

Dissertação de Mestrado

**Avaliação em Hardware de Modelos de Consumo de  
Energia Utilizados em Simuladores de Redes de  
Sensores Sem Fio (RSSF)**

Celso Viana da Silva  
sdcelso@gmail.com

**Orientadores:**

Alejandro C. Frery  
Pablo Viana da Silva

Maceió, Julho de 2011

Celso Viana da Silva

**Avaliação em Hardware de Modelos de Consumo de Energia Utilizados em Simuladores de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Curso de Mestrado em Modelagem Computacional de Conhecimento do Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas.

Orientadores:

Alejandro C. Frery  
Pablo Viana da Silva

Maceió, Julho de 2011

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale**

S586a Silva, Celso Viana da.  
Avaliação em hardware de modelos de consumo de energia utilizados em simuladores de redes de sensores sem fio (RSSF) / Celso Viana da Silva. – 2011. 57 f. : il.

Orientador: Alejandro Cesar Frery.  
Dissertação (mestrado em Modelagem Computacional de Conhecimento) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Computação. Maceió, 2011.

Bibliografia: f. 55-57.

1. Energia elétrica – Consumo. 2. Redes de computação. 3. Sensores sem fio. 4. Capacidade remanescentes de baterias. I. Título.

CDU: 004.738.5



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS/UFAL  
Programa Multidisciplinar de Pós-Graduação em  
Modelagem Computacional de Conhecimento  
Avenida Lourival Melo Mota, Km 14, Bloco 09, Cidade Universitária  
CEP 57.072-900 - Maceió - Al - Brasil  
Telefone: (082) 3214-1364



Membros da Comissão Julgadora da Dissertação de Mestrado de Celso Viana da Silva, intitulada: "Avaliação em Hardware de Modelos de Consumo de Energia Utilizados em Simuladores de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)", apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional de Conhecimento da Universidade Federal de Alagoas em 22 de junho de 2011, às 10h00min, na sala de aula do Mestrado em Modelagem Computacional de Conhecimento.

#### COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Alejandro Cesar Frery  
UFAL - Instituto de Computação  
Orientador

Prof. Dr. André Luiz Lins Aquino  
UFAL - Instituto de Computação  
Examinador

Prof. Dr. Ricardo Augusto Rabelo Oliveira  
UFOP - Departamento de Computação  
Examinador

Maceió, junho de 2011.

# Resumo

O consumo de energia e consequentemente o tempo vida de uma rede de sensores sem Fios tem sido alvo constante de pesquisas. Nesta dissertação, medimos a corrente consumida pelo MICAz de uma fonte de energia formada por baterias alcalinas. Estas medições foram feitas através de experimentos realizados com um *kit* comercial de RSSF e um circuito eletrônico provido de um resistor. Os dados de consumo de corrente obtidos formaram várias séries temporais que possibilitaram a construção de várias curvas de capacidade remanescente das baterias alcalinas. O consumo foi medido até que o MICAz parasse de funcionar, e assim determinamos o seu tempo de vida, bem como a sua tensão de corte de funcionamento. De posse dos valores médios de tensão e corrente, determinamos a energia média em Joules e comparamos com o consumo de um nó sensor criado no simulador computacional NS-2. Os resultados apresentados por intermédio de tabelas e gráficos comparativos mostraram que o consumo do MICAz é maior que o consumo do nó sensor no NS-2.

# Abstract

Energy consumption and, consequently, lifetime in Wireless Sensor Networks is an active field of research. In this work, we measured the current consumed by MICAz from alkaline batteries. These measurements were made through experiments with a Commercial WSN kit and an electronic circuit built with a resistor. The current consumption data obtained in the form of time series allowed the construction of several curves of the remaining capacity of alkaline batteries. Consumption was measured until MICAz stops working, determining its lifetime and its voltage-off of operation. With the voltage and current, we determined the mean energy in Joules and compared it with the consumption of a sensor node created in the computer simulator NS-2. The results presented in tables and comparative graphics showed that consumption of MICAz is greater than the consumption of sensor node in NS-2.

# Agradecimentos

A Deus por sempre sempre estar ao meu lado, me dando bênçãos, ânimo e coragem para enfrentar os novos desafios.

Aos grandes amores de minha vida: minha esposa Bel e meus filhos Bebel e Miguel, pelo apoio, carinho e compreensão.

Aos meus queridos pais, Edenio e Maria José por me ensinarem sobre humildade, generosidade e amor.

Aos meus irmãos pelo apoio e amizade em todos os momentos de dificuldades.

Ao meu orientador, Prof. Alejandro C. Frery pelo apoio, incentivo, confiança e compreensão. Espero sempre poder atender as expectativas e contar com sua amizade e apoio.

Ao meu co-orientador e irmão Prof. Pablo Viana, sem o incentivo do qual este Mestrado sequer teria começado.

À excelente equipe do Laboratório de Computação Científica e Análise Numérica (LaC-CAN) que tiveram a generosidade de me acolher com braços amigos.

À Profa. Eliana pelo apoio, incentivo e confiança. Espero sempre retribuir à altura sua amizade e apoio.

Enfim, a todas aquelas pessoas que, direta ou indiretamente, apoiaram este trabalho.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	2
1.2	Metodologia . . . . .	2
1.3	Trabalhos Relacionados . . . . .	3
1.4	Contribuições . . . . .	3
1.5	Redes de Sensores sem Fio . . . . .	4
1.5.1	Nós Sensores . . . . .	4
1.5.2	<i>Gateway</i> . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Definições</b>	<b>7</b>
2.1	Modelos de Energia para Redes de Sensores Sem Fios . . . . .	7
2.1.1	O Modelo de Energia do Simulador NS-2 . . . . .	8
2.2	Tecnologia de Baterias Comerciais . . . . .	10
2.3	Modelos de Estimação da Capacidade Remanescente de Baterias . . . . .	11
2.3.1	Modelo de Estimação Baseado na Tensão . . . . .	13
2.3.2	Modelo de Estimação Baseado na Corrente . . . . .	13
2.4	Células e Baterias . . . . .	16
2.4.1	Classificação de Células e Baterias Utilizadas em Dispositivos Móveis . . . . .	17
2.4.2	Operação de Descarga das Baterias . . . . .	18
2.4.3	Tensão, Capacidade e Energia das Baterias . . . . .	19
2.4.4	Energia Específica e Densidade Energia de Baterias Reais . . . . .	22
2.4.5	Especificação de Baterias Reais . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>24</b>
3.1	Experimentos . . . . .	24
3.2	Aplicação do Dispositivo em Experimento . . . . .	25
3.3	Plataforma Comercial da <i>Crossbow</i> . . . . .	27
3.3.1	Sistema . . . . .	27
3.3.2	Inicialização da Aplicação <i>MoteView</i> . . . . .	29
3.3.3	Tabelas com Valores Informados pelo Fabricante do MICAz ( <i>Crossbow</i> ) . . . . .	29
3.4	Consumo de Energia e Tempo de Vida em RSSF . . . . .	31
3.4.1	Energia para Processamento . . . . .	32
3.4.2	Energia para Transmissão de Dados . . . . .	32
3.4.3	Energia Consumida no Modo Dormindo . . . . .	33
3.4.4	Quantidade Total de Energia por Segundo e Tempo de Vida . . . . .	33
3.5	Considerações Finais . . . . .	34



---

<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>35</b>
4.1	Aplicação da Metodologia no MICAz . . . . .	35
4.1.1	Análise dos Resultados . . . . .	37
4.2	Experimentos . . . . .	37
4.2.1	Primeiro Experimento . . . . .	40
4.2.2	Segundo Experimento . . . . .	43
4.2.3	Terceiro Experimento . . . . .	44
4.2.4	Quarto Experimento . . . . .	45
4.3	Resumo dos Resultados dos Experimentos . . . . .	46
4.4	Expressão para o Consumo de Energia . . . . .	47
4.5	Avaliação do Modelo de Energia do NS-2 . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>52</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>55</b>

# Lista de Figuras

1.1	Rede de Sensores Sem Fios . . . . .	4
1.2	Diagramas em Blocos dos Elementos do Experimento . . . . .	5
1.3	Floresta Monitorada por RSSFs . . . . .	5
2.1	Modelo de Energia do NS-2 . . . . .	9
2.2	Modelo de Bateria no NS-2 . . . . .	16
2.3	Bateria Primária . . . . .	17
2.4	Bateria Secundária . . . . .	18
2.5	Operação Eletroquímica de uma Célula (Descarga) . . . . .	19
3.1	<i>Screenshot</i> do Enlace no <i>Moterview</i> . . . . .	25
3.2	Diagrama do Amplificador LMV358 . . . . .	25
3.3	Dispositivo ligado ao MICAz . . . . .	26
3.4	Disposição dos Dispositivos nos Experimentos . . . . .	26
3.5	<i>Gateway</i> conectado à Estação Base (PC) . . . . .	27
4.1	Diagramas em blocos dos elementos do experimento . . . . .	38
4.2	Gráfico: Circuito para ajuste de parâmetros . . . . .	39
4.3	Gráfico: Tensão $\times$ Tempo . . . . .	41
4.4	Gráfico: Corrente $\times$ Tempo . . . . .	42
4.5	Gráfico: Capacidade Remanescente $\times$ Tempo . . . . .	42
4.6	Gráfico: Capacidade Remanescente $\times$ Tempo . . . . .	43
4.7	Gráfico: Capacidade Remanescente $\times$ Tempo . . . . .	44
4.8	Gráfico: Capacidade Remanescente $\times$ Tempo . . . . .	45
4.9	Capacidade Remanescente: Modelos de Tensão e de Corrente $\times$ Tempo . . . . .	48
4.10	<i>Script</i> em <i>OTcl</i> usado no NS-2 . . . . .	50
4.11	Capacidade Remanescente de Energia $\times$ Tempo . . . . .	51

# Lista de Tabelas

2.1	Diferenças de Potencial em Elementos Químicos . . . . .	20
2.2	Informações Técnicas de Baterias Primárias . . . . .	21
3.1	Tabela de Consumo do MICAz em mA . . . . .	29
3.2	Estimativa de Vida de um Nó Sensor em Operação . . . . .	30
3.3	Consumo Horário (mAh) . . . . .	30
3.4	Consumo da Bateria × Tamanho da Bateria . . . . .	30
3.5	Típico Consumo de Energia do Nó Sensor ESB ( <i>Embedded Sensor Board</i> ). . . . .	31
4.1	Consumo de Energia do MICAz . . . . .	35
4.2	Resultados do Experimento 1 . . . . .	41
4.3	Resultados do Experimento 2 . . . . .	43
4.4	Resultados do Experimento 3 . . . . .	44
4.5	Resultados do Experimento 4 . . . . .	45
4.6	Resumo 1 dos Resultados dos Experimentos . . . . .	46
4.7	Resumo 2 dos Resultados dos Experimentos . . . . .	46
4.8	Valores Médios dos Parâmetros: $a$ , $b$ e $K$ . . . . .	47
4.9	Valores Médios do MICAz . . . . .	48
4.10	Comparativo: NS-2 × MICAz ( <i>Crossbow</i> ) . . . . .	51

# Lista de Símbolos

$\alpha, \beta$	Parâmetros Específicos da Bateria
$\Delta G^0$	Energia Livre do Sistema
$A$	Função que Calcula o Impacto do Comportamento Não-Linear da Bateria
$a, b$	Constantes Adimensionais
$C_{ef}$	Capacidade Efetiva da Bateria em mAh
$C_{MAX}$	Capacidade Máxima Nominal da Bateria em mAh
$C_{res}$	Capacidade Remanescente em mAh
$E(t)$	Energia no Tempo $t(s)$ , em Joules
$E^0$	Diferença de Potencial (d.d.p) Padrão, em V
$E_i$	Energia Inicial, em Joules
$F$	Constante de Faraday ( $\approx 96.500$ C ou 26,8 Ah)
$I$	Corrente Nominal de Descarga em mA
$I_m$	Corrente Média Obtida nos Experimentos, em mA
$I_{k-1}$	Corrente de Descarga da Bateria Durante o Período de Tempo $k - 1$
$k$	Fator Adimensional que Considera a Corrente de Descarga da Bateria
$n$	Número de Elétrons Envolvidos na Reação Estequiométrica
$t$	Tempo
$t_k, t_{K-1}$	Períodos de Tempo $k$ e $k - 1$
$V(t)$	Tensão da Bateria em Volts
$V_0$	Tensão da Bateria com o Circuito Elétrico Aberto (Sem Carga)
$V_m$	Tensão Média Obtida nos Experimentos, em Volts
$V_{cut-off}$	Tensão de Corte de Funcionamento da Bateria

# Capítulo 1

## Introdução

Uma Rede de Sensores sem Fios (RSSFs) é composta por um grande número de nós sensores, que são implantados dentro da região de ocorrência de um fenômeno de interesse, ou próximo dela (Akyildiz et al., 2002). Estes nós sensores são componentes elétricos, auto-organizáveis, que trabalhando de forma colaborativa, obtêm informações do mundo físico e transmitem-nas aos mais diversos tipos de “usuários”.

Existem muitas aplicações que utilizam RSSFs como por exemplo: monitoramento de mares e oceanos, que permitem a melhoria da previsão climática de secas e inundações e a determinação dos índices de precipitação pluviométrica; detecção de focos de incêndio em florestas, afim de agilizar a localização e o combate ao fogo, etc. Como muitos destes ambientes são de difícil acesso, os nós sensores precisam ser operados com baixo consumo de energia, visto que são normalmente alimentados por baterias compactas, energia solar ou outras formas de energia alternativa (Silva et al., 2010).

O tempo de vida da RSSFs depende da autonomia dos nós sensores. A energia é normalmente fornecida por baterias de Lithium-ion, AA ou AAA, podendo ser complementados por sistemas de captação (painéis solares, geradores eólicos, etc.) afim de prolongar a vida útil dos sensores (Albaladejo et al., 2010). O consumo de energia é devido, majoritariamente, à comunicação (Frery et al., 2010), daí a necessidade de otimizar o consumo energético dos dispositivos, mesmo quando estão processando dados com desempenho máximo. Segundo Akyildiz et al. (2002) a redução do consumo de energia do nó sensor é um dos desafios mais importantes dos projetos de RSSFs.

A utilização de simuladores computacionais para estimação da energia consumida e tempo de vida de Redes de Sensores Sem Fios (RSSFs) é uma prática bastante difundida em pesquisas que objetivam reduzir a energia gasta pelo seus componentes (processador, rádio, sensor) em suas respectivas tarefas de processamento, comunicação e sensoreamento. Mas será que podemos realmente confiar nos modelos analíticos de energia para determinar o consumo e tempo de vida das RSSFs? Logo, consideramos que os resultados obtidos através dos simuladores precisam ser avaliados e confrontados com resultados obtidos em

experimentos com RSSFs reais.

Para a realização do trabalho, definimos uma metodologia para a determinação da capacidade efetiva de baterias alcalinas comerciais usadas para alimentar os nós sensores da RSSFs e comparamos estes resultados com os valores determinados através das especificações dos fabricantes. Em seguida, analisamos o comportamento de curvas de capacidade de carga remanescente das baterias ao longo do tempo, utilizando os modelos lineares de estimação da capacidade remanescente de baterias baseados na tensão e na corrente.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: o capítulo 1 apresenta trabalhos relacionados e conceitos básicos sobre RSSFs, bem como seus principais componentes; o capítulo 2, apresenta várias definições sobre os modelos de energia usados em simuladores computacionais de RSSFs, além de tratar sobre células e baterias comerciais; o capítulo 3 aborda as metodologias utilizadas para a determinação teórica do tempo de vida de um nó sensor comercial, além da metodologia adotada neste trabalho para obtenção do tempo de vida do nó sensor MICAz através de experimentos em laboratório; o capítulo 4 apresenta os resultados de consumo e tempo de vida do MICAz obtidos nos experimentos e finalmente a comparação com o tempo de vida de um objeto nó sensor criado no NS-2; e por fim o capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi comparar o consumo real de energia do nó sensor comercial MICAz com o consumo de energia de um objeto nó sensor criado em simuladores computacionais de RSSFs, os quais utilizam modelos analíticos de energia. Após a realização das comparações, identificar as causas e sugerir modificações que reduzam as diferenças encontradas.

## 1.2 Metodologia

Realização de revisão bibliográfica dos modelos de avaliação de consumo energético em dispositivos sensores e sistemas de redes de sensores sem fio; aquisição de um dispositivo comercial sensor de corrente e tensão; inserção deste dispositivo em série com a bateria de alimentação de um nó sensor comercial; programação de um simulador computacional com a mesma configuração do nó sensor comercial; e finalmente comparação do consumo e tempo de vida do componente nó sensor de uma RSSFs através de experimentos reais e simulações computacionais.

### 1.3 Trabalhos Relacionados

- Em [da Cunha et al. \(2009\)](#) é apresentada uma solução de *hardware* de intervenção mínima no nó sensor MICA2 para a implementação de um método de estimação de carga remanescente em uma bateria alcalina da marca Duracell.
- Em [Behrens et al. \(2007\)](#) é apresentado um conceito simples para medição da voltagem da bateria em um nó sensor real através de um *hardware* adicional para a modelagem da descarga e comportamento das baterias Li-Ion e consequente tempo de vida sob determinadas condições ambientais.
- Em [Casas & Casas \(2005\)](#) são apresentados os principais modelos matemáticos derivados de medições de energia da bateria para estimar o carga remanescente em uma bateria utilizada para alimentar pequenos dispositivos elétricos.
- Em [Schneider et al. \(2011\)](#) é apresentada uma análise comparativa entre dois modelos analíticos de descarga de baterias: o modelo Linear e o modelo de Rakhmatov-Vrudhula.

Todos os trabalhos relacionados forneceram ferramentas para realização deste trabalho, que através da composição dos mesmos, permitiu a realização de um estudo comparativo entre curvas geradas através de modelos analíticos lineares que são implementados em simuladores computacionais de RSSFs com curvas geradas através de séries temporais obtidas através de experimentos reais com nós sensores comerciais.

### 1.4 Contribuições

Ao final deste trabalho, acreditamos que esta avaliação conjunta do consumo e tempo de vida de um nó sensor comercial e de um elemento de simulação, contribuiu para fornecer uma metodologia eficiente de comparação entre estes dois tipos de ambientes, além de demonstrar características importantes sobre baterias comerciais que alimentam nós sensores reais. A partir dos resultados obtidos, avaliamos a fidelidade dos simuladores e obtivemos uma base de informações que podem minorar as diferenças encontradas. Devido ao fato do simulador computacional NS-2 ser um dos mais conhecidos nos meios de pesquisa, o mesmo foi escolhido como o primeiro representante dos simuladores. Verificamos que o NS-2 apresentou um consumo de energia menor que o MICAz, o que em termos práticos pode significar uma RSSFs que interrompendo o seu funcionamento antes de concluir sua missão.

## 1.5 Redes de Sensores sem Fio

Inicialmente iremos fazer uma revisão sobre redes de sensores sem fio, figura 1.1, abordando primeiramente os componentes de uma RSSFs, em seguida veremos os desafios construtivos, funcionamento e aplicações, além dos simuladores computacionais utilizados em diversas pesquisas, sobre os quais iremos dar especial atenção aos modelos de consumo de energia.



Figura 1.1: Rede de Sensores Sem Fios

Os principais componentes das RSSFs são: os nós sensores, as interfaces de comunicação sem fio e os nós para comunicação com a outras entidades (nós *gateways*).

### 1.5.1 Nós Sensores

Nós sensores são dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação. Quando estes nós são dispostos em rede em um modo *ad hoc*, formam as redes de sensores. Os nós coletam dados através de seus sensores, e processam estes dados localmente ou coordenadamente entre vizinhos, podendo enviar a informação para um “usuário” ou, em geral reunido para um nó sensor denominado sorvedouro. Um nó, dentro da RSSFs, tem essencialmente as seguintes e diferentes tarefas: sensoriar o ambiente, processar informações e executar tarefas associadas com o tráfego em um esquema de retransmissão em múltiplos saltos (Loureiro et al., 2003).

Os nós sensores, conforme os diagramas de blocos das figuras 1.2(a) e 1.2(b), são dispositivos eletrônicos constituídos pelos seguintes componentes: Sensor, Processador, Rádio Transceptor e Fonte de Energia.

**Sensor:** Componente que capta as informações do meio físico e envia para o processador através de Conversores Analógicos Digitais (ADC's).

**Processador:** Componente que controla os demais componentes que compõem o nó sensor.



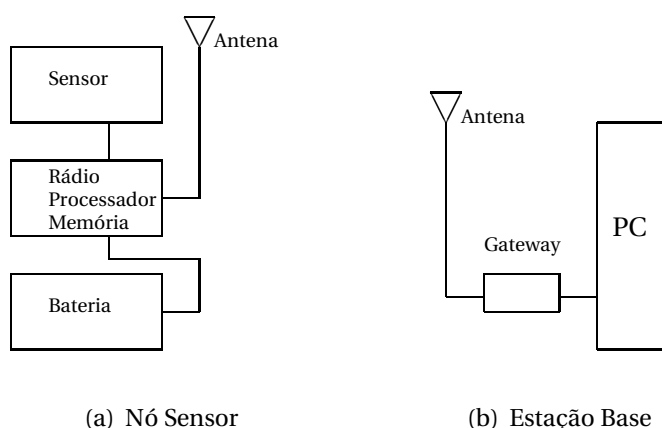


Figura 1.2: Diagramas em Blocos dos Elementos do Experimento

**Rádio Transceptor:** Componente responsável pela troca de informações entre os nós sensores, e entre os nós sensores e o *Gateway*.

**Bateria:** Fonte de energia responsável pela alimentação elétrica dos componentes do nó sensor. Como os nós sensores são pequenos, as baterias usadas nos nós sensores também precisam ser pequenas, e devido a esta limitação, possuem pouca capacidade de carga.

### 1.5.2 Gateway

É um componente da RSSFs, que pelo fato de possuir maior capacidade de processamento, maior quantidade de memória, e também maior suprimento de energia, concentra as informações oriundas dos demais nós sensores. A sua principal função é interligar a RSSFs, figura 1.3, ao mundo externo.

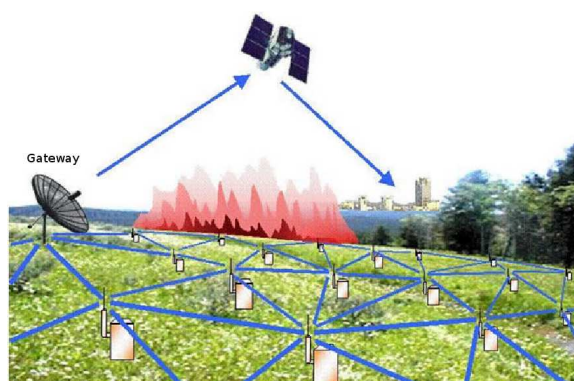


Figura 1.3: Floresta Monitorada por RSSFs

No próximo capítulo, apresentaremos algumas definições importantes sobre modelos de energia utilizados em simuladores de RSSFs. Apresentaremos também as células e baterias

comerciais que alimentam dispositivos do tipo nós sensores, tanto a respeito de seu funcionamento, como sobre os principais tipos e capacidades de energia.

# Capítulo 2

## Definições

### 2.1 Modelos de Energia para Redes de Sensores Sem Fios

Para fins de desenvolvimento de projetos de RSSFs, são usados modelos de energia em simuladores computacionais. Segundo [Loureiro et al. \(2003\)](#), um modelo de energia é usado para representar o funcionamento dos diversos recursos físicos (componentes) de um nó sensor, visto que estes componentes consomem energia e interagem através de um modelo de funções (rotinas de programas). O modelo de energia pode ser visto como um provedor de energia para elementos consumidores, que dependem de uma bateria que tem uma capacidade finita de energia armazenada. Os componentes consumidores de energia são os modelos de: rádio, processador e os elementos sensores. Cada entidade consumidora notifica ao provedor de energia, seu consumo de energia que, por sua vez informa a quantidade de energia disponível. Os elementos que compõem o modelo de energia são:

- Sensores: representam os dispositivos de sensoriamento. O consumo depende do modo de operação (quantidade de tempo ligado ou desligado) e do tipo de grandeza a ser medida.
- Processador: representa o elemento de processamento central do nó sensor. O consumo depende da velocidade do relógio do processador (quanto menor a frequência menor o consumo) e do modo de operação. O consumo pode ser medido pelo número de ciclos de relógio para diferentes tarefas como o processamento de sinais, verificação de códigos de erro, etc.
- Rádio Transceptor (Transmissor/Receptor): representa todo o sistema de transmissão e recepção, bem como o amplificador e a antena. O consumo de energia depende da operação que está sendo efetuada. Típicamente a transmissão de dados consome mais energia que a sua recepção.
- Fonte de Energia: representa o armazenador de energia do nó sensor, o qual tem uma

capacidade finita que depende da taxa de consumo do restante do circuito do nó, podendo ainda ser complementada por outras fontes de energia, como solar por exemplo.

### 2.1.1 O Modelo de Energia do Simulador NS-2

O NS-2 é o simulador mais comumente usado pelos pesquisadores em redes. Ele foi originalmente desenvolvido para simular redes cabeadas. Porém devidos às pesquisas emergentes em *wireless ad-hoc* e redes de sensores sem fio, o NS-2 foi estendido para simular estes novos tipos de redes (Sutaria et al., 2007). Nesta extensão, o NS-2 possui um objeto que modela e calcula o consumo de energia até um certo grau de escalabilidade (quantidade de nós sensores na rede). Os modelos de energia utilizados em simuladores computacionais de RSSFs consideram a energia consumida pelo nó sensor nos seguintes estados: a) transmitindo, b) recebendo, c) dormindo e d) inativo. Todos os nós iniciam a simulação com uma quantidade inicial de energia e então consomem esta energia em quantidades proporcionais a cada estado em que se encontram no tempo. Ao longo do tempo o nó sensor muda de estado, e o nível de consumo de energia é alterado. O modelo de energia recebe as chamadas da camada MAC quando existe uma mudança no modo de operação do rádio transceptor. Os protocolos da camada MAC têm sido modificados, pelos pesquisadores, com o objetivo de aumentar o tempo de duração em qualquer dos estados do rádio, com redução do consumo de energia. A camada MAC fornece ao modelo o tempo de duração de cada estado, e o modelo calcula a energia consumida durante esse tempo, para cada estado, e depois deduz uma quantidade de energia a partir da energia atual do nó. O modelo marca o nó como esgotado quando sua energia cai abaixo de um limiar pré-definido.

#### Implementação do Modelo de Energia

O modelo de energia no NS-2, é um atributo do nó. O modelo de energia em um nó possui um valor inicial do nível de energia no início da simulação. Este valor inicial está definido como *initialEnergy\_*. O modelo de energia também inclui a energia gasta para cada pacote transmitido ou recebido. Elas são chamadas de *txPower\_* e *rxPower\_* (Fall & Varadhan, 2010).

**C++ *EnergyModel Class*** O modelo de energia básico é simplesmente definido como *class EnergyModel* conforme mostrado na figura 2.1 (Fall & Varadhan, 2010).

O protocolo de comunicação MAC 802\_11, foi o primeiro a ser incorporado ao NS-2, e permite o cálculo do tempo de duração em cada estado e invoca as funções do modelo de energia a cada momento que o estado do rádio sofre mudança. Neste trabalho porém, foi utilizado o protocolo MAC 802\_15\_4, recentemente incorporado ao NS-2, que por ser mais

```

1 class EnergyModel : public TclObject
2 public:
3   EnergyModel(double energy) energy_ = energy;
4   inline double energy() return energy_;
5   inline void setenergy(double e) energy_ = e;
6   virtual void DecrTxEnergy(double txtime, double P_tx)
7     energy_ -= (P_tx * txtime);
8
9   virtual void DecrRcvEnergy(double rcvtime, double P_rcv)
10     energy_ -= (P_rcv * rcvtime);
11 protected:
12   double energy_;
13 ;

```

Figura 2.1: Modelo de Energia do NS-2

eficiente energeticamente, é o protocolo atualmente utilizado em RSSFs comerciais. Durante a fase de inicialização, o objeto modelo de energia é criado para cada nó sensor, individualmente, mantendo informações do nível de energia. Os modelos de energia atribuem um nível inicial de energia a seus nós, a partir daí, o consumo de energia em cada estado do rádio será deduzido durante o tempo de vida dos nós sensores.

A seguir, descrevemos o modelo de energia, utilizado no simulador NS-2.

**Decremento da Energia no Modo de Transmissão** Para determinar o tempo de duração que o rádio se mantém no modo transmissão, é obtido o valor da variável *txtime* da camada MAC que é responsável por guardar o tempo gasto para transmitir o pacote. No momento em que o rádio muda para o estado de transmissão, o tempo de duração para a transmissão do pacote é enviado para a função *DecrTxEnergy()*. Esta função é parte do modelo de energia e calcula a energia consumida especificamente na transmissão e deduz este consumo do nível de energia atual do nó. Se o nível de energia cair abaixo de certo limiar definido, o modelo de energia notificará ao simulador que o nó está “morto” e que a partir deste momento, não fará mais parte da rede.

**Decremento da Energia no Modo Inativo** Para contar o tempo de duração em que o nó está no modo inativo, existe a implementação de temporizadores. No momento que o nó muda para o estado inativo, o valor do tempo corrente é salvo em uma variável chamada de *idletime*. Quando o nó muda novamente do estado inativo para algum outro estado, o novo valor do tempo corrente é salvo. A diferença entre estes dois valores de tempo é usado para calcular a energia consumida pelo nó. A função *DecrIdleEnergy()* utiliza o tempo de duração do modo inativo para calcular o consumo de energia. Da mesma forma, se o nível de energia cair abaixo de um valor pré-definido, o nó é marcado como exaurido ou “morto”.

**Decremento da Energia no Modo Recepção** Temporizadores são usados para contar o tempo de duração do modo recepção. A função *DecreRxEnergy()* utiliza este tempo de duração no modo recepção para calcular a energia consumida e deduzir esta quantidade do nível de energia corrente e atualizar o valor da energia corrente. O novo nível de energia é então comparado com o valor limite.

**Decremento da Energia no Modo Dormindo** No momento em que o rádio muda para o estado dormindo, o nó começa a operar um modo de baixa potência, onde a maioria dos circuitos do rádio são desligados. A função *DecreSleepEnergy()* calcula a energia consumida no modo dormindo.

**Nível de Energia Corrente** A cada momento que o rádio muda de estado, o modelo de energia atualiza a informação sobre o nível de energia corrente no nó. Para que o simulador funcione corretamente, alguns dos protocolos do NS-2 precisam conhecer o nível corrente de energia do nó. Para facilitar isto, o modelo de energia possui uma variável pública *Energy* que pode ser usada por todos os objetos do simulador.

## 2.2 Tecnologia de Baterias Comerciais

A modelagem da carga remanescente em tecnologias de baterias é bastante complexa, em consequência dos intrínsecos fenômenos não lineares envolvidos no consumo de energia. A operação da bateria depende de muitos fatores, tais como dimensões físicas, materiais utilizados nos eletrodos, e velocidade de difusão dos materiais ativos na eletrólise (Raghunathan et al., 2002).

A capacidade de carga da bateria ou simplesmente capacidade da bateria representa a quantidade de carga elétrica armazenada em uma bateria primária nova ou uma bateria secundária completamente carregada (Pedram & Wu, 1999). Ela é medida em ampère-hora (Ah) ou mili-ampère-hora (mAh), e fatores como taxa de descarga, temperatura, auto-descarga, e tempo de uso da bateria, afetam a sua capacidade (Brown, 2000; Park et al., 2001). A taxa de descarga ou o aumento da corrente consumida da bateria é o fator mais crítico (Raghunathan et al., 2002).

As baterias primárias *LeClanche*, também conhecidas como sistemas ordinários de dióxido de Zinco-Manganês apesar de terem um baixo custo de aquisição, não são recomendadas para uso em RSSFs, devido à sua baixa capacidade e elevada auto-descarga. A auto-descarga ocorre já durante a estocagem das baterias, antes mesmo de serem usadas, ocorrendo também durante o período de tempo entre descargas distintas.

Em muitas aplicações dos nós sensores, o processador e o rádio funcionam por um breve período de tempo, seguido por um ciclo dormindo. Durante esta fase, o consumo de corrente é de micro-ampères contra os mili-ampères da fase anterior. Isto resulta em uma cir-

culação de corrente muito baixa durante a maior parte do tempo, e picos de curta duração no processamento, recepção, e transmissão de dados. Este método estende o tempo de vida da bateria, porém, estas variações de corrente, provocam a redução da capacidade especificada da bateria. Consequentemente, este baixo ciclo de uso dos nós sensores das RSSFs provocam também a rápida descarga deste tipo de bateria.

Baterias Alcalinas são o sistema químico de preferência em plataformas comerciais de RSSFs devido às suas características de alta capacidade, auto-descarga reduzida, e baixo custo. Geralmente, as baterias para RSSFs não podem ser recarregadas devido ao grande número de nós sensores e à dificuldade de acessibilidade para recarregar cada bateria.

Devido ao alto custo das baterias secundárias (NiCd, NiMH, e Li-Ion) e a normal impossibilidade de recarregá-las, fazem com que as mesmas não sejam usadas em plataformas de RSSFs (da Cunha et al., 2009).

## 2.3 Modelos de Estimação da Capacidade Remanescente de Baterias

De acordo com [Timmermann & Handy \(2003\)](#) para o projeto e implementação de protocolos e algoritmos de comunicação, o uso de ferramentas de simulação significa um aumento de produtividade. Usando simulações, os protocolos não precisam ser implementados com explícitos detalhes, e na maioria dos casos, a simulação de uma ou mais camadas de protocolos apresentam resultados significativos e suficientes. Além disso, ao contrário de redes baseadas em TCP/IP, o desenvolvedor de protocolos de comunicação para dispositivos móveis não podem se basear nas infra-estruturas existentes, como intranet e, portanto, dependem de outros métodos de avaliação. Ferramentas de simulação de rede como NS-2 ([Fall & Varadhan, 2010](#)) dão apoio através da integração dos protocolos para redes móveis. NS-2 é um simulador de eventos discretos e fornece suporte para redes com fios e redes sem fios.

Um dos principais desafios para desenvolvedores de protocolos de RSSFs é, em alguns casos, a falta de uma fonte de energia duradoura. Os nós sensores são geralmente alimentados por bateria. No entanto, a vida útil dos nós sensores é extremamente importante para manter a RSSFs funcionando. Portanto, o objetivo principal do projeto de RSSFs é reduzir o consumo de energia para aumentar a vida útil dos nós sensores. A maioria das ferramentas de simulação de RSSFs fornecem modelos de energia simples. Por exemplo, NS-2 equipa cada nó da RSSFs, com uma quantidade inicial de energia e diminui esse valor toda vez que um pacote é enviado ou recebido. Segundo [Timmermann & Handy \(2003\)](#), no NS-2, a energia consumida por um pacote não depende da distância entre o emissor e o receptor e é definido como padrão o valor de 281,8 mW tanto para transmissão como para recepção, podendo no entanto ser modificado pelo usuário.

Além de uma precisa modelagem do consumo de energia dos nós sensores, um conhecimento detalhado do comportamento da bateria é importante para a confiabilidade dos resultados da simulação. Para a simulação de protocolos de comunicação, geralmente se supõe uma fonte de energia ideal, ou seja, uma bateria com carga linear. No entanto, as baterias reais, como por exemplo, as baterias alcalinas, possuem um comportamento não-linear. A vida útil de uma bateria e sua capacidade de entrega de carga dependem principalmente do perfil de corrente de descarga. Se a corrente de descarga é maior que a corrente nominal de uma bateria, então a eficiência energética da bateria diminui. Assim, a capacidade real ou efetiva da bateria é inferior à capacidade nominal (Timmermann & Handy, 2003).

Este efeito é denominado como efeito da taxa de capacidade e resulta do fato de que sob taxas altas de descarga, as reduções eletro-químicas ocorrem apenas na superfície externa do cátodo. Na descarga pulsada, ou seja, na ocorrência alternada de períodos de descarga e de ociosidade, a vida útil de uma bateria pode ser aumentada (Timmermann & Handy, 2003).

Durante os períodos de repouso, também chamado de tempo de relaxamento, a bateria pode recuperar parcialmente a capacidade perdida em períodos anteriores de alta descarga. Esse efeito é conhecido como efeito de recuperação (*Recovery Effect*) (Timmermann & Handy, 2003).

A literatura classifica as técnicas de monitoramento da capacidade remanescente das baterias (ou métodos de determinação do estado de carga) de acordo com os modelos matemáticos de estimação (Casas & Casas, 2005).

Os modelos de estimação da capacidade das baterias variam de simples modelos lineares a complexos modelos que tentam incorporar o efeito de recuperação. Quando a bateria está com uma corrente de descarga alta, e esta corrente é cortada ou reduzida, ocorre uma recuperação na carga da bateria. Este fenômeno é chamado de efeito de recuperação. Embora o modelo que considera o efeito de recuperação seja semelhante ao comportamento das baterias comerciais, há grande dificuldade em sua implementação, uma vez que o efeito de recuperação envolve muitas propriedades físicas e eletroquímicas da bateria (da Cunha et al., 2009). Já os modelos lineares são computacionalmente eficientes e flexíveis, e podem ser configurados de maneira simples para diferentes tipos de baterias comerciais (Schneider et al., 2011).

A maioria dos modelos de estimação compartilham os mesmos dados de entrada, quais sejam: tensão, corrente, e impedância, e se diferenciam pelos parâmetros que são utilizados.

Os três principais modelos matemáticos lineares de estimação são os de impedância, tensão e corrente. Neste trabalho, utilizamos os modelos baseados na tensão e na corrente, aplicados a baterias alcalinas primárias. O modelo de estimação baseado na impedância não foi utilizado, pois as medidas de impedância de baterias dependem da frequência e não são práticas para a estimação da capacidade remanescente em nós que são alimentados normalmente por fontes de corrente contínua. Desta forma, apenas modelos de estimação baseados na tensão e na corrente são utilizados em RSSFs (da Cunha et al., 2009).



A técnica de monitoramento para utilização do modelo de estimação baseada na tensão consiste na medição do nível de tensão que decresce durante a descarga. Segundo [Pop et al. \(2005\)](#), verifica-se que a relação entre o nível de tensão e a capacidade remanescente varia amplamente para as baterias alcalinas, principalmente devido à razão de descarga. O modelo baseado na tensão, apesar de ser linear, considera os efeitos físicos e eletroquímicos não-lineares, como por exemplo, o efeito de recuperação. No entanto, este modelo não considera o valor da corrente de descarga para determinação da capacidade efetiva através das especificações das baterias comerciais.

O modelo baseado na corrente considera o valor da corrente de descarga para determinação da capacidade efetiva através das especificações das baterias comerciais, porém não considera o efeito de relaxamento. Além disso, é necessária uma outra técnica de monitoramento, que requer a intervenção em *hardware* para inserção de um dispositivo de medição do consumo. Este dispositivo de medição não deverá ter, no entanto, um consumo próprio superior ao próprio nó sensor. Para isto, o dispositivo de medição deve ser formado por um resistor de baixo consumo e deve utilizar os amplificadores e circuitos de conversão analógico digital (ADC) que já estejam presentes no próprio nó sensor da RSSFs ([da Cunha et al., 2009](#)). Outra forma, até mais eficiente e simples de obtenção da corrente consumida pelo nó sensor, seria a utilização de um osciloscópio digital que medisse e armazenasse as informações em seu banco de dados.

### 2.3.1 Modelo de Estimação Baseado na Tensão

O modelo de tensão utiliza os dados de tensão coletados ao longo do tempo de vida do nó sensor e estima a capacidade remanescente da bateria através da Equação (2.1):

$$C_{res}(t) = a \cdot V(t) - b, \quad (2.1)$$

em que  $C_{res}$  é a capacidade remanescente em mAh,  $V(t)$  é a tensão da bateria em Volts,  $a$  e  $b$  são constantes adimensionais, de acordo com as características específicas da bateria, e  $t$  é o tempo medido em segundos.

### 2.3.2 Modelo de Estimação Baseado na Corrente

O modelo de corrente utiliza os dados de corrente coletados ao longo do tempo de vida do nó sensor, e estima a capacidade remanescente da bateria através das Equações (2.2) e (2.3):

$$C_{res}(t) = C_{ef} - \int_0^t I(t) dt, \quad (2.2)$$

$$C_{ef} = k \cdot C_{MAX}, \quad (2.3)$$

em que  $C_{res}$  é a capacidade remanescente em mAh,  $C_{MAX}$  é capacidade máxima nominal da bateria em mAh,  $C_{ef}$  é a capacidade efetiva da bateria em mAh, função da corrente nominal de descarga,  $k$  é o fator adimensional que considera a corrente de descarga da bateria,  $I$  é a corrente nominal de descarga em mA e  $t$  é o tempo medido em horas.

A parcela integral do modelo de corrente foi simplificado para um somatório, devido ao método de obtenção dos dados de corrente, obtida em intervalos regulares de 1 minuto. Apresentamos esta modificação na Equação (2.4).

$$C_{res}(t_i) = C_{ef} - \sum_{i=1}^n (I_i \cdot t_i), \quad (2.4)$$

em que,  $C_{res}(t_i)$  é a capacidade remanescente no instante em mAh,  $C_{ef}$  é a capacidade efetiva da bateria, função da corrente nominal de descarga, em mAh,  $I_i$  é a corrente no instante de tempo  $t_i$  e  $t_i$  é o tempo no instante  $i$  em horas.

### Modelo de Bateria de *Rakhmatov and Vrudhula*

[Rakhmatov & Vrudhula \(2001\)](#) descrevem processos elétricos e químicos dentro de uma célula de lítio-íon através de um conjunto de equações matemáticas. Os autores derivam equações para a carga da bateria constante e variável afim de calcular a vida útil de uma bateria de lítio-íon. Para a estimativa da vida útil da bateria, apenas dois parâmetros específicos da bateria são necessários. O parâmetro  $\alpha$  que representa a capacidade da bateria, e  $\beta$  que descreve o comportamento da bateria não-linear durante os períodos de carga e descarga. Uma técnica de estimativa de parâmetros é apresentada por [Rakhmatov et al. \(2002\)](#).

Para carga variável, a taxa de descarga variável no tempo é aproximado por uma carga constante seccionada. A variável carga  $i(t)$  pode ser expressa como um passo  $n$  de uma função escada  $U(t)$ :

$$i(t) = \sum_{k=1}^n [U(t - t_{k-1}) - U(t - t_k)]. \quad (2.5)$$

$$\alpha = \sum_{k=1}^n 2I_{k-1} A(L, t_k, t_{k-1}, \beta). \quad (2.6)$$

A Equação (2.6) descreve o impacto do perfil de carga sobre o tempo de vida da bateria. Como descrito acima,  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros específicos da bateria,  $I_{k-1}$  indica a corrente de descarga da bateria durante o período de tempo  $k - 1$ . A função  $A$  calcula o impacto do comportamento não-linear da bateria, onde  $L$  o tempo de vida útil da bateria,  $t_k$  é a duração do período de tempo  $k$ , e  $t_{k-1}$ , a duração do período de tempo  $k - 1$ . [Rakhmatov & Vrudhula \(2001\)](#) trazem detalhes da função  $A$ .

Em [Timmermann & Handy \(2003\)](#) é apresentado um algoritmo que permite uma estimativa de vida útil de uma pilha de lítio-íon para qualquer perfil de carga. Uma desvantagem do

algoritmo é que o perfil de carga da bateria tem que ser conhecido completamente com antecedência. O tempo de execução da rotina para determinação do tempo de vida da bateria seria impraticável, por limitações de memória. No entanto, para o uso em ambientes de simulação, tal premissa não é uma prioridade. Nas simulações, geralmente o perfil de carga não é conhecido a priori, e sim como resultado da simulação. Segundo [Timmermann & Handy \(2003\)](#), esse algoritmo permite a integração do modelo de bateria-*Rakhmatov* em ambientes de rede de simulação para dispositivos móveis.

### **Integração do Modelo de Bateria ao NS-2**

O modelo de bateria não substitui o modelo de energia do NS-2, mas está ligado ao simulador como um módulo adicional. Para ilustrar as diferenças entre o modelo de energia e o modelo da bateria, lembramos que o modelo de energia que vem com NS-2 equipa cada nó móvel com uma fonte de energia ideal, ou seja, para cada pacote enviado ou recebido por um nó móvel, uma certa quantidade de energia é subtraída do nó. A partir da interface *OTcl*, um usuário pode especificar os valores de transmissão, recepção e também o consumo de energia no modo inativo. Cada nó sensor no NS-2 pode ser equipado com um modelo energético. Opcionalmente, o modelo da bateria pode ser adicionado ao nó sensor. Observe que o modelo de energia é um pré-requisito para o modelo da bateria uma vez que este usa as funções do modelo de energia.

O modelo de bateria periodicamente verifica o nível de energia do nó sensor e calcula o consumo de energia de cada período. Usando o consumo de energia do último período e o instante de tempo, o modelo da bateria calcula a descarga da bateria até este momento. Se a descarga acumulada exceder a capacidade da bateria, a bateria está completamente descarregada (para este tipo de dispositivo). Nota-se que, após a integração do modelo da bateria ao modelo energético, este não é mais responsável pela extinção de um nó. Esta tarefa é agora executada pelo modelo da bateria. Semelhante ao modelo energético, o modelo da bateria pode ser anexado a um nó móvel a partir da interface *OTcl* do NS-2. A figura 2.2 mostra uma parte do código em *OTcl* que é usado para a configuração de um nó móvel. As últimas quatro linhas do código especificam os parâmetros do modelo da bateria. O parâmetro *batteryModel* indica o nome do modelo da bateria e pode ser usado para a futura integração de modelos de outras baterias. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros específicos da bateria, conforme descritos em [Rakhmatov & Vrudhula \(2001\)](#). Lembramos que o  $\alpha$  representa a capacidade da bateria e  $\beta$  traduz o comportamento não-linear de descarga da bateria. O parâmetro tensão é necessário para o cálculo da carga da bateria. O modelo de energia fornece o nível atual de energia em Joule. No entanto, o modelo de bateria tem como parâmetro de entrada uma corrente em Ampère. O parâmetro tensão é usado para converter a energia em Joule para carga em Ampère. Para fins de simplificação, supomos que a tensão da bateria é constante para toda a sua vida. Um valor possível para o parâmetro de tensão

pode ser a média entre a tensão do circuito aberto  $V_0$  e a tensão de corte da bateria  $V_{cut-off}$  da bateria, conforme descrito em [Rakhmatov & Vrudhula \(2001\)](#).

```
1 $ns_ node-config \  
2 -adhocRouting DSDV \  
3 -llType $opt(ll) \  
4 -energyModel $opt(em) \  
5 -rxPower 0.3 \  
6 -txPower 0.6 \  
7 -initialEnergy $opt(ie) \  
8 -batteryModel RTBattery \  
9 -alpha 35220 \  
10 -beta 0.637 \  
11 -voltage 4.1
```

Figura 2.2: Modelo de Bateria no NS-2

Como o objetivo deste trabalho é avaliar o consumo de um nó sensor real e compará-lo com o consumo determinado pelo atual modelo de energia utilizado pelo simulador computacional NS-2, optamos por não interferir nos objetos e funções do NS-2 usando os modelos de bateria descritos por [Rakhmatov & Vrudhula \(2001\)](#) e integrado ao NS-2 por [Timmermann & Handy \(2003\)](#).

## 2.4 Células e Baterias

Uma bateria é um dispositivo que converte a energia química contida em seus materiais ativos diretamente em energia elétrica por meio de uma redução da oxidação eletroquímica. No caso de um sistema recarregável, a bateria é recarregada por uma reversão deste processo. Este tipo de reação envolve a transferência de elétrons de um material para outro através de um circuito elétrico ([Linden & Reddy, 2002](#)).

Apesar da expressão “bateria” ser muito utilizada, a unidade eletroquímica básica referida é a célula. A bateria consiste em uma ou mais dessas células ligadas em série ou em paralelo, ou ambos, dependendo da tensão de saída e da capacidade desejada. A célula é composta por três componentes principais:

- 1 O ânodo ou eletrodo negativo (a redução ou eletrodo combustível) - que perde elétrons para o circuito externo e é oxidado durante a reação eletroquímica.
- 2 O cátodo ou eletrodo positivo (o eletrodo oxidante) - que recebe os elétrons do circuito externo e é reduzido durante a reação eletroquímica.
- 3 O eletrólito condutor iônico - que fornece o meio de transferência de carga, como íons, no interior da célula entre o ânodo e o cátodo. O eletrólito é tipicamente um líquido, como água ou outros solventes, com sais dissolvidos, ácidos ou alcalinos para conferir

condutividade iônica. Algumas baterias usam eletrólitos sólidos, que são condutores iônicos na temperatura de operação da célula.

### 2.4.1 Classificação de Células e Baterias Utilizadas em Dispositivos Móveis

Células eletroquímicas e baterias são identificadas como primárias ou não recarregáveis e secundárias ou recarregáveis, em função da capacidade de serem eletricamente recarregadas. Dentro desta classificação, outras classificações são usadas para identificar estruturas específicas ou projetos. Segundo [Linden & Reddy \(2002\)](#) temos a seguir a classificação para os diferentes tipos de células eletroquímicas e baterias.

#### Células ou Baterias Primárias



Figura 2.3: Bateria Primária

Essas baterias, figura 2.3, não possuem a capacidade de serem facilmente ou eficazmente recarregadas eletricamente, portanto, uma vez descarregadas, são descartadas. Muitas células primárias nas quais o eletrólito é contido por um material absorvente ou separador (não existe eletrólito líquido ou livre) são denominadas “pilhas secas”.

A pilha primária é uma conveniente, geralmente barata e leve fonte de energia embalada para dispositivos eletrônicos portáteis e elétricos, iluminação, equipamento fotográfico, brinquedos, backup de memória, e uma série de outras aplicações, sem a necessidade do uso da rede elétrica da concessionária de energia. As principais vantagens das baterias primárias são: permite estocagem em prateleira por longos períodos de tempo, alta densidade de energia para baixas e moderadas taxas de descarga, pouca ou nenhuma manutenção e facilidade de uso. Devido à alta capacidade das baterias primárias, elas são normalmente usadas em aplicações militares, sinalização, energia em *standby*, entre outras. A grande maioria de baterias primárias são feitas em formato de uma única célula cilíndrica ou em forma de botão plano ou baterias multicélulas formadas por duas ou mais dessas células componentes.

#### Células ou Baterias Secundárias

Estas baterias, figura 2.4, podem ser recarregadas eletricamente após a descarga até a sua condição original passando a corrente por elas no sentido oposto ao da corrente de descarga. São dispositivos de armazenamento de energia elétrica e são conhecidos também como baterias de armazenamento ou acumuladores.



Figura 2.4: Bateria Secundária

As aplicações de baterias secundárias são divididas em duas principais categorias:

- 1 Aplicações em que a bateria secundária é usada como um dispositivo de armazenamento de energia, estando geralmente ligada eletricamente e carregada por uma fonte principal de energia e fornece sua energia para a carga de acordo com a demanda. Exemplos: sistemas elétricos de automóveis e aviões, *no-breaks*, veículos elétricos híbridos e sistemas de energia elétrica de nivelamento de carga.
- 2 Aplicações em que a bateria secundária é usada ou descarregada, essencialmente, como uma bateria primária, mas recarregada após o uso ao invés de serem descartadas. As baterias secundárias são usadas dessa maneira, como por exemplo, em eletroeletrônicos portáteis, ferramentas elétricas, etc, com o objetivo de reduzir custos, já que podem ser recarregados ao invés de substituídos, e em aplicações que requerem valores de corrente maiores do que a fornecida pelas baterias primárias.

Segundo [Linden & Reddy \(2002\)](#), as baterias secundárias são caracterizadas, além de sua habilidade de ser recarregada, pela alta densidade de energia (Capacidade de Carga), alta taxa de corrente de descarga, curvas de descarga plana, e bom desempenho sob baixas temperaturas. Sua densidade de energia é geralmente inferior ao das baterias primárias. Sua retenção de carga também é pior do que a maioria das baterias primárias, embora a capacidade de carga da bateria secundária que se perde, pode ser restaurada por recarga. Algumas baterias, conhecidas como tipos mecanicamente recarregáveis, são recarregadas pela substituição do eletrodo esgotado, geralmente o ânodo de metal, por um novo.

### 2.4.2 Operação de Descarga das Baterias

O funcionamento de uma pilha durante a descarga está representado esquematicamente na figura 2.5. Quando a bateria está conectada a uma carga externa, os elétrons fluem do ânodo, que é oxidado, passando pela carga externa até o cátodo, onde os elétrons são absorvidos e o material do cátodo sofre redução. O circuito elétrico é completado no eletrólito através do fluxo de ânions (íons negativos) e cátions (íons positivos) para o ânodo e o cátodo, respectivamente.

A reação de descarga pode ser escrita, assumindo um metal como material ânodo, o Zinco ( $Z_n$ ), por exemplo e um material cátodo como o Cloro ( $Cl_2$ ), da seguinte forma:

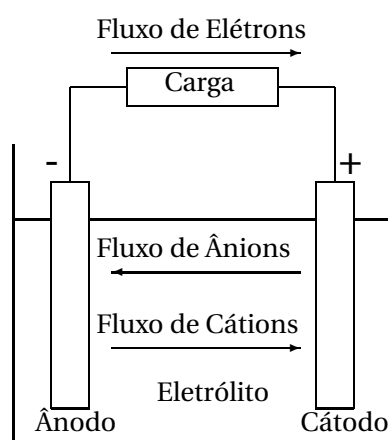


Figura 2.5: Operação Eletroquímica de uma Célula (Descarga)

Eletrodo negativo: reação anódica (oxidação, perda de elétrons)



Eletrodo positivo: reação catódica (redução, ganho de elétrons)



Reação completa: descarga



### 2.4.3 Tensão, Capacidade e Energia das Baterias

A tensão teórica e a capacidade de uma bateria (célula) são funções dos tipos de materiais do ânodo e do cátodo. Uma tabela com valores típicos extraída de [Linden & Reddy \(2002\)](#) é mostrada na tabela 2.2. Observe que a bateria *Leclanché* possui uma capacidade teórica bastante pequena em relação à da bateria Alcalina, o que demonstra sua ineficiência.

#### Energia Livre (*Free Energy*)

Sempre que ocorre uma reação, há uma diminuição na energia livre  $\Delta G^0$  do sistema, que é expresso como:

$$\Delta G^0 = -nFE^0, \quad (2.10)$$

em que  $F$  é a constante conhecida como Faraday ( $\approx 96.500\text{ C}$  ou  $26,8\text{ Ah}$ ),  $n$  é número de elétrons envolvidos na reação estequiométrica e  $E^0$  é a diferença de potencial (d.d.p) padrão,

em Volts (V).

### Tensão Teórica (*Theoretical Voltage*)

A diferença de potencial padrão da célula é determinada pelo tipo de materiais ativos contidos na célula. Pode ser calculado a partir dos dados de energia livre ou obtidos experimentalmente. Uma lista de potenciais de eletrodo (potenciais de redução) é mostrada na tabela 2.1 extraída de Linden & Reddy (2002).

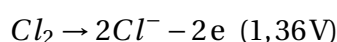
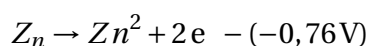
Tabela 2.1: Diferenças de Potencial em Elementos Químicos

Reação do Eletrodo à 25 <sup>o</sup>	$E^0$ V	Capacidade Específica (Ah/kg)
$Li^+ + e$	-3,01	3,860
$Zn^{2+} + 2e$	-0,76	0,820
$Ag^+ + e$	0,80	0,248
$Cl_2 + 2e$	1,36	0,756

A diferença de potencial padrão de uma célula pode ser calculada a partir dos potenciais padrão de eletrodo da seguinte forma (o potencial de oxidação é o valor negativo do potencial de redução):

Ânodo (potencial de oxidação) + cátodo (potencial de redução) = o potencial padrão da pilha

Por exemplo, em uma reação  $Zn + Cl_2 \rightarrow ZnCl_2$ , a diferença de potencial padrão da célula é:



$$E^0 = 2,12V$$

A Tensão da Célula também depende de outros fatores, incluindo concentração e temperatura (Linden & Reddy, 2002).

### Capacidade Teórica (*Theoretical Capacity - Coulomb*)

A capacidade teórica de uma célula é determinada pela quantidade de materiais ativos na célula. É expressa como a quantidade total de eletricidade envolvida na reação eletroquímica e é definida em termos de Coulombs ou Ampère-hora. A “capacidade Ampère-hora” da bateria está diretamente associada com a quantidade de eletricidade obtida a partir dos materiais ativos. Teoricamente, um grama de peso equivalente de material vai entregar 96.487 C ou 26,8 Ah. (Um grama de peso equivalente é o peso atômico ou molecular do material ativo



em gramas, dividido pelo número de elétrons envolvidos na reação). A equivalência eletroquímica dos materiais típicos são apresentados em [Linden & Reddy \(2002\)](#). A capacidade teórica de uma célula eletroquímica, com base apenas nos materiais ativos participando na reação eletroquímica, é calculado a partir do peso equivalente dos reagentes. Assim, a capacidade teórica da célula  $Zn/Cl_2$  é 0,394 Ah/g, ou seja,

$$\begin{aligned} Zn + Cl_2 &\rightarrow ZnCl_2, \\ (0,82\text{Ah/g}) + (0,76\text{Ah/g}), \\ 1,22\text{g/Ah} + 1,32\text{g/Ah} &= 2,54\text{g/Ah ou } 0,394\text{Ah/g}. \end{aligned}$$

Da mesma forma, a capacidade Ampère-hora, em termos de volume pode ser calculado usando os dados apropriados para Ampère-hora por centímetro cúbico, conforme tabelas encontradas em [Linden & Reddy \(2002\)](#). As tensões teóricas e capacidades dos principais sistemas eletroquímicos são também apresentados em [Linden & Reddy \(2002\)](#), no entanto alguns desses sistemas são apresentados na tabela 2.2. Estes valores teóricos baseiam-se apenas nos materiais ânodo e cátodo ativos. Água, eletrólitos, ou quaisquer outros materiais que possam estar envolvidos na reação de células não estão incluídos no cálculo.

Tabela 2.2: Informações Técnicas de Baterias Primárias

Bateria	Elementos	Tensão (V)	Capacidade Específica (Ah/kg)
<i>Leclanché</i>	$Zn/Mn/NH_4Cl$	1,5	065
Alcalina	$Zn/MnO_2/KOH$	1,5	145

### Energia Teórica (*Theoretical Energy*)

A capacidade de uma célula pode também ser considerada em termos de energia (watt-hora), tomando em consideração a tensão e a quantidade de eletricidade. Este valor energético teórico é o valor máximo que pode ser entregue por um sistema eletroquímico específico: watt-hora (Wh) = tensão (V) × ampère-hora (Ah). No exemplo da célula  $Zn/Cl_2$ , se o potencial padrão é de 2,12 V, então a capacidade teórica watt-hora por grama de material ativo (energia gravimétrica específica teórica ou densidade de energia gravimétrica teórica) é:

$$\begin{aligned} \text{Energia Específica (Wh/g):} \\ 2,12\text{V} \times 0,394\text{Ah/g} &= 0,835\text{Wh/g ou } 835\text{Wh/kg} \end{aligned}$$

O valor calculado acima é teórico, a tabela 2.2 também lista os valores teóricos de energia específica de alguns sistemas eletroquímicos.

#### 2.4.4 Energia Específica e Densidade Energia de Baterias Reais

A energia de saída disponível em uma pilha ou bateria é geralmente expressa como uma proporção do seu peso ou tamanho. A terminologia preferida para esta relação está baseada no peso, por exemplo, Watthora/quilograma (Wh/kg), que é a “energia específica”, já em termos de volume, temos por exemplo, Watthora/litro (Wh/L), que é a “densidade de energia”. No entanto, é muito comum, o termo “densidade de energia” ser usado para referir-se ambas as relações.

A energia máxima que pode ser entregue por um sistema eletroquímico é baseado nos tipos de materiais ativos que são usados (o que determina a tensão) e da quantidade dos materiais ativos que são usados (o que determina a capacidade ampère-hora). Na prática, apenas uma fração da energia teórica da bateria é utilizada. Isto acontece devido à necessidade construtiva, da existência de componentes de eletrólitos e de elementos não reativos (contenedores, separadores, eletrodos) que aumentam o peso e o volume da bateria. Outro fator que contribui para redução da capacidade teórica, é que a bateria não é descarregada a partir da tensão teórica (diminuindo assim o valor da tensão média), nem é descarregada completamente até o valor zero volts (o que reduz a capacidade disponível de entrega ampère-hora). Além disso, os materiais ativos, em uma bateria real, geralmente não são estequiometricamente equilibrados. Isso reduz a energia específica, devido a utilização de uma quantidade excessiva de um dos materiais ativos (Linden & Reddy, 2002).

#### 2.4.5 Especificação de Baterias Reais

É importante entender como obter as corretas informações a respeito da tensão nominal e capacidade nominal das baterias reais, através das especificações de seus fabricantes. A seguir apresentaremos um exemplo aplicado à folha de dados de duas baterias primárias alcalinas, sendo a primeira da marca Duracell e a outra Rayovac.

Em Duracell<sup>1</sup> encontramos as especificações das baterias Alcalinas Duracell. De acordo com o fabricante, o peso da bateria MN1500 é de 24 g. A seguir calculamos a energia disponível teórica da bateria:

$$145 \text{ Ah/kg} \times 0,024 \text{ kg} = 3,48 \text{ Ah ou } 3.480 \text{ mAh.}$$

Em Rayovac<sup>2</sup> encontramos as especificações das baterias Alcalinas Rayovac. De acordo com o fabricante, o peso da bateria MN1500 é de 22,9 g. A seguir calculamos a energia disponível teórica da bateria:

$$145 \text{ Ah/kg} \times 0,0229 \text{ kg} = 3,32 \text{ Ah ou } 3.320 \text{ mAh.}$$

---

<sup>1</sup><http://www1.duracell.com/Procell/productdata/#>

<sup>2</sup><http://www.rayovac.com/Technical-OEM/Specs-and-Product-Guides.aspx>

Lembramos que, ao colocarmos duas baterias em série, apenas aumentamos a tensão nominal do conjunto, no entanto a capacidade do conjunto continua sendo a de uma bateria individual. Apenas se colocássemos as baterias em paralelo, é que teríamos uma duplicação da carga do conjunto, porém permaneceríamos com a tensão disponível de uma única bateria.

Para a determinação da capacidade efetiva das baterias comerciais, é necessário a determinação do fator adimensional  $k$ , que depende da razão de descarga da bateria. Este fator foi determinado experimentalmente para o nó sensor MICAz, através da média dos valores de capacidade efetiva mostrada na seção 4.3 do capítulo 4.

De acordo com os experimentos o valor da capacidade efetiva média é igual a 1750,50 mAh  $k$  pode ser calculado da seguinte forma para cada uma das baterias comerciais utilizadas:

$$k = \frac{C_{ef}}{C_{MAX}},$$

$$k = \frac{1750,50}{3480,00} = 0,503 \text{ (Duracell)},$$

$$k = \frac{1750,50}{3320,50} = 0,527 \text{ (Rayovac)}.$$

Desta forma concluímos que a capacidade efetiva de uma bateria Alcalina alimentando o nó sensor MICAz da *Crossbow* é aproximadamente igual à 50 % da capacidade nominal ou máxima  $C_{MAX}$  da bateria. Ou seja, uma bateria com capacidade nominal de 3500 mAh, que é normalmente o valor usado pelos pesquisadores, fornece 1750 mAh de carga efetiva  $C_{ef}$ , quando utilizada para alimentar nós sensores deste fabricante.

No próximo capítulo, apresentaremos a aplicação da plataforma comercial de RSSFs, do fabricante *Crossbow*, usada em nossos experimentos, algumas tabelas da folha de dados do MICAz e duas metodologias para determinação do consumo de energia e consequentemente tempo de vida de um nó sensor real, a primeira foi transcrita do manual do MICAz (*Crossbow, 2007b*) e outra apresentada por *Haenselmann (2011)*. Estas metodologias foram utilizadas como base para avaliar o consumo determinado através dos experimentos.

# Capítulo 3

## Metodologia

Em termos gerais, para atender os objetivos propostos neste trabalho, foi necessário medir e avaliar o consumo de energia de um nó sensor através da instalação de um circuito medidor de corrente, anexado ao nó sensor, sem que o mesmo influenciasse de maneira importante no consumo de energia.

### 3.1 Experimentos

Para a realização dos experimentos, inicialmente foi instalado em um PC, o software *MoteView* (Crossbow, 2007a), software gratuito de aplicações, fornecido pela Crossbow, fabricante de plataformas comerciais de nós sensores.

O software *MoteView* disponibiliza ferramentas para envio, recebimento e armazenamento dos dados através do *gateway* (módulo responsável pelo recebimento do dados e envio ao PC), e que deve ser conectado ao PC.

O *MoteView* também possui ferramentas de interfaces para visualização da disposição da RSSF na tela do computador conforme figura 3.1 que mostra a topologia do experimento e os *firmwares* para programação dos componentes da RSSF.

Para possibilitar o envio do valor da corrente que circula no nó sensor foi necessário adicionar, em série com a bateria do nó sensor, um circuito constituído por um resistor e um amplificador operacional.

Desta forma, a corrente da bateria passa pelo dispositivo, antes de alimentar o circuito do nó sensor. A queda de tensão no resistor do dispositivo foi amplificada por um amplificador operacional incluído também no dispositivo; este sinal foi então captado por uma porta disponível no sensor conectada ao processador do nó sensor e transmitido para o *gateway*, utilizando um canal de rádio do próprio nó sensor. Este sinal de tensão, que é proporcional ao consumo de energia do nó sensor é então aferido e finalmente armazenado no PC, utilizando uma ferramenta do *MoteView*.

O amplificador operacional utilizado foi o LMV358 (Texas, 2007), ajustado para o ganho

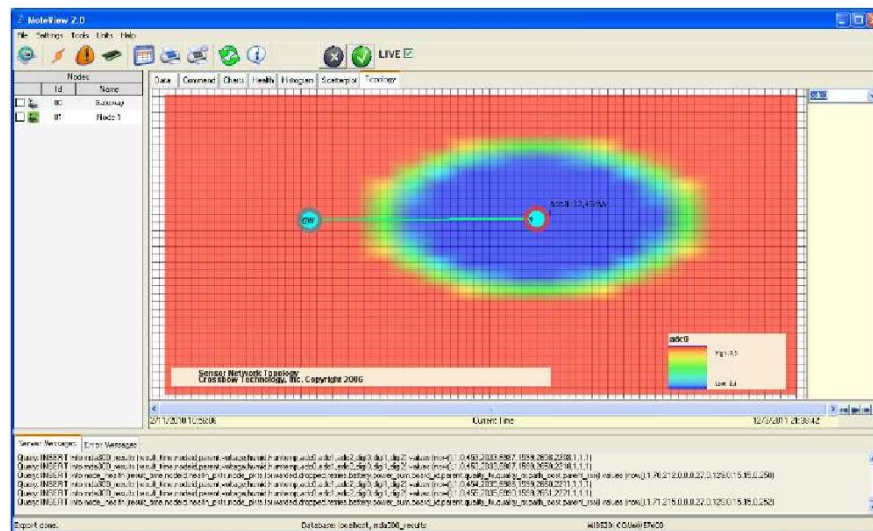


Figura 3.1: Screenshot do Enlace no Moteview

máximo, e cujo diagrama é apresentado na figura 3.2. A sua escolha foi devido à fácil aquisição comercial, no entanto foi necessário curto-circuitar os capacitores de entrada (C5 e C6) afim de permitir a passagem de corrente contínua. A placa de sensores utilizada foi a MDA300CA (Crossbow, 2007c), que disponibiliza acesso à uma porta ADO para envio do sinal de corrente.

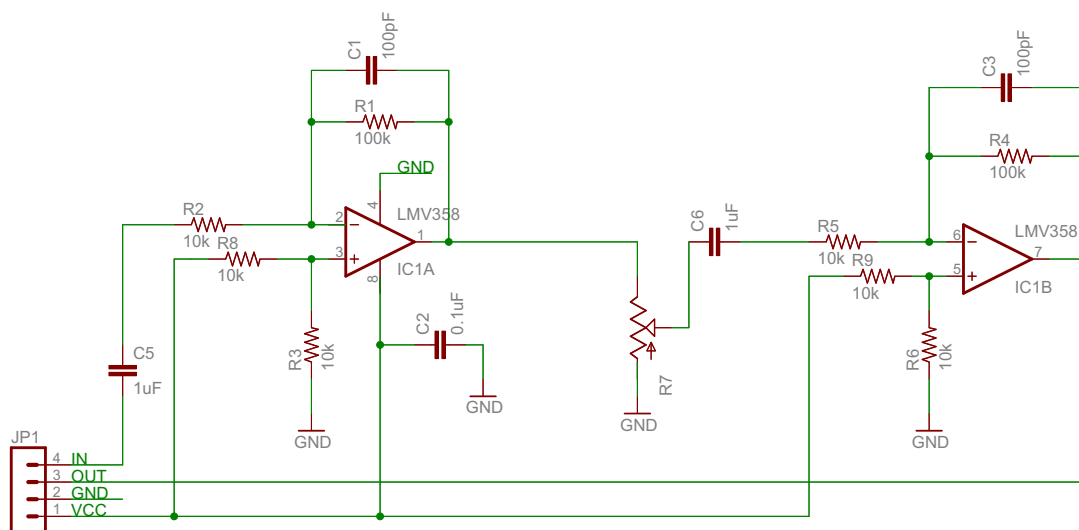


Figura 3.2: Diagrama do Amplificador LMV358

## 3.2 Aplicação do Dispositivo em Experimento

Vários experimentos com o dispositivo constituído pelo resistor e o amplificador operacional foram realizados para realização de medições e verificação do consumo de energia. O nó

sensor MICAz (Crossbow, 2007b) figura 3.3 usado nos experimentos foi alimentado por baterias alcalinas comerciais Rayovac, AA-LR6-1.5V, e também por baterias alcalinas comerciais MN 1500 Duracell. O MICAz foi programado com o *firmware* XMDA300\_2420\_hp, disponível no *MoteView*. Este *firmware* possui como padrão em sua configuração, o envio de pacotes de informações em intervalos regulares de tempo. Este intervalo de tempo foi fixado, via interface do *MoteView* em 1 minuto para envio de pacotes de dados ao *Gateway*, bem como a potência de transmissão foi ajustada em 1 mW (0 dBm) afim de manter propositadamente um alto consumo de energia e reduzir o tempo do experimento.

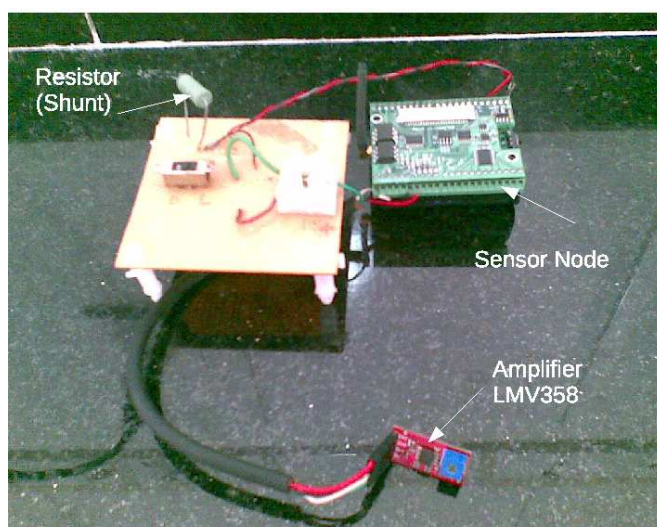


Figura 3.3: Dispositivo ligado ao MICAz

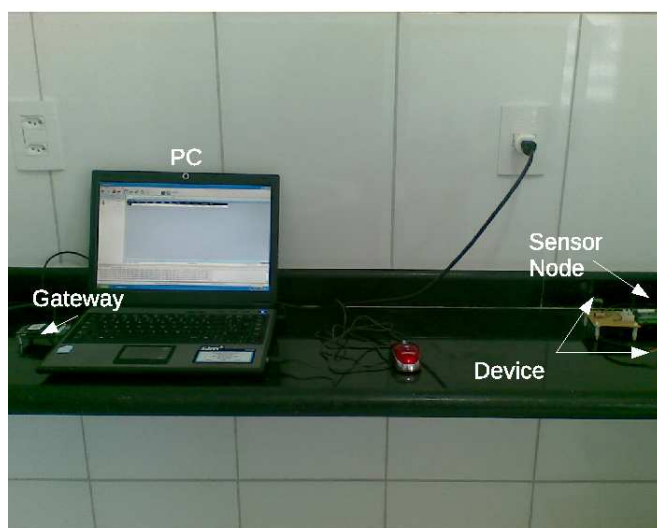


Figura 3.4: Disposição dos Dispositivos nos Experimentos

O MICAz ligado ao circuito formado pelo resistor e o amplificador operacional foi posicionado em ambiente interno, conforme figura 3.4, juntamente com o *gateway*, o qual está



Figura 3.5: *Gateway* conectado à Estação Base (PC)

conectado à Estação Base (PC) figura 3.5. Por intermédio do nó sensor, foram medidos valores de humidade e temperatura do ambiente, além do valor da corrente consumida pelo nó sensor.

Os valores foram monitorados ao longo do tempo até que o nó sensor parasse de transmitir, ou fossem verificadas discrepâncias nos sinais de umidade, corrente e temperatura, como por exemplo, valores muito acima ou muito abaixo do esperado ou até constantes, demonstrando erros de informação de forma generalizada e indicando que o nó sensor já havia esgotado a energia disponível na bateria para o seu perfeito funcionamento.

Para ajuste e aferição das medidas, verificamos, no experimento piloto, que o valor de queda de tensão inicial, no resistor *shunt* de 0,1 Ohm do dispositivo *device hardware*, foi de 2,4 mV e o sinal enviado para o PC, pelo MICAz, após passar pelo amplificador operacional LMV358 (*Amplifier LMV 358*) foi de 1,05 V. Valor que serviu bem aos propósitos, pois segundo o fabricante do nó sensor, para que o sinal possa ser percebido pela ferramenta do *MoteView*, o mesmo deve variar entre 0,6 V e 2,5 V.

### 3.3 Plataforma Comercial da *Crossbow*

#### 3.3.1 Sistema

Para realização dos experimentos foram utilizados os seguintes equipamentos e softwares:

- *MoteView*, software da *Crossbow* responsável pela interface (“*client tier*”) entre o usuário e a rede diposta de sensores sem fio. *MoteView* provê as ferramentas para simplificar o posicionamento e monitoramento. É quem faz também a fácil conexão ao banco de dados, para analisar e gerar gráficos dos sinais recebidos pelos sensores. O

*MoteView* não é compatível com o sistema *Linux*.

- *XMesh*, protocolo de rede *multi-hop mesh* da *Crossbow* instalado no MICAz, o qual possui várias opções, incluindo sensoreamento em baixa potência, tempo de sincronismo, modo dormindo, roteamento entre os nós sensores e, entre a base e os nós sensores. Todos os nós e placas de aquisição de dados da *Crossbow* possuem suporte *Xmesh* para as aplicações disponíveis.
- Para executar as aplicações é necessário a instalação dos seguintes componentes e plataformas de *softwares*.
  - *PostgreSQL 8.0 database service*
  - *PostgreSQL ODBC driver*
  - *Microsoft .NET 1.1 framework*

Os arquivos de instalação destes componentes já estão incluídos no CD de instalação do *MoteView*. O *PostgreSQL* dá suporte as todas as ferramentas de visualização no *MoteView* que requerem uma conexão com um banco de dados. Este banco de dados pode residir no seu PC (“*localhost*”), um servidor remoto, ou na *Stargate* (Estação base com conexão ao PC através de rede sem fio). O tamanho deste banco de dados depende do espaço disponível no sistema.

- MIB520CB, é a placa usada na plataforma de *gateway* da estação base, e que é caracterizada pela utilização de uma porta USB para interface entre a estação base (*gateway*) e o PC. É necessário um *Mote* (por ex. MICAz) acoplado à placa MIB520CB, para permitir seu funcionamento.
- MPR2400 (MICAz), O MICAz foi desenvolvido pela *Motes da Crossbow Technology*, antes de vender a sua linha de produtos de RSSFs para a *MEMSIC, INC.*. O MPR2400 (utiliza a frequência de 2400 MHz a 2483,5 MHz de largura de banda), velocidade de transmissão de dados de 250 kbps, é equipado com o Chipcon CC2420, que obedece o protocolo IEEE 802.15.4, disponível pelo transmissor de radio frequência *ZigBee* já integrado com o micro-controlador Atmega128L. Possui memória flash serial e um conector de 51 pinos I/O, que possibilita a ligação física com diversos modelos de placas de sensores, possui memória flash serial.
- MDA300CA-I/F BOARD, é uma placa para medições gerais compatível com a plataforma MICAz. Como aplicações primárias pode ser usada para: a) instrumentação para rede sem fio em baixa potência, b) medições de sistemas climáticos, c) controle de irrigação e agricultura de precisão, d) monitoramento de habitações, e) análise de solo e f) controle remoto de processos. Sensores analógicos podem ser ligados a diferentes canais baseados na precisão esperada e variação dinâmica. Sensores digitais



podem ser ligados para entrada e saída de sinais digitais ou canais para contagem de fenômenos externos.

### 3.3.2 Inicialização da Aplicação *MoteView*

Uma vez que a rede de sensores está funcionando e o *MoteView* foi instalado no PC, uma configuração mínima é necessária para iniciar a coleta de dados da rede de sensores sem fio, incluindo a informação da corrente elétrica consumida pelo MICAz. O passo a passo desta inicialização pode ser acessado no manual do fabricante ([Crossbow, 2007a](#)).

### 3.3.3 Tabelas com Valores Informados pelo Fabricante do MICAz (*Crossbow*)

Todos os nós sensores da Crossbow foram construídos para trabalhar com uma tensão variando entre 2.7 VDC e 3.6 VDC. Em muitas aplicações dos nós sensores, o processador e o rádio funcionam por um breve período de tempo, seguido por um ciclo dormindo. Durante a fase dormindo, o consumo de corrente é da ordem de micro-ampères contra os mili-ampères da fase anterior. Isto resulta em uma circulação de corrente muito baixa durante a maior parte do tempo, e picos de curta duração no processamento, recepção, e transmissão de dados. Este método possibilita estender o tempo de vida da bateria. A capacidade típica da bateria é especificada pelo fabricante para um consumo nominal constante de corrente. As tabelas 3.1 e ?? foram extraídas do manual do fabricante do MICAz (*Crossbow*).

A tabela 3.1 apresenta os valores de corrente consumida pelo nó sensor MICAz com potência de transmissão ajustada em 1 mW nos modos: processamento, transmissão, recepção e dormindo. Além disso, apresenta também a corrente consumida pela memória no modos: escrevendo, lendo e dormindo.

Tabela 3.1: Tabela de Consumo do MICAz em mA

Atividade	Consumo
Processador, em operação (7,37 MHz)	12,000
Processador, dormindo	00,010
Radio, recebendo	19,700
Radio, transmitindo 1 mW	17,000
Radio, dormindo	00,001
Memória <i>Serial flash</i> , escrevendo	15,000
Memória <i>Serial flash</i> , lendo	04,000
Memória <i>Serial flash</i> , dormindo	00,002

As tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam um guia útil de como estimar o tempo de vida de uma bateria alimentando um Mote da *Crossbow* ([Crossbow, 2007b](#)).

Tabela 3.2: Estimativa de Vida de um Nó Sensor em Operação

Componente	Modo de Operação	Consumo	Exemplo de Ciclo de Trabalho
Processador	em operação	08 mA	001,00
Processador	dormindo	08 $\mu$ A	099,00
Radio	recebendo	08 mA	000,75
Radio	transmitindo	12 mA	000,25
Radio	dormindo	02 $\mu$ A	001,00
Memória <i>Serial flash</i>	escrevendo	15 mA	000,00
Memória <i>Serial flash</i>	lendo	04 mA	000,00
Memória <i>Serial flash</i>	dormindo	02 $\mu$ A	100,00
Placa Sensor	em operação	05 mA	001,00
Placa Sensor	lendo	05 $\mu$ A	099,00

Tabela 3.3: Consumo Horário (mAh)

Componente	Carga (mAh)
Processador	0,0879
Radio	0,0920
Memória	0,0020
Placa Sensor	0,0550
Carga Total Consumida	0,2369

A soma total da produto da corrente consumida por cada elemento do nó sensor no tempo de 1 hora é apresentado como a Carga Total Consumida (0,2369 mAh). Dividindo-se a carga teórica da bateria, conforme mostrado na tabela 3.4, é possível estimar o tempo de vida do MICAz.

Tabela 3.4: Consumo da Bateria  $\times$  Tamanho da Bateria

Capacidade da Bateria (mAh)	Vida da bateria (horas)	Vida da Vateria (meses)
0250	01,055	01,46
1000	04,221	05,86
3000	12,663	17,58

### 3.4 Consumo de Energia e Tempo de Vida em RSSF

De acordo com Haenselmann (2011), as aplicações de rede de sensores dependem tanto da eficiência energética que queremos analisar quanto de quais tipos de operações drenam mais energia. A seguir, apresentamos a metodologia descrita por Haenselmann (2011), para realização do cálculo do consumo de energia de um nó sensor. Nesta metodologia, Haenselmann (2011) utilizou o nó sensor ESB (*Embedded Sensor Board*)<sup>1</sup>.

Haenselmann (2011) inicialmente, apresenta exemplos de medições que foram feitas com um amperímetro durante um experimento, mas informa que elas também poderiam ter sido tomadas a partir das especificações do fabricante, se disponível.

Tabela 3.5: Típico Consumo de Energia do Nó Sensor ESB (*Embedded Sensor Board*).

$(P_{CL})$	12,000 mA	Consumo básico de energia (processamento)
$(P_{TX})$	12,000 mA	Consumo adicional no modo transmissão
$(P_{RX})$	04,500 mA	Consumo adicional no modo recepção
$(P_{SL})$	00,008 mA	Total de energia consumida no modo dormindo

Tabela 3.5 mostra que um nó sensor ESB (*Embedded Sensor Board*) no modo básico (processador e sensores ligados) consome cerca de 500 vezes mais energia do que no modo dormindo. Durante o modo transmissão, o consumo duplica, enquanto no modo recepção, a quantidade de energia aumenta apenas 1/3. No entanto, esta relação entre o consumo no modo transmissão e recepção diferem em diferentes plataformas de diferentes fabricantes de RSSF comerciais. Existe porém, a certeza de que durante o modo dormindo, o nó sensor requer menos quantidade de energia, de modo que a mudança para o modo dormindo deve acontecer sempre que possível. Manter o nó no modo dormindo por maior quantidade de tempo é o principal objetivo, devido ao elevado consumo dos circuitos para redes de sensores sem fio disponíveis atualmente. A seguir, faremos uma aproximação que será baseada em uma aplicação que requer que o nó sensor acorde durante o tempo de 1 segundo, faça algumas medições, transmita informações a outro nó, e entre no modo dormindo durante o tempo restante.

Análise dos modos de operação dos nós sensores:

- Tempo para processamento e respectivo consumo de energia
- Tempo para envio de dados e respectivo consumo de energia
- Energia consumida no modo dormindo

<sup>1</sup>Todas as medidas foram feitas, considerando uma tensão constante de 4,5V.

### 3.4.1 Energia para Processamento

O processador MSP430, usado no nó sensor ESB, possui arquitetura de 16-bit de alto desempenho em baixa potência<sup>2</sup> e executa simultaneamente a interface de sinais de componentes analógicos e digitais. Funciona com um clock de 8 MHz o que significa que um único ciclo leva  $(1/8 \times 10^6)$  segundos. Considere que uma instrução média, leva 3 ciclos de *clock* e que são necessárias 5000 instruções para realização da medição, processamento dos dados e elaboração de um pacote para transmissão através da rede. Isso resulta em:

$$\frac{5000 \times 3}{8 \times 10^6} = \frac{15}{8 \times 10^3} = 0,001875 \text{ segundos,}$$

A quantidade de energia<sup>3</sup> consumida com uma corrente de 12 mA é de:

$$12 \times \frac{15}{8 \times 10^3} = 0,0225 \text{ mAs (mili-Ampère-segundos).}$$

Isto significa que a bateria tem que fornecer uma quantidade de energia equivalente a 1 mA durante o tempo de 22,5 ms. Esta energia é necessária para todas as operações que ocorrem dentro de 1 segundo.

### 3.4.2 Energia para Transmissão de Dados

O envio de dados ocorre a uma velocidade de 19.200 bits/s. Note que este fluxo é menor do que o fluxo de transmissão de 30.000 baud que podem ser manipulados pelo rádio transceptor. No entanto, alguns bits são usados para a sincronização, verificação de erros etc. De modo que os 19.200 bits/s estão disponíveis para transmitir qualquer carga.

Assume-se que as medições próprias de cada nó sensor, ocupam 50 bytes de memória, mas esta quantidade não é suficiente para enviar os próprios dados. Tem-se também o envio de dados provenientes de outros nós sensores que devem ser encaminhados ao nó *sink* ou *gateway*. Então, assume-se que é necessário transmitir a uma média de 250 bytes dos nós vizinhos (suposição otimista para uma RSSF formada por poucos nós). Um único bit leva  $(1/19.200)$  segundos para ser enviado, que pode ser resumido da seguinte forma:

$$(50 + 250) \times 8 \text{ bits} \times \frac{1}{19.200} = 0,125 \text{ s,}$$

$$0,125 \text{ s} \times (12 + 12) \text{ mA} = 3 \text{ mAs.}$$

É necessário (12+12) mA se o envio necessitar que o processador esteja no modo totalmente operacional.

<sup>2</sup><http://focus.ti.com/mcu/docs/mcugettingstarted.tsp?sectionId=97&tabId=2674&familyId=342&toolTypeId=1#arch>

<sup>3</sup>Para obter a energia, é necessário multiplicar o resultado pela tensão, porém ao considerar-se todas as medições, à uma tensão constante de 4,5 V, pode-se omitir este cálculo neste momento.

**baud:** A medida de *baud* é muitas vezes confundida com bits por segundo, o que normalmente não é correto. O número de *bauds por segundo* indica o número de “oscilações” na frequência da portadora. No caso do rádio transceptor MSP430 que pode funcionar em *OOK (On Off Keying)*, que significa que a amplitude do rádio está definida para um valor pré-definido para a transmissão de 1-bit e que é fixada em zero para 0-bits. A primeira vista *baud* corresponde a bits neste caso. Na prática os dados são enviados em blocos ou pacotes. Estes pacotes não incluem apenas as medições *payload* (os dados que a aplicação deseja enviar), estes dados são precedidos por alguns bits redundantes para fins de sincronização que completam o protocolo da camada MAC. No modo *ASK (Amplitude Shift Keying)* a amplitude é definida como mais do que apenas dois estados. Escolhendo, por exemplo, nível de amplitude 8, necessita de um código de 3 bits a cada instante. Neste caso, a taxa de bit/s seria significativamente maior que a taxa *baud*.

### 3.4.3 Energia Consumida no Modo Dormindo

Tempo gasto para processamento e envio

$$\frac{15}{8 \times 10^3} + \frac{(50 + 250) \times 8 \text{ bits}}{19.200} \approx 0,127 \text{ s.}$$

Isto significa que o nó pode ser mantido no modo dormindo por aproximadamente (1 s – 0,127 s = 0,873 s). De acordo com o fabricante, O ESB consome em torno de 0,008 mA no modo dormindo, desta forma (0,008 mA × 0,873 s = 0,007 mAs), ou seja, um consumo total de 0,007 mAs para os 873 ms de tempo ocioso dentro de cada segundo.

### 3.4.4 Quantidade Total de Energia por Segundo e Tempo de Vida

A quantidade total de energia é:

$$0,0225 + 3 + 0,007 = 3,03 \text{ mAs.}$$

Assumimos que uma bateria AA disponibiliza em torno de 2300mAh e foram utilizadas 3 para alimentar o ESB.

$$3 \times 2300 \text{ mAh} \times 1,5 \text{ V} = 4,5 \times 2300 \times 60 \times 60 = 37.260.000 \text{ mWs.}$$

O ESB consome (3,03 mAs × 4,5 V = 13,635 mWs), e assim a energia tem a duração de 2,7 milhões de segundos, ou aproximadamente 32 dias.

Um tempo de apenas 1 mês de operação não justificaria o uso de sensores para muitas aplicações, como por exemplo, o monitoramento de possíveis focos de incêndios em florestas ou locais de difícil acesso. Em um cenário real o tempo no modo ativo por segundo seria provavelmente inferior. O maior problema sobre o cálculo acima, no entanto, é que não con-

siderou a energia necessária para a recepção de dados. Se fosse necessário escutar no canal, o tempo todo, seria necessário substituir o valor da energia de 0,007 mAs no modo dormindo para o valor de  $(0,873 * 14 \text{ mAs} \approx 16 \text{ mAs})$  do nó no modo ativo com a unidade transceptora na escuta. Isso diminuiria o tempo de vida do nó sensor para valores entre 5-6 dias.

### 3.5 Considerações Finais

Apesar de [Haenselmann \(2011\)](#), em sua metodologia considerar que 3 baterias fornecem três vezes a quantidade de energia fornecida por uma única bateria, isto só acontece quando as baterias são ligadas em paralelo, o que não é o caso, que são ligadas em série. Desta forma, na prática, apenas a tensão é triplicada, não a capacidade de energia disponível. Esta afirmação foi comprovada através dos experimentos realizados no decorrer deste trabalho.

No próximo capítulo, baseados na metodologia de [Haenselmann \(2011\)](#), apresentaremos os resultados obtidos nos experimentos realizados com o nó sensor MICAz. Com o dados obtidos foram contruídas curvas temporais de corrente, tensão, bem como de capacidade remanescente de carga das baterias alcalinas. Mostramos o efeito de relaxamento que acontece nas baterias que alimentam cargas variáveis, caso típico dos nós sensores, e determinamos alguns parâmetros usados na construção de curvas de capacidade remanescente. Ao final apresentamos um gráfico comparativo do consumo do MICAz e do nó sensor virtual simulado com o NS-2.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Aplicação da Metodologia no MICAz

Consideramos, em nossa aplicação, que o nó sensor está ativo o tempo todo, ora no modo transmissão ora no modo sensoreamento e recepção. E na aplicação da metodologia utilizamos os dados obtidos a partir da tabela 3.1, do nó sensor MICAz, cujo consumo foi resumido através da tabela 4.1<sup>1</sup>, e também os dados obtidos nos experimentos realizados.

Tabela 4.1: Consumo de Energia do MICAz

$(P_{CL})$	13,000 mA	Consumo de energia (processador + sensor)
$(P_{TX})$	12,000 mA	Consumo adicional no modo transmissão
$(P_{RX})$	19,700 mA	Consumo adicional no modo recepção
$(P_{SL})$	00,017 mA	Total de energia consumida no modo <i>sleep</i>

Observamos, que de acordo com o fabricante do MICAz, o seu consumo durante a recepção é maior que no modo transmissão, o que contraria a hipótese comumente adotada em pesquisas científicas sobre RSSFs.

**Energia para processamento e sensoreamento** Da mesma forma que em [Haenselmann \(2011\)](#), consideramos que o processador durante a tarefa de leitura das informações coletadas pelo sensor e processamento dos dados gasta 5.000 clocks, e como a velocidade do processador do MICAz também é de 8 MHz, calculamos o tempo e a energia gasta nesta operação, conforme abaixo:

$$\frac{5000 \times 3}{8 \times 10^6} = \frac{15}{8 \times 10^3} \text{s},$$
$$13 \times \frac{15}{8 \times 10^3} = 0,024375 \text{ mAs}.$$

<sup>1</sup>Todas as medidas foram feitas, considerando uma tensão constante de 3,0V

**Energia para transmissão** Calculamos a energia gasta para transmissão, considerando o tamanho máximo do pacote de dados que é de 55 Bytes (Crossbow, 2007d) e que a velocidade para envio de dados é de 250 kbps para o rádio *Chipcon* CC2420 que equipa o MICAz (Crossbow, 2007b).

$$\frac{55 \times 8 \text{ bits}}{250.000} = 0,00176 \text{ s},$$

$$0,00176 \text{ s} \times (13 + 12) \text{ mA} = 0,044 \text{ mAs}.$$

**Energia para recepção** Como em nosso experimento real, o nó sensor permanece com o receptor ligado, o tempo todo, escutando o canal para permitir a recepção de dados, o consumo no modo *sleep* foi substituído pelo consumo no modo recepção. O cálculo abaixo, subtrai do tempo de 1 s, o tempo gasto nas operações de processamento e transmissão. O resultado é o tempo no modo recepção que é multiplicado pela corrente drenada nesta operação.

$$\frac{15}{8 \times 10^3} + \frac{55 \times 8 \text{ bits}}{250.000} \approx 0,045875 \text{ s},$$

$$(1 - 0,045875 = 0,954125 \text{ s}) \rightarrow 0,954125 \text{ s} \times 19,7 \text{ mA} \approx 18,7962625 \text{ mAs}.$$

**Energia para modo *sleep*** Não foi calculado, pois em nosso experimento, o nó sensor não entra no modo *sleep*.

**Total de energia consumida** O consumo total de energia foi calculado, somando-se os valores de energia gastos para sensoramento e processamento, transmissão e recepção, conforme abaixo:

$$0,024375 + 0,044 + 18,7962625 = 18,865 \text{ mAs}.$$

**Energia efetiva disponível nas baterias** Através dos experimentos, concluímos que a quantidade carga média disponível em um conjunto de duas baterias alcalinas de 1,5 V é de 1750,5 mAh, e que a tensão média aplicada ao MICAz durante o seu funcionamento é de 2,59 V. Estes valores foram utilizados para a determinação da energia efetiva disponível na bateria, conforme abaixo:

$$1750,50 \text{ mAh} \times 2,59 \text{ V} = 2,59 \times 1750,5 \times 60 \times 60 = 16321662 \text{ mWs (mili-Watt-segundos)}.$$

**Tempo de Vida** O MICAz, conforme calculado, consome 18,865 mAs que multiplicado pela tensão média de 2,59 V, obtida através de experimentos, totaliza um consumo de 48,86 mWs em cada 1 s, e assim o tempo de vida do nó sensor é de:



$$\frac{16321662 \text{ mWs}}{48,86 \text{ mW}} \approx 2334047 \text{ s ou aproximadamente } 92,79 \text{ horas.}$$

O tempo de vida calculado através da metodologia é de 92,79 horas, esse tempo foi comparado com o tempo de vida observado nos experimentos realizados, os quais serão descritos na próxima seção.

**Total de energia consumida nos experimentos** O consumo total de energia determinado nos experimentos, através do produto da tensão média pela corrente média ao longo do tempo de funcionamento do MICAz, onde a tensão média foi de 2,59 V e a corrente média foi de 19,8 mA, conforme abaixo:

$$V \times I = 2,59 \times 19,8 \approx 51 \text{ mWs.}$$

**Tempo de Vida através dos dados dos experimentos** O MICAz, conforme medido, consome uma corrente de 19,8 mAs que multiplicado pela tensão média de 2,59 V, obtida através de experimentos, totaliza um consumo de aproximadamente 51 mWs em cada 1 s, e assim o tempo de vida do nó sensor é de:

$$\frac{16321662 \text{ mWs}}{51 \text{ mW}} \approx 320032 \text{ s ou aproximadamente } 88,89 \text{ horas.}$$

Os resultados acima mostraram que a potência consumida pelo nó sensor é aproximadamente 51 mW a cada segundo. Este valor foi usado para configuração do simulador NS-2, tanto em relação à potência de transmissão (*rxPower*), quanto a de recepção (*txPower*).

#### 4.1.1 Análise dos Resultados

Observamos que o resultado do tempo de vida do MICAz obtido no: experimento (88,21 horas); através das tabelas do fabricante do MICAz (92,79 horas); e com os dados dos experimentos (88,89 horas) foram bastante parecidos, o que demonstra que a prática de utilizarem-se valores tabelados pelas folhas de dados dos fabricantes em relação ao consumo dos nós sensores comerciais resulta em valores muito próximos dos reais.

## 4.2 Experimentos

Com o objetivo de avaliar e comparar as curvas de carga remanescente obtidas com o simulador NS-2 e com as curvas de carga de capacidade remanescentes de nós sensores comerciais, foram realizados quatro experimentos com o nó sensor MICAz. O MICAz foi programado para enviar os pacotes de dados obtidos pela placa sensor MTS420, em intervalos regulares de 1 min e os resultados foram apresentados em forma de gráficos e tabelas.

Foram realizados quatro experimentos idênticos, para avaliação da carga Remanescente no MICAz, a única diferença foi a utilização de pilhas novas em cada um deles. Segue abaixo a configuração básica e componentes dos experimentos.

- *Firmware* instalado na memória RAM do nó sensor MICAz: XMDA300\_2420\_hp;
- 01 Nó sensor MICAz, modelo MPR2600, composto por um *chip* contendo o processador ATmega128L (7,37 MHz, 8 bit) e o rádio *Chipcon* CC2420. E conectada, através de encaixe, uma placa sensor, modelo MDA300CA-I/F BOARD;
- 01 *Gateway*, que é o MICAz sem a placa sensor, conectado à placa MIB520CB;
- 01 Estação Base (PC) com o *software* *Moterview* instalado;
- 01 Amplificador operacional LMV358;
- 01 Placa onde foram montados e conectados os componentes adicionais: chave, resistor, etc;
- Porta utilizada para envio dos pacotes: AD0.

A figura 4.1 mostra a disposição dos componentes.

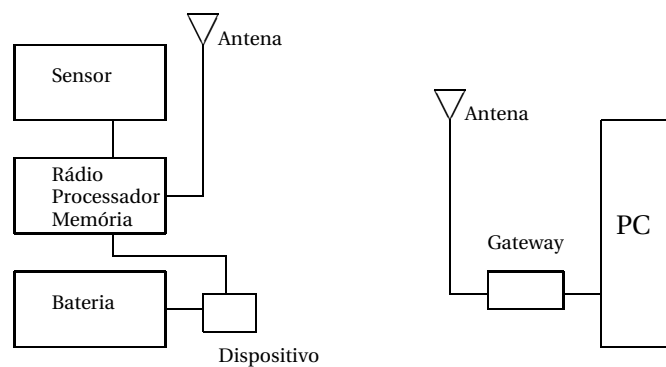


Figura 4.1: Diagramas em blocos dos elementos do experimento

Os experimentos foram realizados em ambiente interno, sem controle de temperatura e pressão e livre de obstáculos físicos entre o nó sensor e o *gateway*. O MICAz foi alimentado por duas baterias alcalinas novas em série, com tensão nominal equivalente de 3 V.

O MICAz permaneceu em modo ativo durante todos os experimentos, e o envio de pacotes era feito em intervalos regulares de 1 minuto. O sinal amplificado pelo LMV358 era enviado para o *gateway* que estava conectado ao PC através de uma porta USB. Este sinal de tensão era então convertido, através de uma equação linear, da forma  $aX^2 + bX + c$ , em valor de corrente e armazenado no banco de dados do PC em formato ASCII.

**Medições para ajuste de parâmetros dos demais experimentos** Antes da realização dos experimentos que iriam avaliar a capacidade efetiva das baterias comerciais, e cujos dados seriam também utilizados para construção de curvas de carga remanescentes reais, foram realizadas medições para ajustes de parâmetros dos dados de corrente que seriam coletados através dos experimentos.

Conforme descrito anteriormente, ao invés da placa sensor MTS420, usada no primeiro experimento, foi utilizada a placa sensor MDA300CA, que possui apenas dois sensores: temperatura e umidade. A grande vantagem desta placa é que ela também disponibiliza acesso a alguns canais do rádio transceptor, por exemplo: canais ADC0, ADC1, etc., bem como possibilita o acesso físico para a utilização das tensões presentes no próprio nó sensor.

Para ajuste dos parâmetros, o MICAz teve sua corrente medida durante a fase de transmissão. O valor medido foi de 24,15 mA. Este valor foi obtido através do uso de um multímetro, conforme montagem experimental mostrada na figura 4.2, nesta montagem a chave indicada, permaneceu aberta. Em seguida, com a chave fechada, medimos na saída amplificador operacional LMV358 (Texas, 2007), mostrado na figura 3.3, a queda de tensão do resistor *shunt*, cujo valor foi de 1,05 V. Como esta tensão de saída é proporcional ao valor da corrente consumida pelo MICAz, utilizamos uma equação linear  $aX^2 + bX + c$  para converter este valor de tensão em valor de corrente. Para o primeiro valor de tensão de corrente, foi multiplicado pelo fator  $b = 23$  da equação linear de ajuste do *MoteView*, e mantendo os demais iguais a zero, ou seja  $a = c = 0$ , afim de obtermos os mesmos 24,15 mA para ser armazenado. Esta ferramenta de conversão é disponibilizada pelo próprio *Moteview*.

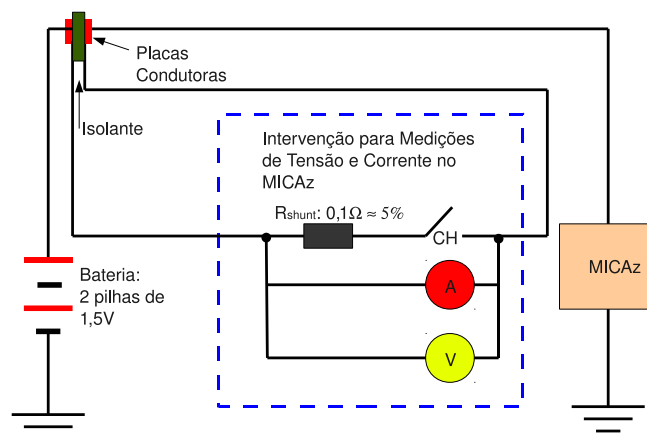


Figura 4.2: Gráfico: Circuito para ajuste de parâmetros

O valor da queda de tensão no resistor *shunt* foi de 2,4 mV e a equação usada no *Moteview* é da forma  $aX^2 + bX + c$ , onde:  $b = 23$ ,  $a = c = 0$ , onde  $X$  é o valor amostrado. Depois do ajuste dos valores de corrente que comporiam as séries temporais em formato ASCII, foram

realizados vários experimentos com baterias alcalinas dos fabricantes Rayovac e Duracell. Para possibilitar o uso do LMV358 foi necessário curto-circuitar os capacitores de entrada do circuito amplificador e assim permitir a passagem do sinal analógico contínuo (a queda de tensão). O amplificador operacional foi necessário, pois conforme manual do fabricante do MICAz, para que o sinal pudesse ser percebido pelo *gateway*, deveria variar entre 0,6 e 2,5 V.

A seguir descrevemos estes experimentos e apresentamos os gráficos e tabelas contruídos com os dados obtidos nos mesmos, em seguida apresentamos um resumo de dados obtidos nos experimentos.

### 4.2.1 Primeiro Experimento

De posse dos dados obtidos no primeiro experimento foram construídos 3 (três) gráficos temporais utilizando o *software R-project* (R Development Core Team, 2009). A figura 4.3 mostra o valor da tensão da bateria do MICAz em função do tempo, a figura 4.4 mostra a corrente consumida pelo MICAz ao longo do tempo e a figura 4.5 apresenta a curva de carga remanescente em função do tempo, utilizando os modelos lineares baseados na corrente e na tensão. Também é apresentada a tabela 4.2 que resume os dados obtidos no experimento.

- A figura 4.3 mostra que a tensão aplicada ao MICAz não é constante, pois a tensão da bateria cai ao longo do tempo. E a tensão varia de 3.085 V a 2.236 V sendo esta a faixa de tensão no qual o MICAz funciona.
- A figura 4.4 mostra que a corrente consumida pelo MICAz não é constante, pois como a tensão da bateria cai ao longo do tempo, e sendo a carga constante para este experimento, implica numa redução contínua do valor da corrente. Neste experimento só foi medido a corrente consumida, nos intervalos de 1 minuto, ou seja, durante o envio de pacotes de informações.
- A figura 4.5 mostra que a curva da capacidade remanescente da bateria, mostrada também na tabela 4.2 que é de 1552.868 mAh, o qual é bem abaixo do valor teórico máximo de 3500 mAh determinado através da folha de dados de fabricantes de bateria comerciais. Como consequência o tempo de vida do MICAz foi de 284700 s ou  $t=79,08$  horas, bem abaixo do valor esperado antes do experimento, se considerarmos que uma bateria alcalina nova possui uma carga nominal de aproximadamente 3500 mAh e que pode fornecer carga até o valor de 0,9 V. Na figura 4.5, podemos observar a diferença no comportamento das curvas baseadas nos modelos de Tensão e de Corrente.

A curva de capacidade remanescente baseada no modelo de tensão não apresentou uma linha reta, embora utilize um modelo linear. A razão para tal comportamento é devido a fenômenos não-lineares, cujo mais importante é o efeito de relaxamento, que ocorrem nos

Tabela 4.2: Resultados do Experimento 1

Capacidade efetiva da Bateria	1552 mAh
Corrente média	19,6 mA
Constante (a) do modelo de Tensão	1829,06
Constante (b) do modelo de Tensão	4089,77
Constante (k) do modelo de Corrente	0,44
Tempo de vida	79,08 horas

Gráfico: Tensão (V) X Tempo (Segundos)

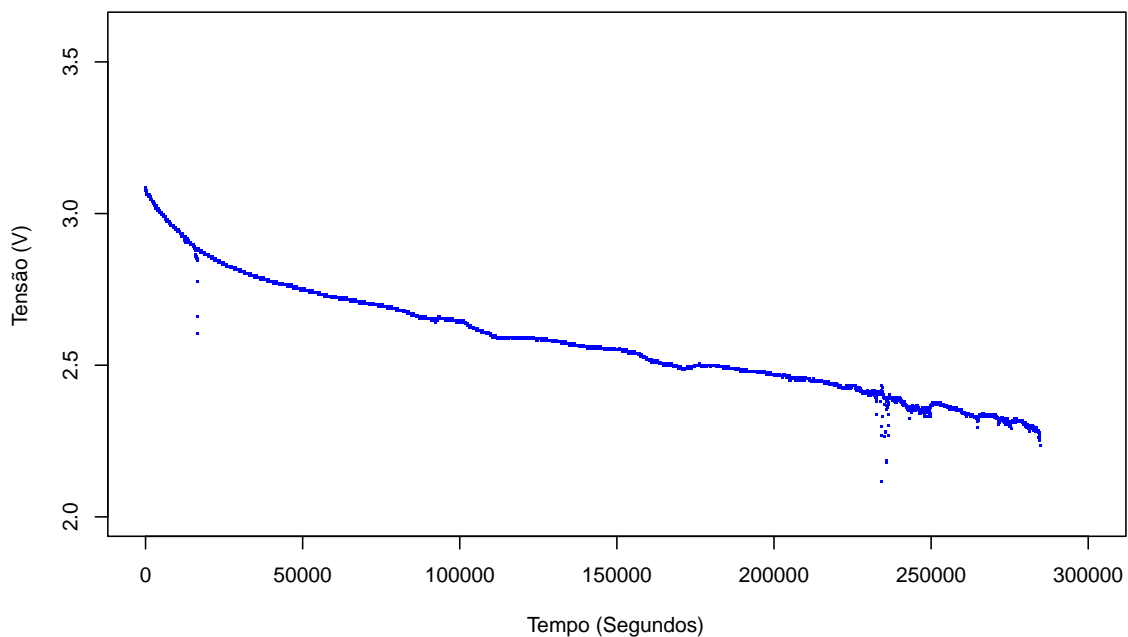
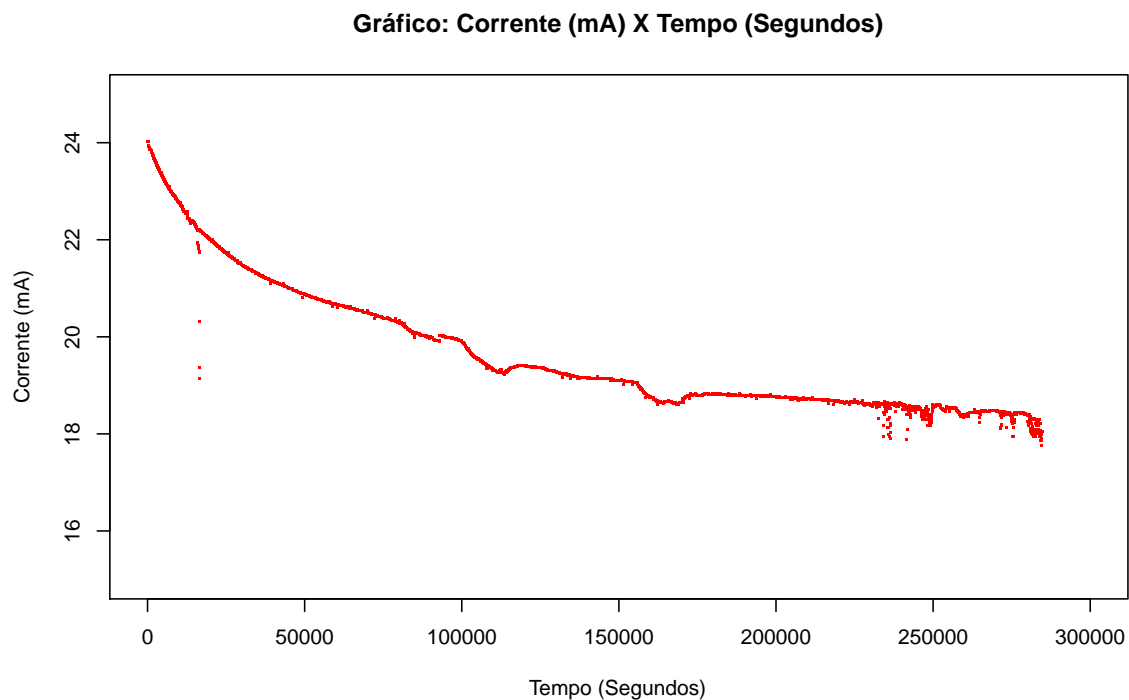
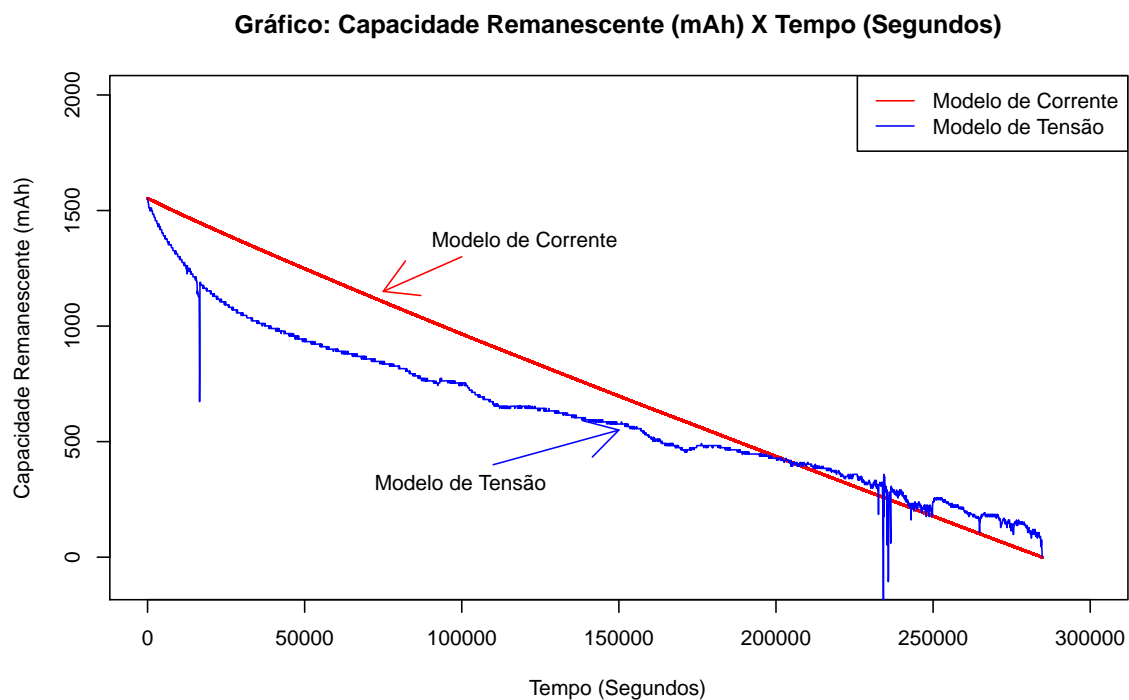


Figura 4.3: Gráfico: Tensão × Tempo

instantes de interrupção de transmissão, demonstrando capacidade de recuperação da bateria do nó sensor. Os parâmetros adimensionais  $a$  e  $b$  foram determinados utilizando os valores de capacidade efetiva e tempo de vida obtidos nos experimentos para cada conjunto de baterias. Estes parâmetros são utilizados para a construção de curvas de carga remanescente.

A curva baseada no modelo de corrente não sofreu o efeito de relaxamento, razão pela qual a curva foi linear. Nesta curva, não foi utilizado o fator  $k$  para determinação da capacidade efetiva, pois a série temporal do experimento, já disponibiliza a capacidade efetiva da bateria comercial utilizada no experimento.

Figura 4.4: Gráfico: Corrente  $\times$  TempoFigura 4.5: Gráfico: Capacidade Remanescente  $\times$  Tempo

### 4.2.2 Segundo Experimento

No experimento 2, com um novo conjunto de baterias Rayovac e para a mesma configuração, obtivemos resultados semelhantes. Verificamos, no experimento, valores de tensão e corrente médias bastante próximos dos resultados anteriores. No entanto obtivemos um tempo de vida maior para o nó sensor, ou seja  $t=346980$  s ou  $t=96,38$  horas, cerca de 17,3 horas a mais que o anterior, o que demonstrou disparidades em relação às capacidades nominais de baterias do mesmo fabricante. O experimento foi repetido mais uma vez utilizando baterias Duracell (Duracell, 2006) afim de comparar com os resultados obtidos com as baterias Rayovac (Rayovac, 2010). Segue abaixo a figura 4.6 do gráfico da Capacidade Remanescente e a tabela 4.3 com o resumo dos resultados.

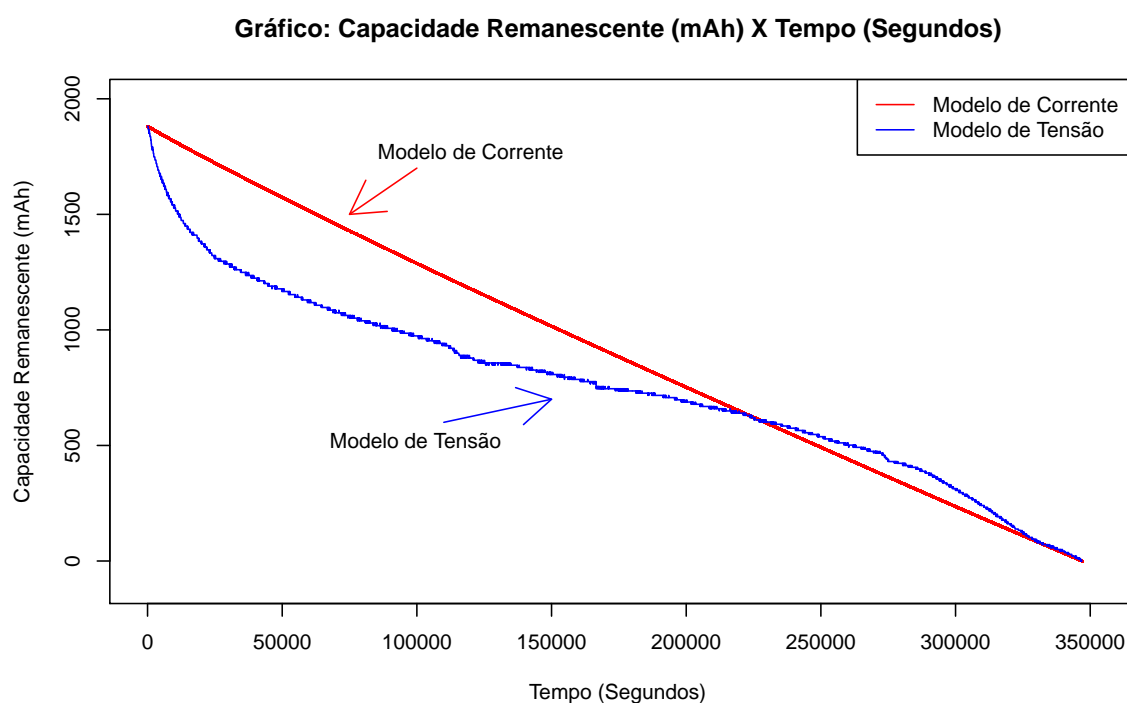


Figura 4.6: Gráfico: Capacidade Remanescente  $\times$  Tempo

Tabela 4.3: Resultados do Experimento 2

Capacidade efetiva da Bateria	1880 mAh
Corrente média	19,5 mA
Constante (a) do modelo de Tensão	1921,26
Constante (b) do modelo de Tensão	4134,55
Constante (k) do modelo de Corrente	0,54
Tempo de vida	96,38 horas

### 4.2.3 Terceiro Experimento

No experimento 3, com um novo conjunto de baterias Duracell e para a mesma configuração, obtivemos resultados semelhantes. No experimento foi verificado valores de tensão e corrente médias também bastante próximos dos resultados anteriores. Obtivemos um tempo de vida, para o nó sensor de  $t=324120$  s, cerca de 90,03 horas, compatível com os resultados anteriores. As curvas de carga remanescente apresentaram aspectos muito parecidos com as do gráfico anterior. O experimento foi mais uma vez repetido utilizando novamente baterias Duracell (Duracell, 2006) afim de termos, pelo menos, dois resultados para cada marca de bateria. Segue abaixo a figura 4.7 do gráfico da Capacidade Remanescente e a tabela 4.4 com o resumo dos resultados.

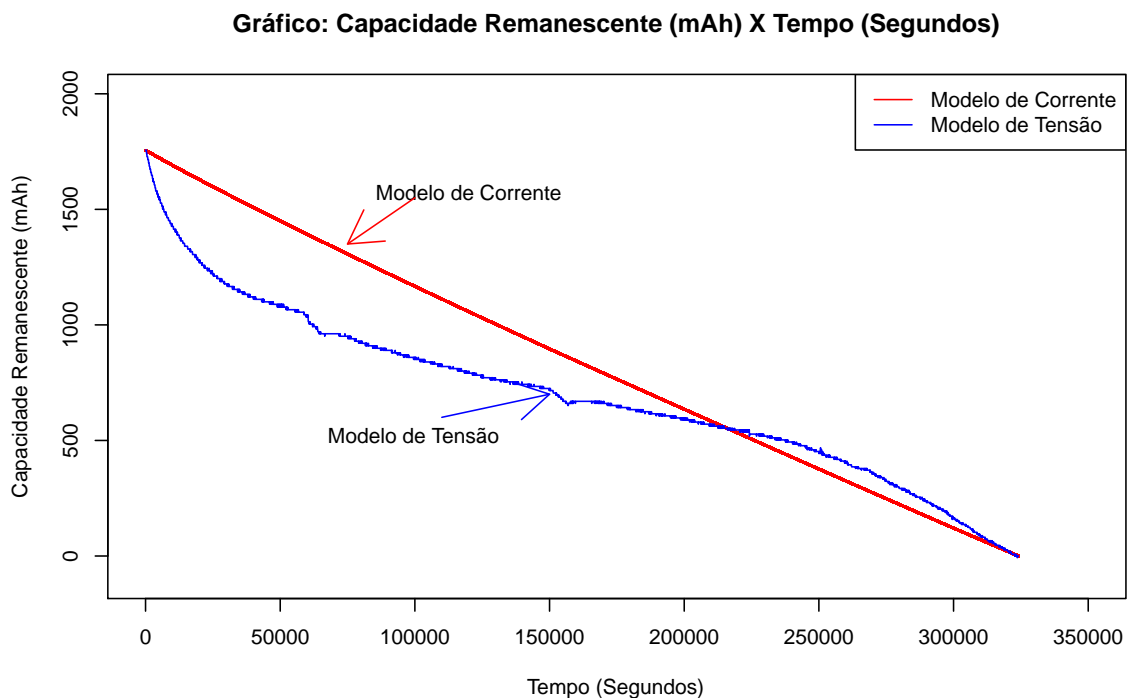


Figura 4.7: Gráfico: Capacidade Remanescente  $\times$  Tempo

Tabela 4.4: Resultados do Experimento 3

Capacidade efetiva da Bateria	1756 mAh
Corrente média	19,5 mA
Constante (a) do modelo de Tensão	1794,18
Constante (b) do modelo de Tensão	3861,08
Constante (k) do modelo de Corrente	0,50
Tempo de vida	90,03 horas



#### 4.2.4 Quarto Experimento

No experimento 4, um novo conjunto de baterias de um novo modelo de baterias Duracell, fabricadas especialmente para máquinas fotográficas digitais, e para a mesma configuração, obtivemos curvas com comportamento semelhantes, porém com valores de Tensão e Corrente iniciais, acima dos obtidos nos experimentos anteriores. O tempo de vida, para o nó sensor foi de  $t=314460$  s, cerca de 87,35 horas, compatível com os primeiros resultados dos demais experimentos. Segue abaixo a figura 4.8 do gráfico da Capacidade Remanescente e a tabela 4.5 com o resumo dos resultados.

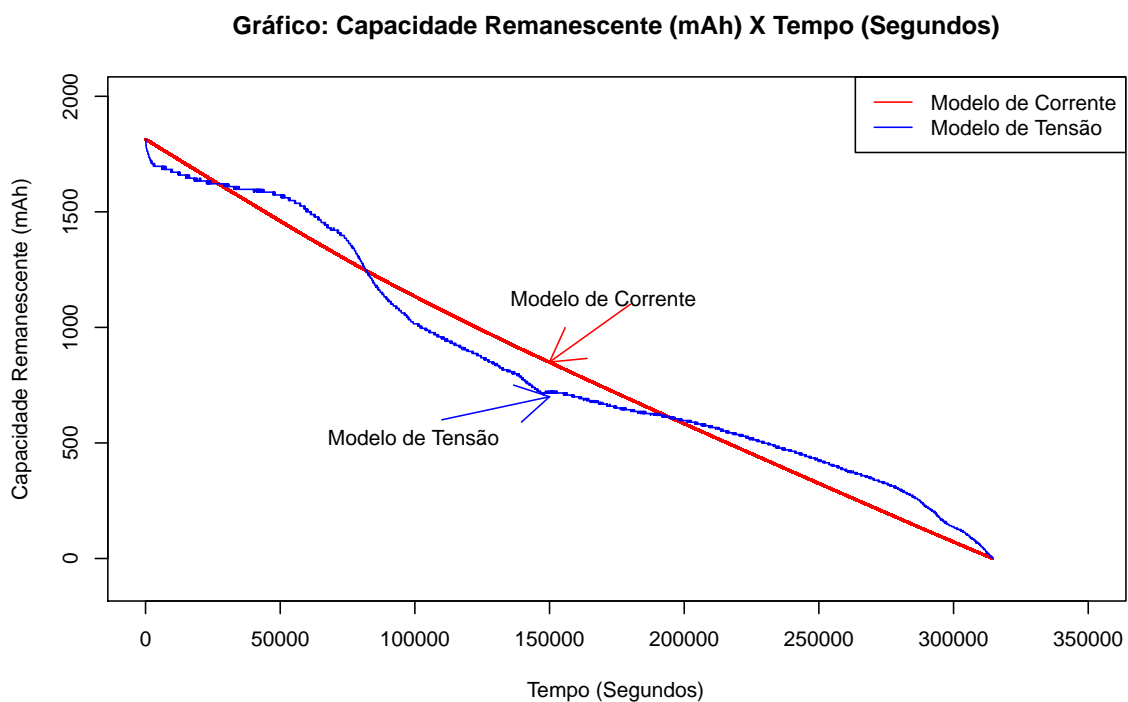


Figura 4.8: Gráfico: Capacidade Remanescente × Tempo

Tabela 4.5: Resultados do Experimento 4

Capacidade efetiva da Bateria	1814 mAh
Corrente média	20,7 mA
Constante (a) do modelo de Tensão	1511,13
Constante (b) do modelo de Tensão	3218,03
Constante (k) do modelo de Corrente	0,52
Tempo de vida	87,35 horas

### 4.3 Resumo dos Resultados dos Experimentos

Como resultados, foram obtidas séries temporais de formato ASCII, que disponibilizam valores de corrente e tensão em intervalos regulares de 1 minuto. Apesar das séries temporais obtidas em apenas quatro experimentos serem insuficientes para conhecer o comportamento exato da energia consumida ao longo do tempo, de acordo com o valor da corrente e tensão fornecida pela bateria, estes experimentos podem ser repetidos utilizando a metodologia definida. As tabelas 4.6 e 4.7, contém o resumo dos valores obtidos nos experimentos.

Tabela 4.6: Resumo 1 dos Resultados dos Experimentos

Experimento	Bateria	Cap. (mAh)	Cut-off Volt. (V)	Corrente (mA)
1	AA-LR6-1.5V Rayovac	1552	2,23	19,6
2	AA-LR6-1.5V Rayovac	1880	2,15	19,5
3	MN 1500 Duracell	1756	2,15	19,5
4	MN 1500 Duracell	1814	2,13	20,7
Média		1750	2,17	19,8

Em relação à forma de consumo da corrente, foi possível através das séries temporais geradas, mostrar que a corrente de descarga real do nó sensor ao longo do tempo não é constante e sim decrescente, acompanhando o nível de tensão das baterias comerciais.

Tabela 4.7: Resumo 2 dos Resultados dos Experimentos

Experimento	Corrente (mA)	Tensão (V)	H. média (%)	Temp. média ( $^{\circ}$ C)	Vida (horas)
1	24,03 - 18,05	3,08 - 2,23	71,20	27,89	79,08
2	24,67 - 17,96	3,13 - 2,15	73,15	28,83	96,38
3	24,68 - 17,96	3,13 - 2,15	70,75	30,71	90,03
4	26,55 - 17,73	3,33 - 2,13	78,60	30,59	87,35

Os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $k$  foram determinados nos experimentos e são apresentados na tabela 4.8. Estes parâmetros foram calculados, considerando uma bateria alcalina com capacidade nominal de 3500 mAh, valor comumente adotado em pesquisas. E são necessários para a construção de Curvas de Capacidade Remanescente baseadas nos modelos lineares de tensão e de corrente.

De posse das séries temporais, também foi possível construir Curvas de Capacidade Remanescente da Bateria em função do tempo, baseadas nos modelos de tensão e corrente, conforme figura 4.9.

Podemos observar na figura 4.9 um total de 8 curvas de capacidade remanescente  $\times$  tempo, sendo 4 baseadas no modelo de tensão e as outras 4 baseadas no modelo de corrente.

Tabela 4.8: Valores Médios dos Parâmetros:  $a$ ,  $b$  e  $K$ 

Experimento	Parâmetro $a$	Parâmetro $b$	Parâmetro $k$
1	1829,06	4089,77	0,44
2	1921,26	4134,55	0,54
3	1794,18	3861,08	0,50
4	1511,13	3218,70	0,52
Média	1763,91	3826,03	0,50
Desvio Padrão ( $\sigma$ )	0176,84	0422,22	0,04

Observamos que a capacidade efetiva da bateria, para aplicações em RSSFs, é bem reduzida. Através dos valores medidos nos experimentos, verificamos que duas baterias novas ligadas em série, disponibilizam uma capacidade efetiva média de 1750 mAh, que é 50 % do valor adotado em pesquisas de RSSFs. Esta diferença é explicada principalmente pelo fato de que apesar das folhas de dados de baterias informarem que baterias de 1,5 V podem fornecer energia até um valor de tensão de 0,9 VDC, ou 1,8 VDC se forem colocadas duas baterias em série, na prática, o nó sensor para de funcionar corretamente quando o nível de tensão total das duas baterias em série se aproxima de 2,1 VDC.

De acordo com a *Crossbow*, fabricante da plataforma comercial, todos os seus nós sensores são construídos para trabalhar com uma tensão variando entre 2,7 V DC e 3,6 V DC. Isto quer dizer que o fabricante não garante o funcionamento do nó sensor quando a tensão cai abaixo de 2,7 V DC. Esta limitação reduz ainda mais o tempo de vida do nó sensor, caso seja considerada nos projetos de RSSFs.

## 4.4 Expressão para o Consumo de Energia

A partir dos resultados dos 4 (quatro) experimentos realizados, resumidos e apresentados na tabela 4.9, foi utilizada uma expressão matemática, bastante comum nos simuladores computacionais, como por exemplo o NS-2, para avaliação do consumo de energia em Joules do nó sensor e comparar seus resultados com os resultados obtidos através do NS-2. Conforme já exposto, consideramos, neste trabalho experimental, que o nó sensor não entra nos modos *sleep* e *idle*.

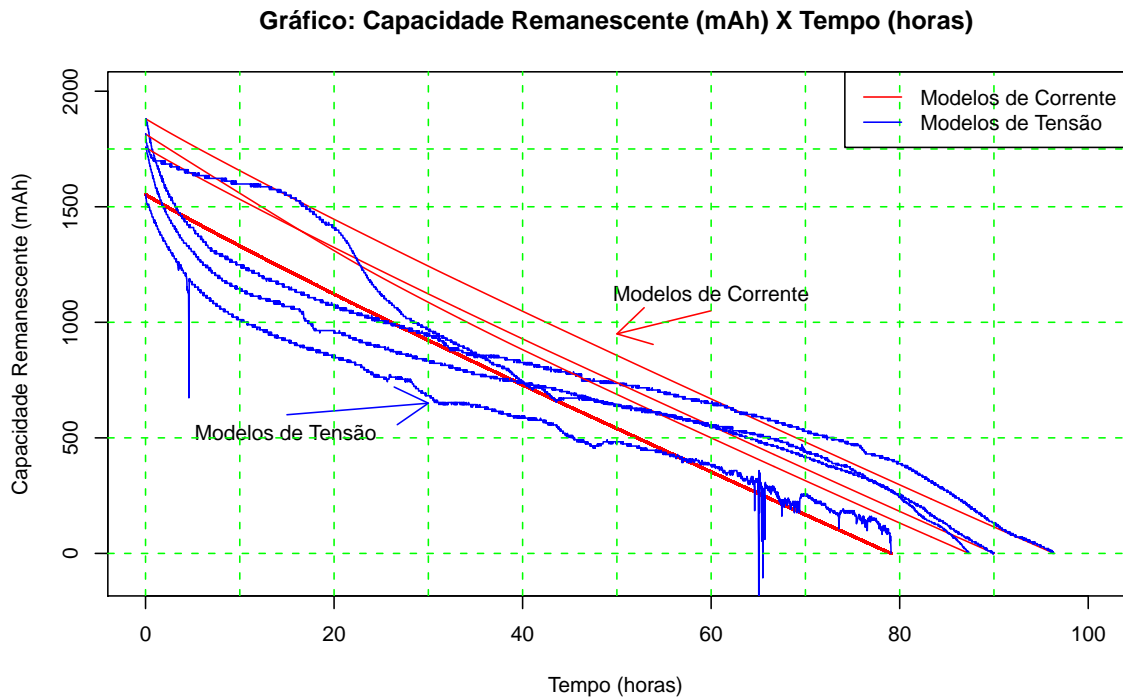


Figura 4.9: Capacidade Remanescente: Modelos de Tensão e de Corrente  $\times$  Tempo

Potência (W) = Tensão (V)  $\times$  Corrente (A).

Energia (J) = Potência (W)  $\times$  Tempo (s).

Energia de Transmissão = Potência de Transmissão  $\times$  Tempo de Transmissão.

Energia de Recepção = Potência de Recepção  $\times$  Tempo de Recepção,

desta forma:

Energia de Total Consumida = Energia de Transmissão + Energia de Recepção.

Tabela 4.9: Valores Médios do MICAz

Energia Efetiva (kJ)	Tensão Média (V)	Corrente Média (mA)	Potência Média (mW)
16,34	2,59	19,86	51,43

Portanto, uma expressão matemática conforme Equação 4.1 foi utilizada para calcular o consumo de energia, a partir da média dos resultados obtidos nos 4 (quatro) experimentos, é mostrada abaixo:

$$E(t) = E_i - \sum_t^n V_m \cdot \frac{I_m}{1000} \cdot 60 \quad (4.1)$$

Onde:  $E(t)$  é a Energia no tempo  $t(s)$ , em Joules,  $E_i$  é a Energia inicial, em Joules,  $V_m$  é Tensão média obtida nos experimentos, em Volts,  $I_m$  é Corrente média obtida nos experimentos, em mA,  $n$  é Tempo total da simulação, em minutos, 1000 é um Fator para converter mA em A e 60 é um Fator para converter minutos em segundos.

A Equação 4.1 fornece os valores da energia remanescente no MICAz ao longo do tempo, considerando a corrente e tensão médias obtidas nos experimentos. O produto da tensão pela corrente nos fornece a potência consumida em Watts e esta potência multiplicada pelo tempo em segundos, fornece a energia em Joules. Este consumo de energia em unidade Joules pôde então ser comparado com a energia consumida pelo objeto nó sensor criado no simulador NS-2, cujo consumo também é apresentado em Joules.

## 4.5 Avaliação do Modelo de Energia do NS-2

Com o objetivo de avaliar modelos de energia utilizados por simuladores computacionais de RSSFs em relação ao comportamento de um nó sensor comercial, era necessário repetir os experimentos realizados através de uma simulação computacional. Pelo fato do NS-2 ter sido bastante utilizado em pesquisas sobre RSSFs, optamos por escolhê-lo.

Por consideramos que o valores obtidos nos experimentos são mais precisos que os valores encontrados nas especificações do fabricante do MICAz, os mesmos foram utilizados em nossas análises para fins de comparação entre os resultados obtidos através do MICAz e do simulador NS-2. Abaixo apresentamos a configuração utilizada no *script* do *OTcl*:

- Interface de rede: MAC 802\_15\_4;
- Potência TX: 51 mW;
- Potência RX: 51 mW;
- Tempo de simulação: 1.000 s;
- Envio de pacotes: A cada 60 s;
- Modo de funcionamento: Receptor ligado todo o tempo;
- Tamanho de pacotes: 55 Bytes;
- Velocidade de transmissão: 250 kbps.

Para realização da simulação no NS-2, utilizamos como base um *script* disponível na pasta do tutorial do NS-2, chamado *simple – wireless.tcl*, que é um exemplo simples de

simulação de rede sem fio, o qual foi modificado para atender as características dos experimentos, e renomeado para *simple-wireless-modificado\_802\_15\_4.tcl*, mostrado na figura 4.10. As seguintes modificações foram feitas: inclusão do modelo de energia, e inclusão dos parâmetros de energia inicial e potência de transmissão e recepção, no valor de 51 mW.

```

1 set val(initialenergy) 100;
2 # configure node
3 $ns_ node-config -rxPower 51e-3 \
4                 -txPower 51e-3 \
5 # Setup traffic flow between nodes
6 # TCP connections between node_(0) and node_(1)
7 set tcp [new Agent/TCP]
8 $tcp set class_ 2
9 set sink [new Agent/TCPSink]
10 $ns_ attach-agent $node_(0) $tcp
11 $ns_ attach-agent $node_(1) $sink
12 $ns_ connect $tcp $sink
13 $tcp set packetSize_ 55
14 $tcp set interval_ 60
15 set ftp [new Application/FTP]
16 $ftp attach-agent $tcp
17 $ns_ at 0.0 "$ftp start"
18 # Tell nodes when the simulation ends
19 for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
20     $ns_ at 1000 "$node_($i) reset";
21 }
22 $ns_ at 1000.1 "stop"

```

Figura 4.10: Script em *OTcl* usado no NS-2

Utilizando-se o *software R-project* (R Development Core Team, 2009), construímos gráfico da figura 4.11, Capacidade de Energia  $\times$  Tempo, no qual avaliamos o comportamento do consumo de energia com base nos experimentos e também baseado no consumo obtido no simulador NS-2. Na configuração do NS-2 das potências de transmissão e recepção foram utilizados os valores de potência obtidos nos experimentos, e não a potência do rádio transceptor, que em nossos experimentos foi de 1 mW. Isto foi necessário porquê com uma potência de transmissão ajustada em 1 mW, o MICAz consome na prática uma potência de 53 mW.

Conforme pode ser observado na tabela 4.10, o consumo do objeto nó sensor, no NS-2, foi menor do que o consumo obtido através da Equação 4.1, mostrado também na figura 4.11.

Observamos que a diferença entre o consumo obtido pelo simulador NS-2 e pelo experimento com o nó sensor MICAz, para um tempo de 1.000 s, foi de 10,5J ou seja, o NS-2 apresentou um consumo 22,1 % menor que o real. Esta diferença mostra que projetos que utilizem o NS-2 para cálculo do tempo de vida de RSSFs, podem estar majorando a vida útil do nó sensor, o que pode provocar a interrupção de uma pesquisa de coleta de dados no

Tabela 4.10: Comparativo: NS-2 × MICAz (*Crossbow*)

Ferramenta	Energia Inicial (J)	Energia Final (J)	Tempo de Simulação (s)
NS-2	100	58,0	1.000
MICAz	100	47,5	1.000
Diferença		10,5 J	

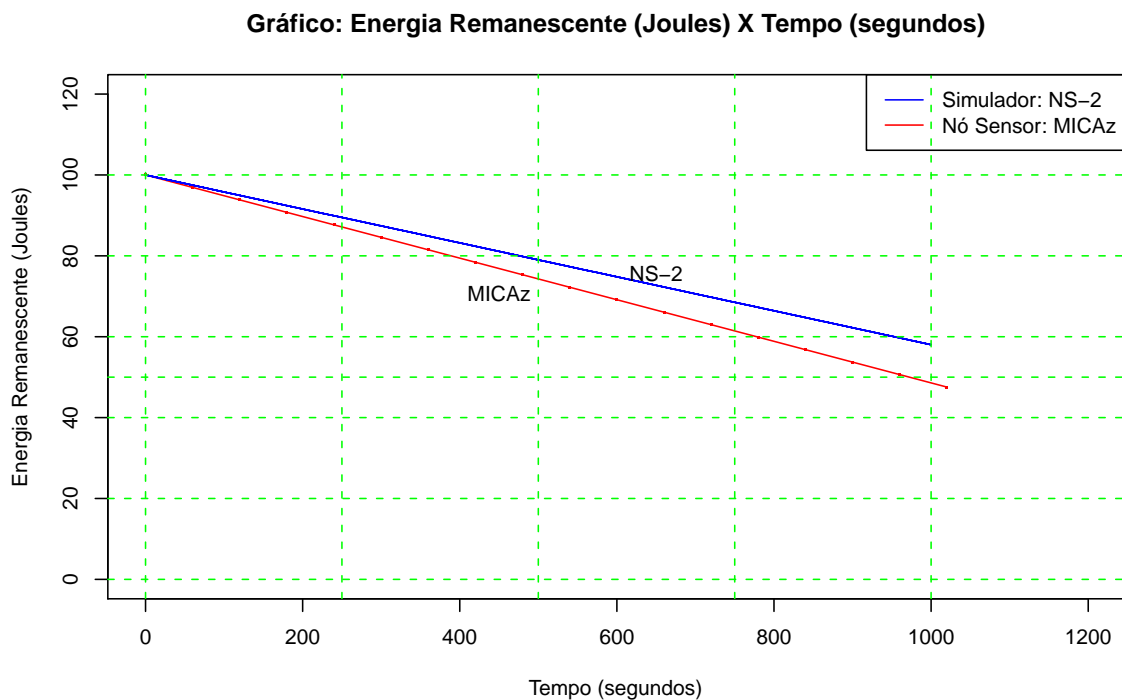


Figura 4.11: Capacidade Remanescente de Energia × Tempo

campo antes da conclusão dos trabalhos.

Entendemos também que a diferença entre os consumos obtidos pelas duas ferramentas pode ter sido causada por aproximações na configuração do simulador NS-2.

A configuração do *script* em *OTcl* no NS-2 é pouco detalhada em seu manual, o que não permite um entendimento total de como programar o simulador com os mesmos parâmetros do MICAz. O que sugere a necessidade de escrever novos exemplos no tutorial com a finalidade de facilitar o entendimento da configuração prática entre o simulador e as RSSFs comerciais.

No próximo capítulo, faremos considerações a respeito das diferenças observadas entre o MICAz e o NS-2, e faremos algumas reflexões sobre as causas e consequências destas diferenças, bem como minorá-las.

# Capítulo 5

## Conclusão

Ao realizarmos a comparação entre o consumo do nó sensor comercial MICAz e o simulador computacional NS-2, observamos que a diferença entre os dois resultados, para um tempo de 1000 s, foi de 7,5J. Esta diferença mostra que projetos que utilizem o NS-2 para cálculo do tempo de vida de RSSFs, podem estar majorando a vida útil do nó sensor, o que pode provocar a interrupção de uma pesquisa de coleta de dados no campo antes da conclusão dos trabalhos. Esta diferença nos resultados encontrados confirma que existem diferenças entre os dispositivos de RSSFs comerciais e os simuladores computacionais. Um trabalho que objetive ajustar melhor o modelo do NS-2 tendo como base os resultados deste trabalho irá possibilitar uma aproximação maior entre os resultados dos simuladores e das RSSFs comerciais.

Logo, os principais problemas enfrentados para a finalização deste trabalho, e assim podermos realizar a comparação entre o consumo do MICAz e o consumo obtido no NS-2, foram a inexistência de exemplos que demonstrem como configurar o simulador de maneira similar a como se encontra configurado o nó sensor comercial e a baixa escalabilidade do NS-2, cujo arquivo de registro da energia consumida no simulador atingiu proporções muito grandes em pouco tempo de simulação, e infelizmente não foi encontrada uma maneira de reduzir o tamanho deste arquivo durante a sua geração.

Desta forma, consideramos que para melhorar a precisão da entrada de dados no NS-2 e assim diminuir a dificuldade na configuração do modelo de energia, a interface do *OTcl* precisa disponibilizar uma entrada de dados em forma de corrente drenada, que é a forma disponibilizada na folha de dados dos fabricantes de nós sensores comerciais, ou seja, entrar com os valores de corrente elétrica consumida nos modos: transmissão, recepção, inativo e dormindo.

Atualmente, esses valores precisam ser informados ao simulador em termos de potência (mW), no entanto como as especificações dos fabricantes não disponibilizam esta informação em (mW), os pesquisadores ficam limitados a trabalhar em protocolos que reduzem um consumo fictício, pois não podem utilizar dados de dispositivos reais para comprovar e me-



lhora exemplificar seus resultados.

Neste trabalho, foi apresentado a capacidade de carga, em *Joules*, que uma bateria alcalina pode fornecer a um nó sensor, com esta informação, o simulador pode ser alimentado com valores de energia disponível mais próximos da realidade, e assim melhorar a configuração do cenário das simulações.

De qualquer forma, consideramos que o objetivo principal deste trabalho foi atingido. O circuito com o resistor ligado em série com o nó sensor comercial MICAZ mostrou-se eficaz e possibilitou a determinação da energia consumida em Joules pelo MICAZ. Desta forma foram feitas as primeiras comparações sobre a quantidade de energia consumida pelo nó sensor real e um nó sensor simulado no NS-2.

Conforme esperado e cujos motivos já foram expostos, os resultados foram diferentes e a causa destas diferenças estão relacionadas com falta de precisão na configuração do NS-2. Ou seja, existe uma certa distância entre o modelo e o dispositivo real, e ainda não foram criados exemplos que demonstrem como configurar o simulador de maneira similar a como se encontra configurado o nó sensor comercial.

As séries temporais disponibilizaram valores de corrente e tensão em intervalos regulares, com os quais foi possível conhecer o comportamento da energia consumida ao longo do tempo, bem como construir curvas de Capacidade Remanescente da Bateria em função do tempo baseadas nos modelos lineares de tensão e corrente. O comportamento das curvas, mostrou que o modelo de tensão descreve melhor o comportamento da capacidade remanescente da bateria. Pois, apesar de ser um modelo linear, considera o efeito de relaxamento, já o modelo linear de corrente não sofre qualquer interferência deste efeito.

Concluímos também que a capacidade de carga efetiva da bateria, para aplicações em RSSFs, é bem reduzida, cerca de 1750 mAh, ou seja, apesar de uma bateria alcalina nova possuir uma capacidade nominal teórica de aproximadamente 3500 mAh (Duracell, 2006; Linden & Reddy, 2002), disponibiliza uma capacidade efetiva média cerca de apenas 50 % da capacidade nominal. Em unidades de energia, 1750 mAh corresponde a uma quantidade efetiva de 16450 Joules.

Observamos também em relação à tensão de corte de funcionamento, que apesar das especificações das baterias informarem que uma alcalina nova com tensão nominal de 1,5 V pode fornecer energia até um valor de tensão mínimo de 0,9 VDC (Rayovac, 2010), e duas baterias em série, uma tensão de 1,8 VDC, o nó sensor interrompe seu funcionamento quando o nível de tensão se aproxima de 2,1 VDC. O que contribui para a redução da capacidade realmente disponível da bateria.

Em relação à forma de consumo da corrente foi possível, através das séries temporais geradas, mostrar que o consumo real de energia do nó sensor ao longo do tempo não é constante e sim decrescente, acompanhando o nível de tensão das baterias comerciais. Isto contraria a hipótese simplificadora de que o nó sensor é alimentado por uma fonte ideal que possui nível de tensão constante, e uma corrente também constante, no entanto esta dife-

rença pode ser compensada utilizando-se valores de corrente médios, conforme adotado em nossas avaliações e comparações.

E finalmente, concluímos que os resultados deste trabalho permitirão que estudos adicionais possam avaliar outros simuladores em uso, e assim determinar a precisão das estimativas consideradas nos projetos de RSSFs envolvendo componentes de sensores reais.

Em relação a trabalhos futuros, podemos aumentar o número de experimentos para obtenção de uma equação experimental mais ajustada do consumo do MICAz, e conseqüentemente proporcionar mais ajustes ao modelo analítico de energia. Além de realizar avaliação de outros simuladores de RSSFs seguindo a metodologia apresentada.

## Referências bibliográficas

- Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E. (2002), 'Wireless sensor networks: a survey', *Computer Networks* **38**(4), 393–422.
- Albaladejo, C., Sánchez, P., Iborra, A., Soto, F., López, J. A. & Torres, R. (2010), 'Wireless sensor networks for oceanographic monitoring: A systematic review', *Sensors* **10**(7), 6948–6968.
- Behrens, C., Bischoff, O., Lueders, M. & Laur, R. (2007), 'Energy-efficient topology control for wireless sensor networks using online battery monitoring', *Advances in Radio Science* **5**, 205–208.
- Brown, A. J. (2000), The preliminary study into an innovative approach to determining a battery's full charge capacity, *in* 'Twenty-second International Telecommunications Energy Conference, 2000. INTELEC.', pp. 602–608.
- Casas, R. & Casas, O. (2005), 'Battery sensing for energy-aware system design', *Computer* **38**, 48–54. ISSN 0018-9162.
- Crossbow, T. (2007a), *MoteView User's Manual*. URL <http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/6-user-manuals.html>, Acessado em 26 de Julho de 2011.
- Crossbow, T. (2007b), *MPR-MIB User's Manual*. URL <http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/6-user-manuals.html>, Acessado em 26 de Julho de 2011.
- Crossbow, T. (2007c), *MTS-MDA Sensor Board User's Manual*. URL <http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/6-user-manuals.html>, Acessado em 26 de Julho de 2011.
- Crossbow, T. (2007d), *XMesh User's Manual*. URL <http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/6-user-manuals.html>, Acessado em 26 de Julho de 2011.

- 
- da Cunha, A., de Almeida, B. & da Silva, D. (2009), 'Remaining capacity measurement and analysis of alkaline batteries for wireless sensor nodes', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **58**(6), 1816–1822.
- Duracell (2006), *Discharge Characteristics of MN1500 Duracell Battery*. URL <http://www1.duracell.com/Procell/productdata/>, Acessado em 26 de Julho de 2011.
- Fall, K. & Varadhan, K. (2010), *The ns Manual*. URL <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, Acessado em 26 de Julho de 2011.
- Frery, A. C., Ramos, H. S., Alencar-Neto, J., Nakamura, E. & Loureiro, A. A. F. (2010), 'Data driven performance evaluation of wireless sensor networks', *Sensors* **10**, 2150–2168.
- Haenselmann, T. (2011), *Wireless sensor networks - design principles for scattered systems*, Toldenburg Verlag.
- Linden, D. & Reddy, T. B. (2002), *Handbook of batteries*, 3 ed., The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Loureiro, A. A., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Nakamura, E., Seródio, C. M. & Mini, R. (2003), Redes sensores sem fio, in 'XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)', pp. 179–226.
- Park, S., Savvides, A. & Srivastava, M. (2001), Battery capacity measurement and analysis using lithium coin cell battery, in 'ISLPED '01: Proceedings of the 2001 International Symposium on Low Power Electronics and Design', pp. 382–387.
- Pedram, M. & Wu, Q. (1999), Battery-powered digital cmos design, in 'Design, Automation and Test in Proceedings Europe Conference and Exhibition 1999', pp. 72–76.
- Pop, V., Bergveld, H. J., Notten, P. H. L. & Regtien, P. P. L. (2005), 'State-of-the-art of battery state-of-charge determination', *Measurement Science and Technology* **16**(12), R93–R110.
- R Development Core Team (2009), *R: A Language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- Raghunathan, V., Schurgers, C., Park, S. & Srivastava, M. (2002), 'Energy-aware wireless microsensor networks', *IEEE Signal Processing Magazine* **19**(2), 40–50. ISSN 1053-5888.
- Rakhmatov, D. N. & Vrudhula, S. B. K. (2001), An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems, in 'ACM - Proceedings of International Conference on Computer-Aided Design', Vol. 10, pp. 1–6.

- Rakhmatov, D., Vrudhula, S. & Wallach, D. A. (2002), Battery lifetime prediction for energy-aware computing, *in* 'Proceedings of the 2002 International Symposium on Low Power Electronics and Design', ACM, pp. 154–159.
- Rayovac (2010), *Application Notes and Product Data Sheet*. URL <http://www.rayovac.com/Technical-OEM/Specs-and-Product-Guides.aspx>.
- Schneider, K. K., Sausen, A. T. Z. R. & Sausen, P. S. (2011), 'Análise comparativa do tempo de vida de baterias em dispositivos móveis a partir da utilização de modelos analíticos', *TEMA Tendências em Matemática Aplicada e Computacional* **12**(1), 43–55.
- Silva, C. V., Frery, A. C. & Viana, P. (2010), Avaliação do consumo de energia e tempo de vida de redes de sensores sem fio comerciais, *in* E. Dvorkin, M. Goldschmit & M. Storti, eds, 'CILAMCE 2010: XXXI Congreso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionales en la Ingeniería', Vol. XXIX, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Buenos Aires, Argentina, pp. 2663–2672.
- Sutaria, T., Mahgoub, I., Humos, A. & Badi, A. (2007), Implementation of an energy model for jist/swans wireless network simulator, *in* 'Proceedings of the Sixth International Conference on Networking', IEEE Computer Society, pp. 24–.
- Texas, I. (2007), *Datasheet LMV358*. URL <http://www.ti.com>, Acessado em 26 de Julho de 2011.
- Timmermann, D. & Handy, M. (2003), Simulation of mobile wireless networks with accurate modelling of non-linear battery effects, *in* 'Proceedings of Applied Simulation and Modeling, Marbella, Spain', pp. 532–537.

