Uma Análise do Consumo de Energia em Redes Ad Hoc

Daniel de O. Cunha, Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte
Grupo de Teleinformática e Automação
COPPE/PEE - DEL/POLI
Universidade Federal do Rio de Janeiro
http://www.gta.ufrj.br/

***Resumo*— Este artigo analisa o consumo de energia dos nós em redes ad hoc IEEE 802.11. O principal objetivo desta análise é descobrir limites teóricos para os ganhos obtidos em tempo de vida dos nós através de diferentes técnicas de conservação de energia encontradas na literatura. A avaliação do consumo de energia considera as características do método de acesso ao meio e a interação dos nós no processo de encaminhamento dos pacotes. A idéia básica é determinar o tempo de vida de um nó a partir do seu consumo médio. O consumo é estimado a partir da parcela de tempo que o nó permanece transmitindo, recebendo ou ocioso. São então analisados os ganhos potenciais obtidos por diferentes técnicas de economia ou de balanceamento do consumo de energia. Mostra-se que a técnica de balanceamento de fluxos pode alcançar um ganho máximo para o tempo de vida dos nós entre 11% e 30%, dependendo da configuração da rede.**

***Palavras-Chave*— Consumo de Energia, Comunicação sem fio, Redes Ad Hoc.**

***Abstract*— This paper analyzes the energy consumption of ad hoc nodes using IEEE 802.11 interfaces. Our objective is to provide theoretical limits on the lifetime gains that can be achieved by different power saving techniques found in the literature. The evaluation takes into account the properties of the medium access control protocol and the process of forwarding packets in ad hoc mode. The key idea is to determine the node lifetime based on its average power consumption. The average power consumption is estimated considering how long the node remains idle, receiving, or transmitting. We show that energy-aware routing can achieve a lifetime gain as large as 30%, and significant gains can be obtained even if a small number of paths is used.**

***Keywords*— Energy Consumption, Wireless Communication, Ad Hoc Networks.**

I. INTRODUÇÃO

Um fator crítico na operação das redes ad hoc é o consumo de energia dos nós. Tipicamente, nós ad hoc são dispositivos sem fio, alimentados por baterias cujas capacidades de armazenamento são limitadas por restrições de volume e peso dos equipamentos. Por isto, é importante reduzir o consumo de energia dos nós. Além disso, as redes ad hoc funcionam sem nenhuma infra-estrutura pré-estabelecida, obrigando os nós a cooperar entre si a fim de viabilizar comunicações entre nós distantes. Assim, a desativação de um nó por falta de energia pode prejudicar o funcionamento de toda a rede. Desta forma, a economia de energia é importante para um nó, isoladamente, mas também para a rede como um todo.

O problema da conservação de energia em redes ad hoc vem sendo abordado de diversas formas. Uma delas é utilizar a energia restante nos nós como métrica de roteamento, técnica que foi discutida inicialmente por Singh *et al.* [1]. O objetivo da energia como métrica de roteamento é evitar a utilização de uma mesma rota repetidas vezes, o que levaria ao rápido esgotamento da energia dos nós presentes nesta rota. Este tipo de roteamento procura balancear os fluxos de dados por diferentes rotas, levando em consideração a energia restante nos nós da rede. O balanceamento de tráfego é mais simples em redes estáticas onde a topologia pode ser seguramente obtida, porém é mais complexo em redes móveis que possuem topologias dinâmicas. Chang e Tassiulas [2] apresentam algoritmos para balancear fluxos com o objetivo de maximizar o tempo de vida dos nós da rede. Yu e Lee [3] propõem duas novas versões do protocolo *Dynamic Source Routing* [4] que visam maximizar o tempo até que o primeiro nó da rede fique sem energia. Visando reduzir o atraso na descoberta de rotas, Cunha *et al.* [5] propõem modificações a um dos mecanismos de Yu e Lee, bem como estendem seu uso a protocolos reativos em geral. Kim e Cho [6] desenvolveram um algoritmo de roteamento capaz de alterar as rotas durante as conexões de modo a proteger nós próximos à exaustão. Outros trabalhos assumem que, devido à atenuação exponencial de sinais na transmissão sem fio, a comunicação através de pequenos e múltiplos saltos é mais eficiente que a transmissão com

Este trabalho foi realizado com recursos do CNPq, CAPES, COFECUB e FAPERJ.

menos saltos porém maior distância entre os nós. Wan *et al.* [7] analisam a melhor rota numa determinada topologia considerando a potência de transmissão dos nós variável. A abordagem de Singh *et al.* [8] busca o balanceamento no consumo de energia dos nós particionando as conexões em dois segmentos, um de comunicação com múltiplos saltos e outro com comunicação direta.

A maior parte dos trabalhos considera a utilização de interfaces sem fio IEEE 802.11 na construção de redes ad hoc. No entanto, estas interfaces no modo ad hoc possuem características específicas de operação, que muitas vezes não têm sido levadas em consideração. Feeney e Nilsson [9] apresentam medidas com interfaces IEEE 802.11 e modelam a energia consumida por pacote em relação ao consumo da interface no estado ocioso. No mesmo trabalho é mostrado que o custo deste estado ocioso é relativamente alto, pois os nós devem ficar constantemente escutando o meio para receber transmissões de seus vizinhos. Monks *et al.* [10] analisam os efeitos da utilização de diferentes potências de transmissão no consumo de energia dos nós.

Neste trabalho é analisado o consumo de energia dos nós ad hoc levando-se em consideração a interação entre o método de acesso ao meio de interfaces IEEE 802.11 e o encaminhamento de pacotes em modo ad hoc. Para isto, são levadas em consideração as parcelas de tempo em que os nós permanecem num dado estado de operação e a capacidade de transmissão de dados de redes ad hoc. Por fim, este trabalho demonstra como os resultados podem ser utilizados para investigar o ganho potencial de diversas técnicas de economia ou balanceamento de energia. Estes ganhos limites podem ser utilizados como referência na pesquisa de novos esquemas de economia de energia.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção II descreve as características principais da operação das redes IEEE 802.11 no modo ad hoc, destacando os estados possíveis de funcionamento das interfaces que seguem este padrão. Na Seção III é analisada a interação entre o encaminhamento em modo ad hoc e o consumo de energia dos nós. A Seção IV discute como os resultados apresentados podem ser utilizados para calcular limites possíveis para o ganho de diversas técnicas de economia ou de balanceamento de energia. Por fim, A Seção V apresenta as conclusões deste trabalho.

II. REDES IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 [11] é a tecnologia de redes locais sem fio mais utilizada atualmente. O IEEE 802.11 possui dois mecanismos de acesso ao meio. O esquema distribuído de acesso ao meio (*Distributed Coordination Function* - DCF) é utilizado no modo de operação ad hoc enquanto que o esquema centralizado (*Point Coordination Function* - PCF) é usado em redes infra-estruturadas. A seção a seguir resume o DCF, foco deste trabalho.

A. Distributed Coordination Function - DCF

O DCF utiliza o método de acesso *Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). Para obter controle do meio e transmitir um quadro de dados, o terminal deve primeiro escutar o meio por um certo tempo (DIFS - DCF *InterFrame Space*) e se o meio continuar livre ele envia o quadro, como mostra a Figura 1. Devido à diferença de potência entre o sinal transmitido e o recebido, o emissor não pode detectar se o quadro foi corretamente recebido, tornando necessário o envio de um quadro de reconhecimento (ACK) pelo receptor. Após receber o quadro de dados, o receptor aguarda um período SIFS (*Short InterFrame Space*) e transmite o ACK para o emissor do quadro. O fato do SIFS ser menor que o DIFS garante que o receptor terá oportunidade de enviar seu reconhecimento antes que algum outro nó ocupe o meio com outro quadro de dados. Para garantir acesso justo ao meio e reduzir as chances de colisões, nós que desejem enviar um segundo pacote deverão escutar o meio por um período igual ao DIFS somado a um tempo aleatório (*backoff*).

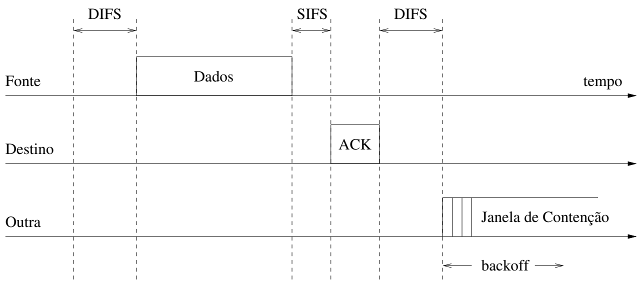


Fig. 1. Esquema básico do DCF.

O DCF implementa, ainda, um mecanismo virtual de escuta ao meio chamado *Network Allocation Vector* (NAV) que guarda por quanto tempo o meio ficará ocupado. Para viabilizar este mecanismo, existem dois outros tipos de quadros de controle na camada MAC 802.11, o *Request to Send* (RTS) e o *Clear to Send* (CTS). Este mecanismo visa reduzir colisões e evitar o problema do terminal escondido nestas redes. Este problema surge quando um nó vizinho do receptor de uma comunicação não consegue detectar uma transmissão em andamento, por estar muito longe do emissor, e decide iniciar uma outra comunicação, causando colisão no receptor da primeira comunicação. Assim, cada nó que deseja transmitir um quadro de dados primeiro envia um quadro de pedido RTS que informa a duração calculada para a comunicação. Caso o nó destino receba corretamente o RTS ele envia em resposta um quadro CTS. O quadro CTS enviado pelo receptor do quadro de dados contém a duração estimada para o resto da conexão. Todas as estações vizinhas que não participam diretamente da conexão, mas que podem escutar o tráfego, chamadas de estações ouvintes, atualizam seus vetores de alocação (NAVs). Para que este mecanismo funcione, todos os nós ouvintes devem ser capazes de receber as informações sobre a duração da comunicação. Por isto, os quadros RTS e CTS devem ser transmitidos numa das taxas básicas suportadas por todos os nós da rede, independentemente da taxa máxima de transmissão de dados de cada nó. Tipicamente, a taxa utilizada para a negociação com RTS e CTS é de 1Mbps. Esta negociação pode ser vista na Figura 2.

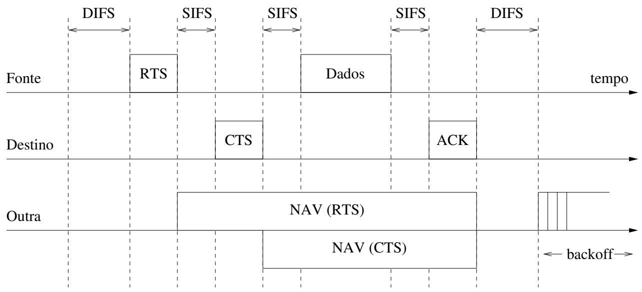


Fig. 2. DCF com negociação por RTS/CTS.

B. *Estados de operação da interface*

As interfaces IEEE 802.11 possuem 4 estados de operação bem definidos: o estado de dormência (*Sleep*), o estado ocioso (*Idle*), o estado de transmissão (Tx) e o estado de recepção (Rx). Dentre estes estados o que apresenta o menor consumo de energia é o estado de dormência. No entanto, a tarefa de gerenciar a entrada e saída dos nós do estado de dormência é particularmente complexa em redes ad hoc uma vez que não há nenhum elemento centralizador. Além disso, seria necessário que nós vizinhos armazenassem pacotes destinados a nós que estejam em seus períodos de dormência. Por estes motivos costuma-se considerar que os nós ad hoc ficam no estado ocioso quando não estão transmitindo ou recebendo dados, não utilizando o estado de dormência. Este estado apresenta um consumo mais alto que o consumo no estado de dormência. Isto ocorre porque no modo ad hoc os nós devem ficar constantemente escutando o meio para saber se há algum quadro endereçado a eles. O estado Rx apresenta um consumo, em geral, pouco maior que o consumo no estado ocioso. Este aumento representa o custo de efetivamente processar os sinais recebidos ao invés de apenas detectar a recepção ou não de um sinal. Dentre todos os estados, o estado Tx é o que apresenta o maior consumo. O principal motivo é a grande atenuação de espaço livre que força a inclusão de amplificadores de potência para RF nestas interfaces. Algumas interfaces possibilitam a mudança da potência de saída do sinal, reduzindo assim o consumo de energia como um todo.

III. Consumo de energia dos nós

As análises realizadas nesta seção assumem o uso de interfaces IEEE 802.11b com taxa máxima de transmissão de 11Mbps operando no modo DCF e utilizando a negociação por RTS/CTS para reduzir colisões. Estas análises partem do princípio de que os nós não possuem nenhum mecanismo para gerenciar entradas e saídas do estado de dormência, permanecendo sempre nos estados Tx, Rx ou ocioso.

Desta forma, como o estado ocioso é o que apresenta menor consumo, podemos concluir que a menor potência instantânea que pode ser consumida pelo nó é a potência do estado ocioso (P_{oc}). Isto implica que o tempo máximo de operação de um nó (T_{max}) é finito, e dado por:

$$T_{max} = \frac{E}{P_{oc}} \quad , \tag{1}$$

onde E é a energia inicial do nó.

De acordo com as condições específicas de operação dos nós, pode-se obter potências médias (P_m) que representem seu consumo de energia. A potência média pode ser calculada da seguinte forma:

$$P_m = t_{oc} \times P_{oc} + t_{Tx} \times P_{Tx} + t_{Rx} \times P_{Rx} \quad , \tag{2}$$

onde t_{oc}, t_{Tx} e t_{Rx} são as parcelas de tempo em que o nó fica nos estados ocioso, Tx e Rx respectivamente, enquanto que P_{oc}, P_{Tx} e P_{Rx} são as potências consumidas nestes estados. Genericamente, podemos calcular o tempo de operação, ou tempo de vida de um nó como:

$$T_v = \frac{E}{P_m} \quad . \tag{3}$$

Inicialmente pode-se intuir que o menor tempo de vida possível de um nó seria no caso em que ele passasse todo o tempo transmitindo. No entanto, esta hipótese não é real. Mesmo que um nó fique continuamente enviando quadros de dados, ele passará alguns momentos no estado ocioso e no estado Rx pelo próprio funcionamento do mecanismo de acesso ao meio (Seção II-A). Para verificar os efeitos do esquema DCF sobre o consumo de energia dos nós a primeira análise realizada é num cenário de comunicação direta entre dois nós, que possibilita uma capacidade de transmissão máxima, já que não há contenção. Após esta análise, será feita uma análise dos efeitos do encaminhamento de quadros em modo ad hoc.

A. Comunicação direta

Esta análise é importante pois serve como base para análises mais complexas. O cenário considerado é de dois nós separados por uma distância que permita a comunicação direta. O nó emissor tenta transmitir dados a 11Mbps, garantindo que sempre que o meio esteja livre ele tenha algo a transmitir. Desta forma, a taxa máxima de utilização da rede pode ser calculada. Nesta condição, t_{oc}, t_{Tx} e t_{Rx} são a fração do tempo da transmissão de um quadro que os nós passam nos estados ocioso, Tx e Rx, respectivamente. Desprezando-se os atrasos de propagação, as parcelas que compõem o tempo de transmissão de um quadro podem ser vistas na Figura 3.

O tempo de *backoff* neste cenário pode ser calculado considerando-se uma janela de contenção igual a 31 (CW_{min}) todo o tempo. O *backoff* será, então, uniformemente distribuído entre 0 e 31 *slots* de tempo com duração de 20μs. A média do *backoff* será de 15,5 *slots* de tempo, resultando num tempo médio de 310μs por quadro. A norma define o SIFS como 10μs e o DIFS como SIFS + 2 × $slot$, resultando em DIFS = 50μs. Além disso, antes de cada quadro MAC deve ser enviado um preâmbulo da camada física, que pode ser longo, de 192μs, ou curto, de 96μs [12]. Como o preâmbulo curto não é compatível com dispositivos mais antigos, será utilizado o preâmbulo longo nos cálculos desta seção. Os quadros de controle RTS, CTS e Ack são transmitidos na maior taxa básica possível, neste caso, será considerada 1Mbps. Assim a transmissão do RTS, com 20 *bytes*, leva 160μs, enquanto que a transmissão dos 14 *bytes* que compõem o CTS e o ACK leva 112μs. O tempo de transmissão do quadro de dados é igual ao tempo de transmissão a 11Mbps de 34 *bytes* do cabeçalho MAC mais os *bytes* que compõem o pacote de dados. É importante ressaltar que o tamanho do pacote deve contar quaisquer cabeçalhos de camadas superiores que venham a ser utilizadas. O cabeçalho IP, por exemplo, possui 20 *bytes*.

O tempo de transmissão de um quadro completo pode ser calculado da seguinte forma:

$$T_{quadro} = t_{Backoff} + 4 \times t_{pr} + 3 \times SIFS + DIFS + t_{RTS} + t_{CTS} + t_{dados} + t_{ACK} \quad . \tag{4}$$

Assim, o tempo de transmissão de um quadro completo é igual a:

$$T_{quadro} = 1542 + t_{dados} \quad . \tag{5}$$

A Tabela I mostra os tempos t_{dados} e o número de quadros completos que podem ser transmitidos por segundo para diferentes tamanhos de pacote. Estes tempos foram calculados considerando-se um cabeçalho de 20 *bytes* (igual ao cabeçalho IP) somado aos dados.

A partir destes diferentes t_{dados} e tempos de quadros pode-se calcular t_{oc}, t_{Tx} e t_{Rx} para o nó emissor e para o nó receptor. Os tempos de *backoff*, DIFS e SIFS são tempos em que ambos os nós ficam no estado ocioso. Os tempos referentes ao RTS e quadro de dados, incluindo os preâmbulos associados, são tempos em que o emissor fica no estado Tx e o Receptor no estado Rx. Nos períodos relativos ao CTS e ao ACK, a situação é inversa. Os valores calculados podem ser vistos na Tabela II.

TABELA II
PARCELA DE TEMPO QUE OS NÓS PASSAM EM CADA ESTADO.

Tamanho do Pacote (*bytes*)	**Emissor**			**Receptor**		
	t_{oc}	t_{Tx}	t_{Rx}	t_{oc}	t_{Tx}	t_{Rx}
160	0,23	0,41	0,36	0,23	0,36	0,41
512	0,20	0,49	0,31	0,20	0,31	0,49
800	0,18	0,54	0,28	0,18	0,28	0,54
1000	0,17	0,57	0,26	0,17	0,26	0,57
1500	0,14	0,63	0,23	0,14	0,23	0,63

Com base nestes valores pode-se calcular diferentes P_m segundo a Equação 2, um para cada tamanho de pacote. Assim, o uso de pacotes de 1500 *bytes*, por exemplo, resulta em $P_m = 0,15 \times P_{oc} + 0,65 \times P_{Tx} + 0,20 \times P_{Rx}$ para o emissor e $P_m = 0,15 \times P_{oc} + 0,20 \times P_{Tx} + 0,65 \times P_{Rx}$ para o nó receptor.

Para verificar estes cálculos foram realizadas simulações no simulador *Network Simulator* (*ns*-2) [13]. Os cenários eram compostos por 2 nós distantes 200m um do outro, permitindo comunicação direta com o alcance de 250m do rádio. Os nós eram equipados com interfaces IEEE 802.11 operando a 11Mbps. O nó emissor tenta enviar dados a 11Mbps de modo a que sempre haja um pacote a ser transmitido quando o meio estiver livre. As simulações realizadas tiveram duração de 300s, e foi medido o tempo em que os nós ficaram em cada estado de operação. Foram calculados intervalos de confiança de 99% em relação à média das medidas, ficando estes intervalos menores que 0,5% desta média. A Figura 4 mostra os resultados obtidos para o nó emissor.

Como se pode observar na Figura 4, os resultados são bem próximos dos calculados. Além disto, podemos perceber que quanto maior o pacote utilizado, mais tempo a interface passa no estado Tx e menos tempo ela passa nos estados Rx e Ocioso. Isto implica numa maior potência média consumida e, conseqüentemente, num menor tempo de vida. No entanto, este menor tempo de vida não significa que

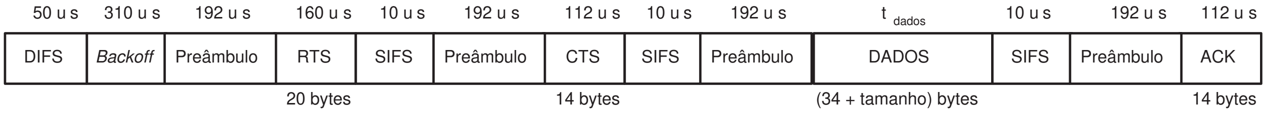


Fig. 3. Composição do tempo de transmissão de um quadro completo.

TABELA I

VALOR DE t_{dados} PARA DIFERENTES TAMANHOS DE PACOTE.

Tamanho do Pacote (*bytes*)	t_{dados} (μs)	**Tempo do Quadro** (μs)	**Número de Quadros por seg.**
160	156	1698	589
512	412	1954	512
800	621	2163	462
1000	747	2309	434
1500	1130	2672	374

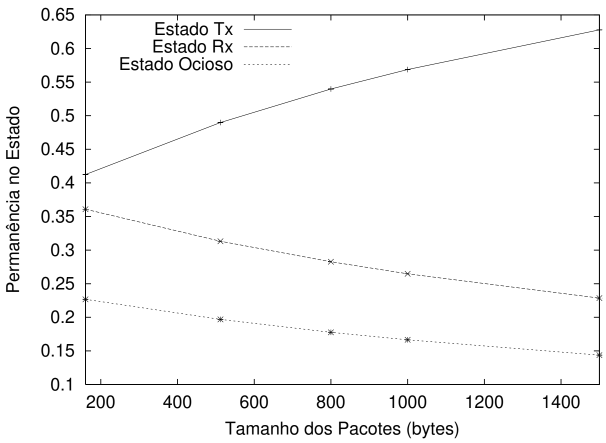


Fig. 4. Permanência do emissor nos estados de operação.

utilizando pacotes menores a eficiência em termos de dados transmitidos seja maior. Como se pode ver na Tabela III, o uso de pacotes menores reduz a taxa máxima de envio de dados possível. Desta forma, para que a utilização de pacotes menores fosse mais vantajosa, seria necessário que a diferença de tempo de vida do nó fosse grande a ponto de compensar esta diferença na taxa de envio.

Considerando os valores da Tabela II podemos construir tabelas de permanência nos estados para nós ouvintes, ou seja, aqueles que não participam diretamente da comunicação mas estão no alcance do emissor e/ou receptor. Existem três tipos de ouvintes: o $ouvinte_e$, que está no alcance apenas do emissor e, portanto, só escuta o tráfego originado pelo emissor; o $ouvinte_r$, que está no alcance

TABELA III

TAXA MÁXIMA DE ENVIO DE DADOS.

Tamanho do Pacote (*bytes*)	**Taxa Máxima de Envio (Mbps)**
160	0,75
512	2,1
800	2,95
1000	3,47
1500	4,49

apenas do receptor e, portanto, só escuta o tráfego originado pelo receptor; e o $ouvinte_{er}$ que está no alcance de ambos e escuta toda a comunicação. A Tabela IV mostra a permanência dos três tipos de ouvintes nos estados de operação. Devido ao seu papel passivo na comunicação, os ouvintes em momento algum entram no estado Tx.

TABELA IV

PARCELA DE TEMPO QUE OS OUVINTES PASSAM EM CADA ESTADO.

Tamanho do Pacote (*bytes*)	$ouvinte_{er}$		$ouvinte_e$		$ouvinte_r$	
	t_{oc}	t_{Rx}	t_{oc}	t_{Rx}	t_{oc}	t_{Rx}
160	0,23	0,77	0,59	0,41	0,64	0,36
512	0,20	0,80	0,51	0,49	0,69	0,31
800	0,18	0,82	0,46	0,54	0,72	0,28
1000	0,17	0,83	0,43	0,57	0,74	0,26
1500	0,14	0,86	0,37	0,63	0,77	0,23

Deve ser feita uma ressalva no tocante aos nós ouvintes que recebem tráfego originado pelo emissor. Como estes nós não estão realmente interessados no conteúdo do quadro de dados, mas apenas nas informações fornecidas pelos quadros RTS e CTS, eles podem economizar energia durante a transmissão do quadro de dados. Esta redução pode ser significativa, especialmente para interfaces enviando dados a taxas mais baixas. Os resultados de Feeney e Nilsson [9] mostram que a potência consumida neste período pode ser menor que P_{oc} para interfaces trabalhando a 2Mbps. No entanto, para interfaces operando a 11Mbps, consideradas nesta análise, esta economia não se mostra significativa. Por este motivo, será considerado que os ouvintes se alternam sempre entre os estados Rx e ocioso.

B. *Comunicação através de uma cadeia de nós*

Numa rede ad hoc a solução que os nós encontram para se comunicar com outros nós fora de seu alcance de transmissão é a formação de uma cadeia de encaminhamento da qual os nós fonte e destino são as extremidades. Os pacotes são enviados salto-a-salto. Neste tipo de encaminhamento, os pacotes enviados consecutivamente competem entre si pelo meio, aumentando a contenção. Li *et al.* [14] mostram que a utilização ideal de uma cadeia de encaminhamento ad hoc é de $\frac{1}{4}$ da taxa máxima a um salto. Para isto eles consideram um modelo de propagação em que se um pacote pode ser corretamente recebido numa distância r, esta transmissão seria capaz de causar interferência em transmissões distantes aproximadamente $2r$.

Considerando a participação de um nó numa cadeia de encaminhamento ideal, este nó passaria $\frac{1}{4}$ do tempo no papel de emissor e $\frac{1}{4}$ do tempo no papel de receptor mostrados na Tabela II. No restante do tempo, ele seria ouvinte da comunicação ao redor dele na cadeia. Para determinar qual o tipo de ouvinte (Tabela IV) este nó é no restante do tempo, é necessário analisar os efeitos do raio de interferência. Se for considerado que o nível de sinal na região com distância d tal que $r < d < 2r$ é suficiente para interferir numa conexão mas não para mudar sozinho o estado do nó ouvinte de ocioso para Rx, este nó será $\frac{1}{4}$ do tempo um $ouvinte_r$ e $\frac{1}{4}$ um $ouvinte_e$. Neste Caso I, sua potência média consumida será

$$P_m = \frac{1}{4} \times P_e + \frac{1}{4} \times P_r + \frac{1}{4} \times P_{o_r} + \frac{1}{4} \times P_{o_e} \quad , \qquad (6)$$

onde P_e, P_r, P_{o_r} e P_{o_e} são as potências médias consumidas por nós dos tipos emissor, receptor, $ouvinte_r$ e $ouvinte_e$ respectivamente.

O Caso II considera que na distância d mencionada anteriormente o sinal de interferência é capaz de levar o nó ouvinte ao estado Rx de modo a tentar receber alguma informação (este é o modelo utilizado no simulador *ns*-2). Neste caso, sua potência média pode ser aproximada por

$$P_m = \frac{1}{4} \times P_e + \frac{1}{4} \times P_r + \frac{1}{2} \times P_{o_{er}} \quad , \qquad (7)$$

onde $P_{o_{er}}$ é a potência média consumida por um nó $ouvinte_{er}$.

Os tempos de permanência em cada estado para os nós participantes de uma cadeia podem ser vistos na Tabela V. Como pode ser visto, o efeito da utilização de uma ou outra aproximação é apenas nas parcelas de tempo que o nó passa nos estados Rx e ocioso. A parcela de tempo no estado Tx, que apresenta o maior consumo, permanece inalterada.

TABELA V
PARCELA DE TEMPO QUE OS NÓS DE UMA CADEIA PASSAM EM CADA ESTADO.

Tamanho do Pacote (*bytes*)	**Caso I**			**Caso II**		
	t_{oc}	t_{Tx}	t_{Rx}	t_{oc}	t_{Tx}	t_{Rx}
160	0,42	0,19	0,39	0,23	0,19	0,58
512	0,40	0,20	0,40	0,20	0,20	0,60
800	0,39	0,21	0,40	0,18	0,21	0,61
1000	0,38	0,21	0,41	0,17	0,21	0,62
1500	0,36	0,22	0,42	0,14	0,22	0,64

IV. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ECONOMIA DE ENERGIA

Nesta Seção serão analisados os ganhos potenciais de algumas técnicas de economia e balanceamento de energia em redes ad hoc. As técnicas analisadas são: o controle de potência de transmissão, o balanceamento de fluxos e a mudança do nó para o estado de dormência. Como base para análise serão utilizados os valores apresentados em [9] para o consumo de uma interface IEEE 802.11b operando a 11Mbps. Uma aproximação destes valores pode ser vista na Tabela VI.

TABELA VI
CONSUMO DE UMA INTERFACE IEEE 802.11B.

Estado	**Potência (W)**
Dormência	0,050
Ocioso	0,740
Rx	0,900
Tx	1,350

Para facilitar a comparação com o tempo máximo de vida definido pela Equação 1, podemos expressar a potência consumida nos outros estados em função de P_{oc}. Desta forma teremos de forma aproximada: $P_{Tx} = 1,8\ P_{oc}$,

TABELA VII

CONSUMO DE NÓS EM FUNÇÃO DE P_{oc}

Tamanho do Pacote (*bytes*)	Emissor em Comunicação Direta	Caso I	Caso II
160	1,40 P_{oc}	1,23 P_{oc}	1,27 P_{oc}
512	1,45 P_{oc}	1,24 P_{oc}	1,28 P_{oc}
800	1,49 P_{oc}	1,25 P_{oc}	1,29 P_{oc}
1000	1,51 P_{oc}	1,25 P_{oc}	1,29 P_{oc}
1500	1,55 P_{oc}	1,26 P_{oc}	1,30 P_{oc}

$P_{Rx} = 1,2\ P_{oc}$ e $P_d = 0,07\ P_{oc}$. P_d é a potência consumida no estado de dormência. Com base nestes valores, pode-se calcular P_m para as diversas situações mostradas anteriormente. A Tabela VII mostra a potência média consumida por nós (Equações 2,6 e 7 e Tabelas II e V) em comunicação direta e participando de cadeias em função de P_{oc}. Esta tabela não mostra os valores para os receptores em comunicação direta porque seu consumo é menor que o dos emissores.

Com base nestas análises, pode-se perceber que nós na condição de $ouvinte_{er}$ possuem um tempo de vida entre 13%, quando utilizados pacotes de 160 *bytes*, e 15%, utilizando pacotes de 1500 *bytes*, menor que nós ociosos. Além disto, nós participando de cadeias de encaminhamento (considerando o Caso II) apresentam um tempo de vida entre 0,79 T_{max} e 0,77 T_{max} para os tamanhos de pacotes utilizados nesta análise. Isto resulta num total de dados úteis transmitidos (normalizando $T_{max} = 1$) que varia entre 0,15Mb e 0,86Mb. A Figura 5 mostra o total normalizado de dados úteis transmitidos utilizando diferentes tamanhos de pacotes para os cenários de comunicação direta e encaminhamento de pacotes através de uma cadeia de nós.

Apesar do tempo de vida de nós participando de cadeias de encaminhamento ser maior que o tempo de vida de nós em comunicação direta, a comunicação direta permite a transmissão de, pelo menos, 3,3 vezes mais dados que a comunicação através de uma cadeia para a mesma energia inicial.

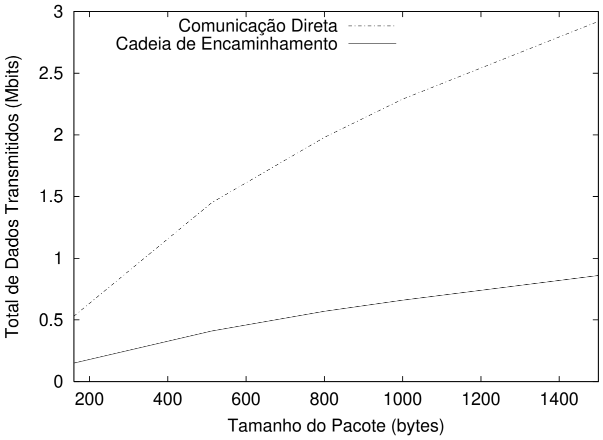


Fig. 5. Total normalizado de dados úteis transmitidos.

A. Controle da potência de transmissão

Alguns trabalhos buscam economizar energia através da redução da potência de transmissão utilizada [7] [10]. É claro que o raio de alcance da comunicação também diminui, sendo em alguns casos necessária a inclusão de mais saltos. Min e Chandrakasan analisam sob quais condições é interessante a utilização de múltiplos saltos a partir da redução da potência de transmissão [15]. É demonstrado que a utilização de dois saltos ao invés de um é vantajoso se a parcela que pode ser reduzida for maior que o custo fixo associado à comunicação. Nas interfaces sem fio, a parcela que pode ser reduzida é referente ao consumo do amplificador de potência RF. Esta parcela pode ser aproximada pela diferença entre P_{Tx} e P_{Rx} ou 0,6 P_{oc}, com os valores utilizados na presente análise. Assim, considerando que a interface estará sempre no estado ocioso na melhor das hipóteses, o custo fixo pode ser estimado pela diferença entre P_{Rx} e P_{oc} que é 0,2 P_{oc}. Nestas condições, para que seja vantajosa a utilização de dois saltos, a nova P_{Tx} deve ser menor que 1,3 P_{oc}. Quando pensamos na comunicação direta, é especialmente interessante a redução de P_{Tx} para o menor nível que permita a correta recepção da transmissão, já que todo o ganho é neste caso líquido. Nesta condição, o ganho limite para a potência consumida (considerando $P_{Tx_{lim}}$ = P_{Rx} - o que é um caso otimista já que considera que toda a diferença entre P_{Tx} e P_{Rx} é devido ao amplificador de RF) seria de 0,25 P_{oc} para emissores utilizando pacotes de 160 *bytes* e de 0,41 P_{oc} para emissores utilizando pacotes de 1500 *bytes*.

B. Mudança para o estado de dormência

Esta técnica, embora muito usada em sistemas com algum tipo de administração centralizada, possui viabilidade limitada em redes ad hoc. Sua complexidade é maior que a das técnicas anteriores, já que necessita de algum mecanismo de controle para a entrada e saída dos nós do estado de dormência [16]. Além disso, nós no estado de dormência devem confiar que seus vizinhos armazenarão pacotes endereçados a ele que venham eventualmente a ser enviados neste período.

Devido à grande diferença entre a potência consumida no estado ocioso e a potência consumida no estado de dormência, esta técnica apresenta o maior potencial de economia de energia. Sua melhor aplicação é em redes que ficam grandes períodos de tempo no estado ocioso. Nestes casos, o custo adicional do controle do mecanismo pode ser absorvido pelos ganhos.

Os pontos principais na utilização desta técnica são o mecanismo de controle, que não deve ser mais custoso do que a economia potencial, e a manutenção da capacidade da rede, que não deve ficar desconexa nem apresentar gargalos na nova topologia.

C. Balanceamento de fluxos

Esta técnica [5] [3] [6] não tem o objetivo real de reduzir o consumo de energia total, mas sim de distribuir este consumo pela rede, resguardando quando possível nós com recursos mais escassos. Como o emissor e o receptor de uma comunicação não podem ser mudados estes nós não se beneficiam desta técnica. Além disso, em comunicações diretas não há opção de caminho a ser utilizado, fazendo com que comunicações deste tipo não possam se beneficiar desta técnica. Os nós que podem se beneficiar desta técnica são os nós que participam da cadeia de encaminhamento dos pacotes.

Se considerarmos a existência de n caminhos separados (caminhos em que os nós de um caminho não sejam ouvintes do tráfego de algum dos outros caminhos), a potência média consumida pelo nó será

$$P_{m_{bal}} = P_{oc} + \frac{P_m - P_{oc}}{n} \quad , \tag{8}$$

onde P_m é a potência média consumida pelo nó no cenário considerado sem a utilização do balanceamento e $P_{m_{bal}}$ é a potência média consumida pelo nó no cenário considerado com a utilização do balanceamento.

No entanto, não existem caminhos totalmente separados, já que os nós das extremidades da cadeia de encaminhamento devem estar invariavelmente no alcance da fonte ou do destino da comunicação. Para estes nós, a potência média consumida quando não fizerem parte da cadeia de encaminhamento ativa não será P_{oc}. Eles serão ouvintes das transmissões que ocorram perto das extremidades da cadeia. Assim, a potência média consumida por estes nós (P_{ex}) será

$$P_{ex} = \frac{1}{4} \times P_{oc} + \frac{1}{4} \times P_{o_e} + \frac{1}{2} \times P_{o_{er}} \quad , \tag{9}$$

e sua potência média consumida resultante do balanceamento ($P_{m_{bal/ex}}$) será

$$P_{m_{bal/ex}} = P_{ex} + \frac{P_m - P_{ex}}{n} \quad . \tag{10}$$

Numa cadeia de nós transmitindo pacotes de 1500 *bytes*, por exemplo, considerando P_m para o Caso II, P_m seria $1,3P_{oc}$ e P_{ex} seria $1,12P_{oc}$. Nestas condições, o limite para o ganho em tempo de vida (Equação 3) obtido em função do número de cadeias de encaminhamento separadas ($n \to \infty$) é 30% para os nós no interior da cadeia e 16% para os nós nas extremidades. A evolução do balanceamento com o aumento do número de caminhos separados nestas condições pode ser vista na Figura 6.

Se for considerada a utilização de caminhos disjuntos, porém não separados, os nós integrantes das cadeias podem ser considerados como nós do tipo $ouvinte_{er}$ nos períodos em que sua cadeia estiver inativa. Desta forma, sua potência mínima consumida será igual a $P_{o_{er}}$. A potência média resultante do balanceamento ($P_{m_{bal/disj}}$) será

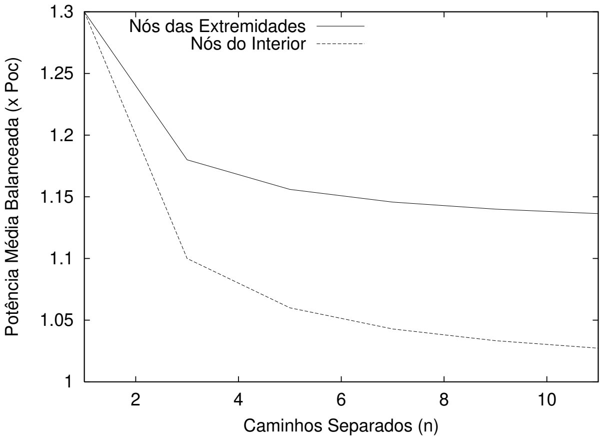
$$P_{m_{bal/disj}} = P_{o_{er}} + \frac{P_m - P_{o_{er}}}{n} \quad . \tag{11}$$

Se o tamanho dos pacotes transmitidos for de 1500 *bytes* como na análise anterior, o limite ($n \to \infty$) para o ganho em tempo de vida (Equação 3) dos nós é de 11%. A variação deste ganho em função do número de caminhos disjuntos pode ser vista na Figura 7.

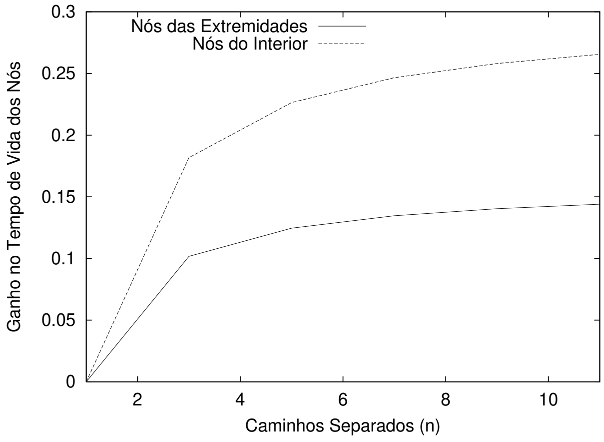
V. Conclusões

Este artigo analisou o consumo de energia dos nós integrantes de uma rede ad hoc levando em consideração as características do método de acesso e as interações entre os nós, necessárias ao encaminhamento de pacotes. Levando estes dois fatores em consideração, foi calculada a parcela do tempo durante a qual as interfaces de rede dos nós permanecem nos estados Tx, Rx e ocioso de modo a possibilitar o cálculo da potência média consumida. A potência média consumida permite estimar o tempo de vida de um nó.

Os resultados mostram que ao se utilizar pacotes maiores, as interfaces passam mais tempo no estado Tx, aumentando a potência média consumida e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de vida do nó. No entanto, a redução do tempo de vida é muito menor do que o ganho obtido em vazão

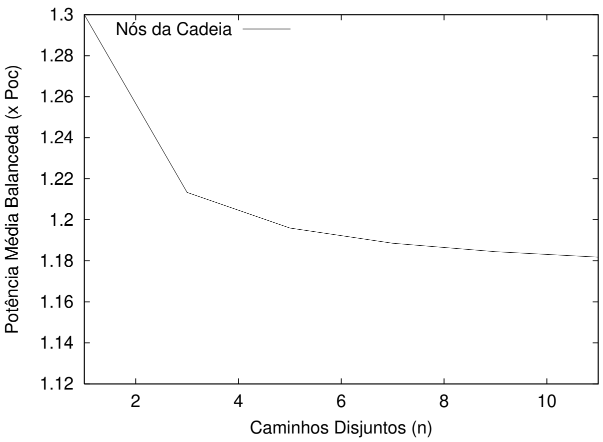


(a) Potência Média Consumida

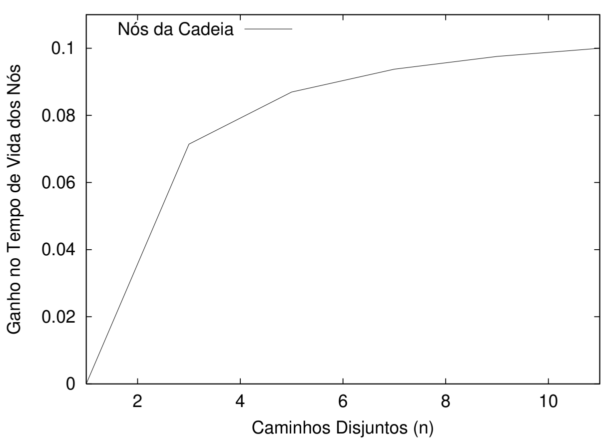


(b) Ganho no Tempo de Vida

Fig. 6. Efeitos do Número de Caminhos Separados.



(a) Potência Média Consumida



(b) Ganho no Tempo de Vida

Fig. 7. Efeitos do Número de Caminhos Disjuntos.

devido a utilização de pacotes maiores. Desta forma, pode-se concluir que uma maior eficiência em bits por joule é obtida com a utilização de pacotes maiores.

A análise também demonstra que um nó ouvinte, ou seja, um nó que esteja dentro do raio de cobertura de uma comunicação entre outros dois nós, tem o tempo de vida reduzido em até 15%.

São analisadas, ainda, técnicas de economia e balanceamento do consumo de energia. Para os modelos utilizados é mostrado que, em certas circunstâncias, o uso de múltiplos saltos e a redução da potência de transmissão podem ser vantajosos. Mostra-se, ainda, que o limite superior do ganho obtido para o tempo de vida dos nós com o balanceamento de fluxos em redes ad hoc é de 30% para nós no interior de cadeias de encaminhamento e de 16% para nós nas extremidades das cadeias. Por outro lado, se forem considerados caminhos disjuntos com alcances de rádio sobrepostos, o ganho máximo é limitado a 11%.

Referências

[1] S. Singh, M. Woo e C. S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks", in *ACM MOBICOM*, pp. 181–190, outubro 1998.

[2] J.-H. Chang e L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks", in *IEEE INFOCOM*, pp. 22–31, março 2000.

[3] W. Yu e J. Lee, "DSR-based Energy-aware routing protocols in ad-hoc networks". ICWN, junho 2002.

[4] D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu. e J. G. Jetcheva, "The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks", *Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-09.txt*, abril 2003.

[5] D. de O. Cunha, L. H. M. K. Costa e O. C. M. B. Duarte, "Um mecanismo de roteamento para o consumo balanceado de energia em redes móveis ad hoc", in *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pp. 747–760, maio 2003.

[6] W. Cho e S.-L. Kim, "A fully distributed routing algorithm for maximizing lifetime of a wireless ad hoc network", in *IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks*, 2002.

[7] P.-J. Wan, G. Calinescu, X. Li e O. Frieder, "Minimum-energy broadcast routing in static ad hoc wireless networks", in *IEEE INFOCOM*, pp. 1162–1171, março 2001.

[8] N. K. Singh, R. Simha e B. Narahari, "Energy balance in wireless networks using connection segmentation and range control", in *IEEE WCNC*, 2003.

[9] L. M. Feeney e M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment", in *IEEE INFOCOM*, março 2001.

[10] J. Monks, J.-P. Ebert, W.-M. W. Hwu e A. Wolisz, "Energy saving and capacity improvement potential of power control in multi-hop wireless networks", *Computer Networks*, vol. 3, no. 41, pp. 313–330, fevereiro 2003.

[11] IEEE, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications". IEEE Standard 802.11, 1999.

[12] IEEE, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Higher-speed physical layer extension in the 2.4 ghz band". IEEE Standard 802.11b, 1999.

[13] K. Fall e K. Varadhan, *The ns Manual*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, abril 2002. Available at http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html.

[14] J. Li, C. Blake, D. S. J. D. Couto, H. I. Lee e R. Morris, "Capacity of ad hoc wireless networks", in *Mobile Computing and Networking*, pp. 61–69, 2001.

[15] R. Min e A. Chandrakasan, "Top Five Myths about the Energy Consumption of Wireless Communication". ACM MOBICOM, setembro 2002. Poster.

[16] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan e R. Morris, "Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks", in *ACM MOBICOM*, julho 2001.