,61
4	93,63	0,2659	0,062	92,68	0,2118	0,059	-0,95	20,33	4,47
5	97,09	0,2660	0,045	94,99	0,2106	0,044	-2,10	20,82	2,44
6	96,14	0,2661	0,055	94,96	0,2109	0,052	-1,18	20,74	5,57
7	92,27	0,2659	0,054	90,04	0,2117	0,051	-2,23	20,39	5,07
8	96,55	0,2661	0,056	95,16	0,2094	0,055	-1,39	21,32	1,93
9	95,68	0,2660	0,059	93,93	0,2110	0,057	-1,75	20,67	2,77
10	96,54	0,2660	0,054	95,28	0,2098	0,052	-1,26	21,13	2,82
I.C	95,40±0,99	0,2660±0,00	0,055±0,00	93,91±1,07	0,2106±0,00	0,053±0,00	-1,49±0,28	20,85±0,22	2,98±1,40

Tabela 5.5: Resultados das Simulações para o Cenário 3

FLOOD Original			FLOOD GDE-DE			Ganho GDE-DE			
N.	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR	C(%)	L(%)
1	76,31	0,2679	0,635	77,10	0,1917	0,979	0,79	28,42	-35,18
2	83,49	0,2683	0,311	83,76	0,1879	0,454	0,27	29,96	-31,34
3	83,13	0,2683	0,784	83,56	0,1886	0,808	0,43	29,70	-2,97
4	81,55	0,2682	0,334	82,81	0,1891	0,481	1,26	29,48	-30,67
5	83,31	0,2683	0,364	84,13	0,1893	0,465	0,82	29,43	-21,61
6	82,16	0,2682	0,793	82,83	0,1892	1,104	0,67	29,46	-28,15
7	76,94	0,2679	0,513	77,92	0,1915	0,620	0,98	28,51	-17,38
8	81,96	0,2682	0,609	82,70	0,1899	1,137	0,74	29,19	-46,42
9	85,03	0,2684	0,254	85,33	0,1883	0,252	0,30	29,84	1,14
10	83,91	0,2683	0,569	84,84	0,1877	0,773	0,93	30,05	-26,46
I.C	81,78±2,08	0,2682±0,00	0,460±0,14	82,50±1,98	0,1893±0,00	0,707±0,22	0,72±0,22	29,40±0,40	-23,90±10,32

ambientes de automação industrial e controle.

Neste caso, os resultados das simulações apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7 demonstram que o cenário com uma e cinco fontes de tráfego, sem mobilidade, é ligeiramente diferente quando comparado aos mesmos cenários com mobilidade (i.e., cenários 1 e 2). Já para o cenário com 10 fontes de tráfego (veja Tabelas 5.8) percebe-se uma pequena melhora em termos de PDR e consumo de energia. Isto é, o FLOOD GDE-DE entrega mais pacotes consumindo menos energia quando comparado ao cenário com mobilidade.

Tabela 5.6: Resultados das Simulações para o Cenário 4 (sem mobilidade)

FLOOD Original			FLOOD GDE-DE			Ganho GDE-DE			
N.	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR	C(%)	L(%)
1	97,40	0,2636	0,028	97,40	0,2337	0,028	0	11,34	0
2	98,35	0,2635	0,047	98,35	0,2334	0,047	0	11,42	0
3	99,97	0,2636	0,035	99,97	0,2313	0,035	0	12,25	0
4	99,93	0,2635	0,043	99,93	0,2324	0,043	0	11,81	0
5	100	0,2635	0,026	100	0,2324	0,026	0	11,79	0
6	100	0,2635	0,023	100	0,2335	0,023	0	11,38	0
7	99,84	0,2636	0,043	99,84	0,2336	0,043	0	11,36	0
8	99,96	0,2635	0,032	99,96	0,2330	0,032	0	11,59	0
9	100	0,2636	0,042	100	0,2323	0,042	0	11,86	0
10	100	0,2635	0,036	100	0,2331	0,036	0	11,54	0
I.C	99,55±0,65	0,2635±0,00	0,035±0,01	99,55±0,65	0,2329±0,00	0,035±0,01	0,00±0,00	11,63±0,21	0,00±0,00

Tabela 5.7: Resultados das Simulações para o Cenário 5 (sem mobilidade)

FLOOD Original			FLOOD GDE-DE			Ganho GDE-DE			
N.	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR	C(%)	L(%)
1	91,90	0,2659	0,056	91,09	0,2123	0,053	-0,81	20,19	5,16
2	91,94	0,2659	0,060	90,70	0,2121	0,059	-1,24	20,24	0,90
3	95,87	0,2661	0,062	93,81	0,2100	0,060	-2,07	21,06	1,99
4	94,61	0,2660	0,064	93,14	0,2119	0,062	-1,47	20,35	3,16
5	98,05	0,2661	0,046	96,16	0,2094	0,044	-1,89	21,33	5,62
6	95,14	0,2660	0,056	93,62	0,2111	0,053	-1,52	20,64	3,69
7	92,61	0,2660	0,055	91,12	0,2107	0,054	-1,49	20,78	2,16
8	97,41	0,2661	0,060	95,41	0,2104	0,058	-2,00	20,94	2,49
9	96,47	0,2660	0,066	95,19	0,2109	0,065	-1,28	20,70	2,05
10	96,98	0,2660	0,055	95,39	0,2103	0,053	-1,59	20,95	2,08
I.C	95,10±1,55	0,2660±0,00	0,058±0,00	93,56±1,37	0,2109±0,00	0,056±0,00	-1,54±0,26	20,72±0,25	2,93±1,02

5.2 Aplicando a múltipla dominação e dominação em distância no ambiente das RSSF

Sausen et al. [27] apresentam a primeira solução centralizada e distribuída para computar *backbones* em RSSFs com múltipla dominação e dominação em distância. Ambas soluções são baseadas no mecanismo $(k, r) - CDS$ derivado da teoria dos grafos e utilizado para computar *backbones* em qualquer tipo de rede. Nesta solução qualquer nó de uma rede é coberto por pelo menos k membros que compõem o *backbone* a uma distância máxima de r saltos.

O mecanismo $(k, r) - CDS$ oferece um grau variável de redundância e confiabilidade,

Tabela 5.8: Resultados das Simulações para o Cenário 6 (sem mobilidade)

FLOOD Original			FLOOD GDE-DE			Ganho GDE-DE			
N.	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR(%)	C(J)	L(s)	PDR	C(%)	L(%)
1	74,52	0,2678	0,209	74,62	0,1934	0,612	0,10	27,80	-65,78
2	80,24	0,2682	0,119	81,38	0,1888	0,132	1,14	29,59	-9,77
3	86,03	0,2685	0,159	86,86	0,1859	0,183	0,82	30,77	-12,82
4	83,07	0,2683	0,167	84,34	0,1875	0,187	1,27	30,14	-10,55
5	87,95	0,2687	0,163	88,44	0,1848	0,168	0,49	31,22	-3,36
6	83,70	0,2684	0,567	83,84	0,1876	0,880	0,14	30,11	-35,61
7	81,69	0,2682	0,204	82,66	0,1883	0,194	0,98	29,79	5,12
8	85,49	0,2685	0,252	86,69	0,1860	0,375	1,20	30,72	-32,85
9	86,02	0,2686	0,170	87,40	0,1854	0,193	1,37	30,96	-11,99
10	86,27	0,2686	0,306	87,71	0,1863	0,516	1,44	30,61	-40,63
I.C	83,50±2,81	0,2684±0,00	0,232±0,09	84,39±2,97	0,1874±0,00	0,3446±0,18	0,9±0,35	30,17±0,70	-21,82±15,29

motivo que pode ser usado por aplicações que exigem confiabilidade na coleta dos dados e atrasos reduzidos. Em virtude do elevado *overhead* imposto pela solução centralizada, neste experimento será apenas utilizada a solução distribuída do mecanismo $(k, r) - CDS$.

5.2.1 Implementação do mecanismo $(k, r) - CDS$ no protocolo FLOOD

Em RSSF, muitos protocolos de roteamento utilizam a técnica de inundação (i.e., *blind flooding*) para disseminar pacotes de controle. Na técnica *blind flooding* todo nó realiza a retransmissão da primeira cópia de qualquer pacote de *broadcast* recebido. O protocolo FLOOD [38] segue essa metodologia para realizar o roteamento de pacotes na rede. Portanto, no protocolo FLOOD todos os nós retransmitem a primeira cópia de todos os novos pacotes gerados na rede. Assim, para uma rede com cardinalidade n o protocolo FLOOD irá retransmitir $O(n)$ mensagens. Dependendo do tamanho da rede, da densidade, e da frequência das mensagens geradas pode ocorrer o problema denominado *tempestade de broadcast* [107] que dependendo da intensidade pode paralisar toda rede. Para minimizar esse problema, manter um bom nível de confiabilidade, e tolerância a falhas foi adicionado o mecanismo $(k, r) - CDS$ distribuído ao protocolo FLOOD.

A partir da aplicação do mecanismo $(k, r) - CDS$ ao protocolo FLOOD obtém-se uma redução significativa no número de transmissões desnecessárias na rede. Isso ocorre em virtude da metodologia adotada pelo mecanismo $(k, r) - CDS$ que permite apenas aos membros do *backbone* o direito de realizar o *rebroadcast*.

Para simular a aplicação do mecanismo $(k, r) - CDS$ ao protocolo FLOOD foi utilizado o simulador NS-2. Como o objetivo desta Seção é apenas avaliar o ganho que o mecanismo

$(k, r) - CDS$ pode propiciar ao protocolo FLOOD em termos das métricas avaliadas (veja Seção 5.1.4), optou-se por computar o *backbone* da rede uma única vez, no início da simulação e deixá-lo ativo durante todo o tempo de simulação (i.e., 300 s). Trabalhos futuros devem levar em consideração alguma técnica de rodízio dos membros que compõem o *backbone* levando em consideração, por exemplo, a quantidade de energia remanescente na bateria dos nós sensores conforme é sugerido na apresentação do mecanismo $(k, r) - CDS$ [27].

5.2.2 Avaliação do protocolo FLOOD $(k, r) - CDS$

Para avaliar o desempenho do protocolo FLOOD $(k, r) - CDS$ foi utilizado um cenário composto por 50 nós sensores com 10 fontes geradoras de *broadcast*, distribuídos de forma aleatória num terreno de $1500m \times 300m$. Um resumo completo dos parâmetro utilizados nesse experimento pode ser consultado na Tabela 5.9.

Conforme a definição do mecanismo $(k, r) - CDS$ (veja Capítulo 4) existe a necessidade de informar dois parâmetros (k e r) para a computação do *backbone*. O parâmetro r foi fixado em um (i.e., $r = 1$) para garantir que todos os nós da rede sejam atingidos pelos *rebroadcast*, isso é necessário pois no protocolo FLOOD $(k, r) - CDS$ somente os membros que compõem o *backbone* realizam a retransmissão dos pacotes de *broadcast* (i.e., *rebroadcast*). Já para o parâmetro k foram testados valores variando de um até três conforme pode-se observar na Tabela 5.10. O valor que apresentou o melhor desempenho para o cenário simulado é o valor dois (i.e., $k = 2$). Este valor apresenta o nível mínimo de redundância para o experimento em questão, um nível de redundância controlado é desejável pois o protocolo FLOOD utiliza uma técnica de roteamento não confiável (i.e., *broadcast não confiável*) em um ambiente bastante suscetível a falhas, no caso as RSSFs.

Pelos valores apresentados na Tabela 5.10, pode-se verificar que aumentando o nível de redundância (e.g., veja resultados para $k = 3$) ocorre o aumento no número de pacotes descartados (D) e a redução do número de pacotes entregues (PDR) em relação a adoção de um $k = 2$. Isso indica que foi ultrapassado o nível de redundância aceitável para essa rede em particular.

Para uma melhor compreensão do cenário utilizado neste experimento são apresentados (na Tabela 5.11) os valores do *diâmetro*, do *grau*, e da Cardinalidade do *Backbone* (CB) de todas topologias utilizadas. O *diâmetro* é a maior dentre as menores distâncias entre quaisquer pares de nós que compõem a rede. O *grau* representa o número médio de vizinhos que cada nó possui. E a CB representa o número de nós que formam o *backbone* da rede.

Na Tabela 5.12 são apresentados os valores obtidos na comparação do protocolo FLOOD com o protocolo FLOOD (k,r) -CDS. Relembrando o protocolo FLOOD (k,r) -

Tabela 5.9: Parâmetros da Simulação do Protocolo $(k, r) - CDS$

Parâmetro	Descrição
Processamento	Ativo = 8 mA, Inativo = 15 μ A
Número de Nós	50 nós
Terreno	1500m \times 300m
Alcance do Rádio	250 m
Tempo de Simulação	300 s
Experimentos	10
Distribuição dos nós	Randômica
Modelo de Mobilidade	Sem Mobilidade
Rádio	Tx=27mA, Rx =10mA, Sleep=1 μ A
Capacidade da Bateria	300 Joules
Cenário	10 Fontes de Tráfego

Tabela 5.10: Resultados da Simulação do FLOOD $(k,1)$ -CDS: *Packet Delivery Ratio*(PDR), Consumo(C) em Joules, Latência(L) em segundos, Pacotes Descartados(D)

N.	(1,1)-CDS				(2,1)-CDS				(3,1)-CDS			
	PDR(%)	C(J)	L(s)	D(pacotes)	PDR(%)	C(J)	L (s)	D(pacotes)	PDR(%)	C(J)	L(s)	D(pacotes)
1	92,98	0,2649	0,035	129.183	91,56	0,2654	0,041	223.323	88,76	0,2659	0,048	323.949
2	84,65	0,2650	0,042	74.899	89,76	0,2656	0,051	125.396	88,94	0,2662	0,060	222.867
3	89,98	0,2649	0,035	61.593	93,04	0,2658	0,047	166.730	90,17	0,2668	0,070	353.248
4	85,45	0,2650	0,039	55.773	88,01	0,2659	0,050	163.839	85,71	0,2665	0,062	252.277
5	89,28	0,2652	0,044	137.270	91,16	0,2660	0,054	230.474	91,00	0,2667	0,069	363.637
6	89,11	0,2648	0,032	66.174	91,29	0,2658	0,050	234.178	93,16	0,2664	0,063	371.742
7	92,04	0,2644	0,029	58.730	91,93	0,2652	0,036	156.364	90,06	0,2659	0,046	273.305
8	92,86	0,2650	0,033	87.385	90,32	0,2657	0,044	201.197	89,31	0,2661	0,050	249.549
9	84,76	0,2647	0,032	36.990	89,54	0,2653	0,079	104.599	88,53	0,2664	0,065	280.361
10	91,52	0,2647	0,035	52.561	92,79	0,2660	0,054	254.687	89,14	0,2664	0,058	346.304
Média	89,26	0,2649	0,036	76.056	90,94	0,2657	0,051	186.079	89,48	0,2663	0,059	303.724
D. P.	3,27	0,00	0,00	32.991	1,55	0,00	0,01	50.200	1,91	0,00	0,01	54.244

CDS, neste experimento, utilizou os parâmetros $(2, 1)$ na computação do *backbone* da rede. Isso significa que cada nó que compõe a rede simulada é coberto por no mínimo 2 nós que formam o *backbone* (i.e., $k = 2$) a uma distância máxima de apenas 1 salto (i.e., $r = 1$).

Os valores apresentados na Tabela 5.12 demonstram que o protocolo FLOOD $(2,1)$ -CDS obteve uma considerável redução na latência média dos pacotes transmitidos na rede (i.e., 73,61%), um significativo aumento (i.e., 7,44%) na taxa de entrega de pacotes (PDR), e a redução no consumo de energia quando comparado com o protocolo FLOOD.

Tabela 5.11: Característica da Rede

Para todos (k,r)-CDS			(1,1)-CDS	(2,1)-CDS	(3,1)-CDS
N.	Grau	Diâmetro	CB	CB	CB
1	14	8	7	13	18
2	12	9	11	17	23
3	11	8	9	17	27
4	11	8	11	19	25
5	12	8	12	18	27
6	13	7	8	17	23
7	15	7	7	15	21
8	12	8	8	18	23
9	12	7	9	14	23
10	12	7	9	20	26
Média	7,7	9,1	7,70	16,8	23,6
Desv. Padrão	0,6	1,7	0,6	2,2	2,8

Tabela 5.12: Comparação entre o Protocolo FLOOD e FLOOD (2,1)-CDS

FLOOD				FLOOD (2,1)-CDS			Ganho FLOOD (2,1)-CDS (%)		
N.	PDR (%)	C (J)	L (s)	PDR (%)	C (J)	L (s)	PDR	Consumo	Latência
1	74,52	0,2678	0,209	91,56	0,2654	0,041	17,04	0,89	80,46
2	80,24	0,2682	0,119	89,76	0,2656	0,051	9,52	0,95	57,14
3	86,03	0,2685	0,159	93,04	0,2658	0,047	7,01	1,03	70,33
4	83,07	0,2683	0,167	88,01	0,2659	0,050	4,94	0,90	69,84
5	87,95	0,2687	0,163	91,16	0,2660	0,054	3,21	1,00	66,82
6	83,70	0,2684	0,567	91,29	0,2658	0,050	7,59	0,98	91,23
7	81,69	0,2682	0,204	91,93	0,2652	0,036	10,25	1,12	82,22
8	85,49	0,2685	0,252	90,32	0,2657	0,044	4,83	1,02	82,39
9	86,02	0,2686	0,170	89,54	0,2653	0,079	3,52	1,19	53,45
10	86,27	0,2686	0,306	92,79	0,2660	0,054	6,51	0,94	82,25
Média	83,50	0,2684	0,232	90,94	0,2657	0,051	7,44	1,00	73,61
D. P.	3,93	0,00	0,13	1,55	0,00	0,01	4,11	0,10	12,17

Ressalta-se que a economia de energia é considerada significativa mesmo apresentando um percentual baixo (i.e., 1%) em virtude do aumento do PDR em relação ao FLOOD. Esses resultados comprovam a eficácia do protocolo FLOOD (2,1)-CDS que entregou mais pacotes (7,44%), com uma latência menor (73,61%), e consumindo menos energia (1%) quando comparado ao protocolo FLOOD.

5.3 Aplicação Conjunta da técnica de GDE-DE e do mecanismo (k,r)-CDS no protocolo FLOOD

Nas Seções 5.1 e 5.2 foram apresentadas variantes do protocolo FLOOD implementadas a partir da técnica de GDE-DE e do mecanismo $(k, r) - CDS$. Ambas variantes foram simuladas utilizando o simulador NS-2 e os resultados foram comparados com os resultados do protocolo FLOOD.

A primeira variante do protocolo FLOOD chamada FLOOD GDE-DE apresentou um bom desempenho em relação a métrica consumo de energia, atingindo um percentual superior a 30% de economia. No entanto, o protocolo FLOOD GDE-DE apresentou um aumento médio na latência na rede, que no pior caso chegou a atingir um acréscimo de 23,90% em relação ao protocolo FLOOD. Para contornar esse problema foi desenvolvida a segunda variante do protocolo FLOOD, desenvolvida a partir da aplicação do mecanismo $(k, r) - CDS$. O protocolo FLOOD $(k, r) - CDS$ apresentou um desempenho satisfatório no que se refere a latência, demonstrando uma redução de 73,61% na latência média dos pacotes com um aumento de 7,44% no PDR. No entanto, esse protocolo não apresentou uma redução significativa no consumo de energia quando comparado ao protocolo FLOOD GDE-DE.

A partir dos resultados positivos obtidos pelas duas variantes do protocolo FLOOD foi desenvolvida uma terceira variante denominada protocolo FLOOD GDE-(k,r). O protocolo FLOOD GDE-(k,r) pretende unir as principais vantagens da técnica de GDE-DE e do mecanismo $(k, r) - CDS$. Ou seja, com a técnica GDE-DE o novo protocolo explora o bom desempenho à nível de economia de energia, já com o mecanismo $(k, r) - CDS$ ele herda o bom desempenho à nível de latência média dos pacotes e o bom desempenho à nível de entrega de pacotes (PDR). Na próxima Seção esse novo protocolo é apresentado.

5.3.1 Implementação da técnica de GDE-DE e do mecanismo $(k, r) - CDS$ no protocolo FLOOD

A estratégia adotada para a implementação conjunta da técnica GDE-DE e do mecanismo $(k, r) - CDS$ ao novo protocolo FLOOD GDE-(k,r) seguiu a mesma metodologia de simulação utilizada nas Seções 5.1 e 5.2 e sua implementação foi dividida em duas fases.

Na primeira fase, como ponto de partida, utilizou-se o protocolo FLOOD GDE-DE. Relembrado, no protocolo FLOOD GDE-DE todos nós que compõem a rede realiza um pequeno repouso após cada pacote transmitido. O período deste repouso é definido pelo Intervalo de Recuperação (IR) que é um intervalo de tempo dinâmico que se adapta ao tráfego da rede. A partir desse IR é possível ao nó recuperar a capacidade da bateria e

também obter uma maior economia de energia.

Na segunda fase de implementação foi adicionado o mecanismo $(k, r) - CDS$ ao protocolo FLOOD GDE-DE. Relembrando, o mecanismo $(k, r) - CDS$ realiza a computação do *backbone* da rede a partir dos parâmetros k (nível de redundância) e r (distância máxima). Seguindo a mesma metodologia adotada na Seção 5.2 foram utilizados os parâmetros $(2, 1)$ para computar o *backbone* da rede. Com a adição do mecanismo $(k, r) - CDS$ ao protocolo FLOOD GDE-DE apenas os membros que compõem o *backbone* realizam o *re-broadcast* das mensagens na rede, desta forma ocorre uma redução significativa das transmissões desnecessárias na rede. Na próxima Seção são apresentados os resultados das simulações do novo protocolo GDE-(k,r).

5.3.2 Avaliação do protocolo FLOOD GDE-(k,r)

Para avaliar o desempenho do protocolo FLOOD GDE-(k,r) foi utilizado o mesmo cenário utilizado nas simulações apresentadas na Seção 5.2. Um resumo completo destes parâmetros pode ser consultado na Tabela 5.9 e as características do cenário são apresentadas na Tabela 5.11.

Na Tabela 5.12 são apresentados os valores das simulações obtidos a partir da comparação do protocolo GDE-(k,r) com o protocolo FLOOD. Os valores apresentados na Tabela 5.12 demonstram que o protocolo FLOOD GDE-(2,1) obteve uma redução na latência média da rede em 75,38%, um incremento no PDR na ordem de 7,65%, e uma redução significativa no consumo de energia na ordem de 16,13%. Esses resultados comprovam a eficácia da implementação conjunta da técnica de GDE-DE e do mecanismo $(k, r) - CDS$.

Esses resultados já eram esperados uma vez que foi reunido em um mesmo protocolo de roteamento um técnica de gerenciamento de energia (i.e., GDE-DE) que objetiva a economia de energia e um mecanismo de controle de topologia que visa reduzir o número de pacotes transmitidos de forma desnecessária na rede. A união destas duas soluções em um único protocolo de roteamento *broadcast* mostrou-se vantajosa uma vez que o protocolo GDE-(2,1) obteve o melhor desempenho entre os protocolos avaliados neste Capítulo conforme pode-se observar pelos valores apresentados na Tabela 5.14.

Na Tabela 5.14 é apresentado um resumo dos resultados das simulações para os quatro protocolos avaliados neste Capítulo. O protocolo GDE-(k,r) obteve os melhores resultados nas métricas de PDR e Latência quando comparado com os protocolos FLOOD, FLOOD GDE-DE e FLOOD (2,1)-CDS.

O protocolo GDE-(2,1) só não obteve a melhor média na métrica de consumo, nesta

Tabela 5.13: Comparação entre o Protocolo FLOOD e FLOOD GDE-(2,1)

N.	FLOOD			FLOOD GDE (2,1)			Ganho FLOOD GDE (2,1) (%)		
	PDR (%)	C (J)	L (s)	PDR (%)	C (J)	L (s)	PDR	Consumo	Latência
1	74,52	0,2678	0,209	91,95	0,2294	0,041	17,43	14,32	80,38
2	80,24	0,2682	0,119	90,09	0,2266	0,051	9,85	15,50	56,97
3	86,03	0,2685	0,159	92,26	0,2243	0,048	6,23	16,48	69,93
4	83,07	0,2683	0,167	87,99	0,2219	0,051	4,92	17,29	69,37
5	87,95	0,2687	0,163	91,01	0,2222	0,055	3,06	17,30	66,28
6	83,70	0,2684	0,567	92,65	0,2212	0,054	8,95	17,59	90,42
7	81,69	0,2682	0,204	92,03	0,2323	0,036	10,34	13,40	82,39
8	85,49	0,2685	0,252	89,93	0,2250	0,045	4,44	16,19	82,35
9	86,02	0,2686	0,170	89,73	0,2298	0,043	3,71	14,42	74,59
10	86,27	0,2686	0,306	93,88	0,2180	0,058	7,61	18,82	81,15
Média	83,50	0,2684	0,232	91,15	0,2251	0,048	7,65	16,13	75,38
D. P.	3,93	0,00	0,13	1,73	0,00	0,01	4,29	1,71	9,83

métrica o vencedor foi o protocolo FLOOD GDE-DE com uma redução de 30,17% em relação ao consumo do protocolo FLOOD. No entanto, se for analisado que o protocolo FLOOD GDE-(2,1) possui um PDR de 91,95% (superior em 7,56 pontos percentuais em relação ao protocolo FLOOD GDE-DE) associado a redução de 16,13% no consumo de energia (veja Tabela 5.13) pode-se afirmar que o protocolo GDE-(2,1) obteve o melhor desempenho geral.

O melhor desempenho geral justifica-se pois o protocolo GDE-(2,1) conseguiu entregar mais pacotes (i.e., PDR = 91,95%) que todos os demais protocolos com a menor latência média (i.e., L = 0,048 s) e com um consumo reduzido de energia (i.e., C = 0,2251 J).

Tabela 5.14: Resumo dos resultados de simulação

Métrica/Protocolo	FLOOD	FLOOD GDE-DE	FLOOD (k, r)	FLOOD GDE-(k, r)
PDR (%)	83,50	84,39	90,94	91,95
Consumo (J)	0,2684	0,1874	0,2657	0,2251
Latência (s)	0,232	0,344	0,051	0,048

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Uma Rede de Sensores Sem Fio é formada por sensores que possuem sérias restrições de energia por serem alimentados por baterias, as quais, em virtude da natureza das aplicações, não podem ser facilmente substituídas. Isto implica em fortes restrições no consumo de energia, tornando indispensáveis a utilização de componentes de baixo consumo e de protocolos eficientes em energia.

A avaliação dos protocolos utilizados no ambiente das RSSFs é freqüentemente realizado a partir de simuladores de redes. Os simuladores são ferramentas úteis na avaliação dos protocolos, principalmente porque substituem os experimentos físicos que possuem alto custo de implementação e gerenciamento. A utilização dos simuladores pressupõe uma série de simplificações. Uma delas, freqüentemente utilizada, é a adoção de um modelo simples de descarga de energia (i.e., modelo linear) que, entre outros problemas, não leva em consideração o efeito de recuperação da capacidade da bateria. Essa abordagem pode ocasionar interpretações equivocadas na avaliação do desempenho dos protocolos, especialmente naqueles que levam em conta o tempo de vida da rede.

Esse equívoco aumenta quando em conjunto com a adoção de um modelo simples de descarga de bateria, ignoram-se os valores referentes ao *Switching Energy* (SE). Geralmente, o SE é desprezado objetivando a simplificação da simulação. Entretanto, em virtude das severas restrições de energia das RSSF é de fundamental importância a análise de todos os parâmetros que possam influenciar no tempo de vida da rede.

A utilização de técnicas de gerenciamento de energia e de controle de topologia podem, além de resultar em economia de energia, possibilitar a recuperação da capacidade da bateria dos nós sensores. No entanto, sua avaliação somente pode ser realizada com sucesso utilizando um simulador que incorpore um modelo preciso de descarga de bateria (i.e., considere o efeito de recuperação).

Neste trabalho, utilizou-se uma versão modificada do simulador de redes NS-2 em todo o processo de desenvolvimento e avaliação de duas novas técnicas de GDE e de

um mecanismo original de controle de topologia. As modificações do NS-2 baseiam-se na incorporação ao modelo de energia do simulador o modelo de descarga de bateria de Rakhmatov-Vrudhula [78]. Adicionalmente, foi estendido o modelo de energia do NS-2 para possibilitar a contabilização do *Switching Energy*(SE). Originalmente, o NS-2 leva em consideração apenas o modelo de descarga linear de bateria e não realiza a computação da energia envolvida nas trocas de modos de operação (i.e., SE).

As alterações realizadas no simulador NS-2 apresentaram a vantagem de capturar o comportamento não linear da bateria, permitindo um estudo mais realista das RSSFs. Portanto, foi possível verificar a eficácia das técnicas de GDE propostas, o que não seria possível com a utilização de um modelo mais simples de bateria, tal como o modelo linear.

Entretanto, o ganho em qualidade teve como consequência um elevado custo computacional para simular a descarga da bateria de um nó sensor. A busca por melhorias no desempenho computacional do modelo de Rakhmatov-Vrudhula é necessária e deverá ser realizada em trabalhos futuros. Entretanto, a busca por um modelo de bateria equivalente, que tenha um melhor desempenho computacional, poderá ser uma outra alternativa.

Para melhor compreender o impacto da utilização de um modelo de descarga de bateria preciso, realizou-se um estudo de caso onde foram avaliadas três variantes de um novo protocolo de roteamento *broadcast*. Estas variantes foram desenvolvidas a partir da aplicação e adequação da técnica de GDE-DE [19] e do mecanismo $(k, r) - CDS$ [27] ao protocolo FLOOD [38].

Resultados de simulações evidenciam que os protocolos que utilizaram as técnicas de GDE propostas obtiveram uma significativa recuperação na capacidade da bateria para todos os cenários simulados. Como esperado, ocorreu um pequeno aumento na latência média dos pacotes em determinados cenários, mas mesmo nestes cenários obteve-se um acréscimo na taxa de entrega de pacotes (i.e., PDR), o que justifica, em parte, o aumento da latência média dos pacotes.

Diferente de outras abordagens, para as técnicas de GDE introduzidas neste trabalho a economia de energia não é o único foco. Busca-se também a *recuperação na capacidade da bateria* por meio de repousos curtos ao longo do tempo de atividade da rede. Ao invés de aplicar a estratégia de desligamento por um longo período de tempo, optou-se por distribuí-los durante os ciclos de trabalho do nó sensor. Assim, busca-se evitar que desligamentos prolongados influenciem negativamente na qualidade de serviço da aplicação.

Como trabalhos futuros, pretende-se avaliar a aplicação das técnicas de GDE introduzidas em protocolos mais complexos (e.g., protocolos de enlace de dados). Espera-se obter um ganho efetivo na capacidade da bateria ao mesmo tempo que se torna possível controlar o tempo de desligamento e a frequência deste. Com isso, levanta-se um comparativo

interessante entre ganho de energia e o impacto na latência da rede.

Neste trabalho também foi apresentada a primeira solução centralizada e distribuída para computação de *backbones* com múltipla dominação e dominação em distância. Esta solução, denominada mecanismo $(k, r) - CDS$, é derivada da teoria dos grafos podendo ser utilizada para computar *backbones* em qualquer tipo de rede. O principal diferencial do mecanismo $(k, r) - CDS$ em relação aos outros mecanismo que computam *backbones* é que o $(k, r) - CDS$ foi desenvolvido para oferecer um grau variável de redundância e confiabilidade, possibilitando sua utilização por aplicações que exigem diferentes níveis de confiabilidade na coleta dos dados e latência reduzida.

A partir da análise dos resultados de simulações concluiu-se que a partir da aplicação do mecanismo $(k, r) - CDS$ aos protocolos avaliados ocorreu uma significativa redução na latência média da rede e foi mantida a taxa de entrega de pacotes. A partir da combinação do mecanismo $(k, r) - CDS$ com as técnicas de GDE foi obtida uma significativa melhora em todas as métricas avaliadas. Ou seja, os resultados das simulações evidenciam que é possível economizar energia, reduzir simultaneamente a latência da rede e aumentar a taxa de entrega de pacotes.

A economia de energia é obtida pela aplicação conjunta de ambas soluções, ou seja a técnica de GDE obtém uma recuperação na capacidade da bateria a partir do repouso do rádio após as transmissões (explorando o efeito de relaxação da bateria) e o mecanismo $(k, r) - CDS$ obtém economia de energia pela redução de transmissões inúteis (apenas os membros que compõem o *backbone* realizam o *re-broadcast*). A latência e o aumento na taxa de entrega de pacotes também são influenciadas diretamente pela redução no número de mensagens que trafegam na rede.

Como trabalhos futuros pretende-se estender o mecanismo $(k, r) - CDS$ em dois pontos. O primeiro é implementar uma estratégia de rodízio dos membros que compõem o *backbone* objetivando o correto balanceamento no consumo de energia dos nós sensores. Na implementação utilizada neste trabalho foi dado ênfase apenas a economia média de energia da rede não se preocupando com o correto rodízio dos membros que compõem o *backbone* conforme, originalmente, propõe o mecanismo $(k, r) - CDS$. A segunda extensão proposta para o mecanismo $(k, r) - CDS$ é a aplicação de alguma técnica de poda (i.e., *pruning*) na eleição dos membros do *backbone*. Essa estratégia permitirá uma redução no número de nós que compõem o *backbone* e uma conseqüente redução no consumo de energia e na latência média da rede.

Referências Bibliográficas

- [1] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, “Energy management for battery-powered embedded systems,” *Trans. on Embedded Computing Sys.*, vol. 2, no. 3, pp. 277–324, 2003.
- [2] F. Salvadori, M. Campos, R. F. de Camargo, C. Gehrke, C. Rech, P. S. Sausen, M. A. Spohn, and A. Oliveira, “Monitoring and Diagnosis in Industrial Systems Using Wireless Sensor Networks,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP)*, 2007, pp. 1–6.
- [3] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: A survey,” in *Computer Networks Journal Vol.4*. New York, NY, USA: Elsevier, Mar 2002, pp. 393–422.
- [4] R. Iyer and L. Kleinrock, “QoS Control for Sensor Networks,” in *(IEEE International Conference Communications (ICC))*, 2003, pp. 517–521.
- [5] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser, and M. Turon, “Wireless sensor networks for structural health monitoring,” in *SenSys '06: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*. New York, NY, USA: ACM Press, 2006, pp. 427–428.
- [6] M.-H. Jin, R.-G. Lee, C.-Y. Kao, Y.-R. Wu, D. F. H. Wu, T.-P. Dong, and K.-T. Huang, “Sensor network design and implementation for health telecare and diagnosis assistance applications,” in *ICPADS '05: Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems - Workshops (ICPADS'05)*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005, pp. 407–411.
- [7] A. P. R. da Silva, M. H. T. Martins, B. P. S. Rocha, A. A. F. Loureiro, L. B. Ruiz, and H. C. Wong, “Decentralized intrusion detection in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Quality of service & security in wireless and mobile networks*. New York, NY, USA: ACM Press, 2005, pp. 16–23.

- [8] A. Arora, P. Dutta, S. Bapat, V. Kulathumani, H. Zhang, V. Naik, V. Mittal, H. Cao, M. Demirbas, M. Gouda, Y. Choi, T. Herman, S. Kulkarni, U. Arumugam, M. Nesterenko, A. Vora, and M. Miyashita, “A line in the sand: a wireless sensor network for target detection, classification, and tracking,” *Comput. Networks*, vol. 46, no. 5, pp. 605–634, 2004.
- [9] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao, “Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology,” *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 31, no. 2 supplement, pp. 20–41, 2001.
- [10] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, “Wireless sensor networks for habitat monitoring,” in *WSNA '02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*. New York, NY, USA: ACM Press, 2002, pp. 88–97.
- [11] L. Yu, N. Wang, and X. Meng, “Real-time forest fire detection with wireless sensor networks,” in *Wireless Communications, networking and Mobile Computing*. IEEE Computer Society, 2005, pp. 1214–1217.
- [12] R. Szewczyk, E. Osterweil, J. Polastre, M. Hamilton, A. M. Mainwaring, and D. Estrin, “Habitat monitoring with sensor networks.” *Commun. ACM*, vol. 47, no. 6, pp. 34–40, 2004. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/cacm/cacm47.html#SzewczykOPHME04>
- [13] National Science Foundation, “Report of the National Science Foundation Workshop on Fundamental Research in Networking,” Tech. Rep., 2003. [Online]. Available: <http://www.cs.virginia.edu/~jorg/workshop1/NSF-NetWorkshop-2003.pdf>
- [14] A. A. F. Loureiro, J. M. S. Nogueira, L. B. Ruiz, R. A. Mini, E. F. Nakamura, and C. M. S. Figueiredo, “Wireless sensors networks (in portuguese),” in *Proceedings of the 21st Brazilian Symposium on Computer Networks*. Natal, RN, Brazil: SBRC, May 2003, pp. 179–226, tutorial.
- [15] M. J. P. L. Z. Gilbert Chen, Joel Branch and B. K. Szymanski, *Advances in Pervasive Computing and networking*. Springer, 2004, ch. SENSE: A wireless sensor Network Simulator, pp. 249–267.
- [16] Crossbow, “Crossbow technology inc. data sheet:,” <http://www.xbow.com>, 2006.
- [17] J. R. B. Sousa, P. S. Sausen, A. Perkusich, and A. M. N. Lima, “Modelagem do Consumo de Energia de um Nó Sensor utilizando Redes de Petri Híbridias Diferenciais,”

- in *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática - CBA*. Sociedade Brasileira de Automação, 2006, pp. 1109–1114.
- [18] P. S. Sausen, J. R. B. Sousa, M. A. Spohn, A. Perkusich, and A. M. N. Lima, “Dynamic Power Management with Scheduled Switching Modes in Wireless Sensor Networks,” *Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and telecommunication Systems (MASCOTS)*, pp. 1–8, 2007.
- [19] —, “Exploring the Switching Energy Effect in a Dynamic Power Management Technique for Wireless Sensor Networks,” in *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society(IECON)*, Taipei, Taiwan, November 2007, pp. 2260–2265.
- [20] A. G. Ruzzeli, G. M. P. O’Hare, T. Tynan, P. C. , and J. M. Havingat, “Protocol assessment issues in low duty cycle sensor networks: The switching energy,” in *SUTC ’06: Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks*, 2006, pp. 136–143.
- [21] C. Ma, Y. Yang, and Z. Zhang, “Constructing battery-aware virtual backbones in sensor networks,” in *International Conference on Parallel Processing - ICPP 2005*. IEEE Computer Society, 2005, pp. 203–210.
- [22] R. Kalidindi, R. Ray, L. and Kannan, and S. S. Iyengar, “Distributed Energy-Aware MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” in *International Conference on Wireless Networks*, 2003, pp. 1–5.
- [23] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys)*. New York, NY, USA: ACM Press, 2003, pp. 181–192.
- [24] R. C. Luo, L. C. Tu, and O. Chen, “An Efficient Dynamic Power Management Policy on Sensor Network,” *Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications - AINA ’05, IEEE Computer Society*, pp. 341–344, 2005.
- [25] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. B. Srivastava, “Energy-aware wireless microsensor networks,” *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 40–50, March 2002.

- [26] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” in *Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, 2002, pp. 1567–1576.
- [27] P. S. Sausen, M. A. Spohn, A. M. N. Lima, and A. Perkusich, “Bounded-Distance Multi-Coverage Backbones in Wireless Sensor Networks,” in *The 22nd Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC)*. ACM/IEEE, 2007, pp. 206–208.
- [28] P. S. Sausen, M. A. Spohn, and A. Perkusich, “Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado Aplicado ao Blind Flooding em Redes de Sensores,” in *Anais do 26 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBRC, Maio 2008, pp. 763–776.
- [29] J. R. B. Sousa, P. S. Sausen, A. M. N. Lima, and A. Perkusich, “Redes de petri híbridas diferenciais: Aplicação na modelagem e no gerenciamento dinâmico de energia de redes de sensores sem fio,” *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, vol. 18, no. 3, pp. 278–291, 2007.
- [30] P. S. Sausen, M. A. Spohn, and F. Salvadori, “Simulation of Blind Flooding over Wireless Sensor Networks Based on a Realistic Battery Model,” in *The Seventh International Conference on Networking - ICN*. Cancun: IARIA, April 2008, pp. 545–550.
- [31] P. S. Sausen, M. A. Spohn, and A. Perkusich, “Broadcast Routing in Wireless Sensor Networks with Dynamic Power Management,” in *Thirteenth IEEE Symposium on Computers and Communications - ISCC’08*. Marrakech, Morocco: IEEE, June 2008.
- [32] P. S. Sausen, P. F. R. Neto, A. Perkusich, A. M. N. Lima, and F. Salvadori, “Modelling, Verification and Validation of the IEEE 802.15.4 for wireless Networks,” in *Modelling, Simulation, Verification and Validation of Enterprise Information Systems - MSVVEIS*. Miami - USA: INSTICC, May 2005, pp. 49–57.
- [33] P. S. Sausen, M. Spohn, F. Salvadori, A. Oliveira, E. P. Mauricio de Campos, and R. Stieder, “Sistema Baseado em Software Livre para Automação de Subestações Utilizando Redes de Sensores Inteligentes,” in *VII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos - SIMPASE’07*, Salvador, Brasil, 2007, pp. 11–22.
- [34] P. S. Sausen and J. S. R. Neto, “The State of Art the Standard IEEE 1451(In Portuguese),” in *I Workshop of the Net of Instrumentation and Control*, Natal, Brazil, 2004, pp. 1–11.

- [35] P. S. Sausen, J. S. R. Neto, A. Perkusich, P. F. R. Neto, and A. M. N. Lima, “Modelagem e Análise do Mecanismo CSMA-CA Aplicado às Redes de Sensores Sem Fio,” in *II Workshop da Rede de Instrumentação e Controle*, Rio de Janeiro, Brasil, 2005, pp. 21–32.
- [36] P. S. Sausen, J. S. R. Neto, A. M. N. Lima, and A. Perkusich, “O estado da Arte do Padrão IEEE 1451 Aplicado ‘as Redes de Sensores,” in *VI Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos - SIMPASE’05*, São Paulo, Brasil, 2005, pp. 87–94.
- [37] P. S. Sausen, M. A. Spohn, A. Perkusich, J. R. Brito, and A. M. N. Lima, *Mobile Telephones: Networks, Applications, and Performance*. Nova Science Publishers, 2008, ch. Simulation of Mobile Ad Hoc Networks Based on a Realistic Battery Model, pp. 211–229.
- [38] T. Kunz, “Multicasting in mobile ad-hoc networks: Achieving high packet delivery ratios,” in *The Proceeding of the Annual Conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative Research*, 2003, pp. 1–15.
- [39] E. Callaway, *Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols*. New York: CRC Press LLC, 2003.
- [40] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, “Next century challenges: Mobile networking for ”smart dust”,” in *International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, 1999, pp. 271–278. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/kahn99next.html
- [41] D. Chen and P. K. Varshney, “QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey.” in *International Conference on Wireless Networks*, H. R. Arabnia, L. T. Yang, and C.-H. Yeh, Eds. Las Vegas, USA: CSREA Press, 2004, pp. 227–233.
- [42] M. Younis, M. Youssef, and K. Arisha, “Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks,” in *Proc. of the 10 IEEE/ACM Sym. on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecom Systems (MASCOT)*, October 2002, pp. 78–87.
- [43] L. B. Ruiz, L. H. A. Correia, L. F. M. Vieira, D. F. Macedo, E. F. Nakamura, C. M. S. Figueiredo, M. A. M. Vieira, E. H. B. Maia, D. Câmara, A. A. F. Loureiro, J. M. S. Nogueira, D. C. da Silva Jr., and A. O. Fernandes, “Architectures for wireless sensor networks (in portuguese),” in *Proceedings of the 22nd Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC’04)*. Gramado, RS, Brazil: SBC, May 2004, pp. 167–218, tutorial. ISBN: 85-88442-82-5.

- [44] L. B. Ruiz, “MANNA: a management architecture for wireless sensor networks,” Ph.D. dissertation, Computer Science Department of the Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil, December 2003.
- [45] K. M. Alzoubi, P.-J. Wan, and O. Frieder, “Distributed Heuristics for connected dominating sets in wireless ad hoc networks,” *Journal of Communications and Networks*, vol. 4, no. 1, pp. 22–29, 2002.
- [46] B. Chen, K. Jamienson, H. Balakrishnan, and R. Morris, “SPAN: an energy-efficient coordination algorithms for topology maintenance in ad hoc wireless networks,” *ACM Wireless Networks Journal*, vol. 8, no. 5, pp. 481–494, Sep 2002.
- [47] L. Bao and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “Topology management in ad hoc networks,” in *MobiHoc*. New York, NY, USA: ACM Press, 2003, pp. 129–140.
- [48] V. Paruchuri, A. Durresi, M. Durresi, and L. Barolli, “Routing through Backbone Structures in Sensor Networks.” in *ICPADS*, vol. 2, Fuduoka, Japani, July 2005, pp. 397–401.
- [49] F. Dai and J. Wu, “On constructing k-connected k-dominating set in wireless ad hoc and sensor networks,” *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 66, no. 7, pp. 947–958, 2006.
- [50] J. Blum, M. Ding, A. Thaeler, and X. Cheng, *Handbook of Combinatorial Optimization*. Kluwer Academic Publishers, 2004, ch. Connect Dominating Set in Sensor Networks and MANETs.
- [51] B. Clark, C. Colbourn, and D. Johnson, “Unit disk graphs,” *Discrete Math*, vol. 86, pp. 165–177, 1990.
- [52] D. Simplot-Ryl, I. Stojmenovic, and J. Wu, *Handbook of Sensor Networks*. John Wiley & Sons, New York, 2005, ch. Energy Efficient Backbone Construction, Broadcasting, and Area Coverage in Sensor Networks.
- [53] T. W. Haynes, S. T. Hedetniemi, and P. J. Slater, *Fundamentals of Domination in Graphs*. Marcel Dekker, Inc, 1998, ch. Connect Dominating Set in Sensor Networks and MANETs.
- [54] M. Garey and D. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to NP-Completeness*. Freeman, 1978.
- [55] B. Das and V. Bharghavan, “Routing in Ad-Hoc Networks Using Minimum Connected Dominating Sets,” *ICC*, pp. 376–380, June 1997.

- [56] Y. P. Chen and A. L. Liestman, “Approximating minimum size weakly-connected dominating sets for clustering mobile ad hoc networks,” in *MobiHoc*. New York, NY, USA: ACM Press, 2002, pp. 165–172.
- [57] M. Bahramgiri, M. Hajiaghayi, and V. Mirrokni, “Fault-tolerant and 3-Dimensional Distributed Topology Control Algorithms in Wireless Multi-hop Networks,” In *ICCCN02*, pp. 392–397, 2002.
- [58] P. Basu and J. Redi, “Movement Control Algorithms for Realization of fault Tolerant Ad Hoc Robot Networks,” In *IEEE Network*, vol. 18, pp. 36–44, July-August 2004.
- [59] N. Li and J. C. Hou, “FLSS: a Fault-Tolerant Topology Control Algorithm for Wireless Networks,” in *MobiCom*. New York, NY, USA: ACM Press, 2004, pp. 275–286.
- [60] Y. Chen, A. Liestman, and J. Liu, “Clustering Algorithms for Ad Hoc Wireless Networks,” *Ad Hoc and Sensor Networks*, 2004.
- [61] P. Santi, *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. John Wiley & Sons, September 2005.
- [62] M. Li and B. Yang, “A Survey on Topology issues in Wireless Sensor Network.” in *ICWN*, H. R. Arabnia, Ed. CSREA Press, 2006, pp. 503–510.
- [63] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang, “PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks,” in *3rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, May 2003, pp. 1–10. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/ye03peas.html
- [64] H. zhang and J. Hou, “Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks,” *International Journal of Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, vol. 1, pp. 89–124, 2005.
- [65] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill, “Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks,” in *SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. New York, NY, USA: ACM Press, 2003, pp. 28–39.
- [66] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. Sreenivas, and P. Kumar, “Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the compow protocol,” in *European Wireless Conference*, 2002, pp. 42–51.

- [67] J. Pan, Y. T. Hou, L. Cai, Y. Shi, and S. X. Shen, “Topology control for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)*. New York, NY, USA: ACM Press, 2003, pp. 286–299.
- [68] V. Rodoplu and T. Meng, “Minimum energy mobile wireless networks,” in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 3, Atlanta, EUA, 1998, pp. 1633–1639.
- [69] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris, “Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks,” in *Mobile Computing and Networking*, Rome, Italy, July 2001, pp. 85–96.
- [70] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, “Geography-informed energy conservation for ad hoc routing,” in *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)*. New York, NY, USA: ACM Press, 2001, pp. 70–84.
- [71] R. Zheng, J. C. Hou, and L. Sha, “Asynchronous wakeup for ad hoc networks,” in *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing (MobiHoc)*. New York, NY, USA: ACM Press, 2003, pp. 35–45.
- [72] M. A. Spohn, “Using dominating sets to improve the performance of mobile ad hoc networks,” Ph.D. dissertation, University of California Santa Cruz, 2005.
- [73] T. F. F. Marc Doyle and J. Newman, “Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell,” *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 140, no. 6, pp. 1526–1533, 1993.
- [74] K. Lahiri, A. Raghunathan, S. Dey, and D. Panigrahi, “Battery-driven system design: a new frontier in low power design,” *Proceedings of VLSID’02*, pp. 1–7, 2002.
- [75] D. Panigrahi, C. Chiasserini, S. Dey, R. Rao, A. Raghunathan, and K. Lahiri, “Battery Life Estimation of Mobile Embedded Systems,” in *14th International Conference on VLSI Design (VLSID)*, 2001, pp. 57–63.
- [76] J. Newman, K. E. Thomas, H. Hafezi, and D. R. Wheeler, “Modeling of lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, 2003.
- [77] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, “Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance,” *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2006.

- [78] D. Rakhmatov and S. Vruthula, “An Analytical High-Level Battery Model for Use in Energy Management of Portable Electronic Systems,” *Proceedings of ICCAD*, pp. 1–6, 2001.
- [79] M. Handy and D. Timmermann, “Simulation of Mobile Wireless Networks with Accurate Modelling of Non-Linear Battery Effects,” *Proceedings of International Conference on Applied Simulation and Modelling, Marbella, Spain*, pp. 532–537, 2003.
- [80] Panasonic, “Panasonic industrial alkaline batteries data sheet;” <http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/chem/alk/index.html>, 2006.
- [81] R. M. Passos, C. J. N. Coelho Jr., A. A. F. Loureiro, and R. A. F. Mini, “Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: An Application-driven Approach,” *Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services - WONS'05, IEEE Computer Society*, pp. 109–118, 2005.
- [82] T. Murata, “Petri Nets: Properties, analysis and applications,” *Proc. of IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, 1989.
- [83] J. R. B. Sousa, P. S. Sausen, A. Perkusich, and A. M. N. Lima, “Redes de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação na Modelagem e Análise do Gerenciamento Dinâmico de Energia em Redes de Sensores Sem Fio,” *Revista Controle e Automação da Sociedade Brasileira de Automática*, vol. 18, no. 3, pp. 278–291, 2007.
- [84] J. R. B. Sousa, “Verificação de Propriedades de Sistemas Híbridos Modelados com Redes de Petri,” Agosto, 2005, relatório Técnico - Universidade Federal de Campina Grande.
- [85] J. R. B. Sousa, P. S. Sausen, A. Perkusich, and A. M. N. Lima, “Redes de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação na Modelagem do Consumo de Energia de um Nó Sensor Sem Fio,” in *Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI*. Sociedade Brasileira de Automação, 2005, pp. 1–8.
- [86] Y. Wu, W. Wu, J. Zeng, G. Sun, H. Su, and J. Chu, “Modeling and simulation of hybrid dynamical systems with generalized differential petri nets,” *IEEE-ISIC, Vancouver, Canada*, pp. 789–794, October 2002.
- [87] R. Champagnat, “Supervision des systèmes discontinus: Definition d’un modèle hybride et pilotage en temps réel,” Ph.D. dissertation, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1998.

- [88] M. S. Branicky, “Studies in *Hybrid Systems: Modeling, Analysis, and Control*,” Ph.D. dissertation, MIT, Cambridge, USA, June 1995.
- [89] A. Sinha and A. Chandrakasan, “Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Design Test of Computer*, pp. 62–74, 2001.
- [90] V. Srinivasan, P. Nuggehalli, and R. Rao, “Design of optimal energy aware protocols for wireless sensor networks,” in *Vehicular Technology Conference (VTC’01)*. IEEE, 2001, pp. 2494–2498.
- [91] L. Benini, A. Bogliolo, and G. D. Micheli, “A Survey of Design Techniques for System-Level Dynamic Power Management,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) System*, vol. 8, no. 3, pp. 299–316, 2000.
- [92] C. Ma and Y. Yang, “Battery-aware routing for streaming data transmissions in wireless sensor networks,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 11, no. 5, pp. 757–767, 2006.
- [93] —, “Battery-aware routing for streaming data transmissions in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Broadband Networks*, 2005, pp. 464–473.
- [94] S. Park and M. B. Srivastava, “Dynamic battery state aware approaches for improving battery utilization,” *Proceedings of CASES ’02*, pp. 225–231, 2002.
- [95] R. M. Inc., “Rf monolithics, inc.:tr1000 datasheet,” <http://www.rfm.com>, 2007.
- [96] Chipcon, “Chipcon products: Cc1000 datasheet,” <http://www.chipcon.com>, 2007.
- [97] F. Jin, H. Choi, and S. Subramaniam, “Hardware-aware Communication Protocols in Low Energy Wireless Sensor Networks,” *IEEE - MILCOM 2003*, vol. 1, no. 1, pp. 676–681, 2003.
- [98] CPNTools, “Cpntools,” <http://www.daimi.au.dk/CPNTools/>, 2008.
- [99] Matlab, “The mathworks, inc,” <http://www.mathworks.com/>, 2008.
- [100] PC/104, “Pc/104 consortium,” <http://www.pc104.org/>, 2008.
- [101] S. Guha and S. Khuller, “Approximation Algorithms for Connected Dominating Sets,” *Algorithmica*, vol. 20, no. 4, pp. 374–387, April 1998, iSSN 0178-4617.
- [102] M. A. Spohn and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “Bounded-distance multi-clusterhead formation in wireless ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, vol. 5, no. 4, pp. 504–530, 2007.

- [103] B. Clark, C. Colbourn, and D. Johnson, “Unit disk graphs,” *Discrete Math*, vol. 86, pp. 165–177, 1990.
- [104] J.Wu and F. Dai, “Broadcasting in ad hoc networks based on self-pruning,” *IEEE INFOCOM*, pp. 2240–2250, March 2003.
- [105] F. Dai and J.Wu, “Distributed dominant pruning in ad hoc networks,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, pp. 353–357, May 2003.
- [106] NS-2, “The network simulator - ns-2,” <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2007.
- [107] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, “The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network,” in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)*. New York, NY, USA: ACM, 1999, pp. 151–162.

Apêndice A

Lista das Publicações Relacionadas com a Tese

A.1 Eventos Internacionais

1. P. S. Sausen, M. A. Spohn, and F. Salvadori, *Simulation of Blind Flooding over Wireless Sensor Networks Based on a Realistic Battery Model*, in The Seventh International Conference on Networking(ICN), Cancun:IARIA, April 2008, pp. 545-550.
2. P. S. Sausen, M. A. Spohn, and A. Perkusich, *Broadcast Routing in Wireless Sensor Networks with Dynamic Power Management*, in Thirteenth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Marrakech, Morocco: IEEE, June 2008.
3. P. S. Sausen, M. A. Spohn, A. Perkusich, F. Salvadori and M. Campos, *Applying Dynamic Power Management with Mode Switching in Wireless Sensor Networks*, in Proceedings of the 34rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Orlando, EUA, November 2008.
4. P. S. Sausen, M. A. Spohn, and A. Perkusich, *Enhancing Blind Flooding on Wireless Sensors Networks with Dynamic Power Management and Multi-Coverage Backbones*, in Proceedings of the 34rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Orlando, EUA, November 2008.
5. P. S. Sausen, M. A. Spohn, A. M. N. Lima, and A. Perkusich, *Bounded-Distance Multi-Coverage Backbones in Wireless Sensor Networks*, in The 22nd Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC). ACM/IEEE, 2007, pp. 206-208.
6. P. S. Sausen, J. R. B. Sousa, M. A. Spohn, A. Perkusich, and A. M. N. Lima, *Dynamic Power Management with Scheduled Switching Modes in Wireless Sensor*

Networks, Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and telecommunication Systems (MASCOTS), 2007, pp. 1-8.

7. P. S. Sausen, J. R. B. Sousa, M. A. Spohn, A. Perkusich, and A. M. N. Lima, *Exploring the Switching Energy Effect in a Dynamic Power Management Technique for Wireless Sensor Networks*, in Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, Taiwan, November 2007, pp. 2260-2265.
8. F. Salvadori, M. Campos, R. F. de Camargo, C. Gehrke, C. Rech, P. S. Sausen, M. A. Spohn, and A. Oliveira, *Monitoring and Diagnosis in Industrial Systems Using Wireless Sensor Networks*, in Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP), 2007, pp. 1-6.
9. P. S. Sausen, P. F. R. Neto, A. Perkusich, A. M. N. Lima, and F. Salvadori, *Modelling, Verification and Validation of the IEEE 802.15.4 for wireless Networks*, in Modelling, Simulation, Verification and Validation of Enterprise Information Systems (MSVVEIS). Miami - USA:INSTICC, May 2005, pp. 49-57.

A.2 Eventos Nacionais

1. P. S. Sausen, M. A. Spohn, and A. Perkusich, *Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado Aplicado ao Blind Flooding em Redes de Sensores*, in Anais do 26 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBRC, Maio 2008, pp. 763-776.
2. P. S. Sausen, M. Spohn, F. Salvadori, A. Oliveira, E. P. Mauricio de Campos, and R. Stieder, *Sistema Baseado em Software Livre para Automação de Subestações Utilizando Redes de Sensores Inteligentes*, in VII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos (SIMPASE), Salvador, Brasil, 2007, pp. 11-22.
3. J. R. B. Sousa, P. S. Sausen, A. Perkusich, and A. M. N. Lima, *Modelagem do Consumo de Energia de um Nó Sensor utilizando Redes de Petri Híbridas Diferenciais*, in Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática (CBA). Sociedade Brasileira de Automação, 2006, pp. 1109-1114.
4. P. S. Sausen, J. S. R. Neto, A. Perkusich, P. F. R. Neto, and A. M. N. Lima, *Modelagem e Análise do Mecanismo CSMA-CA Aplicado às Redes de Sensores Sem Fio*, in II Workshop da Rede de Instrumentação e Controle, Rio de Janeiro, Brasil, 2005, pp. 21-32.

5. P. S. Sausen, J. S. R. Neto, A. M. N. Lima, and A. Perkusich, *O estado da Arte do Padrão IEEE 1451 Aplicado às Redes de Sensores*, in VI Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos (SIMPASE), São Paulo, Brasil, 2005, pp. 87-94.
6. P. S. Sausen and J. S. R. Neto, *The State of Art the Standard IEEE 1451 (In Portuguese)*, in I Workshop of the Net of Instrumentation and Control, Natal, Brazil, 2004, pp. 1-11.

A.3 Periódicos Nacionais

1. SOUSA, José Renato Brito, SAUSEN, P. S., LIMA, Antonio Marcus Nogueira, PERKUSICH, Angelo; *Redes de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação na Modelagem e Análise do Gerenciamento Dinâmico de Energia em Redes de Sensores Sem Fio*. Revista da SBA - Sociedade Brasileira de Automática. , v.18, p.278 - 291, 2007.

A.4 Periódicos Internacionais

1. SAUSEN, P. S., SPOHN, Marco Aurélio, PERKUSICH, Angelo; *Dynamic Power Management with Scheduled Switching Modes*; Computer Communications - Elsevier.
2. SAUSEN, P. S., SPOHN, Marco Aurélio, SALVADORI, F., CAMPOS, Mauricio de; *Monitoring in Industrial Systems Using Wireless Sensor Networks with Dynamic Power Management*; Transaction on Instrumentation and Measurement - IEEE.

A.5 Capítulo de Livro

1. SPOHN, Marco Aurélio, SAUSEN, P. S., SOUSA, José Renato Brito, PERKUSICH, Angelo, LIMA, Antonio Marcus Nogueira; *Simulation of Mobile Ad Hoc Networks Based on a Realistic Battery Model*; Mobile Telephones: Networks, Applications, and Performance, ed. Nova Science Publishers, 2008, p. 221-229.

Apêndice B

Intervalos de Recuperação

Os resultados apresentados nesta seção objetivam complementar os resultados apresentados no transcórre do texto principal. Na Tabela B.1 é apresentada a energia recuperada/gasta (em mA-ms) para os Intervalos de Recuperação (IR) variando de 8 ms até 8192 ms. Pode-se verificar que os IR acima de 128 ms passam a ter ganho que não compensa o tempo de indisponibilidade do nó sensor.

Tabela B.1: Energia recuperada/gasta (em mA-ms) para os Intervalos de Recuperação.

k	IR_k (ms)	$SE(S1)$	$E(IR_k)$	$SE(S2)$	$E(DPM)$	$\Delta\% (E(DPM))$
1	8	22.0725	91.5731	-13.7975	99.8481	—
2	16	22.0725	110.4824	-15.3337	117.2212	17.40
3	32	22.0725	126.9050	-16.1131	132.8644	13.34
4	64	22.0725	140.0290	-16.4578	145.6437	9.62
5	128	22.0725	149.9321	-16.5962	155.4084	6.70
6	256	22.0725	157.1285	-16.6485	162.5525	4.60
7	512	22.0725	162.2120	-16.6675	167.6170	3.12
8	1024	22.0725	165.6937	-16.6743	171.0919	2.07
9	2048	22.0725	167.9568	-16.6766	173.3526	1.32
10	4096	22.0725	169.2617	-16.6774	174.6568	0.75
11	8192	22.0725	169.7621	-16.6777	175.1569	0.29

Nas Tabelas B.2, B.3 e B.4 são apresentados os valores de recuperação/gasto (em mA-ms) para o Intervalos de Recuperação (IR) de 8 ms (i.e., IR_1) para todos os modelos de rádios considerados neste trabalho.

Tabela B.2: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (38,4 Kbps/FSK).

Suposição	PD	$E(IR_1)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	111.9600	-3.3736	-61.3872	-64.7608	47.1992
	2	111.9600	-3.3736	-30.0408	-33.4143	78.5456
2	1	64.5739	54.1369	-4.3573	49.7797	114.3536
	2	64.5739	54.1369	-0.9573	53.1797	117.7536
3	1	91.5731	22.0725	-29.5626	-7.4901	84.0830
	2	91.5731	22.0725	-13.7975	8.2750	99.8481

Tabela B.3: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (19.2 Kbps /OOK).

Suposição	PD	$E(IR_1)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	54.4623	3.3343	-4.3741	-1.0398	53.4225
	2	54.4623	3.3343	-2.7674	0.5669	55.0292
2	1	53.5734	4.2601	-3.4483	0.8119	54.3853
	2	53.5734	4.2601	-1.9411	2.3191	55.8925
3	1	55.1581	2.6570	-2.7710	-0.1139	55.0440
	2	55.1581	2.6570	-1.6738	0.9832	56.1413

Tabela B.4: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (115.2 Kbps/ASK).

Suposição	PD	$E(IR_1)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	54.4623	3.3343	-4.3741	-1.0398	53.4225
	2	54.4623	3.3343	-2.8522	0.4820	54.9443
2	1	53.5734	4.2601	-3.4483	0.8119	54.3853
	2	53.5734	4.2601	-2.0011	2.2590	55.8324
3	1	55.1580	2.6570	-2.7710	-0.1140	55.0440
	2	55.1580	2.6570	-1.7257	0.9313	56.0893

Na Figura B.1 são apresentados os resultados da aplicação da técnica GDE-DES utilizando um IR de 8 ms para o rádio CC1000 (veja Tabela B.2).

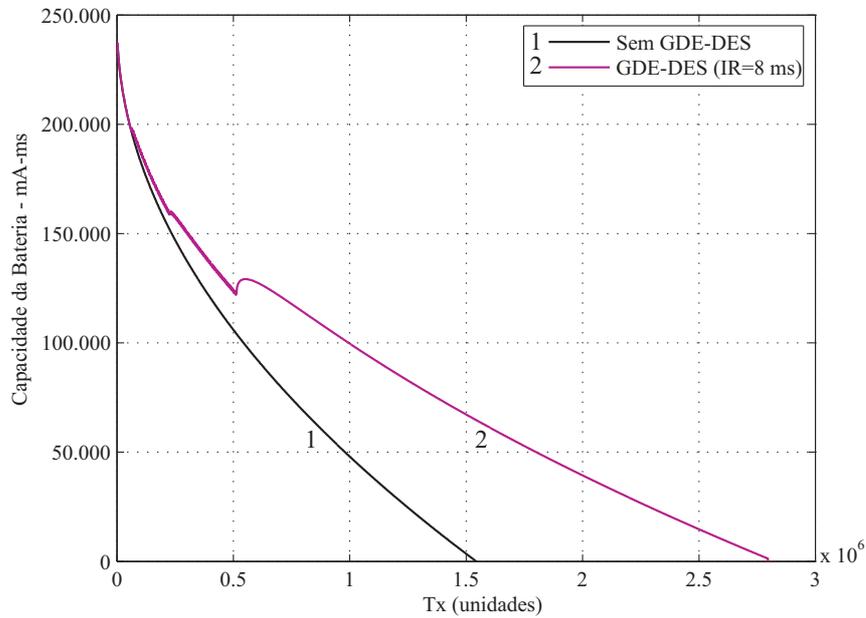


Figura B.1: Consumo da bateria para a técnica GDE-DES com IR de 8 ms

Nas Tabelas B.5, B.6 e B.7 são apresentados os valores de recuperação/gasto (em mA-ms) para o Intervalos de Recuperação (IR) de 16 ms (i.e., IR_2) para todos os modelos de rádios considerados neste trabalho.

Tabela B.5: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (38,4 Kbps/FSK).

Suposição	PD	$E(IR_2)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	132.3043	-3.3736	-63.0721	-66.4456	65.8587
	2	132.3043	-3.3736	-31.7256	-35.0992	97.2051
2	1	82.0443	54.1369	-5.7442	48.3927	130.4370
	2	82.0443	54.1369	-2.3442	51.7927	133.8370
3	1	110.4824	22.0725	-31.0988	-9.0264	101.4560
	2	110.4824	22.0725	-15.3337	6.7388	117.2212

Tabela B.6: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (19.2 Kbps /OOK).

Suposição	PD	$E(IR_2)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	63.9472	3.3343	-4.4002	-1.0659	62.8813
	2	63.9472	3.3343	-2.7975	0.5368	64.4840
2	1	63.0476	4.2601	-3.4743	0.7858	63.8334
	2	63.0476	4.2601	-1.9711	2.2890	65.3366
3	1	64.6375	2.6570	-2.7971	-0.1400	64.4975
	2	64.6375	2.6570	-1.7038	0.9532	65.5907

Tabela B.7: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (115.2 Kbps/ASK).

Suposição	PD	$E(IR_2)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	63.9472	3.3343	-4.4002	-1.0659	62.8813
	2	63.9472	3.3343	-2.8823	0.4519	64.3991
2	1	63.0476	4.2601	-3.4743	0.7858	63.8334
	2	63.0476	4.2601	-2.0311	2.2290	65.2766
3	1	64.6375	2.6570	-2.7971	-0.1400	64.4975
	2	64.6375	2.6570	-1.7558	0.9012	65.5389

Na Figura B.2 são apresentados os resultados da aplicação da técnica GDE-DES utilizando um IR de 16 ms para o rádio CC1000 (veja Tabela B.5).

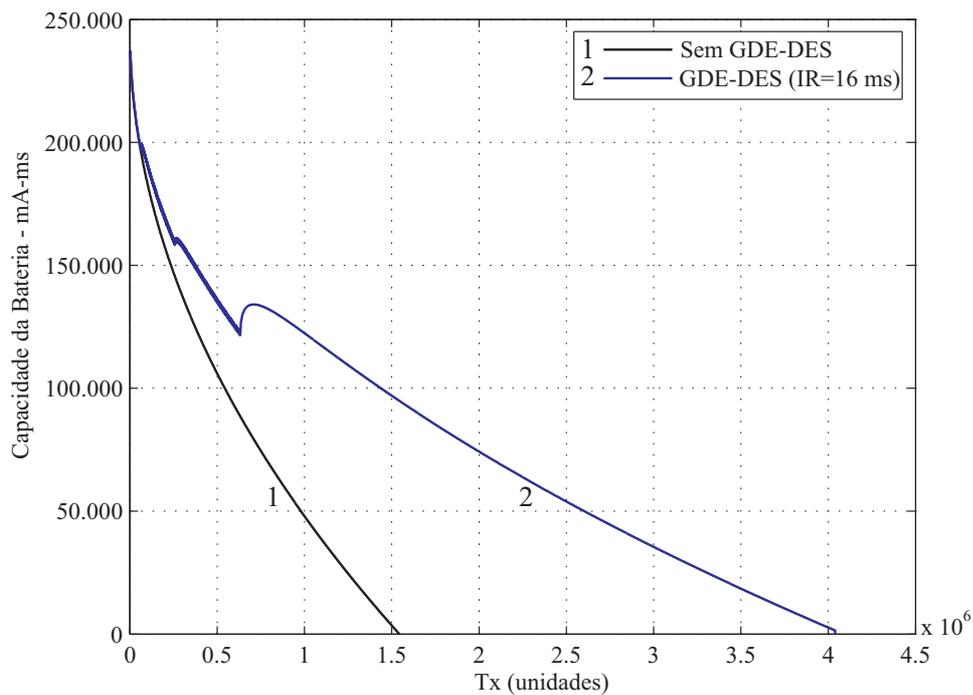


Figura B.2: Consumo da bateria para a técnica GDE-DES com IR de 16 ms.

Nas Tabelas B.8, B.9 e B.10 são apresentados os valores de recuperação/gasto (em mA-ms) para o Intervalos de Recuperação (IR) de 32 ms (i.e., IR_3) para todos os modelos de rádios considerados neste trabalho.

Tabela B.8: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (38,4 Kbps/FSK).

Suposição	PD	$E(IR_3)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	149.7713	-3.3736	-63.9092	-67.2828	82.4885
	2	149.7713	-3.3736	-32.5627	-35.9363	113.8350
2	1	97.4212	54.1369	6.4658	47.6712	145.0924
	2	97.4212	54.1369	-3.0658	51.0712	148.4924
3	1	126.9050	22.0725	-31.8782	-9.8057	117.0993
	2	126.9050	22.0725	-16.1131	5.9594	132.8644

Tabela B.9: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio CC1000 (19.2 Kbps /OOK).

Suposição	PD	$E(IR_3)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	71.9672	3.3343	-4.4125	-1.0782	70.8890
	2	71.9672	3.3343	-2.8117	0.5226	72.4898
2	1	71.0600	4.2601	-3.4866	0.7735	71.8334
	2	71.0600	4.2601	-1.9853	2.2748	73.3347
3	1	72.6538	2.6570	-2.8094	-0.1524	72.5014
	2	72.6538	2.6570	-1.7181	0.9390	73.5928

Tabela B.10: Energia recuperada/gasta (mA-ms) para o rádio TR1000 (115.2 Kbps/ASK).

Suposição	PD	$E(IR_3)$	$SE(S1)$	$SE(S2)$	$SE(S1 + S2)$	$E(GDE)$
1	1	71.9672	3.3343	-4.4125	-1.0782	70.8890
	2	71.9672	3.3343	-2.8965	0.4378	72.4050
2	1	71.0600	4.2601	-3.4866	0.7735	71.8334
	2	71.0600	4.2601	-2.0453	2.2148	73.2747
3	1	72.6538	2.6570	-2.8094	-0.1524	72.5014
	2	72.6538	2.6570	-1.7700	0.8870	73.5408

Na Figura B.3 são apresentados os resultados da aplicação da técnica GDE-DES utilizando um IR de 32 ms para o rádio CC1000 (veja Tabela B.8).

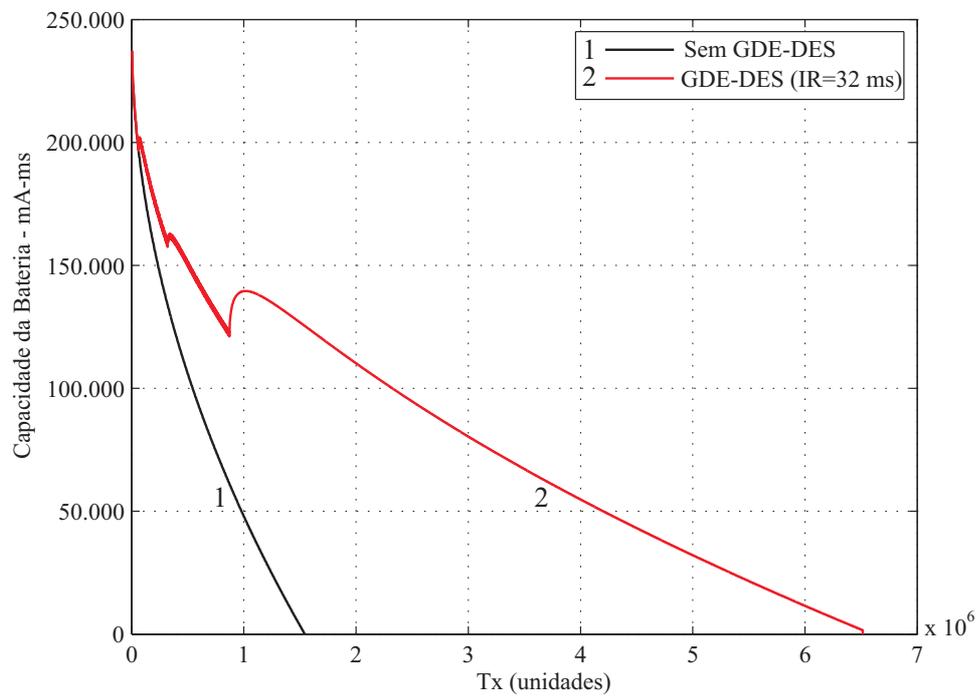


Figura B.3: Consumo da bateria para a técnica GDE-DES com IR de 32 ms.