

AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E TEMPO DE VIDA DE REDES DE SENSORES SEM FIO COMERCIAIS

Celso Viana da Silva , Alejandro C. Frery e Pablo Viana

*Grupo de Redes de Sensores Sem Fio, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, Brazil
sdcelso@gmail.com, acfrery@gmail.com, pvs.viana@gmail.com <http://www.ufal.edu.br>*

Palavras Chave: Capacidade Remanescente de Baterias, Consumo de Energia, Rede de Sensores Sem Fio (RSSF)

Resumo. A redução do consumo de energia e consequente aumento do tempo vida de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) têm sido alvo constante das pesquisas na área da engenharia. Para alcançar estes objetivos é importante conhecer a forma como ocorre o real consumo, bem como a capacidade de energia dos elementos que compõem uma plataforma de RSSF comercial, pois nem sempre é possível depender apenas das informações dadas pelos respectivos fabricantes de nós sensores e de baterias. Neste trabalho apresentamos uma avaliação através de curvas temporais de consumo de energia e de capacidade remanescente de baterias alcalinas, utilizando os modelos de estimação baseados na corrente e na tensão. As curvas temporais foram construídas utilizando-se o software R versão 2.9.2, com valores de corrente e tensão medidos através de experimentos realizados em um ambiente interno. Nestes experimentos, empregamos o nó sensor MICAz (*Mote da Crossbow Technology*) alimentado por baterias alcalinas Rayovac e Duracell. Como resultados, apresentamos os valores de intervalos de tensão de funcionamento, consumo de energia e tempo de vida do nó sensor, além das curvas de capacidade remanescente das baterias alcalinas. Diferentemente do manual do fabricante, observamos que o consumo de energia do MICAz não é constante. Ou seja, a energia consumida varia ao longo do tempo de forma decrescente e não linear, acompanhando a redução da tensão das baterias. As baterias apresentaram variações significativas na sua capacidade efetiva de carga, tanto em relação aos valores informados pelos seus respectivos *datasheets*, como entre baterias do mesmo fabricante, o que pode acarretar em erros de estimativa de tempo de vida nos projetos de RSSF. Este resultado constitui um importante fator a ser considerado no projeto de implantação e desenvolvimento de RSSF comerciais.

1 INTRODUÇÃO

Uma Rede de Sensores sem Fio (RSSF) é composta de 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 aos mais diversos tipos de “usuários”.

Existem muitas aplicações para RSSF como por exemplo: monitoramento de marés 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.

Um dos problemas mais importantes dos nós sensores é a exigência de baixo consumo de energia. Nós sensores possuem uma fonte de energia limitada, geralmente insubstituível (Akyildiz et al., 2002). 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. Estes dispositivos precisam, portanto, possuir grande autonomia de energia, e esta ainda é a principal limitação para o uso das RSSF.

Para um melhor conhecimento que auxilie na escolha da plataforma comercial com maior autonomia energética, é necessário conhecer seu consumo durante o funcionamento e a capacidade de energia das baterias de alimentação, sem depender exclusivamente das informações dos fabricantes, visto que os *datasheets* trazem informações gerais, insuficientes para uma aplicação específica.

Como a informação do consumo de energia dos nós sensores não é normalmente disponibilizada pelos desenvolvedores de software embarcado (*firmware*) das plataformas comerciais de RSSF, necessitamos obtê-la de forma intrusiva, através da utilização de um circuito (*hardware*) adicionado à placa eletrônica do nó sensor (Behrens et al., 2007). Este circuito, consiste em um dispositivo de medição de consumo, formado por um resistor (*shunt*), em série com o circuito de alimentação do nó sensor, e cuja queda de tensão fornece o sinal necessário a ser amplificado para medição e armazenamento (Figura 1(c)).

Neste trabalho determinamos a capacidade média efetiva das baterias alcalinas comerciais usadas para alimentar os nós sensores e comparamos os resultados com os valores disponíveis nos *datasheets* dos fabricantes. Analisamos o comportamento da capacidade remanescente das baterias ao longo do tempo, e comparamos os modelos de estimação da capacidade remanescente de baterias baseados tanto na tensão como na corrente. Calculamos também a quantidade de energia gasta por kbit enviado pelo nó sensor, durante a transmissão dos pacotes de dados e comparamos com os valores descritos na literatura científica.

Este artigo está dividido da seguinte forma: Inicialmente descrevemos a tecnologia das baterias comerciais, em seguida apresentamos os modelos de estimação de capacidade remanescente das baterias. A seguir descrevemos os experimentos realizados em ambiente interno, nos quais inserimos um dispositivo em *hardware* para coleta do consumo de corrente do nó sensor, que possibilitou a construção de tabelas e curvas de capacidade remanescente das baterias. Finalmente apresentamos os resultados e as conclusões obtidas.

2 A TECNOLOGIA DAS 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 da bateria representa a quantidade de energia armazenada em uma bateria primária nova ou completamente carregada em uma bateria secundária (Pedram e Wu, 1999). Ela é medida em ampère-hora (Ah) ou mili-ampère-hora (mAh), e fatores como velocidade de descarga, temperatura, auto-descarga, e tempo de uso da bateria, afetam a sua capacidade (Brown, 2000; Park et al., 2001). A velocidade 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 baixo custo, não são recomendadas para uso em RSSF, 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 a fase dormindo, o consumo de corrente é 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 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 RSSF provocam também a rápida descarga deste tipo de baterias.

Baterias Alcalinas são o sistema químico de preferência em plataformas comerciais de RSSF devido às suas características de alta capacidade, auto-descarga reduzida, e baixo custo. Geralmente, as baterias para RSSF não podem ser recarregadas devido ao grande número de nós sensores e à dificuldade de acessibilidade para recarregar cada bateria. Além disso, o alto custo das baterias secundárias (NiCd, NiMH, e Li-Ion) fazem com que as mesmas não sejam usadas em plataformas de RSSF (da Cunha et al., 2009).

2.1 Modelos de Estimação da Capacidade Remanescente de Baterias

A literatura classifica as técnicas de monitoramento da capacidade remanescente das baterias (ou métodos de determinação do estado de carga – *State of Charge* ou *SoC*) de acordo com os modelos matemáticos de estimação (Casas e Casas, 2005).

Os modelos de estimação da capacidade das baterias variam de simples modelos lineares a complexos modelos que tentam incorporar o efeito de relaxamento. 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 relaxamento. Embora o modelo que considera o efeito de relaxamento seja semelhante ao comportamento das baterias comerciais, há grande dificuldade em sua implementação, uma vez que o efeito de relaxamento envolve muitas propriedades físicas e eletroquímicas da bateria (da Cunha et al., 2009).

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 de estimação são os de impedância, tensão e cor-

rente. 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 RSSF (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 linear, considera os efeitos físicos e eletroquímicos não-lineares, como por exemplo, o efeito do relaxamento. No entanto, este modelo não considera o valor da corrente de descarga para determinação da capacidade efetiva através dos *datasheets* das baterias comerciais.

O modelo baseado na corrente considera o valor da corrente de descarga para determinação da capacidade efetiva através dos *datasheets* 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 RSSF (da Cunha et al., 2009).

2.1.1 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 (1):

$$C_{res}(t) = a \cdot V(t) - b, \quad (1)$$

em que $C_{res}(t)$ é a capacidade remanescente no instante t (mAh), $V(t)$ é a tensão da bateria no instante t (Volts), a e b são constantes adimensionais, de acordo com as características específicas da bateria, e t é o tempo medido em segundos.

2.1.2 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) e (3):

$$C_{res}(t) = C_{ef} - \int_0^t I(t)dt, \quad (2)$$

$$C_{ef} = k \cdot C_{MAX}, \quad (3)$$

em que $C_{res}(t)$ é a capacidade remanescente no instante t (medida em mAh), C_{MAX} é capacidade máxima nominal da bateria (medida em mAh), C_{ef} é a capacidade efetiva da bateria, função da corrente nominal de descarga (medida em mAh), k é o fator adimensional que considera a corrente de descarga da bateria, I é a corrente nominal de descarga (medida em mA) e t é o tempo medido em segundos.

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 (4).

$$C_{res}(t_i) = C_{ef} - \sum_{i=1}^n (I_i \cdot t_i), \quad (4)$$

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

3 EXPERIMENTO

Para a realização dos experimentos, inicialmente foi instalado em um PC, o software *MoteView* (Crossbow, 2007a), software livre de aplicações, fornecido pela Crossbow, fabricante de plataformas comerciais de nós sensores. Um diagrama de blocos de um nó sensor é apresentado na Figura 1(a).

O software *MoteView* disponibiliza ferramentas para envio, recebimento e armazenamento dos dados através do *gateway* (módulo responsável pelo recebimento dos dados e envio ao PC), e que deve ser conectado ao PC, conforme Figura 1(b). O *MoteView* também possui ferramentas de interfaces para visualização da disposição da RSSF na tela do computador e os *firmwares* para programação dos componentes da RSSF. Para possibilitar o envio do valor da corrente que circula no nó sensor foi necessário ligar, em série a bateria do nó sensor, um dispositivo *hardware* constituído por um resistor *shunt* e um amplificador operacional, conforme Figura 1(c).

Desta forma, a corrente da bateria passa pelo dispositivo, antes de alimentar o circuito do nó sensor. A queda de tensão no resistor *shunt* 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) devido à fácil aquisição comercial, no entanto foi necessário curto-circuitar os capacitores de entrada afim de permitir a passagem de corrente contínua. E a placa de sensores utilizada foi a MDA300CA (Crossbow, 2007c), que disponibiliza acesso à uma porta ADO para envio do sinal de corrente.

3.1 Aplicação do Dispositivo em Experimento

Vários experimentos com o dispositivo foram realizados para realização de medições e verificação do consumo de energia. O nó sensor MICAz (Crossbow, 2007b), 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 1 minuto, podendo ser alterado via interface do *Moteview*.

O MICAz foi posicionado em ambiente interno, livre de interferência físicas e eletromagnéticas e localizado a 1 m de distância do *gateway*. A potência de transmissão foi ajustada em 0 dBm ou 1 mW. Através do sensor, foram medidos valores de umidade e temperatura do ambiente, além do valor da corrente consumida pelo nó sensor.

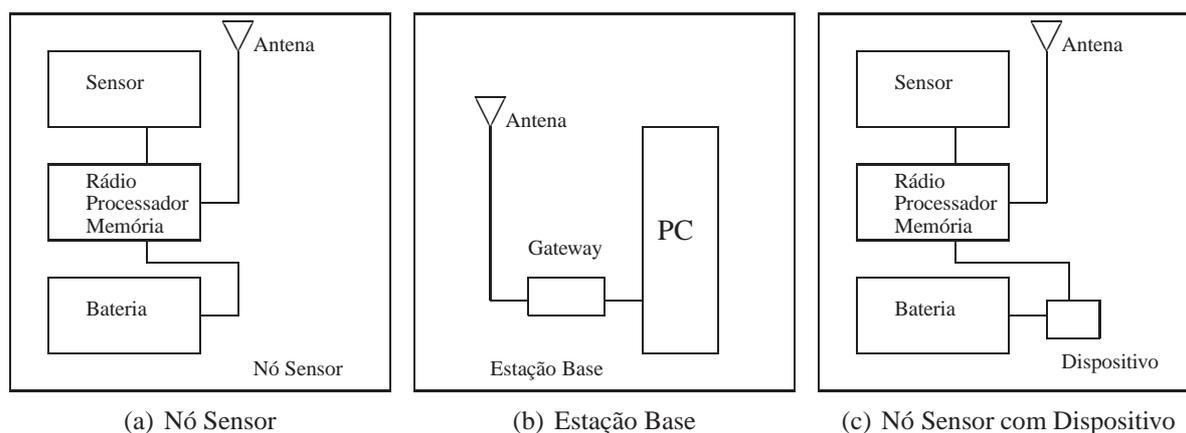


Figura 1: Diagramas em blocos dos elementos do experimento

Afim de manter propositalmente um alto consumo de energia e reduzir o tempo do experimento, optamos por manter a configuração padrão do *firmware*. Os valores foram monitorados ao longo do tempo até que o nó sensor parasse de transmitir, ou fossem verificados sinais de umidade, corrente e temperatura com erros grosseiros. Ou seja, valores muito acima ou muito abaixo do esperado ou até constantes, demonstrando erros de informação de forma generalizada.

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 *hardware*, foi de 2,4 mV e o sinal enviado para o PC, pelo MICAz, após passar pelo amplificador operacional LMV358 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.

3.2 Resultados do Experimento e Tratamento dos Dados

Como resultados, foram obtidas séries temporais de formato ASCII, que disponibilizam valores de corrente e tensão em intervalos regulares de 1 minuto. Com estas séries foi possível conhecer o comportamento da energia consumida ao longo do tempo, de acordo com o valor da corrente e tensão fornecida pela bateria, conforme a Tabela 1, que contém o resumo dos valores obtidos nos experimentos.

Data	Corrente (mA)	Tensão (V)	Hum média (%)	Temp média ($^{\circ}C$)	Vida (horas)
08.05.10	24,033 - 18,053	3,08 - 2,23	71,20	27,895	79,08
12.05.10	24,665 - 17,955	3,13 - 2,15	73,15	28,835	96,38
16.05.10	24,679 - 17,955	3,13 - 2,15	70,75	30,715	90,03
20.05.10	24,286 - 17,885	3,10 - 2,28	68,70	27,975	38,38
22.05.10	26,546 - 17,730	3,33 - 2,13	78,60	30,595	87,35

Tabela 1: Resumos dos valores obtidos nos experimentos

De posse das séries temporais foi possível construir curvas de Capacidade Remanescente da Bateria em função do tempo, baseadas nos modelos de tensão e corrente, conforme Figura 2.

Podemos observar na Figura 2 um total de 10 curvas de capacidade remanescente \times tempo, sendo 5 baseadas no modelo de tensão e as outras 5 baseadas no modelo de corrente.

As curvas baseadas no modelo de tensão não apresentaram uma linha reta, embora utilizem 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 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. Apesar destes parâmetros poderem ser calculados através dos *datasheets* das baterias, verificamos que não teríamos a precisão requerida.

As curvas baseadas no modelo de corrente não sofreram o efeito de relaxamento, razão pela qual todas as curvas foram lineares. Nestas curvas, não foi utilizado o fator k para determinação da capacidade efetiva, pois as séries temporais, de cada experimento, disponibilizaram a capacidade efetiva com maior precisão. Todos os fatores adimensionais: a , b e k , utilizados nos modelos de estimação podem ser melhor calibrados, caso seja feito um tratamento estatístico, sendo necessário porém, aumentar bastante o universo de amostragem.

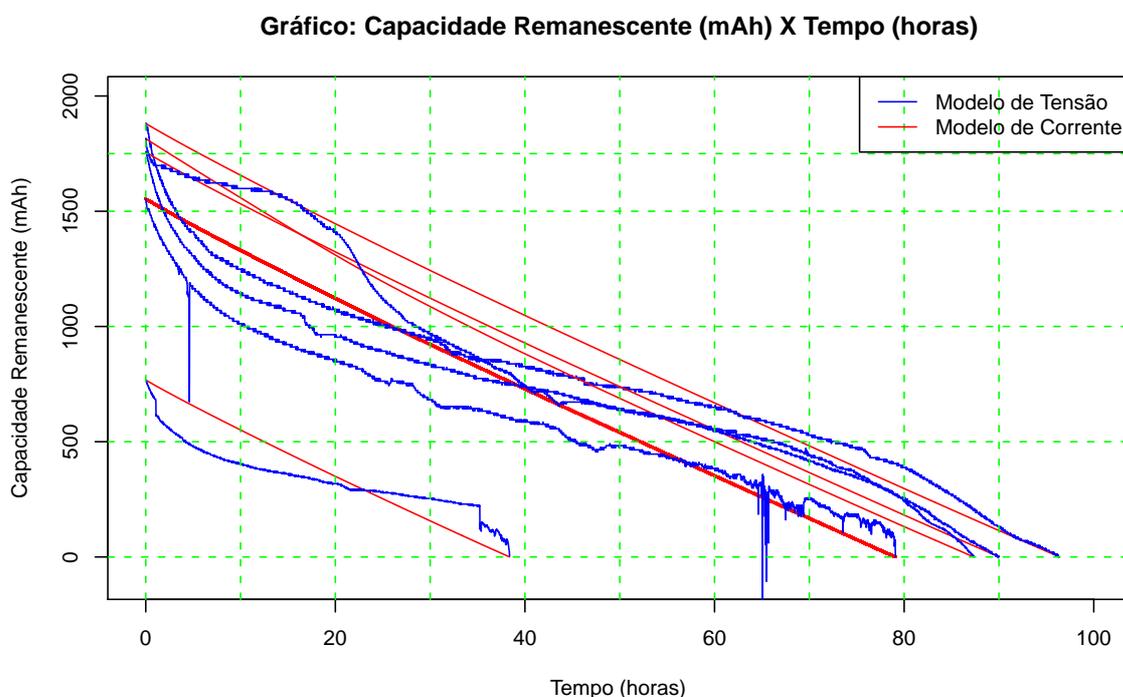


Figura 2: Capacidade Remanescente: Modelos de Tensão e de Corrente \times Tempo

Observamos também que a capacidade efetiva da bateria, para aplicações em RSSF, é bem reduzida. Através dos valores medidos nos experimentos, verificamos que duas baterias novas ligadas em série, disponibilizam uma capacidade efetiva média de 1554,59 mAh. Apesar dos *datasheets* 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 colocadas duas baterias em série, o nó sensor não funciona corretamente quando o nível de tensão total das baterias se aproxima de 2,1 VDC.

A Tabela 2 apresenta informações de capacidade de energia efetiva para alguns aparelhos elétricos comerciais (Rayovac, 2010) considerando uma tensão de corte de funcionamento de 0,9 V. Podemos observar que: a rotina de funcionamento destes aparelhos é bastante diferente

dos nós de uma RSSF; a capacidade efetiva e tempo de vida também diferem bastante; e que de forma geral, as informações disponibilizadas não atendem bem às necessidades de um projeto de RSSF.

Aparelho (<i>Duty Cycle</i>)	Corrente (mA)	Tempo de Vida horas	Cap. até 0,9 V (mAh)
<i>Radio</i> (4 h/dia)	028	88	2535
<i>Cassette</i> (1 h/dia)	120	19	2216
<i>Toy/Game</i> (1 h/dia)	308	07	1907
<i>Flashlight</i> (Contínuo)	308	06	1785

Tabela 2: Capacidade efetiva e tempo de vida da bateria Alcalina Rayovac em alguns aparelhos elétricos

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 fica abaixo de 2,7 V DC. Esta limitação reduz ainda mais o tempo de vida do nó sensor, caso seja considerada nos projetos de RSSF.

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. É portanto, necessário, avaliar se esta simplificação pode provocar erros na avaliação do tempo de vida da RSSF.

Data	Cap. Efetiva (J)	Cap. Efetiva (mAh)	Consumo (<i>J/kbit</i>)	Tempo de Vida (s)
08.05.10	5590,325	1552,868	2,677615	284700
12.05.10	6771,287	1880,913	2,661126	346980
16.05.10	6323,422	1756,506	2,660388	324120
20.05.10	2764,086	0767,802	2,727753	138180
22.05.10	6533,503	1814,862	2,833213	314460

Tabela 3: Capacidade efetiva medida nos experimentos do Mote MICAz (*Crossbow*)

De acordo também com o fabricante do MICAz, o tamanho do pacote de dados enviados pelo nó sensor é por padrão de no máximo 55 bytes (440 bits) ([Crossbow, 2007d](#)). Considerando o tempo de vida do nó sensor em cada experimento e o padrão de envio 1 pacote de dados por minuto nos experimentos, apresentamos na Tabela 3, os valores de consumo de energia em J por kbit enviado medidos, cuja média foi de 2,71 J/kbit para uma distância de 1 m, e que a capacidade efetiva média de duas baterias alcalinas novas é de 5,6 kJ.

Segundo [Pottie e Kaiser \(2000\)](#), a energia gasta para o envio de 1 kbit a uma distância de 100 m é de aproximadamente 3 J. Este resultado demonstra que apesar dos avanços na pesquisa para reduzir o consumo nominal destes tipos de dispositivos, ainda é necessário avançar mais nas pesquisas sobre protocolos de roteamento e de comunicação, com o objetivo de reduzir este consumo.

4 CONCLUSÕES

Concluimos inicialmente que o dispositivo em *hardware* utilizado para obtenção do consumo de corrente foi eficaz no objetivo a que se destinava, pois através dele foi possível extrair o valor da corrente consumida pelo nó sensor MICAz, gerar séries temporais no formato ASCII e obter o consumo real do nó sensor MICAz, dispositivo *Mote* da plataforma comercial de RSSF da *Crossbow*.

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 de tensão e corrente. Com essas curvas foi possível constatar que o modelo de tensão, apesar de ser linear, considera o efeito de relaxamento, já o modelo de corrente não sofre interferência deste efeito. Desta forma concluimos que o modelo de tensão apesar de não considerar o valor da corrente de descarga para determinação da capacidade efetiva, descreve melhor o comportamento da capacidade remanescente da bateria.

Concluimos também que a capacidade efetiva da bateria, para aplicações em RSSF, é bem reduzida, cerca de 1554,59 mAh ou 5,6 kJ e que o nó sensor não funciona corretamente quando o nível de tensão do conjunto das duas baterias se aproxima de 2,1 VDC.

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. É portanto, necessário, avaliar se esta simplificação pode provocar erros na avaliação do tempo de vida da RSSF.

Outra importante conclusão é de que o consumo de energia em J por kbit enviado, medidos nos experimentos, apresentou um valor médio de 2,71 J/kbit para uma distância de 1 m. Essa constatação sugere que, apesar dos avanços na pesquisa que reduziram o consumo nominal destes tipos de dispositivos, ainda é necessário avançar mais nas pesquisas sobre protocolos de roteamento e de comunicação, com o objetivo de reduzir este consumo.

Estes resultados servirão de base para continuidade das pesquisas, pois o próximo objetivo é verificar o consumo de energia em um simulador de RSSF computacional e comparar com os resultados obtidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Akyildiz I.F., Su W. S., Y., e Cyirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422, 2002.
- Behrens C., Bischoff O., Lueders M., e Laur R. Energy-efficient topology control for wireless sensor networks using online battery monitoring. *Advances in Radio Science*, páginas 205–208, 2007.
- Brown A. The preliminary study into an innovative approach to determining a battery's full charge capacity. In *Telecommunications Energy Conference, 2000. INTELEC. Twenty-second International*, pagina 602–608. 2000.
- Casas R. e Casas O. Battery sensing for energy-aware system design. *Computer*, 38:48–54, 2005.
- Crossbow T. *MoteView User's Manual*, 2007a.
- Crossbow T. *MPR-MIB User's Manual*, 2007b.
- Crossbow T. *MTS-MDA Sensor Board User's Manual*, 2007c.

- Crossbow T. *XMesh User's Manual*, 2007d.
- da Cunha A., de Almeida B., e da Silva D. Remaining capacity measurement and analysis of alkaline batteries for wireless sensor nodes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(6):1816–1822, 2009.
- Frery A.C., Ramos H.S., Alencar-Neto J., Nakamura E., e Loureiro A.A.F. Data driven performance evaluation of wireless sensor networks. *Sensors*, 10:2150–2168, 2010.
- Park S., Savvides A., e Srivastava M. 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*, páginas 382–387. 2001.
- Pedram M. e Wu Q. Battery-powered digital cmos design. In *Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition 1999. Proceedings*, páginas 72–76. 1999.
- Pop V., Bergveld H.J., Notten P.H.L., e Regtien P.P.L. State-of-the-art of battery state-of-charge determination. *Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol.*, 16(12):R93–R110, 2005.
- Pottie G.J. e Kaiser W.J. Wireless integrated network sensor. *Communications of the ACM*, 43(5):51–58, 2000.
- Raghunathan V., Schurgers C., Park S., e Srivastava M. Energy-aware wireless microsensor networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 19(2):40–50, 2002.
- Rayovac. *Application Notes and Product Data Sheet*, 2010.
- Texas I. *Datasheet LMV358*, 2007.