



**Universidade Federal do Pará
Campus Castanhal
Faculdade de Computação**

Thalita Ayass de Souza

**Análise comparativa do consumo de energia em uma rede de sensores
sem fio baseada no modelo Linear e de Rakhmatov-Vrudhula de descarga
de bateria.**

**Castanhal
2018**

Thalita Ayass de Souza

Análise comparativa do consumo de energia em uma rede de sensores sem fio baseada no modelo Linear e de Rakhmatov-Vrudhula de descarga de bateria.

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

**Universidade Federal do Pará
Faculdade de Computação
Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação**

Orientador: Prof. Dr. José Jailton Ferreira Junior

**Castanhal
2018**

Dedicatória

À minha mãe e tia, pelo incentivo e apoio incondicional (Rosiris e Dayse).

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças e me sustentado até aqui.

Em especial, não poderia deixar de expressar minha mais sincera gratidão por duas pessoas de fundamental valor na minha vida, responsáveis por tudo que sou, tudo que aprendi de mais importante sobre caráter, respeito, honestidade e perseverança... Obrigada, minha amada mãe Rosiris! Obrigada, minha querida tia Dayse!

Ao meu orientador José Jailton, por todo aprendizado, disponibilidade e grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas da FACOMP e corpo docente, pelos momentos de descontração e compartilhamento do conhecimento.

Enfim, quero deixar aqui minha gratidão a todos que fizeram parte, de forma direta ou indireta, desta longa jornada de 5 anos...

*Não temas, porque eu sou contigo; não te assombres, porque eu sou teu Deus;
eu te esforço e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça.*

(Isaías 41:10)

Resumo

O presente trabalho faz uma abordagem sobre redes de sensores sem fio, com ênfase na análise do consumo de energia dos dispositivos que compõe a rede. Para isso, o estudo comparou dois modelos analíticos de descarga de bateria, sendo eles: o modelo Linear e o modelo realístico de Rakhmatov-Vrudhula. Os cenários de redes foram simulados por meio da ferramenta Network Simulator 2 - NS-2, que por padrão, utiliza o modelo Linear para descarga de bateria dos dispositivos. Entretanto, este modelo convencional pode não apresentar resultados acurados, uma vez que não considera os efeitos não-lineares no processo de descarga da bateria. Diante disso, este modelo foi confrontado ao modelo de Rakhmatov-Vrudhula, que evidenciou resultados mais precisos e proporcionou uma significativa redução de consumo de energia dos nós sensores, por contemplar o efeito de relaxação e o efeito da taxa de capacidade, que acontecem na descarga de uma bateria.

Palavras-Chaves: rede de sensores sem fio, consumo de energia, bateria, modelo Linear, modelo de Rakhmatov-Vrudhula.

Abstract

The present work takes an approach on wireless sensor networks, with emphasis on the analysis of the energy consumption of the devices that make up the network. For this, the study compared two analytical models of battery discharge, being: the Linear model and the realistic model of Rakhmatov-Vrudhula. The network scenarios were simulated using the Network Simulator 2 - NS-2 tool, which by default uses the Linear model for battery discharge of the devices. However, this conventional model may not present accurate results, since it does not consider the non-linear effects in the battery discharge process. Therefore, this model was compared to the Rakhmatov-Vrudhula model, which showed results that are more precise and provided a significant reduction in the energy consumption of the sensor nodes, considering the relaxation effect and the effect of the capacity rate, which occur in the discharge battery.

Key words: wireless sensor network, power consumption, battery, Linear model, Rakhmatov-Vrudhula model.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Exemplo de monitoramento ambiental com RSSF.....	15
Figura 2.1: Ambiente monitorado por uma Rede de Sensor Sem Fio.....	19
Figura 2.2: Arquitetura de um nó sensor.....	24
Figura 2.3: Identificação de Rotas no AODV.....	28
Figura 2.4: Estados de Descarga da Bateria.....	31
Figura 4.1: Cenário com 20 nós aleatoriamente distribuídos.....	39
Figura 4.2: Cenário em <i>grid</i> com 20 nós.....	40
Figura 4.3: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 20 nós.....	43
Figura 4.4: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 30 nós.....	45
Figura 4.5: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 40 nós.....	47
Figura 4.6: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 50 nós.....	49
Figura 4.7: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 20 nós em <i>Grid</i>	51
Figura 4.8: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 30 nós em <i>Grid</i>	53
Figura 4.9: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 40 nós em <i>Grid</i>	55

Figura 4.10: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 50 nós em <i>Grid</i>	57
Figura 4.11: Consumo de energia dos 5 nós ativos no ambiente aleatório com 20 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).....	61
Figura 4.12: Consumo de energia dos 12 nós ativos no ambiente aleatório com 30 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).....	63
Figura 4.13: Consumo de energia dos 13 nós ativos no ambiente aleatório com 40 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).....	65
Figura 4.14: Consumo de energia dos 10 nós ativos no ambiente aleatório com 50 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).....	67
Figura 4.15: Consumo de energia dos 5 nós ativos no ambiente em <i>Grid</i> com 20 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).....	69
Figura 4.16: Consumo de energia dos 6 nós ativos no ambiente em <i>Grid</i> com 30 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).....	71
Figura 4.17: Consumo de energia dos 8 nós ativos no ambiente em <i>Grid</i> com 40 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).....	73
Figura 4.18: Consumo de energia dos 13 nós ativos no ambiente em <i>Grid</i> com 50 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).....	75

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Configurações básicas da simulação.....	41
Tabela 4.2: Configuração de Potência e Energia.....	41
Tabela 4.3: Médias de consumo das redes.....	60
Tabela 4.4: Energia remanescente de nós ativos no cenário 2.....	64
Tabela 4.5: Energia remanescente de nós ativos no cenário 3.....	66
Tabela 4.6: Energia remanescente de nós ativos no cenário 4.....	68
Tabela 4.7: Energia remanescente de nós ativos no cenário 5.....	70
Tabela 4.8: Energia remanescente de nós ativos no cenário 6.....	72
Tabela 4.9: Energia remanescente de nós ativos no cenário 7.....	74
Tabela 4.10: Energia remanescente de nós ativos no cenário 8.....	76

Lista de Acrônimos

RSSFs	Redes de Sensores Sem Fio
NS-2	<i>Network Simulator 2</i>
AODV	<i>Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing</i>
MEMS	Sistemas micro-eletromecânicos
RF	Radiofrequência
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
RREQ	<i>RouteRequest</i>
<i>RREP</i>	<i>RouteReply</i>
SrcID	Identificador Fonte
DestID	Identificador do Destino
SrcSeqNum	Número de Sequência da Fonte
DestSeqNum	Número de Sequência do Destino
BcastID	Identificador de Broadcast
TTL	Tempo de Vida das Mensagens
RERR	<i>RouteError</i>
ZRP	<i>Zone Routing Protocol</i>
V	<i>Volts</i>
Ah	Ampère-hora
OTCL	<i>Object-oriented Tool Command Language</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
TX	Transmissão de Dados
RX	Recepção de Dados
W	<i>Watts</i>
J	<i>Joules</i>
R-V	Rakhmatov-Vrudhula

Sumário

1.Introdução.....	14
1.1. Contextualização.....	14
1.2. Motivação.....	15
1.3. Objetivos.....	16
1.3.1. Objetivo Geral.....	16
1.3.2. Objetivos Específicos.....	17
1.4. Organização do Trabalho.....	17
2. Fundamentação Teórica.....	18
2.1. Redes de Sensores Sem Fio.....	18
2.1.2. Aplicações das Redes de Sensores Sem Fio.....	19
2.1.3. Características das RSSF.....	21
2.1.4. Componentes de Uma Rede de Sensores Sem Fio.....	23
2.2. Protocolos de Roteamento.....	24
2.2.1. Protocolos Proativos.....	26
2.2.2. Protocolos Reativos.....	26
2.2.3. Protocolos Híbridos.....	28
2.3. Bateria.....	29
2.3.1. Modelos de Bateria.....	31
2.3.2. Modelo Linear.....	32
2.3.3. Modelo de Rakhmatov-Vrudhula.....	33
3.Trabalhos Correlatos.....	34
4. Simulações e Resultados.....	38
4.1. Ambiente de Simulação.....	38
4.1.2. Descrição dos Cenários.....	39
4.1.3. Configuração de Energia.....	41

4.2. Parâmetros Estabelecidos.....	41
4.3. Análise de Resultados.....	42
4.3.1. Consumo de Energia da Rede	42
4.3.2. Energia dos Nós Ativos	60
5. Conclusão.....	77
Referências Bibliográficas	78

Introdução

1.1. Contextualização

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) têm ganhado grande viabilidade nos últimos anos. Devido à seu baixo custo, tamanho de pequenas dimensões e relativa facilidade em sua implementação Bispo (2015), os sensores vêm se tornando uma importante ferramenta nas aplicações em diversos ambientes, os quais muitas vezes são remotos e de difícil acesso.

Uma RSSF caracteriza-se pelo agrupamento de dispositivos autônomos formados pelos nós sensores, com a tarefa de monitorar e coletar dados de um meio (e.g., temperatura, vibração, aceleração), sem que haja, geralmente, intermédio humano por vias diretas (Loureiro et al, 2003). Podem ser empregadas para estudo ou detecção de eventos nos mais diversos ambientes, como por exemplo em aplicações ambientais, médicas, domésticas, controle de tráfego, dentre outras. Para tudo isso, a rede de sensores é apta a detectar, fazer o processamento local de dados e transmitir através de ondas de rádio (Gilbert; Kaliaperumal; Rajsingh, 2012) os elementos coletados para posterior avaliação do fenômeno que está sendo monitorado, tudo isso a um custo de sua capacidade computacional e de energia.

O rendimento energético de um nó sensor, de forma isolada, é limitado (Loureiro et al, 2003), uma vez que, geralmente, têm baterias como principal fonte de alimentação. Normalmente, a rede de sensores é implementada em lugares inóspitos ou de difícil acesso (e.g., ambientes afetados por radiação, campos de guerra, florestas de mata fechada), o que torna praticamente inviável a reposição ou recarga da bateria. Diante desse cenário, a energia em uma RSSF é tida como um fator primordial a ser considerado, uma vez que sua principal fonte de energia possui capacidade finita.

O desgaste da bateria de um sensor se dá, principalmente, pela comunicação que é feita entre os dispositivos. Sendo o rádio representante do sistema de transmissão e recepção dos dados, este elemento é o que mais

consome energia na RSSF. Portanto, a fim de se obter uma eficiência energética nas aplicações, deve-se pensar em algoritmos e protocolos de roteamento que considerem uma interação local, evitando assim o gasto excessivo de energia com o trato de um grande número de informações geradas (Loureiro et al, 2003).

Diante disso, tendo como métrica o tempo de esgotamento da bateria de todos os nós sensores para mensurar o tempo de vida da rede Lima (2015), é imprescindível otimizar o gasto energético dos sensores que operam por baterias, como premissa à uma maior conservação de energia e prolongamento do tempo de funcionamento da aplicação, bem como atentar para a escolha adequada de moldes que proporcionam um melhor desempenho energético da bateria, a fim de se potencializar a autonomia da rede.



Figura 1.2: Exemplo de monitoramento ambiental com RSSF, Castro et al (2010).

1.2. Motivação

Como já citado anteriormente, a capacidade de energia dos nós sensores é um fator crítico, que põe em risco o funcionamento para o qual a rede foi implementada. Portanto, Bispo (2015, p. 16) afirma que “a eficiência energética sempre deve ser levada em consideração no desenvolvimento de uma aplicação para RSSF”.

Desta maneira, na tentativa de encontrar soluções para os obstáculos na capacidade energética das RSSFs, as aplicações geralmente são avaliadas utilizando algum tipo de ferramenta de simulação. Contudo, Neto (2011) aponta em seu trabalho que os principais simuladores como: NS-2, *GloMoSim* e *Qualnet*, fazem uso de um modelo ideal (linear) e não acurado do processo de consumo de energia, pois não contemplam os efeitos não lineares da bateria, de modo a induzir resultados imprecisos.

Então, é necessário aplicar modelos que considerem os fatores reais de carga e descarga de uma bateria. A exemplo disso, pode-se apontar o modelo de Rakhmatov-Vrudhula, bastante referenciado na literatura, pois baseia-se no comportamento não linear da bateria, capturando sua taxa de capacidade e de relaxação, e também por ser utilizado em estratégias de otimização do tempo de vida de dispositivos Handy e Timmermann (2003).

Diante da situação, o presente estudo é impulsionado a confrontar o modelo convencional linear, padronizado na maioria dos simuladores, com o modelo realístico de Rakhmatov-Vrudhula. Possibilitando assim, uma análise mais confiável e exata dos resultados, visando estimar e otimizar o tempo de vida da rede e atestar qual deles apresenta um desempenho mais satisfatório no consumo de energia.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma análise comparativa entre o modelo convencional Linear e o modelo realístico de Rakhmatov-Vrudhula de consumo de energia em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), utilizando o protocolo de roteamento *Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing* (AODV) e por meio do simulador de redes *Network Simulator* (NS-2), constatar qual dos modelos evidencia um melhor desempenho energético de forma mais fiel ao processo de descarga da bateria.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudar redes de sensores sem fio e protocolos de roteamento;
- Apresentar os dois modelos analíticos de bateria já anteriormente citados;
- Simular cenários de rede, com os nós dispostos de forma randômica e em formato *Grid*;
- Comparar e avaliar os resultados baseados no modelo Linear com os resultados obtidos no modelo Rakhmatov-Vrudhula, através da coleta de dados por meio das simulações;

1.4. Organização do Trabalho

Incluindo este capítulo primeiro introdutório, que contextualiza o tema estudado e apresenta a motivação e objetivos do trabalho, o texto está estruturado em 5 capítulos, descritos brevemente a seguir:

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: apresenta as definições sobre os conceitos relacionados às RSSFs, protocolos de roteamento e modelos de bateria, que são essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 3 – Trabalho Correlatos: trata-se do levantamento bibliográfico onde são destacados os trabalhos mais relevantes que foram encontrados na literatura referente ao tema, servindo como embasamento para este trabalho.

Capítulo 4 – Simulações e Resultados: é descrito o ambiente de simulação aos quais as mesmas foram executadas e também exibe e analisa os comparativos dos resultados obtidos.

Capítulo 5 – Conclusão: traz as considerações finais compreendidas no decorrer do andamento do trabalho.

Fundamentação Teórica

2.1. Redes de Sensores Sem Fio

A comunicação sem fio têm ganhado grande notoriedade nos últimos anos devido à alta demanda por conectividade, e o crescente aumento no uso de dispositivos móveis. Redes sem fio são cada vez mais utilizadas, pois apresentam relativo baixo custo de instalação, e também contam com a flexibilidade em sua implementação.

As redes de sensores sem fio são consideradas como uma subclasse das redes *Ad Hoc*, ou seja, não necessitam de uma infraestrutura intermediária de comunicação entre os nós sensores, e caracterizam-se por contar com uma grande quantidade de dispositivos que se conectam entre si por meio de um enlace sem fio e operam com baixo consumo de energia Brito (2009).

As RSSF diferem de redes tradicionais, por possuírem limitações quando analisados individualmente em seus componentes, a exemplo de sua reduzida capacidade computacional, memória restrita, comunicação de curto alcance e bateria com baixo rendimento. Geralmente, são implementadas em áreas remotas onde a intervenção humana é impraticável, a exemplo de florestas de mata fechada, cenários de catástrofes naturais, campos de batalha e etc, para monitorar e coletar dados de fenômenos físicos como temperatura, umidade, pressão, presença ou ausência de objetos, dentre outros tipos de eventos.

Para isto, os nós sensores são lançados em um campo de detecção, como mostra a Figura 2.1, onde realizam o processamento local de dados, trocam informações entre si e disseminam-nas para um ponto de acesso, implementado em um nó sorvedouro (*sink node, base station ou gateway*) através de comunicação de múltiplos saltos (*multi-hop*) ou um salto (*one-hop*), permitindo a cooperação e propagação de dados de forma mais eficiente energeticamente. Sendo assim, a implementação da RSSF deve abranger as especificidades das aplicações para as quais a rede foi proposta, principalmente a conservação de energia, que é um fator fundamental para a sobrevivência da rede Bispo (2015).

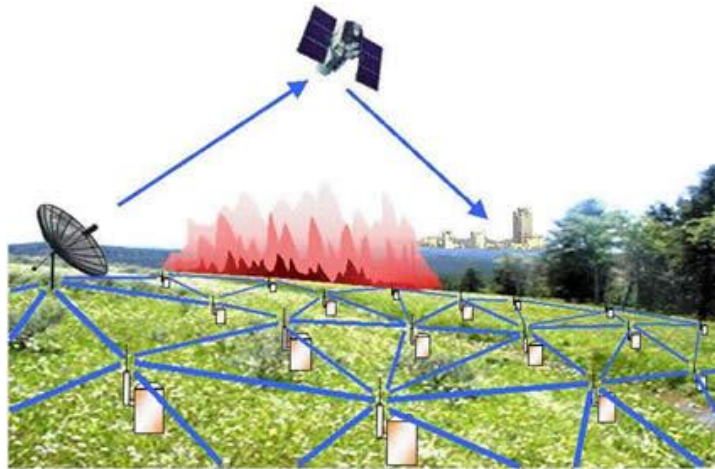


Figura 2.1: Ambiente monitorado por uma Rede de Sensor Sem Fio, Pinto (2009).

2.1.2. Aplicações das Redes de Sensores Sem Fio

Diversas são as aplicações as quais as RSSF podem ser utilizadas, pois detém um grande potencial de execução nos mais diversos contextos, especialmente em sistemas de monitoramento e automação. É grande o incentivo à pesquisas nesta área, por isso as RSSF são a cada dia mais empregadas nos mais variados lugares e a tendência é que estas redes sejam também aplicadas no dia-a-dia – como em automação de tarefas domésticas. Esta seção apresenta alguns ambientes aos quais as redes de sensores são aproveitadas, como:

- **Aplicações Militares:** as primeiras redes de sensores sem fio foram implementadas para fins militares. Por possuírem características de robustez, capacidade de auto-organização e tolerância a falhas devido à perda de sensores por ataques no campo de batalha, foram bastante utilizadas para obter informações sobre reconhecimento da área em guerra, bem como auxiliar os militares em tarefas de resgate, ataque, sobrevivência, monitoramento de armas e etc.
- **Aplicações Ambientais:** as RSSFs também são bastante úteis no monitoramento de condições ambientais onde o acesso ao campo de

detecção (e.g., vegetação densa, relevos irregulares, terrenos acidentados) é dificultoso, o que impossibilita também a instalação de uma estrutura de monitoramento. Por isso os sensores são muito utilizados nessas áreas, pois podem coletar informações de variáveis como temperatura, umidade do ar, pressão, mapear a biodiversidade do ambiente e, como uma de suas principais funcionalidades, pode detectar incêndios e enchentes por meio da disposição de múltiplos sensores lançados no ambiente que enviam os dados ao nó *sink*, evitando assim que o fogo se alastre. O mesmo se aplica às situações de enchentes, onde os sensores coletam informações sobre níveis de água para indicar potenciais inundações provenientes de tempestades Brito (2009).

- **Aplicações Médicas:** na área da saúde, as redes de sensores auxiliam na monitorização de pacientes, obtendo e registrando informações fisiológicas como temperatura corporal, batimentos cardíacos, pressão sanguínea, administração de medicamentos e diagnósticos. Sensores até mesmo podem ser aproveitados em microcirurgias, onde robôs que utilizam sistemas micro-eletromecânicos (*MEMS*), participam de cirurgias pouco invasivas Moreira (2006).
- **Aplicações na Automação Residencial e Industrial:** as redes de sensores sem fio estão cada vez mais presentes no uso doméstico. Com o intuito de criar ambientes inteligentes, são utilizadas para automatizar tarefas comuns do dia-a-dia, como controle de aparelhos eletrodomésticos, iluminação e, principalmente, a questão da segurança através do uso de sensores de movimento e temperatura para detectar a presença de intrusos e até mesmo identificar focos de incêndios. Já no meio industrial, as RSSF podem ser aplicadas para controle de estoque, manutenção de equipamentos, controle de processos, gerência de energia, dentre outros. Diante de tais informações e funcionalidades, é possível então diminuir custos dos processos industriais e aumentar a eficiência dos mesmos.

2.1.3. Características das RSSF

Geralmente comparadas às redes *Ad Hoc*, as RSSFs diferem das redes tradicionais por possuírem atributos e desafios próprios. São definidas quanto às suas principais características de autoconfiguração, larga tolerância à falhas ocasionadas pela perda de sensores, grande mobilidades dos nós, permitir a comunicação direta entre os mesmos e contar com baixos custos de implementação e complexidade. Todavia, devido ao tamanho reduzido dos sensores e, possuírem baterias com capacidade energética limitada, os nós também apresentam severas restrições em termos de energia, memória e processamento. Contudo, apesar de poder ocorrer falhas devido a estas limitações, as RSSFs operam com centenas de milhares de dispositivos que constituem a rede, e a interligação deste grande número de nós sensores pode desviar-se destas condições e trazer grande aplicabilidade em diversas áreas. Nesta seção, são descritas as características comuns às RSSF, dentre elas:

- **Tolerância à Falhas:** em RSSF, os nós estão propensos à falhas por diversos motivos. Dentre eles, podemos apontar a falta de energia, visibilidade prejudicada com outro nó da rede ou até mesmo danos físicos ocasionados por alguma interferência do ambiente. Estas falhas são aceitáveis pois, devido à grande quantidade de sensores que formam a rede, o comprometimento de alguns dispositivos não deve impossibilitar o funcionamento da aplicação como um todo, pois a rede precisa tratar de maneira natural e automática a estas condições.
- **Escalabilidade:** esta característica está relacionada à capacidade da rede em saber lidar com a elevada e constante crescente da quantidade de sensores que são dispostos no campo de detecção, pois quanto maior a densidade da rede, maiores também são as preocupações quanto ao gerenciamento de tarefas dos nós. Sendo assim, os mecanismos de transmissão precisam estar aptos a manipular estas variações, a fim de potencializá-las e fazer uso em benefício da rede.

- **Consumo de Energia:** sem dúvida, a restrição energética é a característica mais associada às RSSFs, constituindo uma parte fundamental no planejamento da rede. Normalmente os nós sensores são alimentados por baterias, que possuem certa escassez de energia, portanto necessitam ser substituídas ou recarregadas periodicamente. Entretanto, muitas vezes esses sensores estão alocados em ambientes inóspitos (e.g., campos de batalha, cenários de desastres naturais), tornando impraticável a reposição das baterias. Por isso, é essencial que algoritmos e protocolos de comunicação sejam eficientes quanto ao consumo de energia para maximizar a vida útil da rede, uma vez que a transmissão é a principal responsável pela drenagem da carga da bateria.
- **Auto-Organização:** em RSSF, podem ocorrer perda de sensores por motivos de danos físicos, insuficiência energética e até mesmo por dificuldades nos rádios de transmissão e canal de comunicação. Devido a estes eventos, a rede deve possuir mecanismos de autoconfiguração para manter o funcionamento do sistema. O mesmo se aplica quando é feita a inserção ou remoção de sensores, pois a rede também deve ajustar-se de maneira automática e periódica ao novo cenário.
- **Mobilidade dos Nós Sensores:** esta característica está relacionada com a possibilidade dos sensores estarem empregados de maneira fixa ou móvel em relação ao sistema que estão coletando os dados. A grande parte das aplicações utilizam os sensores de forma estática, como em monitoramentos de florestas para obter dados de umidade e temperatura. Já os sensores móveis, podem ser aplicados nas superfícies de oceanos para medir níveis de poluição, temperatura, acidez da água e etc. A mobilidade também proporciona monitorar uma maior área de cobertura, bem como a correção para o mal

posicionamento dos nós, permitindo que sejam deslocados para regiões em que terão melhor desempenho de suas funções, economizando assim mais energia.

- **Meio de Transmissão:** comumente, a conexão entre os nós é realizada através de radiofrequência (RF), permitindo uma certa liberdade na implementação, mas também deixando-os sujeitos às interferências geradas por aparelhos que estejam operando na mesma faixa de frequência. Também podem ser utilizados para fazer a comunicação entre os sensores, tecnologias de infravermelho ou por meio óptico.

2.1.4. Componentes de Uma Rede de Sensores Sem Fio

Uma rede de sensor sem fio é composta por uma grande quantidade de dispositivos denominados de nós sensores. Estes, por sua vez, são constituídos e interligados basicamente por quatro elementos, sendo eles: uma unidade de alimentação energética, transmissor, unidade de sensoriamento e processamento. A Figura 2.2 ilustra a arquitetura do sensor, onde a unidade de alimentação irá fornecer a energia para que o sensor desempenhe suas funções. Geralmente, se faz uso de uma bateria, mas fontes de energia como os painéis solares, também são uma alternativa. Já a unidade de sensoriamento é responsável por capturar a informação analógica do fenômeno observado, que posteriormente será traduzida em sinais digitais por meio de um conversor analógico digital (*ADC – Analog-to-Digital Converter*). A transmissão é encarregada pela comunicação dos nós sensores nos enlaces sem fio das RSSF. Por fim, o processador, geralmente vinculado a uma memória, tem a finalidade de distribuir e executar as tarefas entre os nós Silva (2011).

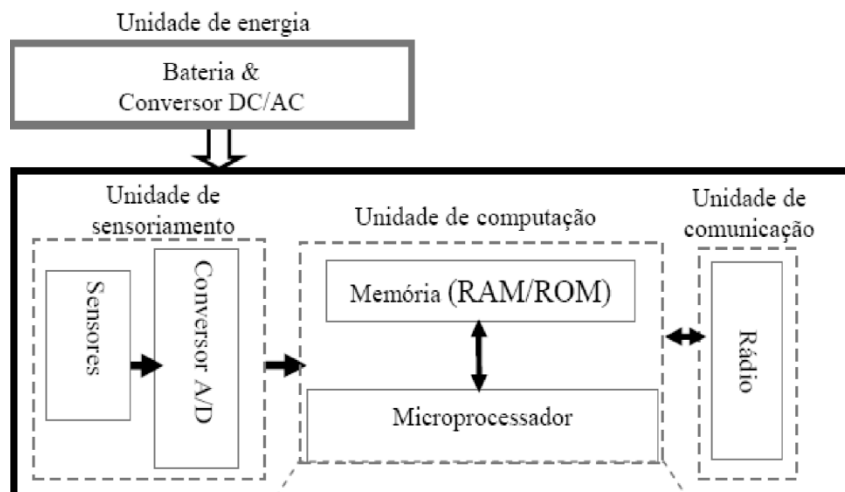


Figura 2.2: Arquitetura de um nó sensor, adaptado de Façanha (2007).

- **Radio:** constitui o sistema de transmissão da RSSF, composto pelo transmissor, receptor, amplificador e antena Brito (2009). É o elemento que faz uso de ondas de radiofrequência para realizar a comunicação sem fio entre os nós.
- **Bateria:** é responsável pela alimentação energética dos sensores. Todavia, possui capacidade de carga finita e reduzida, tornando-se então uma das principais restrições em RSSF.
- **Processador:** esta unidade irá realizar todo o processamento local dos dados de sensoriamento coletados, sendo temporariamente armazenados na memória acoplada e, posteriormente enviados para a rede externa.
- **Sensor:** são dispositivos que geram respostas através de pulsos elétricos às mudanças físicas do ambiente (Loureiro et al, 2003), obtendo informações de grandezas como pressão, aceleração, umidade e, as transforma em dados que serão demandados pelo processador.

2.2. Protocolos de Roteamento

Para que os dados coletados pelos sensores sejam propagados entre os nós da rede até a estação base de forma dinâmica e arbitrária, é fundamental o

estabelecimento e manutenção de rotas entre a origem e o destino. Para tal tarefa, usando a quantidade de saltos, latência, largura de banda, energia de transmissão, dentre outros parâmetros, são implementados os protocolos de roteamento. Estes, têm a finalidade de traçar as rotas para realizar a transferência dos pacotes entre os nós.

Embora sejam uma subclasse das redes ad hoc tradicionais, as RSSFs possuem especificidades que devem ser consideradas para o desenvolvimento de um protocolo eficaz, especialmente por comunicarem-se de maneira unidirecional e, principalmente, possuir recursos energéticos limitados em seus dispositivos. Sendo assim, protocolos de roteamento necessitam adotar mecanismos que promovam um melhor gerenciamento na transmissão de dados, a fim de se obter uma redução do gasto de energia. Alguns destes principais requisitos são citados a seguir:

- **Eficiência:** RSSF suportam uma grande quantidade de nós, portando os protocolos necessitam ser simples, escaláveis e ofertar serviços com o mínimo de processamento possível.
- **Adaptação:** a topologia em rede de sensores é altamente dinâmica, seja por motivo de falha, desligamento temporário para economia de energia ou adição/remoção de sensores, o fato é que o protocolo deve saber lidar com estas frequentes mudanças.
- **Recursos:** os nós sensores são limitados em termos de energia, capacidade computacional e memória. Desta forma, o protocolo precisa gerenciar com eficácia o gasto energético e minimizar a quantidade de processamento e memória requeridos.

Os protocolos de roteamento podem realizar o encaminhamento dos pacotes de maneira *unicast*, *multicast* ou *broadcast*. A primeira, baseia-se na transmissão a um destino específico, ponto-a-ponto, havendo um remetente e um receptor. Esta, é indicada para o uso em redes com topologia altamente dinâmicas e limitadas de recursos, a exemplo das RSSF Neto (2011). No modo *multicast*, os pacotes são endereçados simultaneamente a um grupo específico

de destinatários. Já o envio em *broadcast*, caracteriza-se pelo endereçamento de pacotes a todos os pontos da rede.

No presente trabalho, para avaliar o comportamento energético de dois modelos distintos de bateria em uma rede de sensores sem fio, fez-se uso de um protocolo de roteamento *unicast*. Neste modo de roteamento, os protocolos são classificados em: proativos ou orientado por tabela (*table-driven*); reativos ou sob demanda (*on-demand*); e híbridos, que englobam características de ambos Neto (2011). A seguir, as classificações serão melhor detalhadas.

2.2.1. Protocolos Proativos

Os protocolos classificados como proativos, caracterizam-se por estarem constantemente buscando rotas para o encaminhamento dos pacotes, antes mesmo de serem requisitadas. Neste tipo de protocolo, os nós armazenam as informações de seus adjacentes em tabelas de roteamento, de tal maneira, poderão ser instantaneamente utilizadas no momento em que são demandadas, reduzindo assim o atraso inicial na transmissão. Em contrapartida, são propensos a gerar uma sobrecarga de dados de roteamento que, em alguns casos, torna-se um problema devido à restrições de largura de banda. São protocolos proativos: OLSR, DSDV, WRP, CGSR Neto (2011).

2.2.2. Protocolos Reativos

Diferentemente dos protocolos proativos, os reativos somente buscam informações para criação e manutenção das rotas, quando são solicitadas por outro nó da rede. Essa abordagem resulta em uma redução no consumo de banda, pois impede a disseminação desnecessária de mensagens de roteamento. Entretanto, também gera um maior tempo de resposta à uma solicitação de rota, uma vez que a mesma ainda será obtida no momento da requisição. São protocolos reativos: AODV, DSR, TORA Neto (2011). A seguir,

o protocolo AODV, utilizado nas simulações realizadas para este trabalho, será abordado.

- **Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing (AODV):** o AODV é qualificado por ter características adaptativas a cenários onde existe grande mobilidade de nós (Moraes; Xaud; Xaud, 2007). Neste protocolo, faz-se uso de tabelas tradicionais de roteamento, onde o nó armazena o próximo salto a ser dado para o destino em questão, detendo-se de informações como: número de saltos, número de sequência do destino, nós vizinhos ativos para a rota, e tempo de duração até a rota – considerando sempre o menor caminho Neto (2011).

Por se tratar de um protocolo reativo, quando um nó fonte necessita realizar envio de pacotes a um nó de destino e, o caminho para esta comunicação for ainda desconhecido, dá-se então início ao processo de descoberta de rota. Este procedimento baseia-se na propagação de mensagens de *RouteRequest* (RREQ), contidas do SrcID, DestID, SrcSeqNum, DestSeqNum, BcastID e TTL, pelo nó de origem à todos os nós vizinhos, para que a rota seja traçada. Se por ventura, o nó vizinho não seja o destino ou não tenha conhecimento do trajeto, a mensagem RREQ é retransmitida a todos os nós adjacentes. Este mecanismo se repete até que o destino seja alcançado ou um nó intermediário possua conhecimento de uma rota válida para atingi-lo.

Quando encontra-se um caminho pertinente até o destino, o mesmo ou um nó intermediário, responde pelo trajeto reverso às mensagens de requisição de rota através de um pacote *RouteReply* (RREP), contendo as informações de endereçamento do nó de origem e de destino, número de sequência do destino, contador de saltos (incrementado a cada salto) e TTL Rosa (2009).

A Figura 2.3 ilustra como esta descoberta de rota é realizada: em (a), é mostrado o envio de pacotes RREQ do nó de origem S para seus vizinhos, até alcançar o destino D; em (b), é exemplificado o caminho reverso percorrido pelo pacote RREP, assim que identificada a rota para o destino D – considerando o menor caminho.

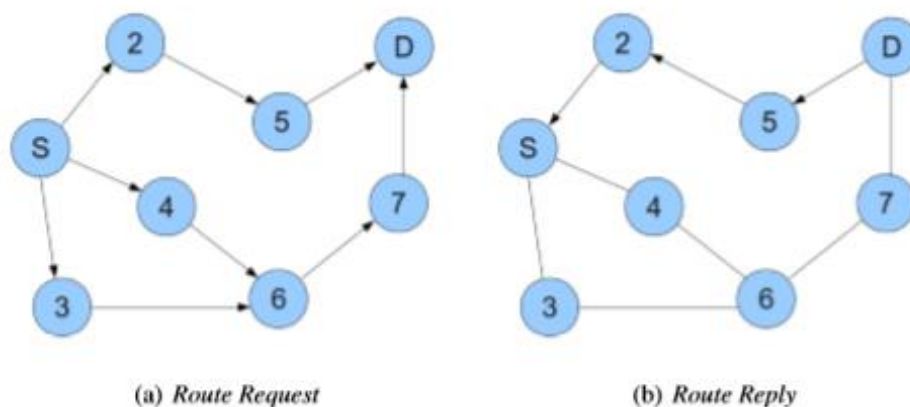


Figura 2.3: Identificação de Rotas no AODV, retirado de Neto (2011).

No protocolo AODV, ainda é importante destacar seu mecanismo para manutenção de rotas. Pode ocorrer na rede, uma ruptura de enlaces devido à mobilidade dos nós, fazendo com que rotas se tornem obsoletas. Diante disso, para validar as informações armazenadas na tabela de roteamento, são enviadas periodicamente pacotes *HELLO* aos nós vizinhos para verificar se há falhas de conectividade. Assim, quando um nó não recebe de volta o pacote esperado, é considerado uma queda de enlace e, então, a falha é sinalizada por meio de uma mensagem de erro *RouteError* (RERR) para o nó de origem e para os nós intermediários que são afetados pela rota comprometida. Logo, ao receber o pacote de erro, o nó terá sua tabela atualizada e fará a remoção da rota prejudicada (Moraes; Xaud; Xaud, 2007).

2.2.3. Protocolos Híbridos

Protocolos proativos e reativos possuem mecanismos próprios de roteamento que os caracterizam, gerando vantagens e desvantagens conforme a aplicação. O primeiro, está continuamente trocando informações de rota, mantendo-as atualizadas e prontas para uso quando solicitadas. Porém, isso gera um consumo elevado de banda e processamento dos dispositivos. Já o segundo, impede a reprodução desnecessária de informações de roteamento, por

trabalhar sob demanda. Contudo, apresenta uma certa latência ao determinar uma rota.

Diante disso, para atenuar os problemas característicos de cada um, os protocolos híbridos (e.g., *Zone Routing Protocol* - ZRP) mesclam as peculiaridades de ambos, objetivando reduzir o consumo excessivo de banda e a latência no tempo de resposta a uma requisição de rota Fernandes (2006).

2.3. Bateria

Baterias funcionam através de reações eletroquímicas que convertem a energia química de seus componentes em energia elétrica Zart et al (2017). São constituídas de células formadas por três elementos fundamentais: um ânodo e um cátodo de polaridade negativa e positiva respectivamente, que são eletrodos responsáveis por fazer a condução metálica por onde a corrente elétrica entra e sai do sistema e, um eletrólito líquido ou sólido que faz a condução iônica de eletricidade e separa os eletrodos. Uma bateria proporciona energia elétrica a um sistema, a partir de quando o ânodo libera elétrons para o circuito, e o cátodo os recebe. Este processo caracteriza a fase de descarga de uma bateria Schneider (2011).

As reações eletroquímicas dão origem a duas importantes propriedades de uma bateria: a tensão, medida em volts (V) e a capacidade, comumente medida em ampère-hora (Ah), de forma que o produto das duas grandezas viabiliza a energia acumulada na bateria. Em um caso ideal, a tensão se permanece constante durante o período de descarga, tornando-se nulo quando a bateria estiver totalmente descarregada, sendo assim, quando considerado uma corrente de descarga constante, uma bateria de 100Ah poderia fornecer 5Ah por 20 horas, ou 100Ah em 1 hora. Entretanto, na prática, este processo não se dá de maneira constante, pois o modo de descarga de uma bateria envolve características não-lineares (e.g., o efeito de recuperação ou relaxação e o efeito da taxa de capacidade), que necessitam ser consideradas pois afetam diretamente o tempo de vida da bateria Zart et al (2017). A seguir, essas particularidades serão descritas.

- **Nível de *Cutoff*:** não é propriamente um efeito não-linear, mas sim um parâmetro utilizado pelo efeito de recuperação que estima o limite mínimo de carga em que uma bateria é capaz de gerar uma tensão para que um dispositivo mantenha-se operacional. A maneira que este limite for atingido, mesmo sem estar com carga nula, a bateria ficará incapaz de fornecer energia, devido à impossibilidade de ocorrer as reações eletroquímicas.
- **Efeito de Recuperação (Relaxação):** é o momento no qual ocorre uma reorganização de maneira uniforme dos elétrons no eletrólito durante o período de relaxação, que é quando a corrente de descarga está consideravelmente reduzida ou nula, possibilitando assim uma recuperação de parte da capacidade da bateria e aumentando sua carga antes de alcançar o nível de *cutoff*.
- **Efeito Taxa de Capacidade:** este efeito é dependente da atual capacidade da bateria (relaxação) e da intensidade da corrente de descarga empregada. Em altas correntes, a capacidade efetiva da bateria torna-se menor, pois não há tempo hábil para que os elétrons reorganizem-se no eletrólito. Dessa forma, mais carga fica sendo inutilizada pelo sistema, reduzindo a capacidade e tempo de vida útil da bateria. Já quando há alternância entre correntes altas e baixas, esta capacidade efetiva é aumentada, pois no momento de baixa corrente ou um período de corrente nula, pode ocorrer o efeito de recuperação, aumentando a carga disponível na superfície do eletrodo para ser utilizada no sistema.

A Figura 2.4 ilustra o efeito de recuperação de uma bateria. Em (a), observa-se a distribuição uniforme das espécies eletroativas (elétrons) por toda a região do eletrólito, constituindo uma bateria totalmente carregada. Ocorre em (b) o processo de descarga, ocasionado pelo fluxo externo de elétrons entre os eletrodos. Com a redução de corrente,

acontece um processo de difusão que reorganiza a distribuição dos elétrons, de forma a recuperar parte da capacidade da bateria (c). Em (d) é mostrado o estado da bateria já com a capacidade recuperada. Já em (e), a bateria fica indisponível pois atingiu seu limite de *cutoff*.

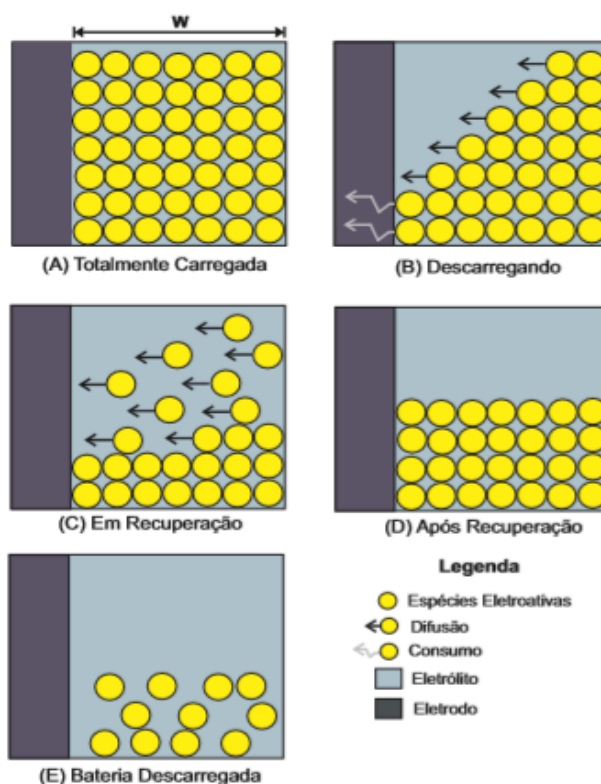


Figura 2.4: Estados de Descarga da Bateria, Sausen (2008).

2.3.1. Modelos de Bateria

Existem diversos modelos com particularidades e complexidades próprias (e.g., modelos eletroquímicos, modelos estocásticos, modelos elétricos, modelos analíticos), utilizados para descrever o comportamento de descarga de uma bateria e prever seu tempo de vida útil. Esses moldes trabalham com as propriedades que envolvem o processo de carga e descarga da bateria sob

diversas condições. Sendo assim, são bastante úteis para analisar e prever seu desempenho.

Dentre eles, aponta-se o modelo analítico. Este, faz uso de expressões analíticas para calcular a capacidade real da bateria, utilizando-se de parâmetros como os valores de corrente de descarga, ambiente operacional característico e propriedades físicas da bateria. Neste modelo, as propriedades da bateria são modeladas através de uma quantidade reduzida de equações e de parâmetros a serem estimados, isso proporciona uma certa facilidade em sua implementação computacional em relação a outros modelos Zart et al (2017).

São exemplos de modelos analíticos: o modelo Linear, a Lei de Peukert, o modelo Cinético de Manwell e McGowan, e o modelo de Rakhmatov-Vrudhula. Contudo, para este estudo, serão abordados apenas dois: o Linear, por ser o modelo padrão adotado na ferramenta de simulação (Network Simulator - NS-2) utilizada neste trabalho e o de Rakhmatov-Vrudhula, apresentado como um modelo comparativo para avaliar o desempenho energético dos dispositivos.

2.3.2. Modelo Linear

Dentre os modelos analíticos, o Linear é classificado como sendo o mais simples e menos apurado para predição do tempo de vida de baterias. Possui certa facilidade em sua implementação, por isso é utilizado pela maioria dos simuladores de redes Neto (2011). Entretanto, o modelo não considera as características não-lineares (e.g., efeito de recuperação e taxa de capacidade) que envolvem o processo de descarga da bateria. Sendo assim, pode produzir resultados imprecisos quanto ao consumo energético dos dispositivos, comprometendo toda a rede.

O cálculo da capacidade restante C , de uma bateria pelo modelo Linear, é dado pela equação:

$$C = C' - I \cdot td \quad (1)$$

Onde C' é a capacidade inicial, I é a corrente de descarga durante a operação, e td sendo o tempo de duração da corrente. A partir disso, a

capacidade remanescente pode ser mensurada sempre que há alteração na corrente de descarga, não sendo possível capturar o efeito de recuperação da bateria Schneider (2011).

2.3.3. Modelo de Rakhmatov-Vrudhula

É um modelo realístico de alta acurácia proposto por Rakhmatov e Vrudhula para estimar o tempo de vida da bateria, que consegue capturar os efeitos não-lineares que ocorrem durante sua operação de descarga. Tais efeitos baseiam-se no conceito de que, quanto maior for a corrente de descarga, menor será a capacidade disponível na bateria, e que quando sujeita à uma considerável redução de corrente, é capaz de recuperar parte de sua carga, podendo então ampliar seu tempo de vida útil.

Para estimar a capacidade da bateria pelo modelo, dá-se a equação:

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

Onde os parâmetros α e β estão associados à capacidade da bateria, e à sua conduta não-linear durante o processo de descarga, respectivamente. I_{k-1} representa a corrente de descarga durante o período $k - 1$. A função A é responsável por calcular a reação não-linear durante a descarga da bateria. 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 $k - 1$ Neto (2011).

Trabalhos Correlatos

Durante o levantamento para referencial e embasamento teórico deste trabalho, foram encontradas algumas literaturas que também abordam a proposta de comparação do desempenho energético dos modelos de bateria acima citados.

Dentre elas, podemos apontar o trabalho de Schneider (2011), que estuda e avalia três modelos analíticos para predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis. O estudo baseou-se nos modelos Lei de Peukert, Linear e de Rakhmatov-Vrudhula, ainda realizando uma comparação direta entre os dois últimos. A partir da análise das simulações, o trabalho atestou que o modelo Linear não atingiu resultados adequados quanto à predição do tempo de vida da bateria, chegando até mesmo a identificar um erro de aproximadamente 30% de previsão, utilizando este modelo. Já pelo modelo de Rakhmatov-Vrudhula, os resultados foram mais acurados em virtude de o modelo considerar os efeitos não-lineares que envolvem o processo de descarga da bateria.

Outro trabalho encontrado, é o de Neto (2011). Este propõe uma análise de protocolos de roteamento *unicast* em redes *ad hoc* móveis. O autor destaca que grande parte destes protocolos foram ponderados via simuladores. No entanto, a maioria destas ferramentas fazem uso do modelo Linear de bateria para obter os resultados comportamentais da rede, o que pode gerar resultados errôneos, pois o modelo não contempla os reais efeitos de descarga da bateria. Portanto, o estudo incluiu o modelo realístico de Rakhmatov-Vrudhula nas simulações, no intuito de oferecer resultados mais apurados, quando comparados ao modelo Linear.

O trabalho concluiu que, pelo modelo realístico, os dispositivos sobreviveram por mais tempo em todos os protocolos estudados, em decorrência do menor consumo de energia que o modelo proporciona.

Sausen (2008) apresentou duas soluções para otimizar o roteamento, controle de topologia e o consumo de energia em Redes de Sensores Sem Fio. Uma delas acrescenta técnicas de Gerenciamento Dinâmico de Energia (GDE), avaliadas a partir do modelo realístico de Rakhmatov-Vrudhula de descarga de bateria, utilizando-se do simulador NS-2.

Diante disso, o autor comparou resultados de previsão de consumo de energia obtidos tanto para o modelo Linear quanto para o modelo realístico. No comparativo, o modelo Linear teve um consumo 50 vezes maior que o modelo R-V na capacidade da bateria para uma mesma configuração de descarga.

Zart (2017) ressalta a crescente demanda por dispositivos móveis nos últimos anos, devido à oferecerem mobilidade, comodidade e fácil acesso à comunicação e à rede sem fio. Entretanto, tais dispositivos são dependentes do tempo de vida das baterias que os alimentam. Portanto, a autora destaca a importância de se conhecer o tempo pelo qual uma bateria consegue prover energia a estes dispositivos, sendo isto fundamental para o desenvolvimento dos mesmos. Neste sentido, o estudo apresenta uma análise comparativa sobre os modelos analíticos – Linear, Lei de Peukert, Lei de Peukert Estendida, cinético de Maxwell-McGowan e, o modelo de difusão de Rakhmatov-Vrudhula – utilizados na predição do tempo de vida das baterias dos dispositivos.

Os modelos foram analisados objetivando, através da comparação, averiguar qual deles seria o mais acurado ao predizer o tempo de vida de baterias de Lítio Íon Polímero (LiPo), para um mesmo cenário de simulação e, perfis de descarga constantes e variáveis. Os resultados simulados foram confrontados com resultados obtidos a partir de uma plataforma de teste e, concluiu que o modelo de Rakhmatov-Vrudhula foi o mais preciso quanto à predição do tempo de vida das baterias.

Em (Schneider; Sausen; Sausen, 2010), são apresentadas a modelagem e a simulação do consumo de energia de um nó sensor que utiliza uma bateria do tipo alcalina. No estudo, o cálculo da capacidade da bateria do nó sensor é comparado com os resultados obtidos através de dois modelos analíticos de

bateria: o modelo Linear e o modelo de Rakhmatov-Vrudhula, que considera os efeitos não-lineares presentes no processo de descarga da bateria.

Os resultados apontaram para um comportamento mais preciso do modelo de Rakhmatov-Vrudhula quanto a estimação do tempo de vida do nó sensor, pois o modelo detém reais características de descarga de uma bateria, sendo assim possível recuperar parte de sua capacidade durante os períodos de alternância de corrente. Tal efeito não é considerado pelo modelo Linear, o que corroborou para os resultados mais acurados do modelo R-V.

Oliveira (2012) também apresentou uma proposta de análise comparativa de três modelos matemáticos aptos a predizer o tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis. Os dois modelos mais simples utilizados, foram o modelo Linear e Lei de Peukert. Estes são bastante referenciados na literatura, porém não consideram os efeitos não-lineares durante o processo de descarga, fator que interfere diretamente o tempo de vida da bateria. O terceiro modelo adotado na comparação foi o modelo de difusão de Rakhmatov-Vrudhula, mais complexo e com significativa acurácia na predição do tempo de vida da bateria.

Os modelos foram simulados na ferramenta Matlab, objetivando predizer o tempo de vida da bateria, em seguida também de uma avaliação a partir da utilização de uma bateria real de Lítio-Íon BL-5F. De tal maneira, o estudo valida a análise comparativa dos modelos a partir de dados reais obtidos por uma plataforma de testes construída para esta finalidade.

A partir dos resultados obtidos, empregando-se cargas constantes, o modelo de Rakhmatov-Vrudhula foi o que apresentou o menor erro médio (5,71%) na predição do tempo de vida da bateria. Este resultado foi possível devido ao modelo ser capaz de capturar os efeitos não-lineares que ocorrem durante uma corrente de descarga.

O modelo Linear evidenciou os piores resultados dentre os modelos simulados, chegando a obter um erro médio de 17,42%. Esta alta taxa justifica-se pelo fato do modelo não considerar nenhum dos efeitos não-lineares que envolvem o processo de descarga.

Quando submetidos a cargas variáveis, todos os modelos obtiveram desempenhos piores, mas ainda assim o modelo de Rakhmatov-Vrudhula manteve seu melhor comportamento em relação aos dois outros modelos, alcançando um erro médio de 6,53%, enquanto que para o modelo Linear o erro médio foi consideravelmente maior (30,76%).

Simulações e Resultados

Para o propósito deste trabalho, de estabelecer uma avaliação comparativa de desempenho energético dos sensores em uma RSSF sob uso dos modelos de bateria já anteriormente abordados na seção 2.3, utilizou-se a versão 2.35 do software de simulação Network Simulator 2 (NS-2). Deste modo, através da estipulação de métricas, a simulação permitiu moldar a rede de acordo com suas especificidades e, realizar a análise de como se comportam os nós sensores, quanto ao seu consumo de energia.

4.1. Ambiente de Simulação

O NS-2 é um simulador de eventos discretos de código fonte aberto, permitindo que sejam feitas as alterações necessárias para atender às características da rede. A ferramenta atende a um grande número de tecnologias de rede, tanto cabeadas quanto tecnologias sem fio, diferentes cenários com base em protocolos TCP e UDP, perfis de tráfego, políticas de fila, dentre outros.

O simulador utiliza duas linguagens de programação para compor as simulações. Para construir sua estrutura básica (e.g., agentes, protocolos, etc.), é aplicada a linguagem orientada a objetos C++, que oferece uma maior praticidade e velocidade na implementação desses recursos, potencializando o desempenho da memória também. Já para interface com o usuário, definição de parâmetros e manipulação de objetos, faz-se uso da linguagem OTCL (Object-oriented Tool Command Language), que por ser interpretada, facilita os frequentes ajustes de parâmetros que são configurados nos *scripts*, necessários para simular o cenário, sem necessário recompilar.

Nos *scripts*, o usuário estabelece os parâmetros da rede, como: topologia, protocolos, agentes, modelo de bateria, de transmissão, padrão de tráfego e movimentação. Depois de executados, os *scripts* geram arquivos de *trace* contendo os dados da simulação, que posteriormente poderão ser analisados. O

NS-2 também possui um visualizador de simulações Network Animator (NAM), que gera uma animação da topologia da rede.

O simulador já conta com alguns protocolos de roteamento desde a sua instalação, a exemplo do AODV, sendo o protocolo adotado neste trabalho. Da mesma maneira, por ser o modelo Linear de descarga de bateria nativo ao NS-2, o modelo de Rakhmatov-Vrudhula necessitou ser incorporado ao simulador para que fosse possível compará-los.

4.1.2. Descrição dos Cenários

Para as simulações, foram utilizados dois tipos distintos de topologias. No primeiro ambiente, como mostra a Figura 4.1, os nós foram distribuídos aleatoriamente por uma área de tamanho 100x100 metros, através da ferramenta *Setdest*. Este recurso está disponível no NS-2 e, gera arquivos de *trace* que contém dados de movimentação dos nós na rede, baseando-se no modelo aleatório de mobilidade *Random Waypoint*. Dessa forma, o modelo então estabelece que, dentro de uma área especificada, cada nó eleja randomicamente um ponto de destino (x,y) para que possa mover-se até atingir o ponto de destino Neto (2011).

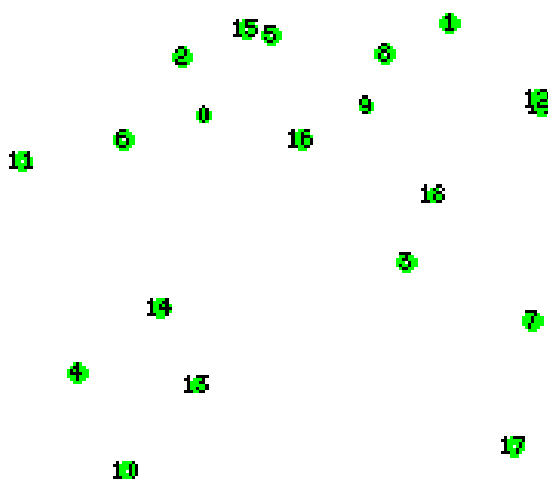


Figura 4.1: Cenário com 20 nós aleatoriamente distribuídos.

O segundo ambiente foi organizado em formato *grid* (grade), com tamanho de área também de 100x100 metros. Neste contexto, a distância entre os nós foi determinada em 20 metros para os eixos x e y.

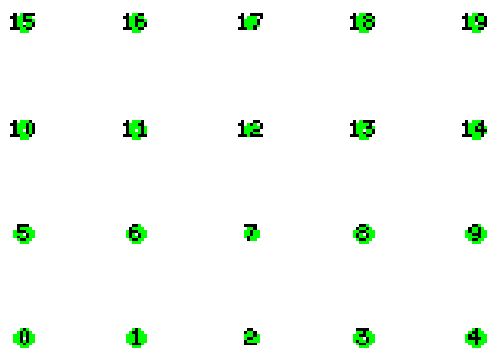


Figura 4.2: Cenário em *grid* com 20 nós.

Para este trabalho, utilizou-se de oito cenários para analisar o comportamento energético dos sensores de uma rede WPAN, sendo eles quatro randômicos e quatro em formato de *grid*. Em cada um dos quatro cenários, tanto para aleatório quanto *grid*, foi configurada uma quantidade de 20, 30, 40 e 50 nós, respectivamente.

A rede foi simulada de acordo com as definições do padrão IEEE 802.15.4, utilizando-se de tráfego do tipo *Constant Bit Rate* (CBR) e pacotes com 100 bytes de tamanho. Filas do tipo *DropTail* com limite máximo de 50 pacotes também foram definidas. Para o modelo de propagação de ondas de rádio, adotou-se o *TwoRayGround*, que considera tanto o caminho direto de comunicação quanto as reflexões do solo. O protocolo de roteamento empregado foi o AODV e, a quantidade de nós variou-se de acordo com cada cenário.

As simulações foram primeiramente executadas considerando o modelo Linear de descarga de bateria para todos os cenários. Posteriormente, aplicou-se o modelo de Rakhmatov-Vrudhula para compará-los.

Área	100x100 m
Tempo de Simulação	200 s
Quantidade de Nós	20,30,40 e 50
Tipo de Tráfego	CBR
Tamanho de Pacotes	100 bytes
Tipo de Antena	Omnidirecional

Tabela 4.1: Configurações básicas da simulação.

4.1.3. Configuração de Energia

O gasto energético dos dispositivos transceptores varia de acordo com seu estado de transmissão (TX), recepção (RX) ou quando se encontram ociosos (IDLE). Para os cálculos de descarga da bateria, o NS-2 assume o tempo em segundos (s), a potência em *Watts* (W) e a unidade de energia em *Joules* (J). Diante dessas unidades, foram definidos os valores para os estados conforme Tabela 4.2. Quanto à bateria, foi definido um valor relativamente baixo de 20 *Joules* de capacidade inicial, com intuito de induzir seu gasto total nos dispositivos.

Potência TX	1 W
Potência RX	1 W
Bateria	20 J

Tabela 4.2: Configuração de Potência e Energia

4.2. Parâmetros Estabelecidos

Como citado anteriormente, a partir de executadas as simulações, são gerados arquivos do tipo *trace*, que contém as informações de todos os eventos ocorridos durante os experimentos. A partir desses arquivos, através do uso de *scripts* em linguagem *awk*, é possível fazer a leitura dos *traces* e retirar os dados

que servirão como parâmetros para avaliação. Para o objetivo deste trabalho, foram considerados:

- Consumo médio de energia da rede: estabelecido pela média de energia consumida por todos os nós que compõe a rede;
- A energia consumida pelos nós ativos na rede: aplica-se ao transmissor, receptor e aos nós intermediários (saltos);

4.3. Análise de Resultados

Nesta seção, os resultados comparativos entre os dois modelos de descarga de bateria, obtidos através das simulações, são expostos por meio de gráficos e tabelas. Porém, em alguns momentos nos gráficos, é possível que as linhas que representam o comportamento energético dos nós em relação ao tempo, não sejam claramente visualizadas devido a apresentarem valores muito próximos de descarga da bateria.

4.3.1. Consumo de Energia da Rede

Aqui são apresentados os gráficos que ilustram o comportamento individual de descarga da bateria dos nós que constituem a rede, para os oito cenários montados. É também exposta uma tabela que contém a média do consumo de todas as redes, obtida através da média de energia gasta por cada um dos nós e, incluindo o ganho percentual quanto ao custo energético que um modelo teve sobre o outro.

Cenário 1 - Ambiente aleatório com 20 nós:

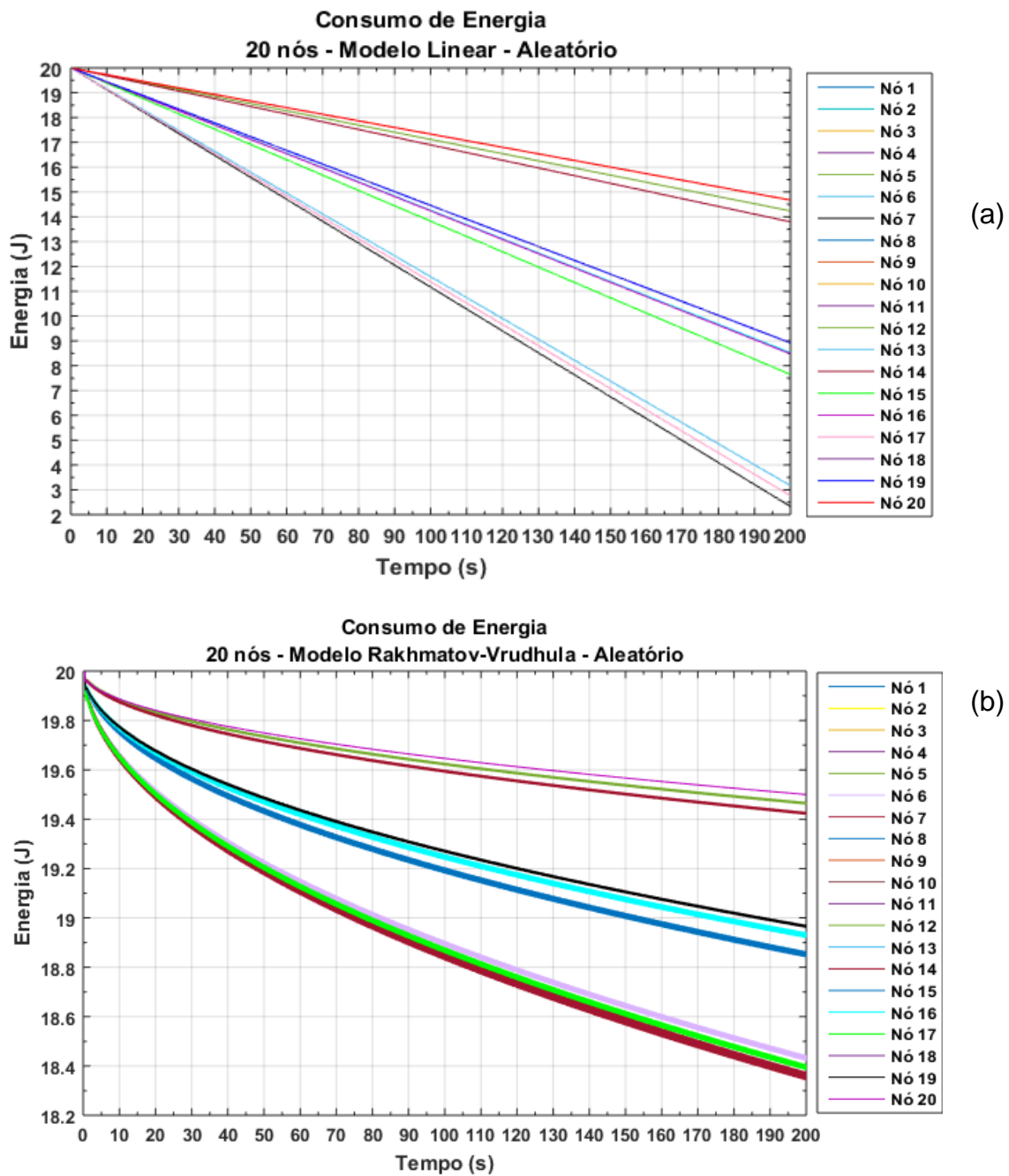


Figura 4.3: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 20 nós.

Na Figura 4.3, é comparado graficamente o desempenho energético individual dos nós que compõe a rede do cenário 1, utilizando-se dos dois modelos de bateria abordados, em um ambiente montado com 20 nós dispostos de forma aleatória, configurados com energia inicial de 20 *Joules* e um tempo total de 200 segundos de simulação.

Os gráficos apontam a descarga da bateria dos nós sensores. Diante disso, observou-se que quando submetida ao modelo R-V, a rede alcançou uma considerável redução quanto ao consumo de energia dos nós, chegando a obter, conforme mostra a **Tabela 4.3**, um ganho energético de 41,7% na média de consumo da rede, quando contraposta ao modelo Linear para o mesmo cenário 1. A exemplo disto destacou-se o nó 7, que obteve o maior consumo de bateria pelo modelo Linear, chegando ao fim da simulação com 2,3 J de capacidade remanescente. Já pelo modelo de R-V, o mesmo nó completou a simulação com 18,3 J de capacidade em sua bateria.

Cenário 2 - Ambiente aleatório com 30 nós:

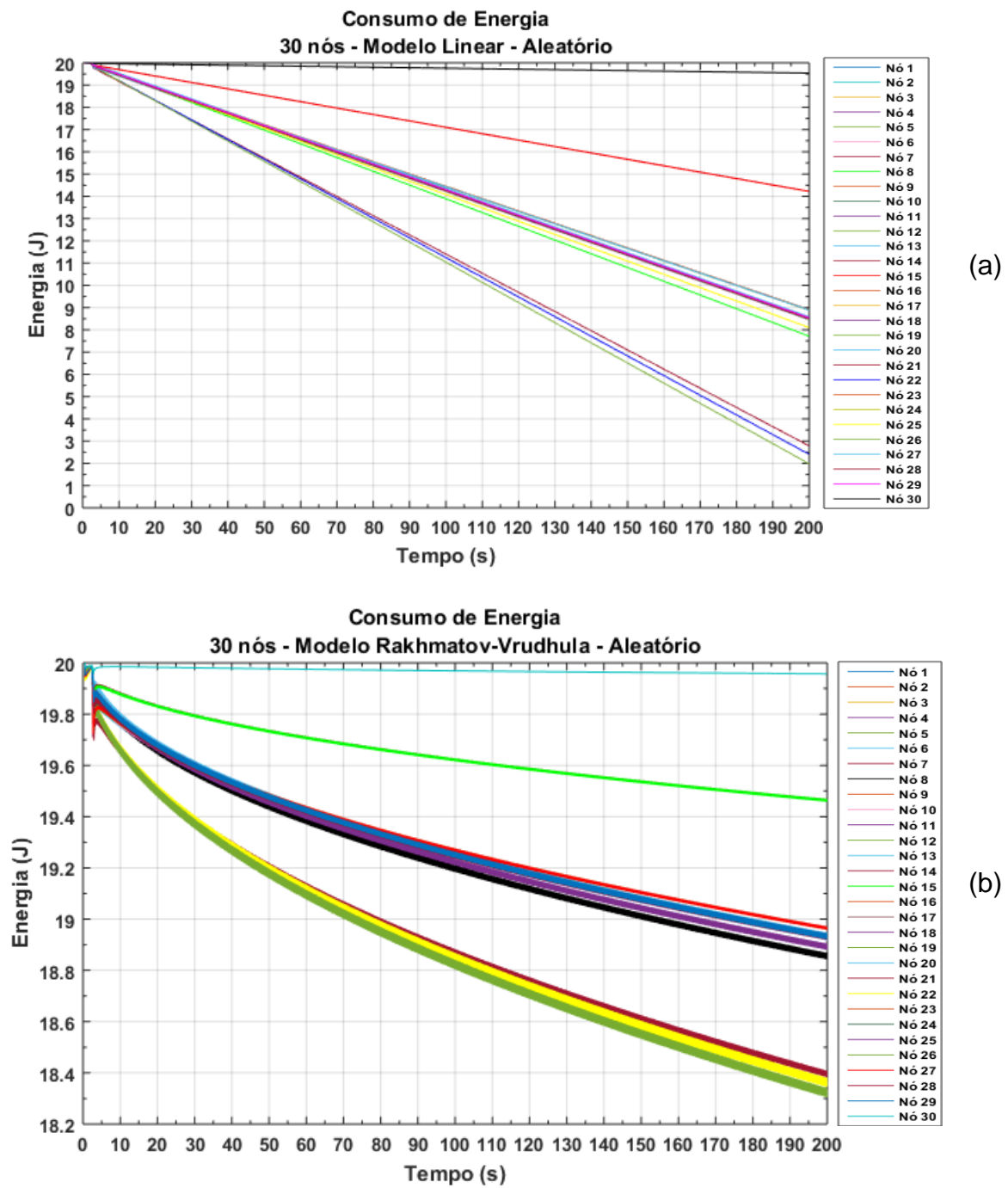


Figura 4.4: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 30 nós.

Neste cenário, os modelos de bateria são comparados em uma rede com 30 nós, postos randomicamente. Aqui, percebeu-se novamente o desempenho superior do modelo realístico, em detrimento ao modelo Linear. Para todos os nós, o consumo de energia pelo modelo R-V foi significativamente menor. Destaca-se o nó 26, que enquanto no modelo Linear teve capacidade remanescente de 1,9 J, pelo modelo de R-V, chegou ao fim da simulação com 18,3 J.

Este também foi o cenário que apresentou o maior ganho percentual em relação ao consumo da rede como um todo, quando sujeitado ao modelo de Rakhmatov-Vrudhula em comparação ao modelo convencional, de acordo com a **Tabela 4.3**.

Cenário 3 - Ambiente aleatório com 40 nós:

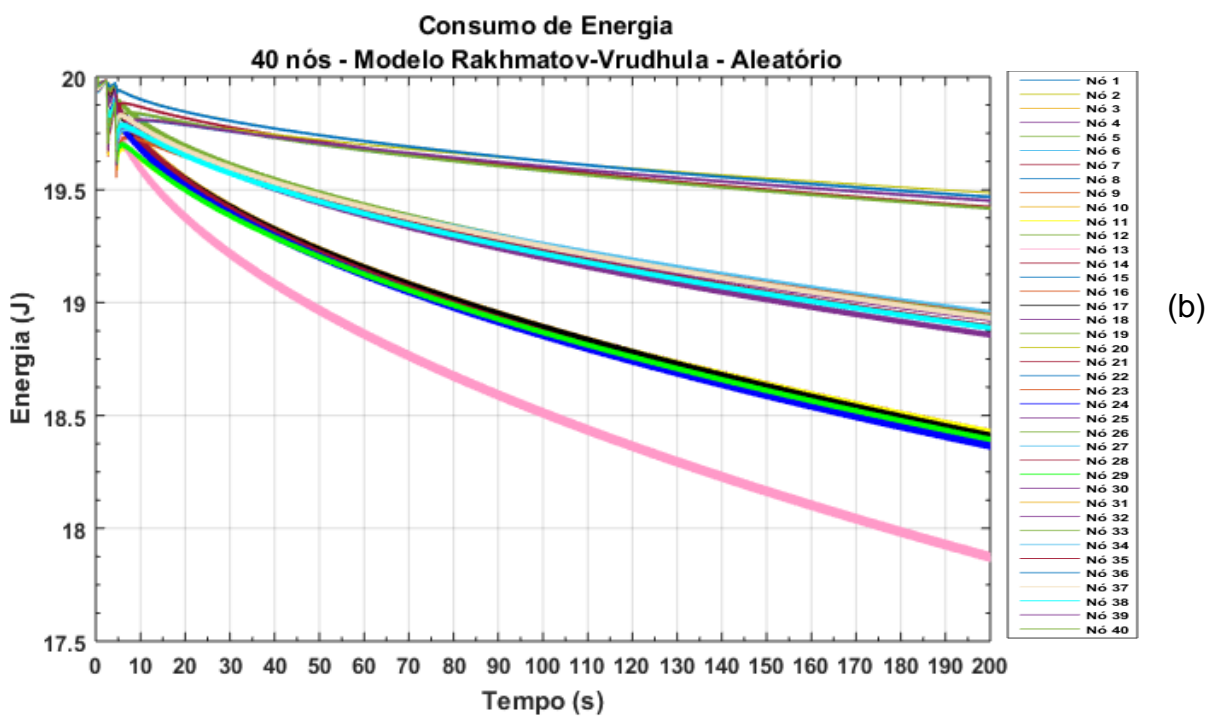
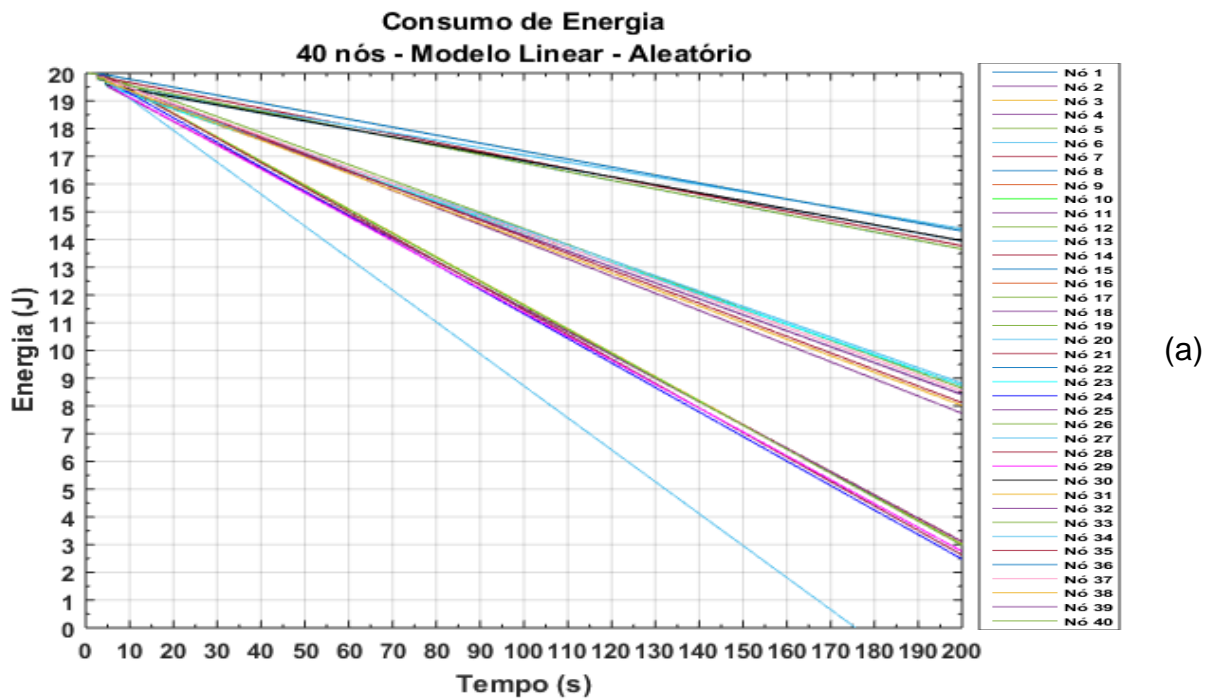


Figura 4.5: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 40 nós.

Neste ambiente, a rede foi simulada com 40 nós organizados de forma aleatória. Mais uma vez notou-se o comportamento energético mais satisfatório da rede pelo modelo de Rakhmatov-Vrudhula.

No cenário 3, evidencia-se que pela primeira vez, um nó teve sua carga de bateria esgotada, quando utilizado o modelo Linear na simulação. Trata-se do nó 13, que zerou sua carga de bateria antes mesmo do fim do experimento. O mesmo não aconteceu quando aplicado o modelo R-V à rede, o nó permaneceu com 17,8 J de energia ao fim da simulação.

Cenário 4 - Ambiente aleatório com 50 nós:

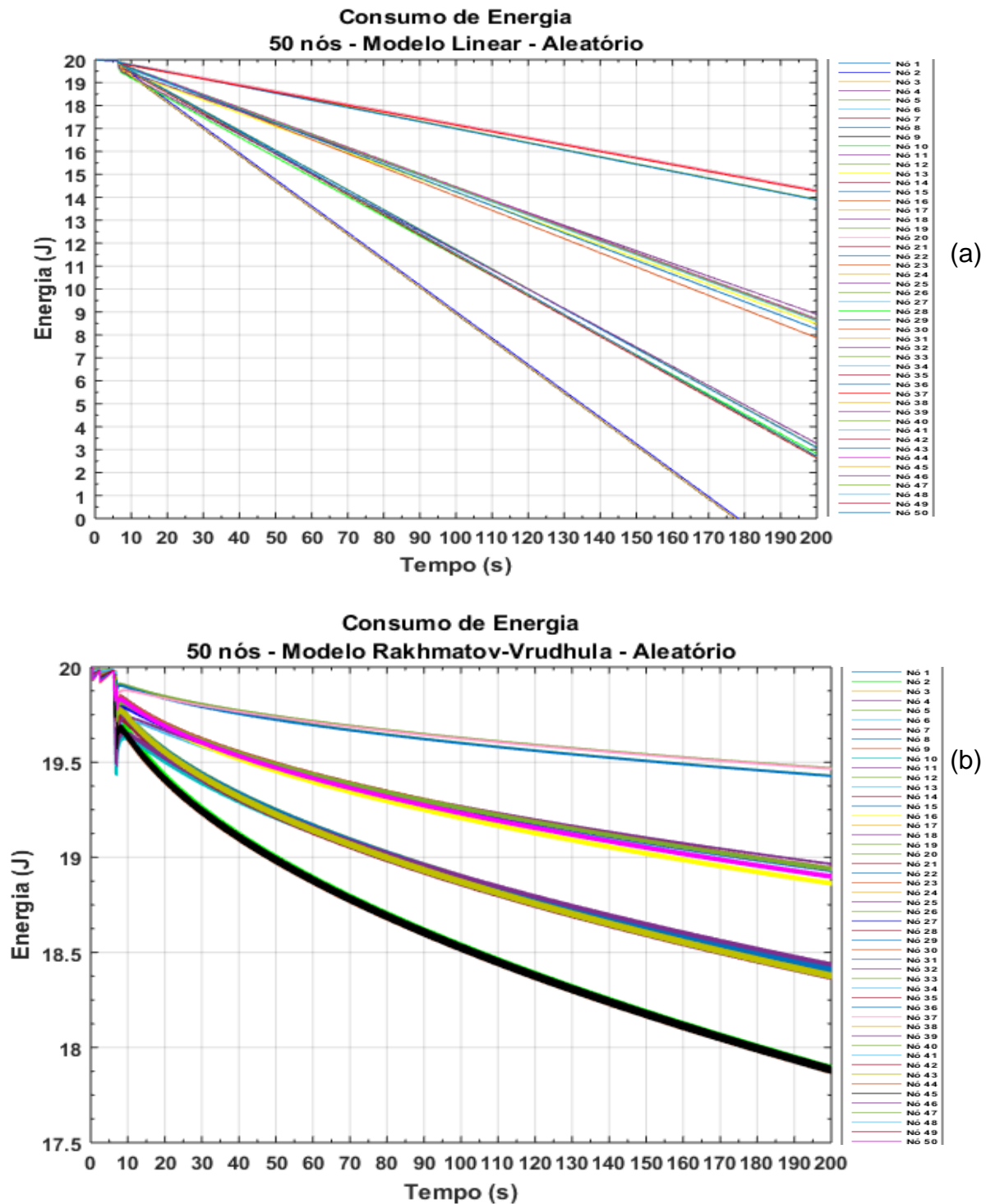


Figura 4.6: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 50 nós.

Agora a rede é simulada com 50 nós distribuídos aleatoriamente. Como em cenários anteriores, o modelo R-V distingue-se por continuar apresentando um melhor desempenho em contraposto ao modelo convencional.

Desta vez, os nós 2 e 45 tiveram suas cargas de bateria esgotadas antes de chegar ao fim da simulação, quando o modelo Linear foi adotado. Empregando o modelo realístico, ambos os nós obtiveram carga remanescente de 17,8 J.

Cenário 5 - Ambiente *Grid* com 20 nós:

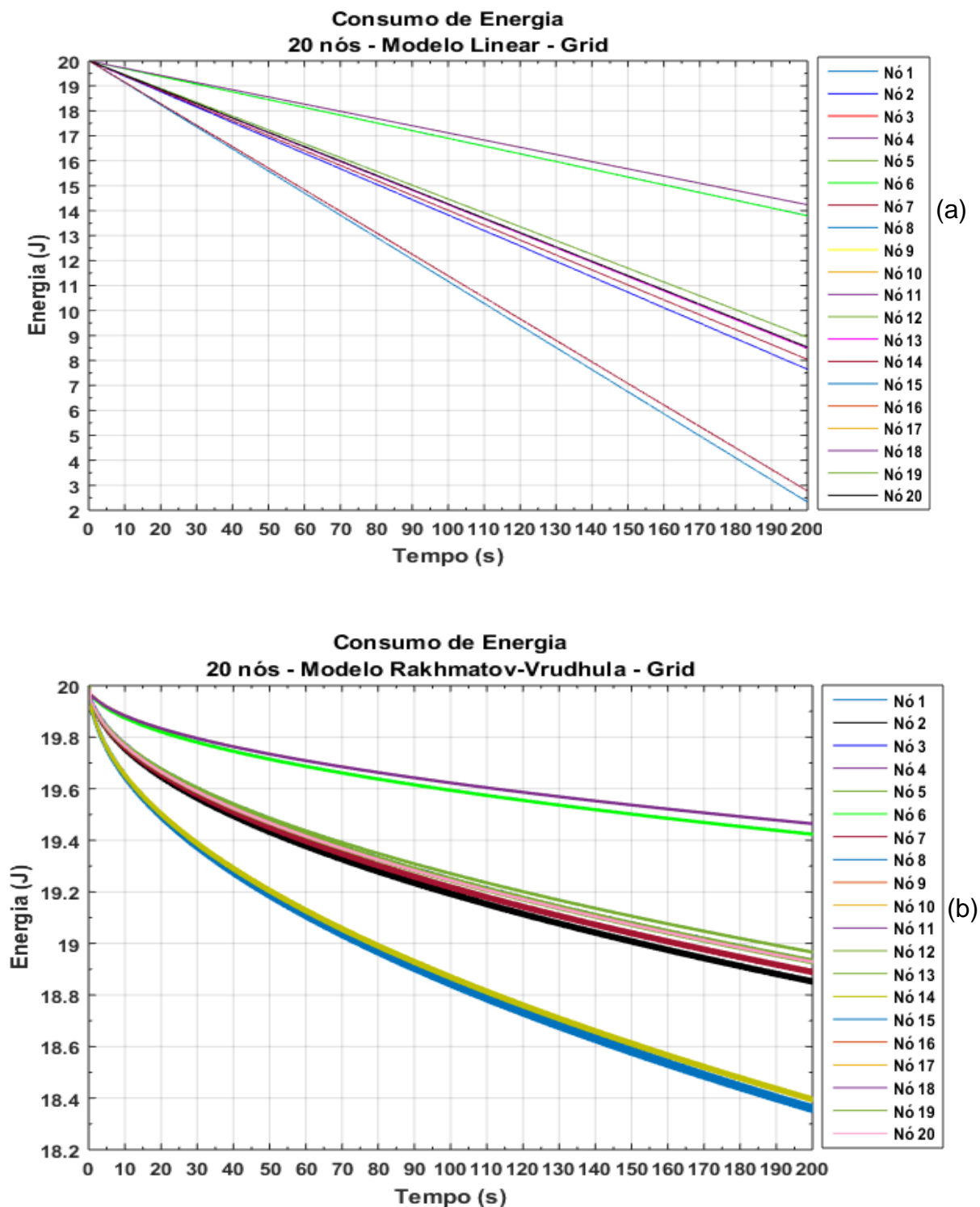


Figura 4.7: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 20 nós em *Grid*.

No cenário 5, modificou-se a forma de distribuição dos nós, agora distribuídos em forma de *grid*.

Neste formato, ressalta-se que o modelo realístico ainda permanece com seu desempenho superior ao modelo Linear quanto à energia de todos os nós. Dado o nó 8 que teve maior consumo de bateria, pelo modelo de R-V finalizou a simulação ainda com 18,3 J de energia, enquanto que no modelo convencional, sua capacidade de bateria restante foi de 2,3 J.

Cenário 6 - Ambiente *Grid* com 30 nós:

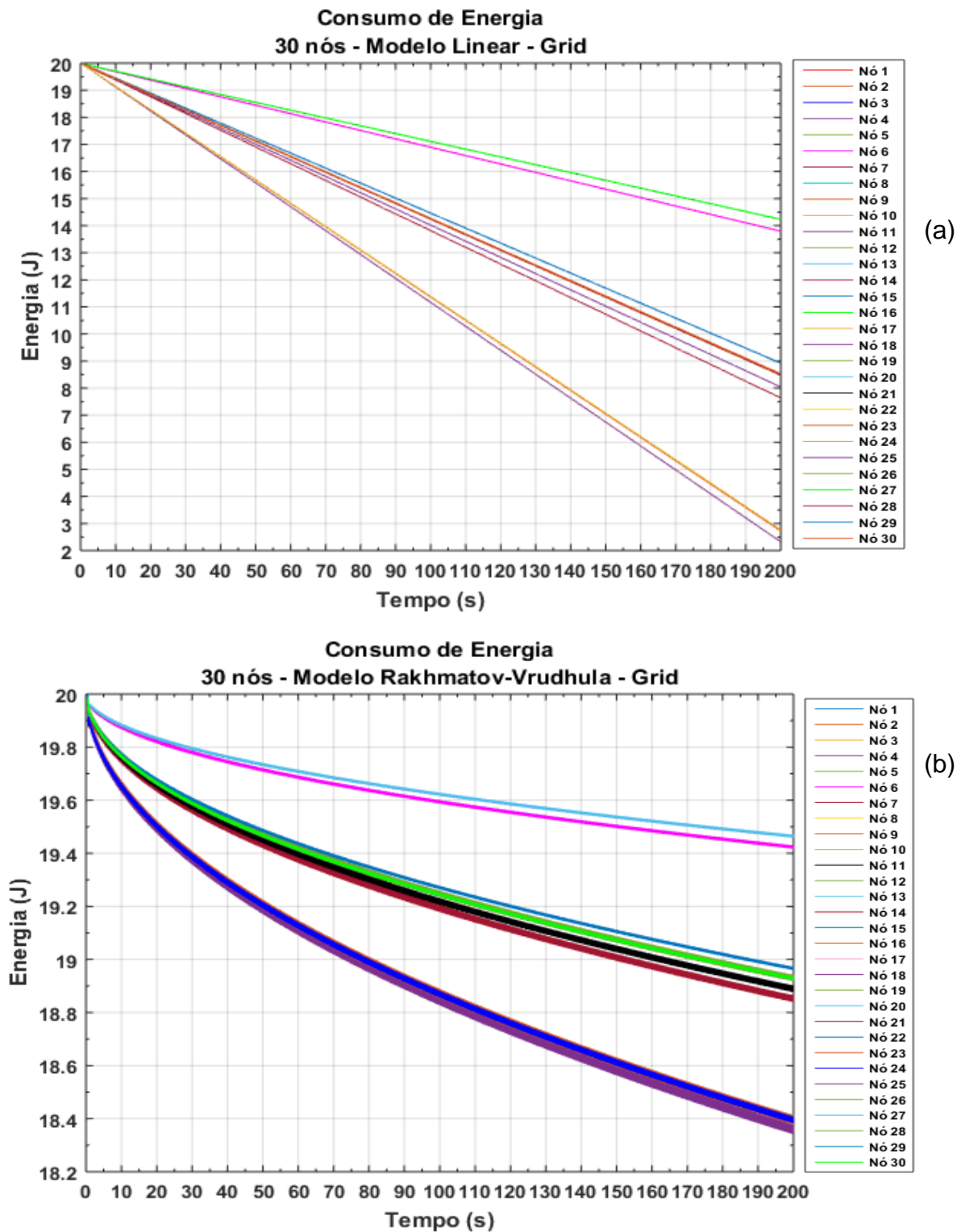


Figura 4.8: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 30 nós em *Grid*.

Cenário composto por 30 nós distribuídos em *grid*.

Como já esperado, o modelo de Rakhmatov-Vrudhula sobressaiu-se mais uma vez ao modelo Linear neste ambiente, quanto à energia gasta por cada um dos nós da rede. O nó 18, que obteve o maior consumo de bateria, atingiu os mesmos valores do cenário anterior, tanto para o modelo R-V, quanto para o modelo convencional. O cenário 6 também apresentou um ganho de 41,1 % quanto ao consumo de energia da rede pelo modelo realístico em relação ao Linear, em conformidade com a **Tabela 4.3**.

Cenário 7 - Ambiente *Grid* com 40 nós:

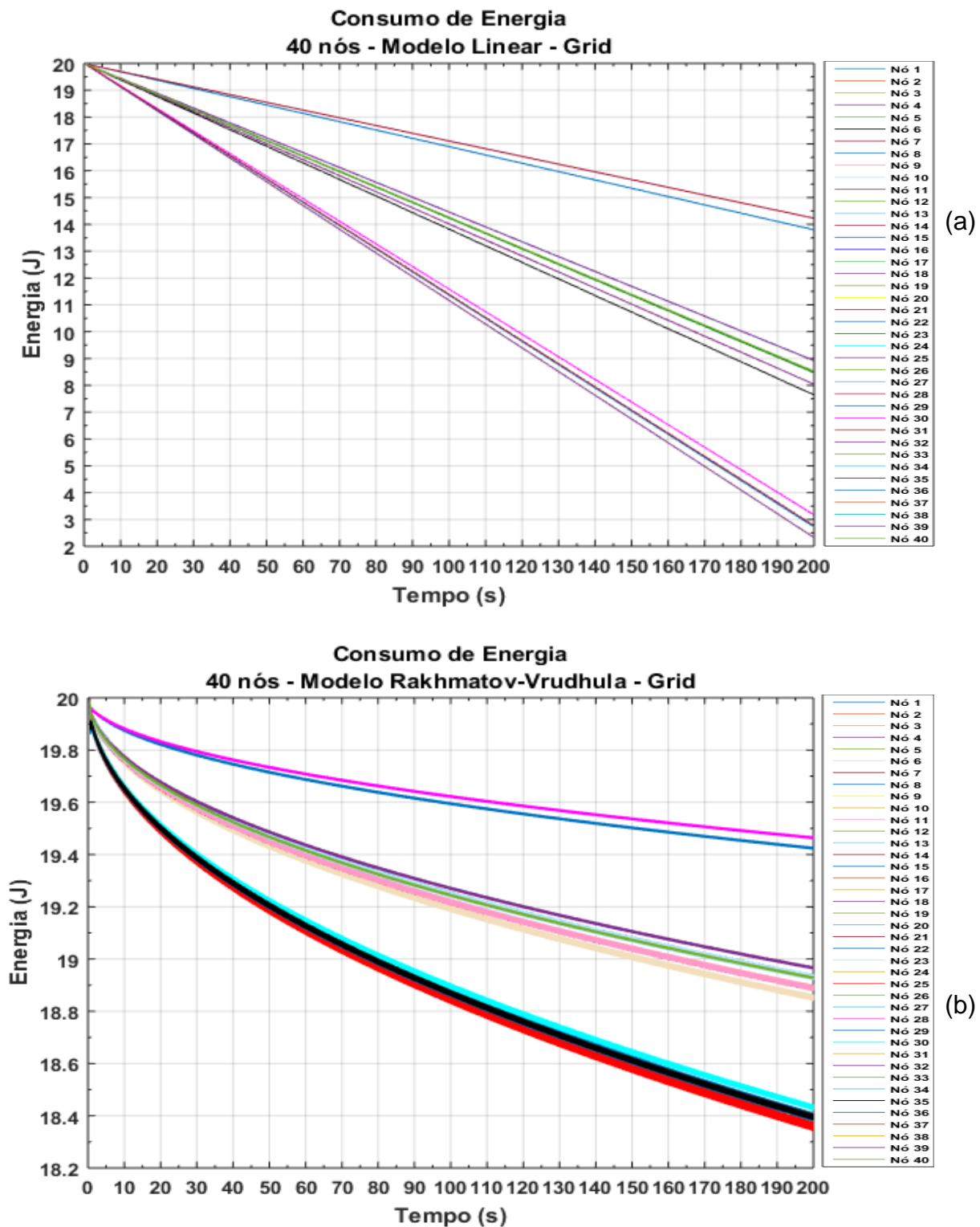


Figura 4.9: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 40 nós em *Grid*.

Agora o cenário possui 40 nós, dispostos em *grid*.

Constatou-se um comportamento semelhante aos dois cenários anteriores em *grid*. Além do destaque para a melhor performance do modelo realístico de descarga de bateria, os valores de energia restante para o nó com maior consumo, também se mantiveram os mesmo dos cenários em *grid* anteriores para ambos os modelos.

Cenário 8 - Ambiente *Grid* com 50 nós:

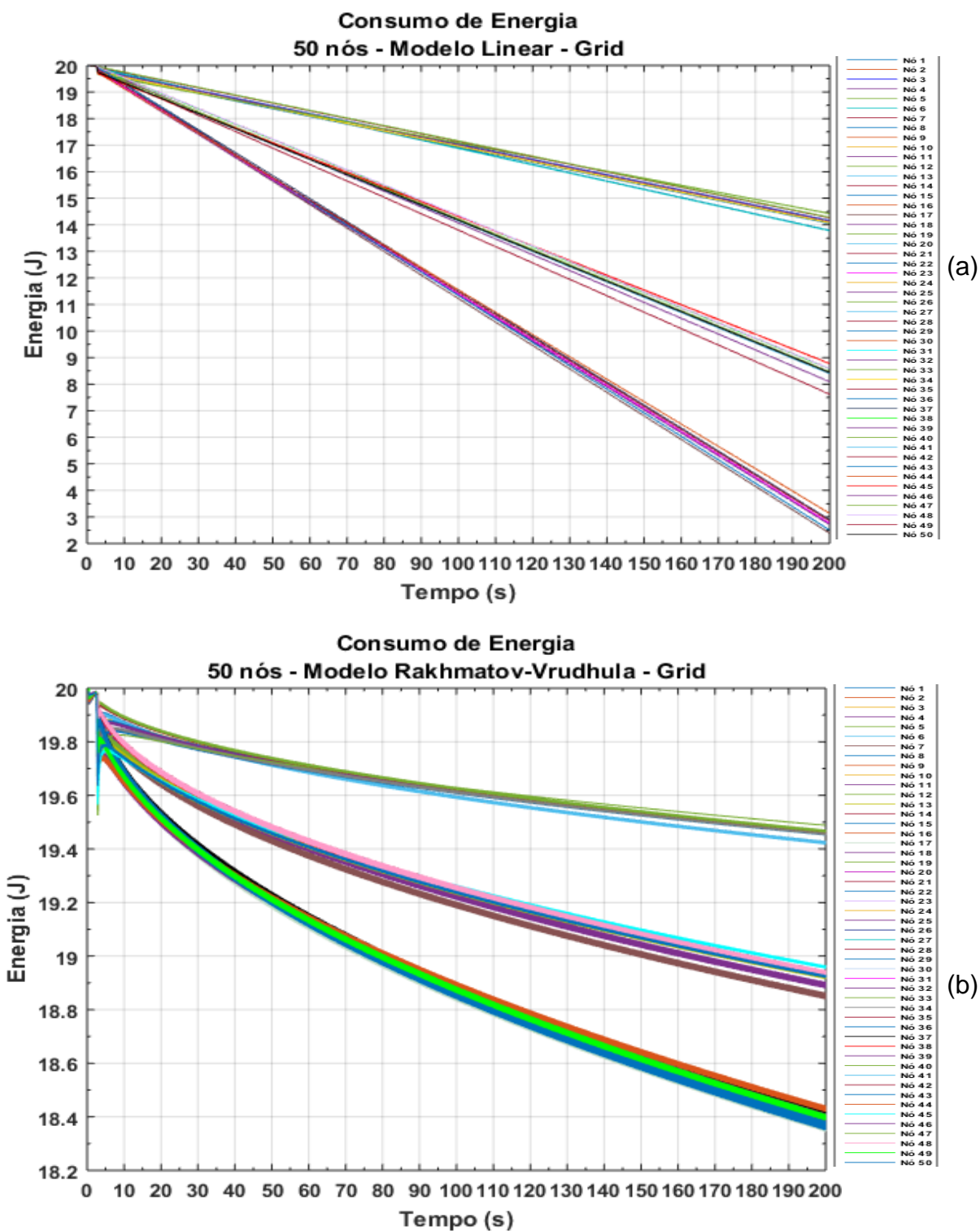


Figura 4.10: Consumo individual dos nós na rede para o modelo Linear (a) e, para o modelo Rakhmatov-Vrudhula (b) com 50 nós em *Grid*.

Neste último cenário simulado com 50 nós em *grid*, novamente pôde-se perceber que o modelo de Rakhmatov-Vrudhula proporcionou um funcionamento mais duradouro da bateria de cada um dos nós sensores da rede, especialmente para o nó 43, com maior consumo. Restando assim, 2,5 J de energia no modelo Linear e, 18,3 J no modelo R-V.

Diante dos gráficos apresentados, evidenciaram-se significativas diferenças entre o consumo de energia dos nós sensores nos modelos Linear e de R-V. Foi feita a comparação entre os dois modelos para todos os cenários montados, o que apontou um melhor desempenho do modelo realístico de Rakhmatov-Vrudhula.

Pôde-se observar que no modelo Linear, a capacidade remanescente da bateria dos nós foi consideravelmente menor, chegando até mesmo a ser zerada como ocorreu nos cenários 3 e 4. No primeiro, o nó 13 teve sua carga esgotada aos 175 segundos de simulação, enquanto que pelo modelo de Rakhmatov-Vrudhula, o mesmo nó chegou ao fim da simulação com 17,8 J de capacidade restante. Já no cenário 4, os nós 2 e 45 tiveram morte prematura pois esgotaram suas baterias nos 178 e 177 segundos respectivamente. Quando comparados no modelo R-V, os dois nós conseguiram terminar a simulação ambos com 17,8 J de capacidade residual.

O modelo de R-V também apresentou uma melhor eficiência energética para os cenários em *Grid*. Neste tipo de distribuição dos nós, nenhum deles teve sua capacidade de bateria esgotada, porém mantiveram o expressivo consumo de energia quando utilizado o modelo Linear. Quando se aplicou o modelo realístico, o consumo de energia dos nós diminuiu significativamente. A exemplo disso, observamos o cenário 5: o nó 8, que teve o maior gasto energético, ficou com 2,3 J de capacidade restante de bateria. Pelo modelo de Rakhmatov-Vrudhula, restou ainda 18,3 J.

Através dos resultados individuais de comportamento energético dos nós, obteve-se também a média do consumo de toda a rede de cada um dos cenários propostos. A Tabela 4.3 mostra estes números, e ainda apresenta o ganho percentual quanto ao gasto de energia da rede que o modelo R-V conquistou, em detrimento do modelo Linear.

Aleatório	Linear (J)	Rakhmatov-Vrudhula (J)	Ganho (%)
20 Nós	10,7	19,1	41,7
30 Nós	9,0	18,6	48,0
40 Nós	10,4	19,0	42,8
50 Nós	11,9	19,2	36,4
Grid			
20 Nós	11,8	19,2	36,8
30 Nós	10,9	19,1	41,1
40 Nós	11,2	19,1	39,4
50 Nós	12,4	19,2	34,0

Tabela 4.3: Médias de consumo das redes

Os resultados constatarem o desempenho mais acurado do modelo R-V. Este melhor rendimento deve-se ao fato do modelo realista considerar o efeito não-linear de relaxação, fazendo com que a bateria recupere parte de sua capacidade e, conseqüentemente, permitindo que os dispositivos sobrevivam por mais tempo na rede.

4.3.2. Energia dos Nós Ativos

Também analisou-se especificamente a descarga da bateria dos nós que participaram efetivamente no encaminhamento dos pacotes, sendo eles o transmissor, o nó *sink* e os “saltos” que fazem o caminho intermediário entre o nó fonte e o receptor. A seguir, é mostrado graficamente como esses nós ativos se comportaram energeticamente em todos os cenários nos dois modelos de bateria estudados.

Cenário 1 – Ambiente aleatório com 20 nós:

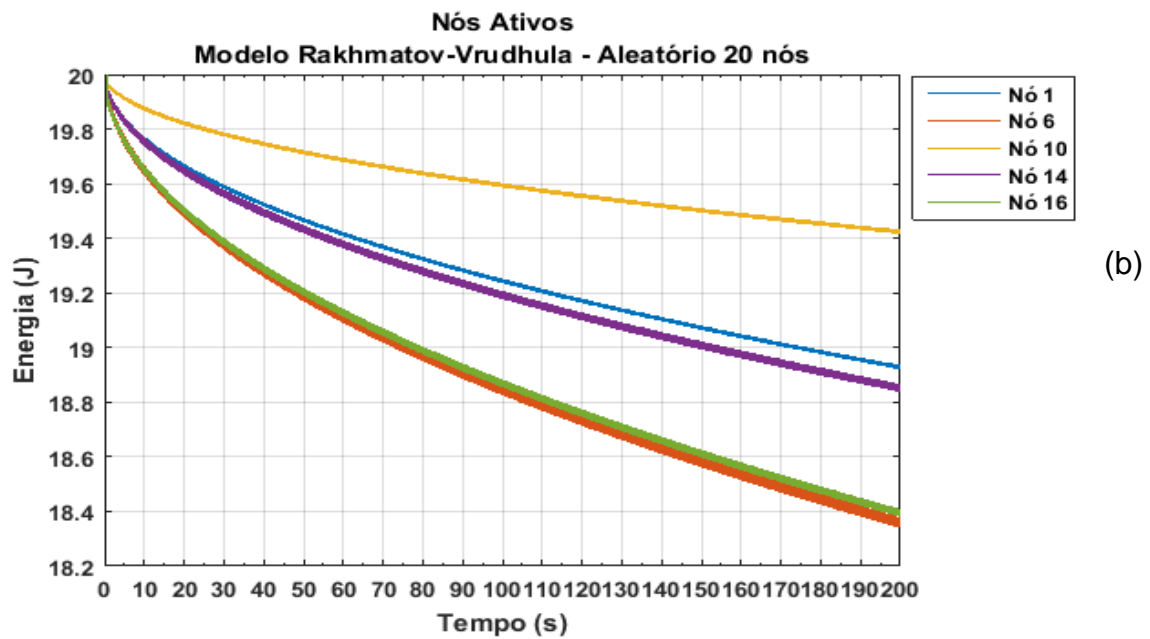
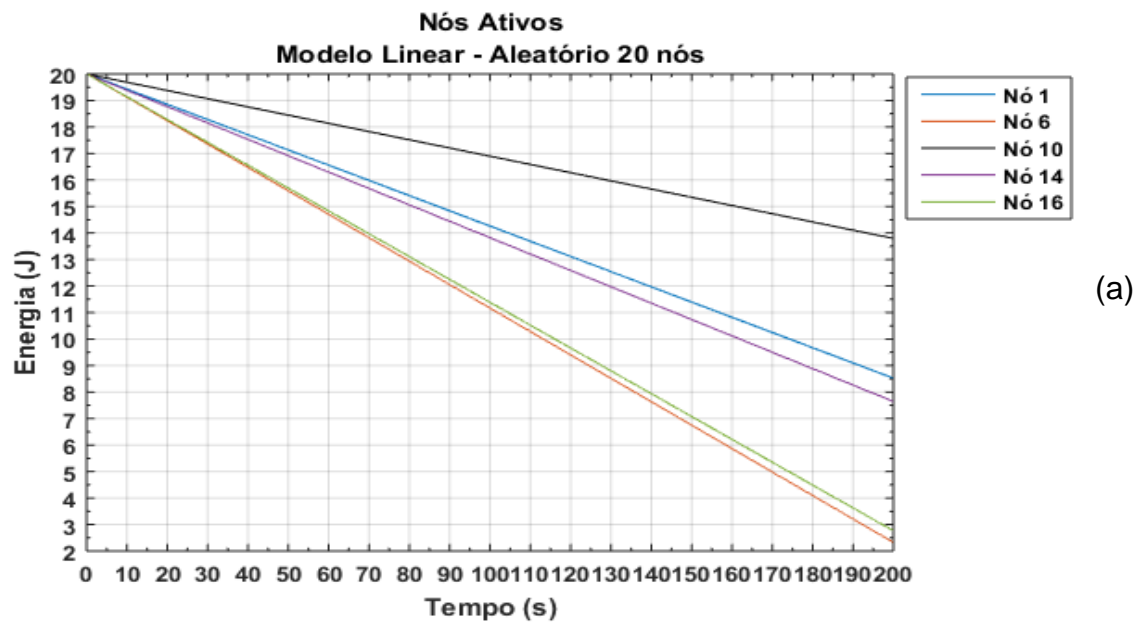


Figura 4.11: Consumo de energia dos 5 nós ativos no ambiente aleatório com 20 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).

Neste cenário, o nó 1 e 10 foram definidos como sendo fonte e *sink* respectivamente. Enquanto que no modelo Linear, a capacidade remanescente em suas baterias foi de 8,5 e 13,8 *Joules*, no modelo de R-V a capacidade restante foi consideravelmente maior, restando ainda 18,9 J para o nó 1 e 19,4 J para o nó 10. O nó 6 foi o que mais consumiu energia dentre os nós que intermediam a comunicação entre a fonte e o destino final. Por isso, destaca-se sua capacidade remanescente de bateria, que no modelo Linear foi de 2,3 J e no modelo realístico chegou ao termino da simulação com 18,3 J.

Foi percebido que o mesmo comportamento se repete para os demais cenários, como apresentado nas tabelas em sequência.

Cenário 2 – Ambiente aleatório com 30 nós:

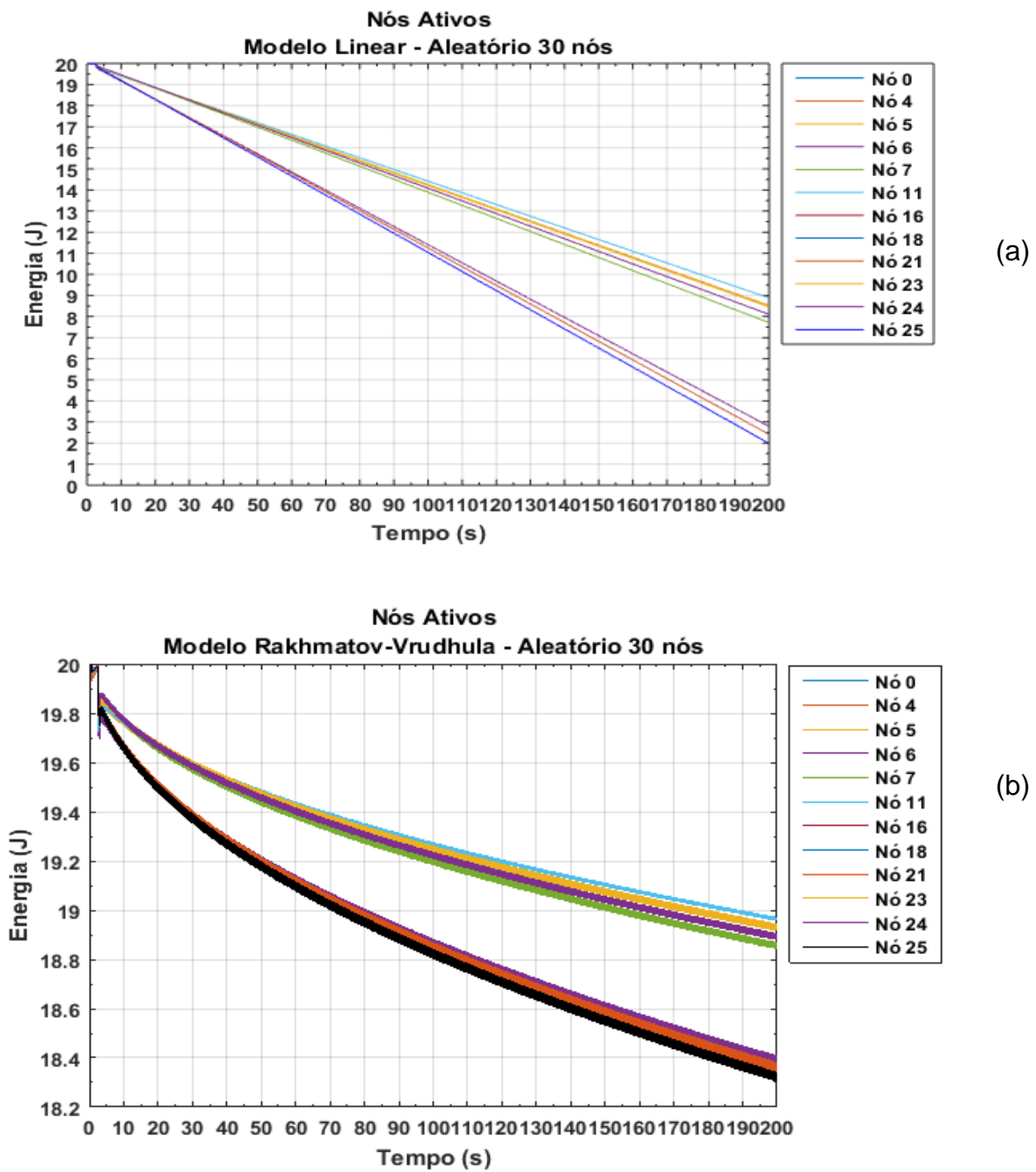


Figura 4.12: Consumo de energia dos 12 nós ativos no ambiente aleatório com 30 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).

Energia Remanescente em (a)		
Nó Fonte 4	Nó Sink 16	Nó Com Maior Consumo 25
8,5 J	8,1 J	1,9 J

Energia Remanescente em (b)		
Nó Fonte 4	Nó Sink 16	Nó Com Maior Consumo 25
18,9 J	18,8 J	18,3 J

Tabela 4.4: Energia remanescente de nós ativos no cenário 2.

Na tabela 4.4, são destacados os valores de energia restante nos principais nós ativos da rede. O nó fonte, *sink* e o de maior consumo, têm suas cargas residuais de bateria comparadas, tanto para o modelo Linear (a), quanto utilizando-se do modelo R-V (b).

Cenário 3 – Ambiente aleatório com 40 nós:

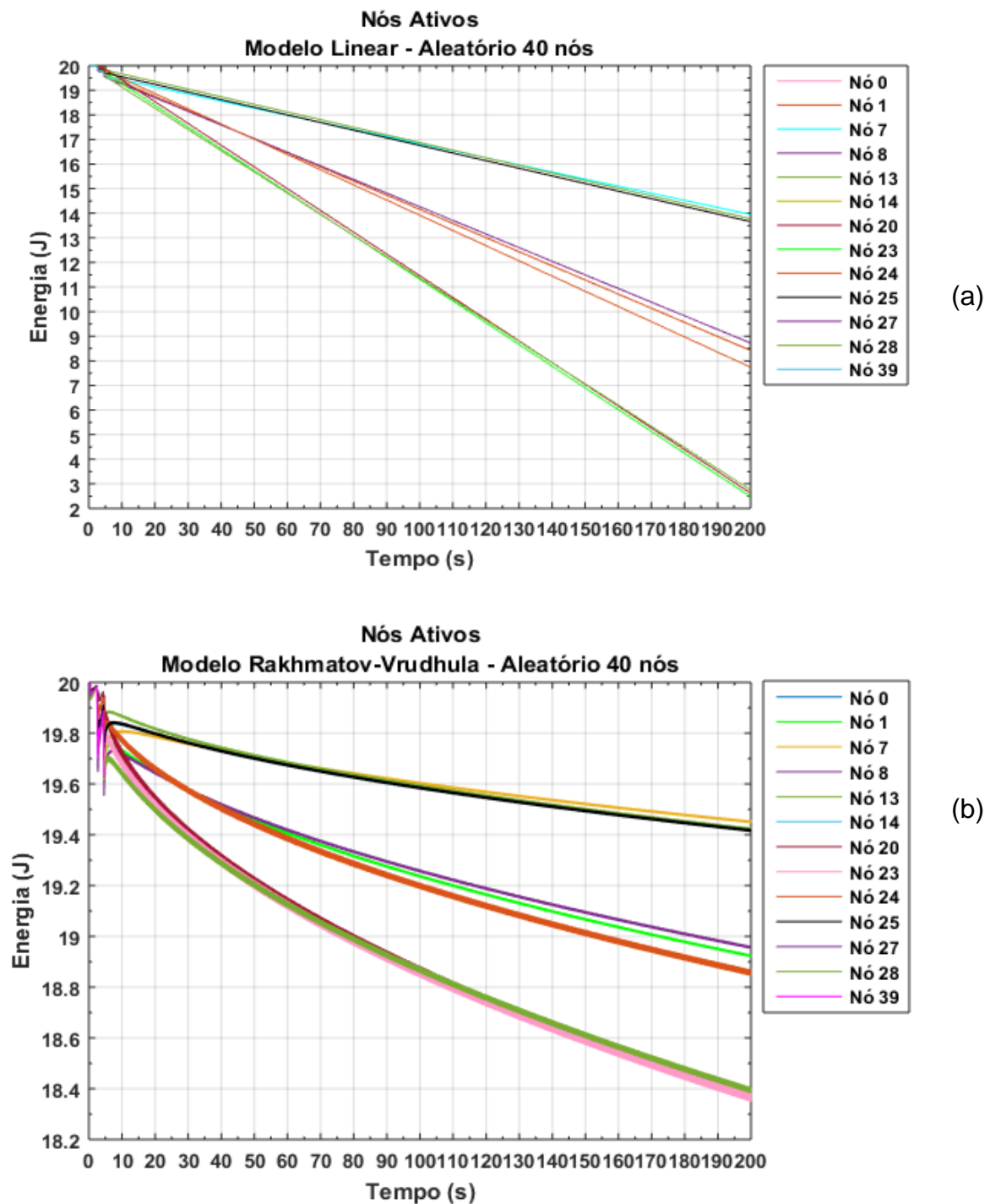


Figura 4.13: Consumo de energia dos 13 nós ativos no ambiente aleatório com 40 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).

Energia Remanescente em (a)		
Nó Fonte 1	Nó Sink 13	Nó Com Maior Consumo 23
8,4 J	13,7 J	2,4 J

Energia Remanescente em (b)		
Nó Fonte 1	Nó Sink 13	Nó Com Maior Consumo 23
18,9 J	19,4 J	18,3 J

Tabela 4.5: Energia remanescente de nós ativos no cenário 3.

A tabela 4.5 evidencia, mais uma vez, o comportamento superior do modelo R-V (b), em oposição ao modelo convencional (a), para o gasto energético dos nós em questão.

Cenário 4 – Ambiente aleatório com 50 nós:

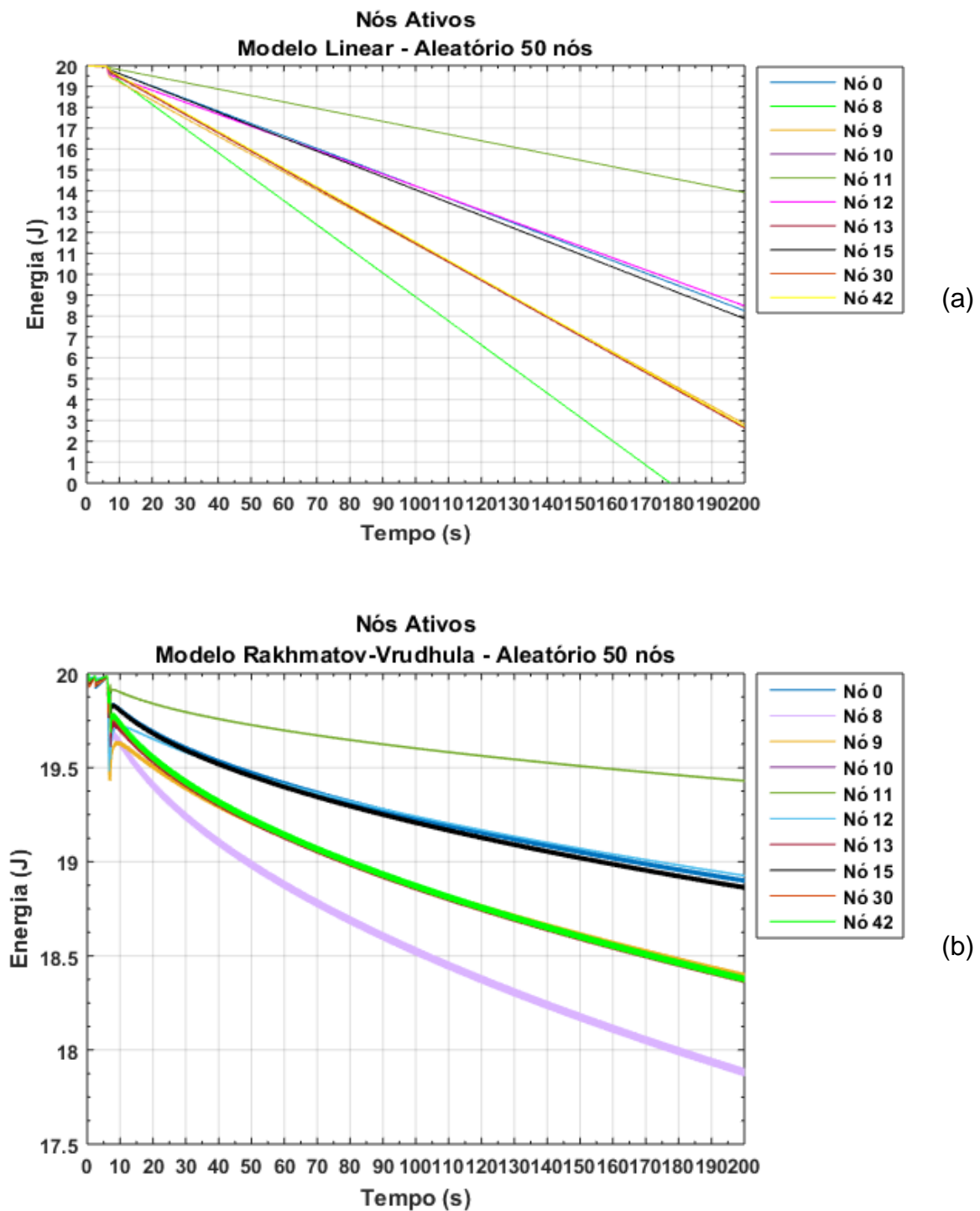


Figura 4.14: Consumo de energia dos 10 nós ativos no ambiente aleatório com 50 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).

Energia Remanescente em (a)		
Nó Fonte 12	Nó Sink 11	Nó Com Maior Consumo 8
8,4 J	13,9 J	0 J

Energia Remanescente em (b)		
Nó Fonte 12	Nó Sink 11	Nó Com Maior Consumo 8
18,9 J	19,4 J	17,8 J

Tabela 4.6: Energia remanescente de nós ativos no cenário 4.

Aqui, atentou-se para o nó 8 que, pelo modelo Linear (a), teve sua carga de bateria esgotada. Já pelo modelo R-V (b), o mesmo nó reduziu substancialmente seu consumo de energia.

Cenário 5 - Ambiente *Grid* com 20 nós:

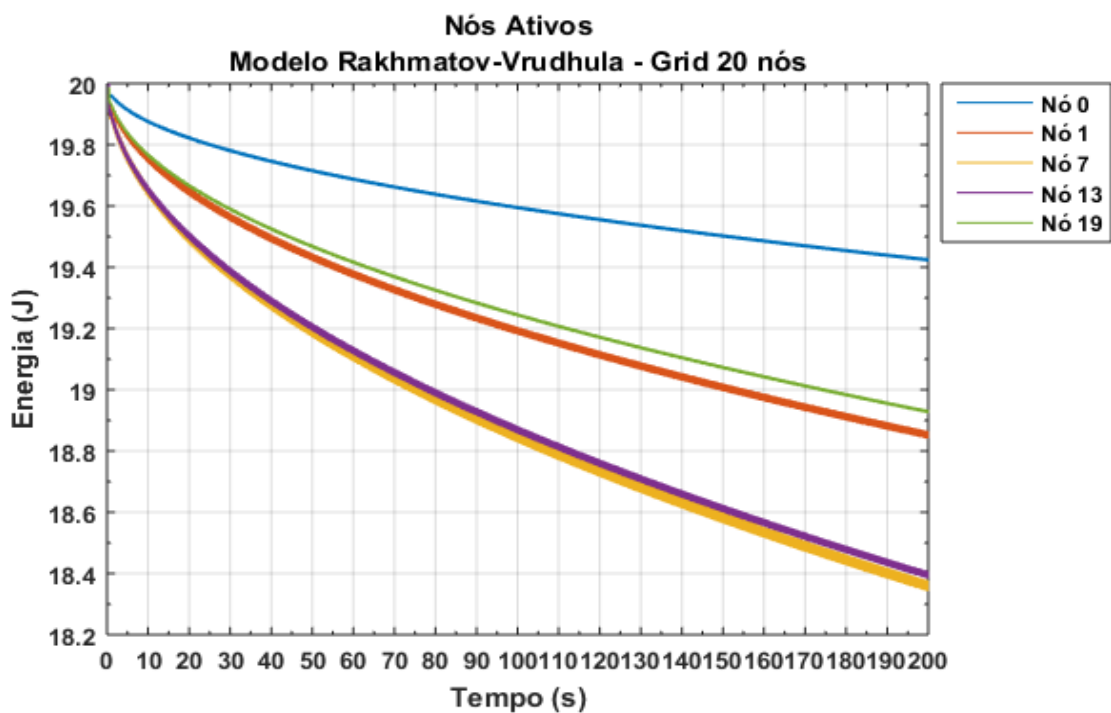
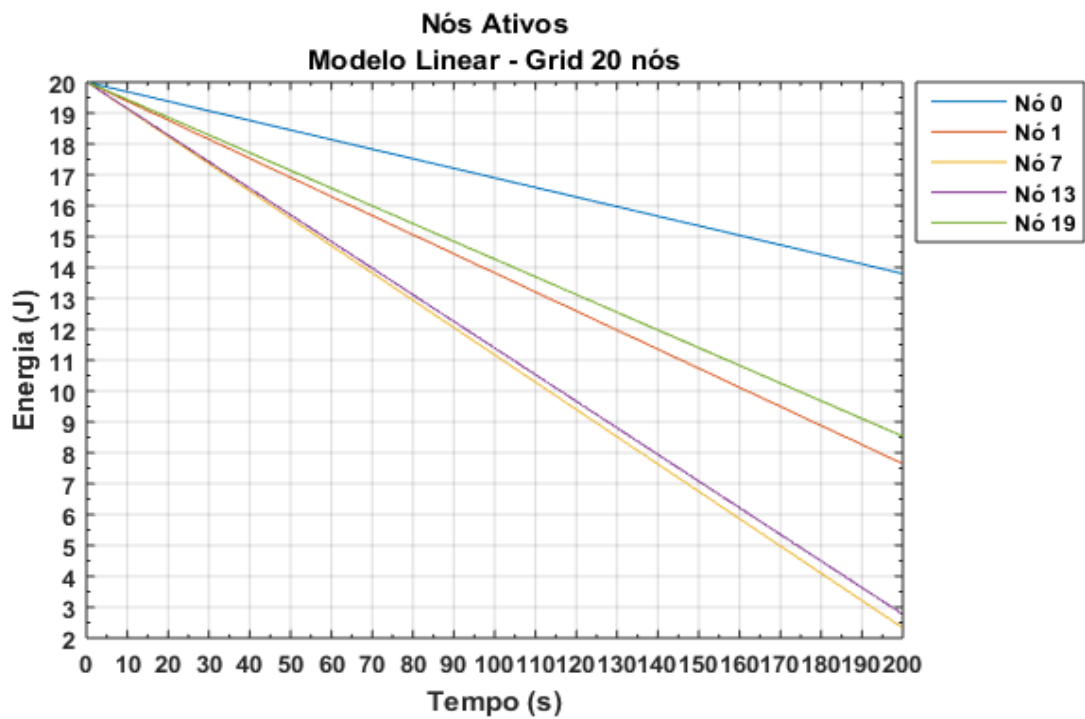


Figura 4.15: Consumo de energia dos 5 nós ativos no ambiente em *Grid* com 20 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).

Energia Remanescente em (a)		
Nó Fonte 19	Nó Sink 0	Nó Com Maior Consumo 7
8,5 J	13,7 J	2,3 J

Energia Remanescente em (b)		
Nó Fonte 19	Nó Sink 0	Nó Com Maior Consumo 7
18,9 J	19,4 J	18,3 J

Tabela 4.7: Energia remanescente de nós ativos no cenário 5.

Cenário 6 - Ambiente *Grid* com 30 nós:

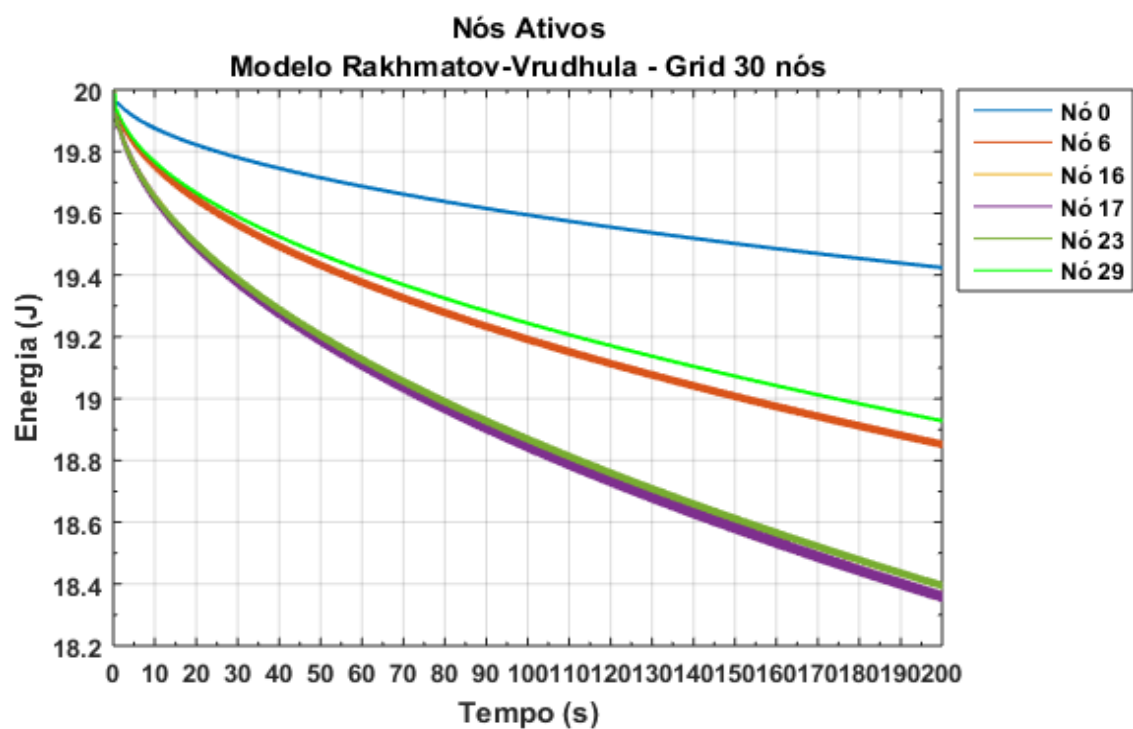
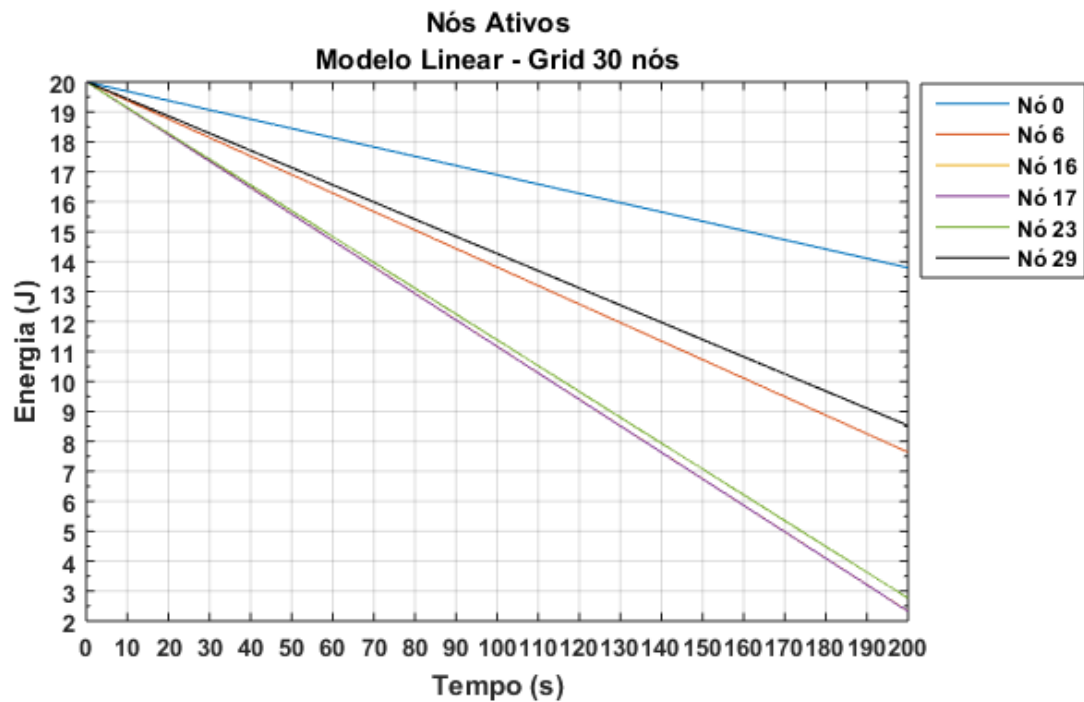


Figura 4.16: Consumo de energia dos 6 nós ativos no ambiente em *Grid* com 30 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).

Energia Remanescente em (a)		
Nó Fonte 29	Nó Sink 0	Nó Com Maior Consumo 17
8,5 J	13,7 J	2,3 J

Energia Remanescente em (b)		
Nó Fonte 29	Nó Sink 0	Nó Com Maior Consumo 17
18,9 J	19,4 J	18,3 J

Tabela 4.8: Energia remanescente de nós ativos no cenário 6.

Cenário 7 - Ambiente *Grid* com 40 nós:

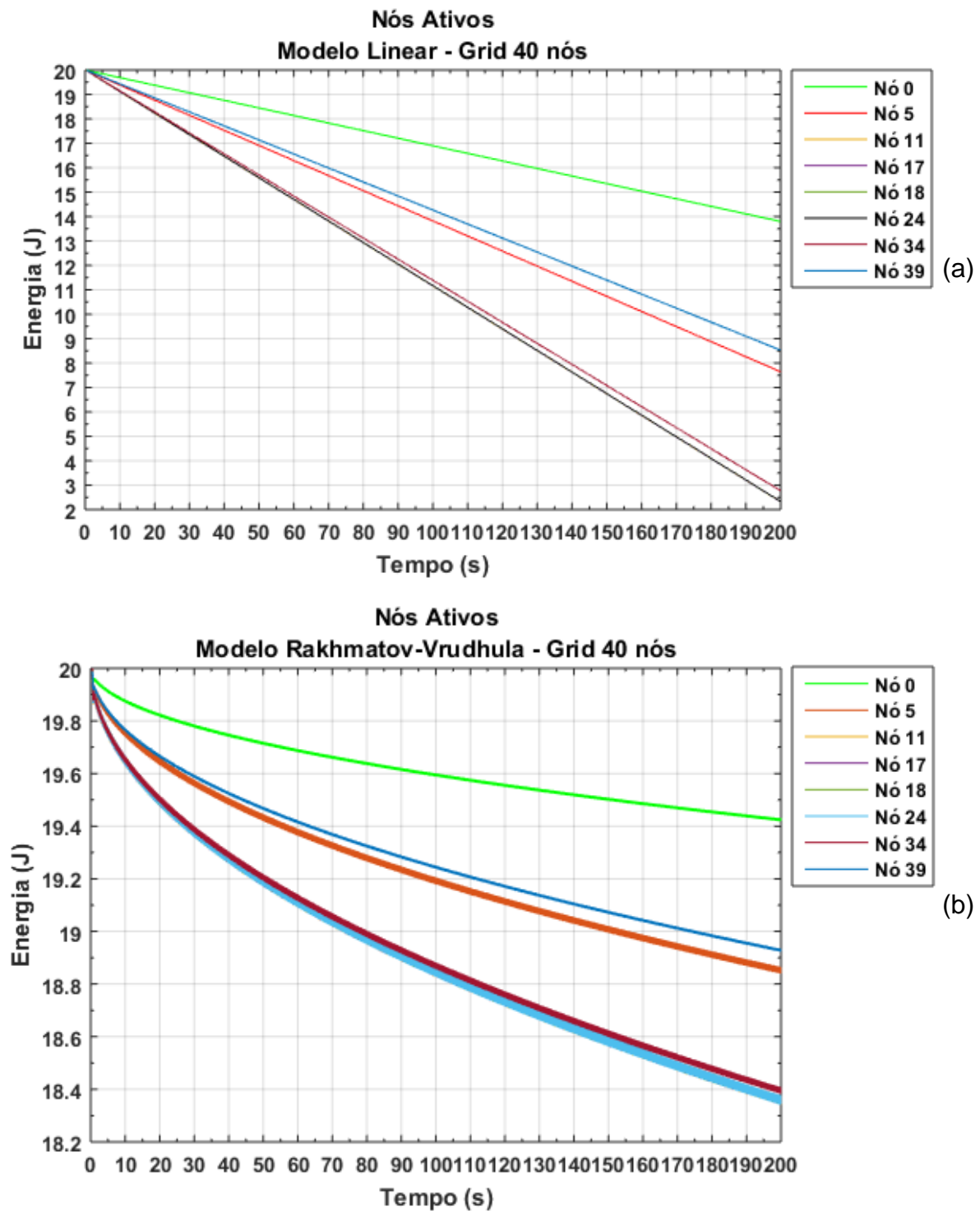


Figura 4.17: Consumo de energia dos 8 nós ativos no ambiente em *Grid* com 40 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).

Energia Remanescente em (a)		
Nó Fonte 39	Nó Sink 0	Nó Com Maior Consumo 24
8,5 J	13,7 J	2,3 J

Energia Remanescente em (b)		
Nó Fonte 39	Nó Sink 0	Nó Com Maior Consumo 24
18,9 J	19,4 J	18,3 J

Tabela 4.9: Energia remanescente de nós ativos no cenário 7.

Cenário 8 - Ambiente *Grid* com 50 nós:

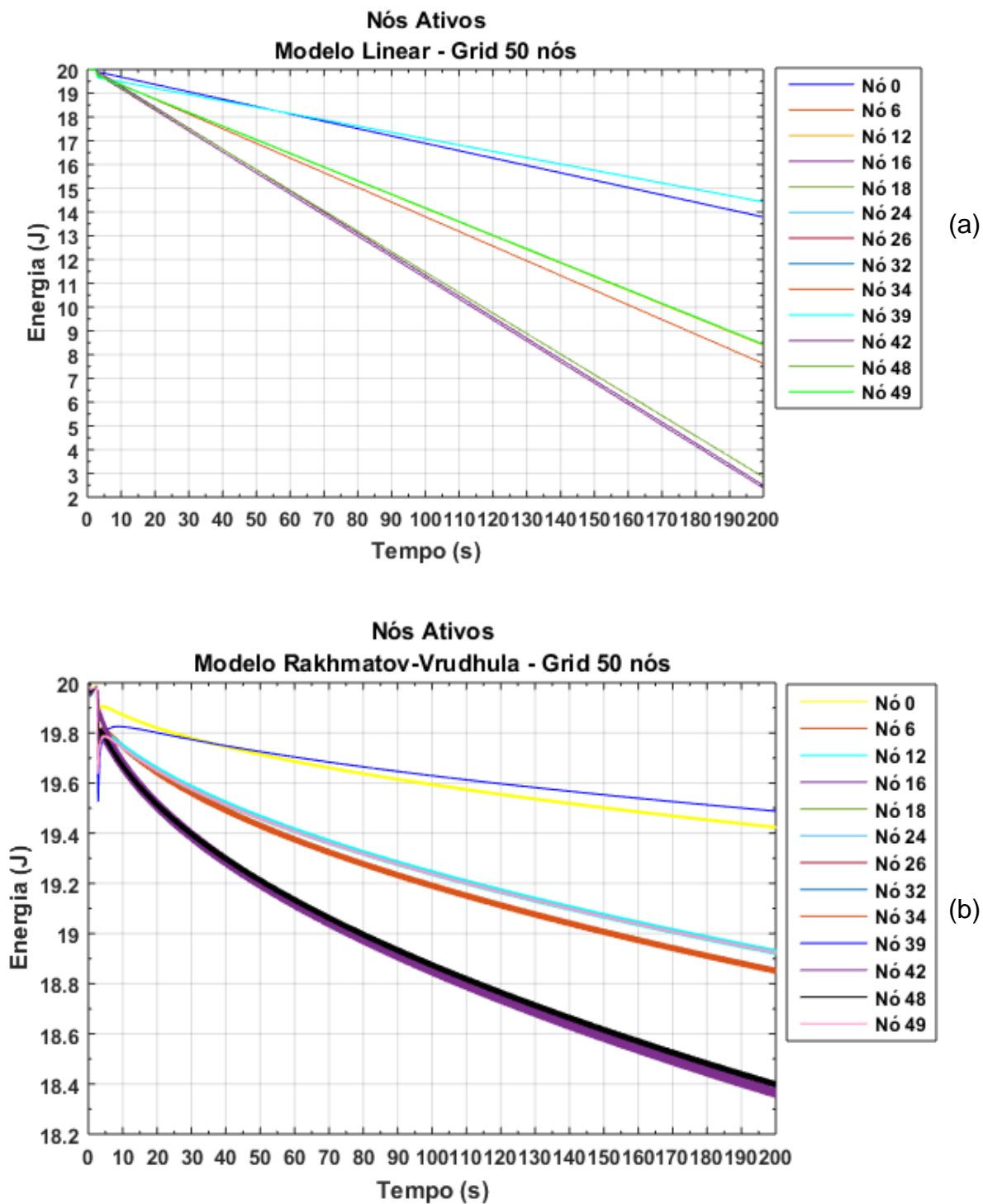


Figura 4.18: Consumo de energia dos 13 nós ativos no ambiente em *Grid* com 50 nós, no modelo Linear (a) e, no modelo Rakhmatov-Vrudhula (b).

Energia Remanescente em (a)		
Nó Fonte 49	Nó Sink 0	Nó Com Maior Consumo 16
8,4 J	13,7 J	2,3 J

Energia Remanescente em (b)		
Nó Fonte 49	Nó Sink 0	Nó Com Maior Consumo 16
18,9 J	19,4 J	18,3 J

Tabela 4.10: Energia remanescente de nós ativos no cenário 8.

Nota-se que para os cenários determinísticos (*grid*), praticamente não há variação quanto ao gasto de energia dos nós destacados e também para todos os outros nós da rede, mantendo a alta capacidade restante na bateria dos dispositivos, quando se é considerado o modelo R-V de bateria.

Como esperado, tendo como conhecimento prévio o modo de funcionamento dos dois modelos de bateria comparados e, considerando suas particularidades, constatou-se o desempenho mais eficiente do modelo realístico de Rakhmatov-Vrudhula sobre todos os cenários estabelecidos para as simulações. Isto ocorre porque o modelo adota os reais efeitos presentes no processo de descarga de uma bateria e, viabiliza resultados mais assertivos, não acontecendo mesmo no modelo Linear.

Conclusão

Tendo em face a grande dificuldade enfrentada no gerenciamento de energia em uma RSSF, devido à limitada capacidade de recursos energéticos de seus componentes, prolongar a vida útil de um sensor e, conseqüentemente manter a rede operando, ainda é uma missão complexa que esbarra em alguns fatores que dificultam esta tarefa.

Portanto, o presente trabalho realizou uma análise comparativa entre dois modelos de bateria, que é o elemento responsável pela fonte de alimentação energética de grande parte dos sensores. Foi apresentado o modelo convencional Linear de descarga de bateria e, o modelo realístico de Rakhmatov-Vrudhula.

Diante da execução de diversas simulações para diferentes cenários com ambos os modelos, os resultados obtidos mostraram relevantes diferenças de consumo de energia de um modelo sobre o outro. Enquanto que no Linear, alguns nós nem mesmo conseguiram chegar ao fim da simulação, pois tiveram suas baterias esgotadas, no modelo de R-V todos os nós atingiram ao término da simulação com uma considerável capacidade remanescente de energia.

A partir da análise dos resultados, concluiu-se que o modelo Linear apresentou um pior desempenho quando confrontado ao modelo alternativo, justamente por não capturar os reais efeitos (e.g., efeito de relaxação e taxa de capacidade) que envolvem a descarga de uma bateria. Por ser fiel à estes efeitos, o modelo de Rakhmatov-Vrudhula produziu um rendimento bem mais eficiente e acurados de energia, para os cenários propostos.

Referências Bibliográficas

BISPO, Kalil Araújo. **Uma Infraestrutura Semântica Para Economizar Energia Em Redes de Sensores Sem Fio**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

NETO, José Athayde Tores Costa. **Análise de Protocolos de Roteamento Unicast em Redes Ad Hoc Móveis Baseada em um Modelo Realístico de Bateria**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.

ROSA, Renata Lopes. **Análise da Associação dos Protocolos de Roteamento AODV e DSR com o Algoritmo Gossip, Sistema de Quorum e com um Novo Algoritmo de Economia de Energia, PWSave**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

SCHNEIDER, Keila Kleveston. **Modelos Analíticos na Predição do Tempo de Vida de Baterias Utilizadas em Dispositivos Móveis**. Dissertação de Mestrado - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2011.

LIMA, Paula Leticia Santos. **Uma Proposta para Redução de Consumo de Energia em Redes de Sensores Sem Fio**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Brasília, 2015.

GILBERT, Edwin Prem Kumar; KALIAPERUMAL, Baskaran; RAJSINGH, Elijah Blessing. **Research Issues in Wireless Sensor Network Applications: A Survey**. International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 2, No. 5, September 2012.

Handy, M; Timmermann, D. **Simulation with Mobile Wireless Networks with Accurate Modeling of Non-Linear Battery Effects**, pp. 532-537, Proc. Int'l. Conf. Applied Simulation and Modeling, September 2003.

SAUSEN, Paulo Sérgio. **Gerenciamento Integrado de Energia e Controle de Topologia em Redes de Sensores Sem Fio**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2008.

Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., de Freitas Mini, R. A., Nakamura, E. F., and Figueiredo, C. M. S. (2003). **Redes de Sensores Sem Fio**. In Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, pp 179 – 226.

ZART, Julia Giehl; GOMES, Livia Bittencour; SAUSEN, Paulo Sérgio. et al. **Análise Comparativa de Modelos Analíticos para Simulação das Descargas de Baterias de Li-Po Utilizadas em Dispositivos Móveis**. RETEC, Ourinhos, v. 10, n. 1, p. 17-34, jan./jun. 2017.

FAÇANHA, Tiago dos Santos. **Rede de Sensores Sem Fio: Uma Abordagem para Detecção de Falhas em Sistemas Elétricos**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará. Fortaleza, 2007.

BRITO, Luís Felipe Meneses Neres de. **Análise Comparativa da Vazão e do Consumo de Energia em Redes de Sensores Sem Fio com Topologia Estrela Utilizando o Padrão IEEE 802.15.4 no Modo *Beacon-Enabled* e *NonBeacon***. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

MOREIRA, D.D Marcelo. **Introdução às Redes de Sensores Sem Fio**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

ZART, Julia Giehl. **Análise Comparativa de Modelos Analíticos sob o Mesmo Cenário de Simulação para Perfis de Descargas Variáveis considerando as Funções Desempenhadas por um Smartphone**. Dissertação de Mestrado –

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí, 2017.

FERNANDES, Rafael de M.S. **Zone Routing Protocol – ZRP**. Programa de Engenharia de Sistemas e Computação - Coppe/UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, Leandro Honorato de Souza. **Desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio Utilizando ZigBee para Aplicações Diversas**. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco. Recife, 2011.

SCHNEIDER, Keila Kleveston; SAUSEN, Paulo, SAUSEN, Airam. **Análise Comparativa de Modelos Analíticos para Predição do Tempo de Vida de Baterias de Dispositivos Móveis**. Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications. Serra Negra – SP, 2010.

CASTRO, André Milhorange de; DIAS, Luiz Fernando Vieira; BOTELHO, Pedro Cariello; FARIA, Rafael de Oliveira. **Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)**. gta.ufrj.br. 05/06/2010. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/rssf/index.html> Acesso em: 08/02/2018 17:53.

PINTO, Pedro. Rede de Sensores sem fios – **Conhece esta tecnologia?**. pplware.sapo.pt. 02/10/2009. Disponível em: <<https://pplware.sapo.pt/microsoft/windows/rede-de-sensores-sem-fios-conhece-esta-tecnologia/>> Acesso em: 08/02/2018 18:31.

MORAES, Ana Luiza Dallora; XAUD, Arthur Fernandes dos Santos; XAUD, Marco Fernandes dos Santos. **Redes Ad Hoc Protocolos DSR, AODV, OLSR, DSDV**. gta.ufrj.br 2007. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/adhoc/index.html> Acesso em: 13/02/2018 15:19.

Oliveira, Alan Vicente. **Análise Comparativa de Metodologias de Estimação de Parâmetros Aplicada a Modelos Analíticos Utilizados na Predição do Tempo de Vida de uma Bateria.** Dissertação de Mestrado - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí, 2012.