

Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado Aplicado ao *Blind Flooding* em Redes de Sensores

P. S. Sausen¹, M. A. Spohn², A. Perkusich²

¹Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ)
Ijuí – RS – Brasil.
sausen@unijui.edu.br

²Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Campina Grande – PB – Brasil.
maspohn@dsc.ufcg.edu.br e perkusic@dee.ufcg.edu.br

Abstract. *In a Wireless Sensor Network (WSN), nodes are power constrained. As a consequence, protocols must be energy efficient to prolong the network lifetime. Network simulators are usually used to develop and analyze WSN protocols. However, most simulators employ the linear battery model to simplify the simulation process. In this work we consider a more realistic battery model when applying the Dynamic Power Management with Scheduled Switching Modes (DPM-SSM) approach to a blind flooding protocol (i.e., FLOOD). The battery model is implemented in the network simulator NS2, and the FLOOD protocol is modified to use the DPM-SSM technique. Extensive simulation results show that the FLOOD protocol can still achieve good performance results.*

Resumo. *Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) apresentam sérias restrições no consumo de energia, exigindo aplicações e protocolos eficientes. Simuladores são frequentemente utilizados na avaliação destes protocolos. Um dos principais problemas encontrados nessa abordagem está na estimativa do tempo de vida da rede, pois a maioria dos simuladores utiliza o modelo de descarga linear. Neste trabalho, é avaliada a técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado (GDE-DE) aplicada ao protocolo de roteamento FLOOD, sob a ótica de um modelo de descarga acurado. Os resultados obtidos via simulação mostram que a técnica GDE-DE proporciona uma recuperação significativa na capacidade da bateria dos nós de uma RSSF.*

1. Introdução

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) geralmente compreende um grande número de nós sensores de pequenas proporções e com capacidade de processar dados e transmiti-los através de enlaces de radiofrequência. Normalmente, os nós sensores possuem sérias restrições de energia por serem alimentados por baterias, as quais, em virtude da natureza das aplicações, não podem ser facilmente substituídas. Isto implica em fortes restrições no consumo de energia, tornando indispensáveis a utilização de componentes de baixíssimo consumo de energia na confecção dos nós sensores, bem como protocolos de comunicação eficientes em energia. A utilização de técnicas de Gerenciamento Dinâmico de Energia (GDE) [Sinha and Chandrakasan 2001] (em inglês, *Dynamic Power Management* (DPM)) podem, além de economizar energia, recuperar a capacidade da bateria dos nós prolongando o tempo médio de vida da rede.

Existem várias técnicas para conservação de energia que podem ser aplicadas às RSSF. Essas técnicas são classificadas como estáticas ou dinâmicas. As técnicas estáticas (e.g., *Energy-Aware Protocols* [Srinivasan et al. 2001]) mantêm as mesmas características no transcorrer da atividade da rede. Em contrapartida, as técnicas dinâmicas evoluem durante o funcionamento da rede, possibilitando melhor conservação de energia pelo nó sensor em tempo de execução. Estas técnicas envolvem o desligamento parcial ou total do nó sensor objetivando economizar energia. O princípio básico tem sido manter as operações mínimas necessárias para o funcionamento da rede e, sempre que possível, realizar o desligamento do nó sensor. No entanto, a decisão de desligamento parcial ou total dos nós sensores não é trivial porque a rede é fortemente dependente da aplicação. Desligamentos prolongados podem afetar diretamente a latência dos pacotes e conseqüentemente a Qualidade de Serviço (*QoS*) da rede.

Para a avaliação das aplicações e dos protocolos utilizados no ambiente das RSSF podem ser utilizadas três técnicas tradicionais: métodos analíticos, experimentos físicos e simulações [Gilbert Chen and Szymanski 2004]. No entanto, em virtude das sérias restrições das RSSF tais como energia limitada, processamento descentralizado, tolerância a falhas, entre outras, existe a necessidade da adoção de algoritmos complexos o que muitas vezes inviabiliza a utilização de métodos analíticos. Já a construção de RSSF reais para realizar experimentos torna-se inviável economicamente em virtude do alto número de sensores (em algumas aplicações esse número chega na casa dos milhares) e seu custo elevado. Por exemplo, o custo de um nó sensor do tipo *Mica Motes* [Crossbow 2006], um dos nós sensores mais utilizados e referenciados em pesquisas sobre RSSF, é algo em torno de cem dólares. Neste contexto, o uso de simuladores tem se tornado padrão para a avaliação de protocolos nas RSSF. A grande maioria dos simuladores utiliza um modelo de descarga de bateria simples (i.e., modelo linear), modelando a bateria como um repositório onde a energia apenas é decrementada após cada operação do nó sensor. Essa abordagem pode ocasionar interpretações equivocadas na avaliação dos protocolos nas RSSF, especialmente aqueles que levam em conta o tempo de vida da rede [Sousa et al. 2006].

O equívoco é maior quando, em conjunto com a adoção de um modelo linear de descarga de bateria, ignora-se os valores referentes ao *Switching Energy*(SE). O SE refere-se a energia envolvida no processo de transição entre dois modos de operação por parte do nó sensor. Por exemplo, a transição entre o modo de recepção (Rx) e o modo repouso (*Sleep*). Dependendo do tipo de transição pode ocorrer perda ou recuperação na capacidade da bateria do nó sensor [Sausen et al. 2007a]. Esse valor geralmente é negligenciado nas simulações por ser considerado irrisório, ou mesmo para efeito de simplificação. No entanto, demonstra-se que os valores envolvidos no SE são representativos e que seria um equívoco desconsiderá-los. Por exemplo, um erro de 6 % no consumo de energia de uma rede de sensores reflete na redução em dois meses no tempo de vida desta rede, a partir de uma expectativa de 3 anos [Ruzzeli et al. 2006].

Em RSSF, muitos protocolos (e.g., protocolos de roteamento) utilizam a técnica de inundação (*flooding*) para disseminar pacotes de controle. Este artigo apresenta um estudo comparativo da aplicação da técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado [Sausen et al. 2007a] (GDE-DE) ao protocolo FLOOD [Kunz 2003] numa RSSF. O protocolo FLOOD implementa o *blind flooding*¹ para realizar o roteamento

¹No protocolo *blind flooding* todo nó realiza a retransmissão da primeira cópia de qualquer pacote de

de pacotes na rede. Para realizar a comparação do desempenho da técnica de GDE-DE foi incorporado ao modelo de energia do simulador NS2 [NS2 2007] o modelo de descarga de bateria de Rakhmatov-Vrudhula [Rakhmatov and Vrudhula 2001]. Adicionalmente, foi estendido o modelo de energia do NS2 para possibilitar a contabilização do *Switching Energy*(SE). O SE é a energia envolvida nas trocas de modos de operação pelo nó sensor. Especificamente neste trabalho, contabilizou-se as transições entre as transmissões e o repouso do nó sensor.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 são apresentados os trabalhos correlatos. Na Seção 3 são apresentados os componentes básicos de uma RSSF. Os modelos de bateria considerados neste trabalho são apresentados na Seção 4. A técnica GDE-DE é revisada na Seção 5. O ambiente de simulação bem como a análise de desempenho são apresentados na Seção 6. Para finalizar, a Seção 7 conclui este trabalho.

2. Trabalhos Correlatos

Técnicas de GDE possibilitam reduzir o consumo de energia dos nós sensores e, conseqüentemente, prolongar a vida útil da rede. Estas técnicas envolvem a utilização de modos distintos de operação do sensor. O princípio básico consiste em colocar em repouso os componentes do nó sensor quando estes não são necessários no momento. O ideal é que o nó sensor entre em estado de *repouso* (i.e., *sleep*) tão logo seja possível; ou seja, repousar assim que o nó terminar as suas atividades momentâneas. O retorno ao modo de operação completa ocorre apenas na ocasião de algum evento de seu interesse, implicando na manutenção do componente de sensoriamento no modo ativo. Portanto, de fato o nó sensor é mantido num estágio intermediário (i.e., *repouso parcial*) e não completamente desligado.

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

Diferentes técnicas de GDE [Benini et al. 2000] objetivam reduzir o consumo de energia em sistemas que utilizam baterias, mas somente algumas consideram eventos externos no processo de otimização. Uma destas abordagens [Passos et al. 2005] aplica o gerenciamento de energia utilizando o formalismo de autômatos híbridos levando em consideração alguns requisitos da aplicação na tomada de decisão sobre o desligamento dos nós sensores. No entanto, esta abordagem não considera o roteamento *multi-hop* dos nós sensores, tampouco o nível da carga de bateria na tomada das decisões de desligamento dos nós sensores.

A técnica *Dynamic Voltage Scaling* (DVS) [Sinha and Chandrakasan 2001] propõe reduzir o consumo de energia do módulo processador do nó sensor. Nesta solução, a decisão sobre o desligamento fica restrita ao nó sensor sem nenhuma intervenção externa. Uma extensão ao DVS considera a capacidade da bateria e a área de cobertura no processo de transição entre os modos de operação do nó sensor [Luo et al. 2005].

broadcast recebido pelo nó.

Observa-se que em nenhum dos trabalhos citados foi explicitado o modelo de descarga da bateria em questão. Para se obter um modelo que represente de forma mais realista o ambiente de uma RSSF, em especial os ganhos obtidos utilizando técnicas de GDE, é importante utilizar um modelo de descarga de bateria acurado. Este modelo deve considerar o comportamento não linear, o efeito de taxa de descarga e, principalmente, o **efeito de recuperação** da bateria. Caso contrário, não é possível capturar o ganho real proporcionado pela técnica de GDE.

Ma e Yang [Ma and Yang 2006, Ma and Yang 2005] apresentam um modelo analítico de bateria derivado do modelo de Rakhmatov-Vrudhula [Rakhmatov and Vrudhula 2001] que, segundo os autores, constitui-se no primeiro trabalho que considera a descarga da bateria em redes de sensores de forma interativa. Cabe ressaltar que o modelo Rakhmatov-Vrudhula original [Rakhmatov and Vrudhula 2001] não computa a descarga da bateria de forma interativa, existindo a necessidade de se conhecer *a priori* o perfil de descarga da bateria. Essa limitação, que impedia a sua utilização de forma on-line em simuladores de redes (e.g., NS2) foi resolvida por Handy e Timmermann [Handy and Timmermann 2003] e também estendida por Sausen et al. [Sausen et al. 2007b] para computar a descarga de baterias alcalinas (aplicadas em grande parte dos nós sensores). Ma e Yang [Ma and Yang 2006] afirmam que o seu modelo analítico possui uma reduzida complexidade computacional e resultados que se aproximam de outros modelos analíticos não interativos (e.g., modelo de Rakhmatov-Vrudhula) para um determinado perfil de descarga. No entanto, não se aprofundam nessa análise comparativa demonstrando o quanto o modelo apresentado é mais eficiente que os modelos existentes, em especial ao modelo de Rakhmatov-Vrudhula que, segundo Ma and Yang, é um modelo analítico acurado de bateria, apenas apresentando um alto custo computacional.

Este trabalho apresenta a aplicação de uma nova técnica de GDE que utiliza o desligamento escalonado dos nós sensores em conjunto com um modelo acurado de bateria (i.e., modelo de Rakhmatov-Vrudhula), objetivando apresentar os ganhos efetivos de energia oferecidos pela técnica de GDE e, ao mesmo tempo, leva em consideração o consumo do *Switching Energy* durante as simulações.

3. Componentes de uma Rede de Sensores Sem Fio

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) podem ser compostas por milhares de dispositivos autônomos e compactos denominados nós sensores. Cada nó potencialmente pode ser equipado com uma variedade de sensores, tais como sensor acústico, sísmico, infravermelho, vídeo-câmera, calor, temperatura e pressão. Em muitas aplicações, os nós são dispostos em áreas remotas e inóspitas, dificultando assim a manutenção desses dispositivos. Neste cenário, o tempo de vida útil de um nó sensor depende diretamente da quantidade de energia remanescente na sua bateria.

A estrutura básica de um nó sensor (veja Figura 1) é formada por quatro subsistemas [Raghunathan et al. 2002]: i) *subsistema computacional* que consiste de um microprocessador ou microcontrolador; ii) *subsistema de comunicação* composto por um rádio de curto alcance oferecendo comunicação sem fio; iii) *subsistema de sensoriamento* formado por um grupo de sensores e atuadores, e iv) *subsistema fonte de energia* responsável pela alimentação do nó, geralmente composto por uma bateria e um conversor CC-CC, o qual provê uma tensão constante para os subsistemas do nó sensor.

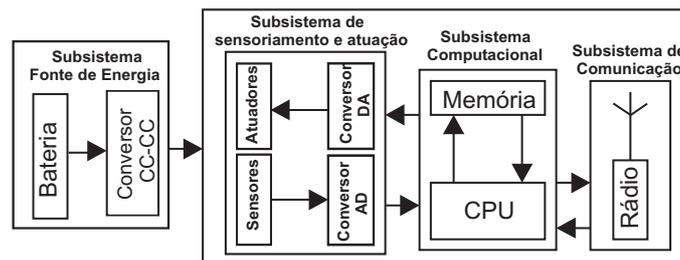


Figura 1. Estrutura básica de um nó sensor

4. Modelos de Bateria

Uma vez que se torna impraticável recarregar milhares de nós, é imprescindível que cada nó seja eficiente em consumo de energia. Portanto, energia é o principal recurso de um nó sensor, sendo uma das principais métricas na análise de desempenho de uma RSSF.

Cada bateria que integra o *subsistema fonte de energia* caracteriza-se por dois valores de tensão: (i) a tensão de circuito aberto (V_{oc}), que é o valor da tensão da bateria totalmente carregada e (ii) tensão de corte (V_{cut}), que é o valor em que a bateria é considerada descarregada.

A capacidade de uma bateria pode ser expressa de três maneiras: Primeira, pela *capacidade teórica* da bateria que se baseia na quantidade de energia armazenada e é o limite máximo de energia que pode ser extraída na prática. Segundo, pela *capacidade padrão* que é a energia que pode ser extraída sob condições especificadas pelo fabricante e, terceira, pela *capacidade atual* que pode exceder a *capacidade padrão* mas não pode exceder a *capacidade teórica* de uma bateria [Lahiri et al. 2002]. Nesta Seção, o termo capacidade da bateria é utilizado como *capacidade atual* em mA-ms².

O desempenho de uma bateria em relação ao perfil de corrente de descarga depende de dois efeitos: (i) *efeito de taxa de capacidade* que depende da *capacidade atual* da bateria e da intensidade da corrente de descarga; (ii) *efeito de recuperação* que depende da recuperação de carga durante períodos ociosos, ou seja, períodos em que a corrente solicitada é reduzida significativamente [Lahiri et al. 2002].

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

Existem vários modelos de baterias: (i) modelos analíticos; (ii) modelos baseados em circuitos elétricos; (iii) modelos estocásticos; e (iv) modelos eletroquímicos. Entre eles se destacam os modelos analíticos de baterias que podem incluir modelos de carga constante e de carga variável, os quais conseguem capturar o *efeito de taxa de capacidade* e o *efeito de recuperação*. Esses modelos são flexíveis no tocante a implementação, podendo ser facilmente configurados para tipos específicos de baterias.

O *modelo linear* é o modelo analítico mais simples, o qual trata a bateria como

²Leia-se: mA vezes ms. A adoção dessa unidade deve-se ao fato que um nó sensor, normalmente, solicita correntes da ordem de mA durante intervalos de tempo da ordem de ms.

um recipiente de corrente linear. Desta forma, a Equação 1 permite calcular a capacidade restante, C , de uma bateria, onde C' é capacidade no início da operação, I é a corrente constante de descarga durante a operação, e t_d é o tempo de duração da operação. A capacidade remanescente é calculada sempre que a taxa de descarga mudar.

$$C = C' - I * t_d. \quad (1)$$

Neste trabalho é utilizado o modelo analítico de Rakhmatov-Vrudhula [Rakhmatov and Vrudhula 2001] para estimar o acréscimo no tempo de vida da bateria de um nó sensor quando aplicado a técnica GDE-DE. A seguir são apresentadas as características deste modelo.

4.1. Modelo Rakhmatov-Vrudhula

Rakhmatov e Vrudhula [Rakhmatov and Vrudhula 2001] apresentaram equações para o cálculo do tempo de vida de uma bateria de íon(s) de lítio alimentada por carga constante ou variável. Para estimar o tempo de vida da bateria, somente dois parâmetros específicos são necessários conforme podemos verificar na Equação 2. O parâmetro α que está relacionado a capacidade da bateria e o parâmetro β que está relacionado ao comportamento não linear da bateria durante os períodos de carga e descarga.

A Equação 2 descreve o impacto do perfil de descarga no tempo de vida da bateria. Onde I_{k-1} é a corrente de descarga durante o período $k-1$. A função A calcula o impacto do comportamento não linear na descarga da bateria, onde L é o tempo de vida da bateria, t_k é o tempo de duração do período k e t_{k-1} é o tempo de duração para o período $k-1$. Mais detalhes sobre a função A e sobre o algoritmo para calcular L podem ser obtidos em [Rakhmatov and Vrudhula 2001].

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

Handy e Timmermann [Handy and Timmermann 2003] apresentam um algoritmo para a integração do modelo analítico de bateria Rakhmatov-Vrudhula com ambientes de simulação para redes sem fio e dispositivos móveis. Este mecanismo realiza a estimativa do tempo de vida de dispositivos alimentados por bateria de forma interativa não sendo necessário o conhecimento prévio de todo o perfil de descarga da bateria. A mesma abordagem é utilizada neste trabalho. Desta forma, efeitos não lineares da bateria, como o *efeito de taxa de capacidade* e o *efeito de recuperação*, podem ser levados em consideração. A principal contribuição desta abordagem está na possibilidade de se desenvolver protocolos que prolonguem a vida útil de uma RSSF.

Ao contrário do trabalho de Handy e Timmermann, que utiliza parâmetros para uma bateria tipo *Lítio-Ion*, neste trabalho adotou-se $\alpha = 4918200$ e $\beta = 4034$. Estes parâmetros foram estimados com base nos dados de uma bateria alcalina [Panasonic 2006] freqüentemente utilizada na alimentação dos nós sensores de uma RSSF. A estimação dos parâmetros α e β seguem a mesma metodologia adotada por Rakhmatov e Vrudhula [Rakhmatov and Vrudhula 2001].

Na Figura 2 pode-se observar a disparidade entre os resultados obtidos utilizando os modelos *linear* e o modelo *Rakhmatov-Vrudhula* na previsão do consumo de energia

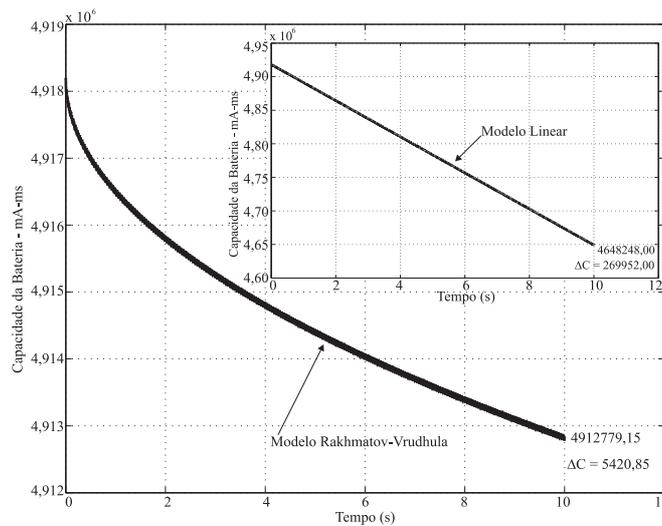


Figura 2. Modelo Linear Versus Modelo Rakhmatov-Vrudhula

de uma bateria. Note que o modelo linear fornece um consumo 50 vezes maior que o modelo Rakhmatov-Vrudhula para a variação na capacidade da bateria para um mesmo perfil de descarga com 10 segundos de duração. Essa grande divergência nos resultados deve-se ao fato de que o modelo linear, devido a sua simplicidade, não consegue capturar o comportamento não linear das baterias (taxa de capacidade e efeito de recuperação).

5. Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado

A técnica de Gerenciamento Dinâmico de Energia com Desligamento Escalonado (GDE-DE) [Sausen et al. 2007a] é baseada no desligamento parcial do nó sensor considerando o nível de carga da bateria que alimenta o nó. A medida que a capacidade da bateria diminui, ao atingir níveis previamente definidos, o modo de operação do nó sofre modificações, alterando a frequência de desligamento do subsistema de comunicação.

O objetivo do desligamento temporário é reduzir a corrente solicitada da bateria e, conseqüentemente, obter recuperação da capacidade da mesma (i.e., *efeito de recuperação*). Em um nó sensor, o modo de operação que mais demanda corrente elétrica é o modo de transmissão (Tx) [Crossbow 2006]. Na Figura 3 são mostrados os ganhos de energia obtidos quando o desligamento (i.e., Intervalo de Recuperação) é realizado após a transmissão ou, então, após a recepção (Rx) de um pacote de dados. Nota-se que a recuperação é maior quando o desligamento é realizado após uma transmissão. Portanto, o desligamento dos subsistemas de comunicação e sensoriamento quando realizado sempre após uma transmissão permite uma maior recuperação da capacidade da bateria.

Foram realizadas adequações na técnica de GDE-DE [Sausen et al. 2007a] com o objetivo de adicioná-la ao protocolo FLOOD [Kunz 2003]. As principais são: a) Ativação de apenas um modo de GDE que inicia a partir da carga completa da bateria; b) Substituição do *Intervalo de Recuperação* (i.e., *Sleep Time*) fixo por um *Intervalo de Recuperação* dinâmico que se adapta ao tráfego da rede. Mais detalhes sobre essas alterações serão descrita na próxima seção.

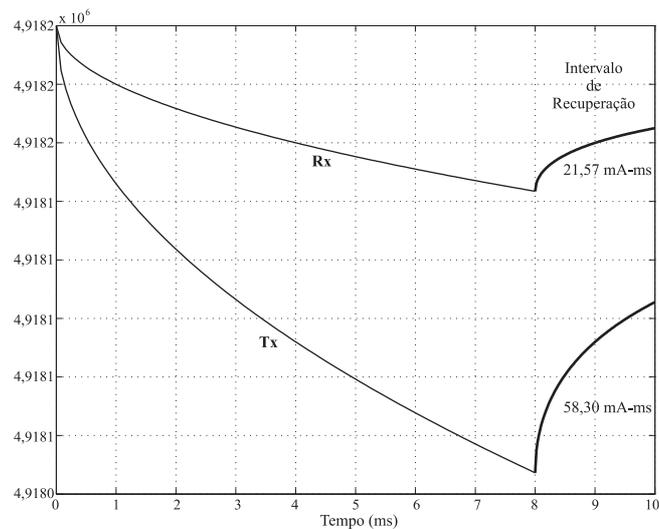


Figura 3. Recuperação da Capacidade da Bateria

6. Ambiente de Simulação

Com o objetivo de comparar o desempenho do protocolo FLOOD a partir da utilização da técnica de GDE-DE foi adicionado ao modelo de energia do simulador NS2 [NS2 2007] Versão 2.27 o modelo de Rahkmatov-Vrudhula (originalmente o NS2 possui apenas o modelo linear). Para a correta análise do gerenciamento dinâmico de energia também foi adicionado ao NS2 a computação do *Switching Energy*.

Foram realizadas várias simulações comparando a descarga da bateria de todos os nós que compõem a RSSF. Todos os nós possuem as mesmas características (i.e., rede homogênea). Os parâmetros para os nós sensores foram obtidos da especificação de um dispositivo do tipo *Berkeley Mote* na sua versão comercial produzida pela *Crossbow Technology* [Crossbow 2006] que apresenta as seguintes especificações: Processador (ATMEL ATmega128L), Modo ativo = 8 mA e Modo inativo = 15 μ A; Rádio(CC1000), Modo transmissão(Tx) = 27 mA, Modo recepção(Rx) = 10 mA, Modo inativo = 10 mA e Modo sleep = 1 μ A; Fonte de energia composta de duas baterias alcalinas tipo AA. Um resumo completo dos parâmetros de simulação podem ser verificados na Tabela 1

A RSSF utilizada nas simulações é composta de 50 nós dispostos numa área de 1500m X 300m. As simulações são repetidas 10 vezes para se obter uma amostragem estatística aceitável. O tempo de simulação de cada experimento é de 300 segundos. Como protocolo de acesso ao meio é utilizado o IEEE 802.11 e como modelo de mobilidade utiliza-se o modelo *random waypoint* sem pausa e uma velocidade constante de 1 m/s. Como protocolo de roteamento *broadcast* foi utilizado o protocolo FLOOD [Kunz 2003]. O protocolo FLOOD é um protocolo simples, que segue a abordagem *blind flooding*. Nesta técnica, cada nó da rede após receber a primeira cópia de um pacote de difusão (i.e., *broadcast*) realiza a retransmissão (i.e., *re-broadcast*) do pacote.

Para reduzir as chances de colisões durante as transmissões, estas são programadas com um retardo médio de 10 ms. A metodologia utilizada nas simulações consiste em escolher, de forma aleatória, um, cinco ou dez nós sensores fontes para transmitir dois pacotes de 512 Bytes a cada segundo para toda rede durante todo o tempo de simulação. Ao final de 300 segundos foi capturado o consumo médio de energia da rede tanto para

Tabela 1. Parâmetros da Simulação

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

o protocolo FLOOD original como para o protocolo FLOOD com a técnica de GDE-DE implementada.

6.1. Implementação da Técnica de GDE-DE

A primeira alteração realizada na técnica de GDE-DE [Sausen et al. 2007a] quando da implementação no protocolo FLOOD foi na ativação dos modos de transição. Originalmente a técnica GDE-DE possui 3 modos de operação que são ativados a partir de níveis pré-definidos da capacidade da bateria. Por questão de otimização no tempo de simulação, optou-se por definir apenas um modo de operação que é ativado no início da simulação. Este modo coloca o nó sensor em repouso após cada transmissão.

A segunda alteração foi no período de duração do Intervalo de Recuperação (IR) (i.e., *Sleep Time*), sendo que originalmente o IR é fixo. Neste artigo, optou-se em adotar um IR variável com um valor mínimo de 2 ms. O valor mínimo de 2 ms se justifica em virtude do tempo de transição entre os modos de operação do rádio adotado na simulação, no caso o *CC1000* (ver valores na Tabela 2).

Tabela 2. Tempo de Transição (em μ s)

Rádio	Velocidade	Tx→Sleep	Rx→Sleep	Sleep→Tx	Sleep→Rx
TR1000	19.2 Kbps	10	10	16	20
TR1000	115.2 Kbps	10	10	16	20
CC1000	38.4 Kbps	10	10	850	850

O cálculo do IR é obtido a partir da variação do tempo de chegada dos pacotes, levando-se em consideração os diferentes fluxos de dados que cada nó recebe. Para definir o valor do IR é utilizada a Equação 3, onde o *TempoAmostra* refere-se ao tempo de chegada do último pacote para o nó em questão, *MMPE* é a Média Móvel com Peso Exponencial calculada a partir da Equação 4 e *C* é uma constante que possui o valor 4 para esse experimento. Esta constante define o peso em que o IR será reduzido a partir do *DesvMMPE* calculado pela Equação 5.

$$IR = (TempoAmostra + MMPE) - (C * DesvMMPE). \quad (3)$$

Para calcular a Média Móvel com Peso Exponencial (MMPE) é utilizado um $\alpha = 0.1$ que equivale a dar um peso maior (i.e., 90 %) para o histórico das médias conforme pode-se verificar na Equação 4, onde *Amostra* é a última medida do tempo entre a chegada de dois pacotes consecutivos de um mesmo fluxo para um mesmo nó sensor.

$$MMPE = (1 - \alpha) * MMPE + \alpha * Amostra. \quad (4)$$

A fim de se obter uma boa aproximação do *IR*, também se calcula o Desvio da Média Móvel com Peso Exponencial (DesvMMPE) como apresentado na Equação 5, na qual é utilizado um $\beta = 0.2$.

$$DesvMMPE = (1 - \beta) * DesvMMPE + \beta * |Amostra - MMPE|. \quad (5)$$

6.2. Implementação do *Switching Energy*

O *Switching Energy* (SE) refere-se a energia envolvida no processo de transição entre dois modos de operação por parte do nó sensor [Sausen et al. 2007a]. Por exemplo, a transição entre o modo de recepção (Rx) e o modo repouso (*Sleep*). Dependendo do tipo de transição pode ocorrer perda ou recuperação na capacidade da bateria do nó sensor.

Atualmente, existem poucos trabalhos [Ruzzeli et al. 2006, Park and Srivastava 2002, Sausen et al. 2007a] que levam em consideração o *Switching Energy* na avaliação do desempenho das RSSF em termos de consumo de energia. Geralmente, o SE é desprezado objetivando a simplificação da simulação. Entretanto, em virtude das severas restrições de energia das RSSF é de fundamental importância a análise de todos os parâmetros que possam influenciar no tempo de vida da rede. Neste contexto, desconsiderar o SE na avaliação do tempo de vida de uma RSSF torna-se um enorme equívoco. Por esse motivo, neste trabalho, o SE foi considerado e implementado no NS2 a partir da terceira suposição apresentada por Sausen et al. [Sausen et al. 2007a]. Nesta suposição é considerado a energia média consumida pela transição do modo *A* para o modo *B* calculado conforme a Equação 6.

$$SE_{A \rightarrow B} = \frac{(P_A + P_B)(T_{A \rightarrow B} + T_{B \rightarrow A})}{2}, \quad (6)$$

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

6.3. Avaliação de Desempenho

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

Entretanto, o ganho em qualidade teve como consequência um elevado custo computacional para simular a descarga completa de uma bateria. Assim, neste experimento, ao invés de buscar o resultado final para o ganho no tempo de vida do nó sensor com a aplicação da técnica GDE-DE, optou-se por limitar a simulação a 300 segundos e avaliar três métricas de desempenho: a) *Packet Delivery Rate* (PDR) que refere-se a taxa de entrega dos pacotes na rede; b) o Consumo, C, de energia (medido neste experimento em Joules); c) a Latência, L, dos pacotes medida em segundos. Também foram definidos 3 cenários distintos para a simulação, sendo a diferença básica entre os cenários o número de fontes geradoras de tráfego *broadcast*.

Para cada cenário foram executadas 10 simulações alterando de forma aleatória a topologia em cada execução. Considerando o Intervalo de Confiança (IC) de 95% para o valor médio de cada uma das métricas avaliadas (veja Tabelas 3, 4 e 5), constata-se que a amostragem estatística é razoável.

No cenário 1, onde existe apenas uma fonte geradora de tráfego, verifica-se que com a aplicação da técnica de GDE-DE obteve-se um ganho médio acima de 11% em termos de economia de energia ao mesmo tempo que foi mantida a taxa de entrega dos pacotes (PDR) e a latência (L), conforme pode-se verificar na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados das Simulações para o Cenário 1

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

Já para o cenário 2 onde o número de fontes é incrementado cinco vezes (i.e., 5 fontes de tráfego) o ganho médio de energia praticamente dobrou chegando a 20, 85% de ganho médio em energia (veja Tabela 4). Como efeito colateral desse ganho, nota-se uma pequena redução no PDR médio (i.e., 1, 49%) a qual acarretou numa, também pequena, redução (i.e., 2, 98%) na latência média dos pacotes.

O melhor desempenho em relação a economia de energia foi obtida nas simulações com o cenário 3. Como mostrado na Tabela 5, obteve-se um desempenho superior a 29% quando adicionada a técnica de GDE-DE ao protocolo FLOOD. Como ponto contrário, a latência média dos pacotes apresenta o pior índice das simulações. No entanto, se for analisado que para esse cenário existem 10 fontes injetando 2 pacotes por segundo na rede e mesmo assim consegue-se manter o PDR, uma latência média de 0, 7 s não pode ser considerada tão alta dependendo da aplicação.

Tabela 4. Resultados das Simulações para o Cenário 2

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

Tabela 5. Resultados das Simulações para o Cenário 3

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

7. Conclusão

Simuladores para RSSF normalmente utilizam o modelo linear de descarga de bateria. Este modelo é simples e de fácil implementação, mas longe da realidade, levando muitas vezes a conclusões equivocadas como, por exemplo, que o *Switching Energy* (SE) implica necessariamente em consumo de energia. Para melhor compreender o impacto da utilização de um modelo de descarga de bateria acurado nas simulações de uma RSSF neste trabalho foi simulado o comportamento do protocolo de roteamento *broadcast* FLOOD original e com a implementação da técnica de GDE-DE em 3 cenários distintos, levando-se em consideração também o SE. O SE é sistematicamente negligenciado nas simulações, mas nesse trabalho além de levá-lo em consideração consegue-se demonstrar que os valores envolvidos são consideráveis.

Resultados de simulação evidenciam que a solução que aplica a técnica de GDE-DE proporciona uma recuperação significativa na capacidade da bateria para todos os cenários simulados. Como esperado ocorreu um pequeno aumento na latência dos pacotes no cenário que possui mais fontes geradoras de tráfego, mas mesmo neste cenário além de obter uma recuperação da carga da bateria obteve-se uma maior taxa de entrega de pacotes (PDR).

Diferente de outras abordagens, a técnica GDE-DE não procura apenas economi-

zar energia. Ao contrário, o foco principal desta técnica está em obter recuperação na capacidade da bateria por meio de repousos curtos ao longo do tempo de atividade da rede. Ao invés de aplicar a estratégia de desligamento por um longo período de tempo, optou-se por distribuir o mesmo durante os ciclos de trabalho do nó sensor. Com isso, pretende-se evitar que desligamentos prolongados influenciem negativamente no nível de qualidade de serviço (QoS) da aplicação.

O ganho em qualidade nos resultados da análise tem como consequência um elevado custo computacional para simular a descarga de uma bateria. A busca por uma melhoria no desempenho computacional do modelo de Rakhmatov-Vrudhula é necessária e deverá ser realizada para permitir a sua utilização num cenário mais realista de uma RSSF. Entretanto, a busca por um modelo de bateria equivalente, que tenha melhor desempenho computacional, constitui-se uma alternativa.

Da adoção da técnica de GDE-DE em protocolos mais complexos (e.g., protocolos de enlace de dados), espera-se obter um ganho efetivo na capacidade da bateria ao mesmo tempo que se torna possível controlar o tempo de desligamento e a frequência deste. Com isso, levanta-se um comparativo interessante entre ganho de energia e o impacto na latência da rede.

Agradecimento

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Brazil*, dentro dos processos 470342/2007-2 e 141538/2004-0.

Referências

- Benini, L., Bogliolo, A., and Micheli, G. (2000). A survey of design techniques for system-level dynamic power management.
- Crossbow (2006). Crossbow technology inc. plataforma mica motes data sheet.: <http://www.xbow.com>.
- Gilbert Chen, Joel Branch, M. J. P. L. Z. and Szymanski, B. K. (2004). *Advances in Pervasive Computing and networking*, chapter SENSE: A wireless sensor Network Simulator, pages 249–267. Springer.
- Handy, M. and Timmermann, D. (2003). Simulation of mobile wireless networks with accurate modelling of non-linear battery effects. *Proceedings of International Conference on Applied Simulation and Modelling, Marbella, Spain*,, pages 532–537.
- Kunz, T. (2003). Multicasting in mobile ad-hoc networks: Achieving high packet delivery ratios. In *The Proceeding of the Annual Conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative Reseach*, pages 1–15.
- Lahiri, K., Raghunathan, A., Dey, S., and Panigrahi, D. (2002). Battery-driven system design: a new frontier in low power design. *Proceedings of VLSID'02*,, pages 1–7.
- Luo, R. C., Tu, L. C., and Chen, O. (2005). An efficient dynamic power management policy on sensor network. *Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications - AINA'05, IEEE Computer Society*,, pages 341–344.

- Ma, C. and Yang, Y. (2005). Battery-aware routing for streaming data transmissions in wireless sensor networks. *Proceedings of the 2nd International Conference on Broad-band Networks*, pages 464–473 Vol. 1.
- Ma, C. and Yang, Y. (2006). Battery-aware routing for streaming data transmissions in wireless sensor networks. *Mob. Netw. Appl.*, 11(5):757–767.
- NS2 (2007). The network simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Panasonic (2006). Panasonic industrial alkaline batteries data sheet. <http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/chem/alk/index.html>.
- Park, S. and Srivastava, M. B. (2002). Dynamic battery state aware approaches for improving battery utilization. *Proceedings of CASES '02*, pages 225–231.
- Passos, R. M., Coelho Jr., C. J. N., Loureiro, A. A. F., and Mini, R. A. F. (2005). Dynamic power management in wireless sensor networks: An application-driven approach. *Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services - WONS'05, IEEE Computer Society.*, pages 109–118.
- Raghunathan, V., Schurgers, C., Park, S., and Srivastava, M. B. (2002). Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine.*, pages 40–50.
- Rakhmatov, D. and Vrudhula, S. (2001). An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems. *Proceedings of ICCAD.*, pages 1–6.
- Ruzzeli, A. G., O'Hare, G. M. P., Tynan, T., P. C., and Havingat, J. M. (2006). Protocol assessment issues in low duty cycle sensor networks: The switching energy. *SUTC '06: Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks*, pages 136–143.
- Sausen, P. S., Sousa, J. R. B., Spohn, M. A., Perkusich, A., and Lima, A. M. N. (2007a). Dynamic power management with scheduled switching modes in wireless sensor networks. *MASCOTS'07 - Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and telecommunication Systems.*, pages 1–8.
- Sausen, P. S., Sousa, J. R. B., Spohn, M. A., Perkusich, A., and Lima, A. M. N. (2007b). Exploring the switching energy effect in a dynamic power management technique for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society(IECON)*, pages 1–8, Taipei, Taiwan.
- Sinha, A. and Chandrakasan, A. (2001). Dynamic power management in wireless sensor networks. *IEEE Design Test of Computer.*, pages 62–74.
- Sousa, J. R. B., Sausen, P. S., Perkusich, A., and Lima, A. M. N. (2006). Modelagem do consumo de energia de um nó sensor utilizando redes de petri híbridas diferenciais. *CBA 2006: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática.*
- Srinivasan, V., Nugehalli, P., and Rao, R. (2001). Design of optimal energy aware protocols for wireless sensor networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC'01)*, pages 2494–2498. IEEE.