

Uma Análise das Técnicas de Conservação de Energia em Redes Ad Hoc

Daniel de O. Cunha, Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte

Resumo—Este artigo analisa os limites teóricos dos ganhos de diferentes técnicas de conservação de energia aplicadas a redes ad hoc IEEE 802.11. As técnicas analisadas são: o uso da energia restante no nó como métrica de roteamento, o controle da potência de transmissão utilizada e a transição para o estado de dormência. Os resultados mostram que a técnica de roteamento com energia como métrica pode proporcionar ganhos no tempo de vida dos nós de até 30%, e que o balanceamento da carga por múltiplos caminhos pode obter resultados expressivos, mesmo com a utilização de poucos caminhos alternativos. A análise da técnica de controle da potência de transmissão mostra que a utilização de dois saltos ao invés de um, quando possível, reduz em até 50% o custo total por pacote transmitido, pois o número de ouvintes da comunicação é menor. Além disso, é proposto um esquema baseado no protocolo PAMAS, que explora a transição dos nós para o estado de dormência, aumentando em até 48% o tempo de vida dos nós.

Palavras-Chave—Conservação de Energia, Comunicação sem Fio, Redes Ad Hoc.

Abstract—This paper analyses the theoretical limits of the gains achievable by different power-saving techniques in IEEE 802.11 ad hoc networks. The analyzed techniques are: energy-aware routing, transmission power control, and transition to sleeping state. The results show that the energy-aware routing technique can achieve a lifetime gain as large as 30%, and significant results are obtained even if a few alternative paths are used to balance the load. The transmission power control technique analysis shows that the use of two-hop instead of direct transmission, when possible, reduces the total packet-transmission cost up to 50%, due to the smaller number of overhearing nodes. Furthermore, our results show that the proposed PAMAS-like energy-saving scheme, which exploits the transition to sleeping state, increases the node lifetime up to 48%.

Keywords—Energy Conservation, Wireless Communication, Ad Hoc Networks.

I. INTRODUÇÃO

As redes ad hoc sem fio têm como vantagens sua flexibilidade, baixo custo de instalação e robustez. No entanto, por não utilizar nenhuma infra-estrutura previamente estabelecida e se basear na comunicação sem fio, estas redes apresentam alguns problemas como baixa banda passante e alta complexidade na construção de rotas. Dentre os principais problemas das redes ad hoc, a conservação de energia merece destaque, já que os nós sem fio possuem restrições de volume e peso, que limitam a capacidade de armazenamento de energia de suas baterias. Desta forma, a utilização eficiente da energia é de suma importância em redes ad hoc. Como consequência do progresso da tecnologia de circuitos integrados, as interfaces de rede sem fio passaram a ser, em muitos casos, o maior consumidor individual de energia dos dispositivos.

Daniel de O. Cunha, Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte, Grupo de Teleinformática e Automação, COPPE/EE – Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, E-mails: {doc,luish,otto}@gta.ufrj.br. Este trabalho foi realizado com recursos da CNPq, CAPES/PRODOC, COFECUB, FAPERJ e RNP/FINEP/FUNTEL.

O sucesso do padrão IEEE 802.11 nas redes locais sem fio estimulou a construção de redes ad hoc utilizando esta tecnologia. Com isto, grande parte da pesquisa realizada em redes ad hoc assume o uso de interfaces IEEE 802.11. Porém, estas interfaces operando em modo ad hoc possuem características específicas, que são frequentemente desconsideradas em trabalhos sobre conservação de energia. Medidas do consumo de energia de interfaces IEEE 802.11 demonstram que, quando operando em modo ad hoc, estas interfaces apresentam um consumo significativo mesmo quando no estado ocioso [1]. Isto é explicado pela necessidade dos nós escutarem constantemente o meio, de modo a detectar transmissões a eles direcionadas. Análises da distribuição do consumo pelas diferentes partes das interfaces IEEE 802.11 [2] mostram que o consumo do amplificador de potência, embora expressivo, não representa a maior parte do consumo destas interfaces. Não há na literatura nenhuma análise sobre as limitações das técnicas de conservação de energia que levem em consideração as características específicas de nós no modo ad hoc.

Neste trabalho, são analisados os ganhos potenciais para o tempo de vida dos nós ad hoc IEEE 802.11 a partir da utilização de diferentes técnicas de conservação de energia. As técnicas analisadas são: o uso da energia restante no nó como métrica de roteamento, o controle da potência de transmissão utilizada e a transição para o estado de dormência. Estas análises são feitas considerando-se quanto tempo os nós passam num dado estado de operação. Todas as análises são diretamente aplicáveis para redes móveis sempre que as hipóteses de cada análise forem respeitadas. Os ganhos potenciais aqui obtidos podem ser utilizados como referência no desenvolvimento de novos esquemas de economia de energia para redes ad hoc.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II discute o consumo de energia dos nós ad hoc levando em consideração as características do protocolo de acesso ao meio e o encaminhamento de pacotes. Na Seção III são obtidos os ganhos potenciais de diferentes técnicas de economia de energia. Por fim, a Seção IV conclui este trabalho.

II. ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA DE NÓS AD HOC

O protocolo de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11 e o processo de encaminhamento de pacotes no ambiente ad hoc exercem grande influência sobre o consumo de energia dos nós. Num trabalho anterior [3], foi analisado o consumo de nós ad hoc nos diferentes papéis de uma comunicação direta. Numa comunicação direta, um nó pode ser *emissor*, *receptor* ou *ouvinte*. Os nós ouvintes são nós que não participam diretamente na comunicação, mas estão no alcance do emissor e/ou do receptor, consumindo energia ao receber pacotes que não são direcionados para eles. 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 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. Esta análise levou em consideração as parcelas de tempo em que os nós permanecem num dado estado de operação para calcular a potência média consumida pelo nó naquele papel específico. Esta potência média é calculada da seguinte forma:

$$P_m = t_d \times P_d + t_{oc} \times P_{oc} + t_{Tx} \times P_{Tx} + t_{Rx} \times P_{Rx} \quad , \quad (1)$$

onde t_d , t_{oc} , t_{Tx} e t_{Rx} são as parcelas de tempo em que o nó fica nos estados dormência, ocioso, Tx e Rx, respectivamente, enquanto que P_d , P_{oc} , P_{Tx} e P_{Rx} são as potências consumidas nestes estados.

A partir desta potência média, o tempo de vida do nó, considerando apenas o consumo da interface sem fio, pode ser calculado como:

$$T_v = \frac{E}{P_m} \quad . \quad (2)$$

Além disso, a partir da Equação 2 pode-se perceber que para redes cujos nós não realizam transições para o estado de dormência, o maior tempo de vida possível é dado por:

$$T_{v_{oc}} = \frac{E}{P_{oc}} \quad , \quad (3)$$

quando o nó permanece todo o tempo no estado ocioso.

Com base nas potências calculadas para a situação de comunicação direta, pode-se calcular a potência média consumida por um nó que participa de uma cadeia de encaminhamento de pacotes, utilizada quando os nós fonte e destino não estão diretamente alcançáveis. A potência média de um nó participando de uma cadeia de encaminhamento ideal pode ser obtida da seguinte forma:

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

onde P_e , P_r e $P_{o_{er}}$ são as potências médias consumidas por nós emissores, receptores e *ouvintes_{er}*, respectivamente. A parcela do tempo que os nós participantes da cadeia passam em cada papel da comunicação direta foi definida com base em análises da capacidade de redes ad hoc [4], e no modelo de propagação utilizado nesta análise. Este modelo de propagação assume que se um nó pode transmitir um quadro corretamente até uma distância r , a transmissão deste pacote pode interferir com a recepção de outros pacotes até uma distância aproximadamente igual a $2r$. Admitiu-se, ainda, que nós localizados a uma distância d do transmissor tal que $r < d < 2r$, embora não possam receber corretamente o pacote, tentarão fazê-lo e consumirão energia nesta tentativa. Desta forma, este nó se torna um ouvinte da comunicação.

A Tabela I mostra aproximações dos valores obtidos em uma medida do consumo de interfaces IEEE 802.11 operando a 11Mbps no modo ad hoc [1], que podem ser utilizadas para obter as potências médias de nós nos diversos papéis.

A Fig. 1 mostra a potência média consumida por nós em diferentes situações em função do tamanho do pacote utilizado na comunicação. A variação do tamanho do pacote implica diretamente o tempo de transmissão do quadro de dados e conseqüentemente muda as frações de tempo que a interface

TABELA I
CONSUMO DE UMA INTERFACE IEEE 802.11B.

Estado	Potência (W)	Parcela de P_{oc}
Dormência	0,050	$0,07P_{oc}$
Ocioso	0,740	P_{oc}
Rx	0,900	$1,2P_{oc}$
Tx	1,350	$1,8P_{oc}$

passa em cada estado (Eq. 1). Estes valores foram obtidos através da análise descrita anteriormente.

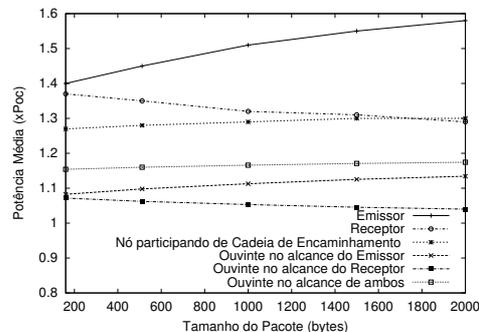


Fig. 1. Consumo dos nós em função de P_{oc} .

III. ANÁLISE DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

As técnicas de economia de energia para redes ad hoc podem ser divididas em três categorias. O primeiro tipo usa a energia restante nos nós como métrica de roteamento. Diferentes métricas [5] e mecanismos de roteamento podem ser definidos de modo a buscar rotas por nós com mais energia restante e, desta forma, proteger os nós com pouca energia do esgotamento. No entanto, esta técnica pode aumentar o consumo global de energia para entregar um pacote, já que a proteção de um nó com pouca energia restante pode resultar numa rota com mais saltos. Uma segunda abordagem é o controle da potência utilizada na transmissão de pacotes [2], [6]. O emprego desta técnica busca reduzir a potência de transmissão ao menor nível capaz de entregar o pacote com sucesso. A hipótese que apoia esta idéia é que, devido à grande atenuação dos sinais de RF, uma pequena diferença de distância entre o emissor e o receptor pode resultar numa grande economia de energia. Porém, em alguns casos, o uso desta técnica implica, como a anterior, o aumento do número de saltos de uma comunicação. A terceira técnica é a transição para o estado de mais baixo consumo, o estado de dormência [7], [8]. Com isto, os nós só precisariam sair deste estado de baixo consumo para transmitir ou receber pacotes. Contudo, a tarefa de sincronizar os nós de modo a que o emissor e o receptor estejam ativos no mesmo instante, viabilizando a transmissão de um pacote, não é simples [9]. Desta forma, esta técnica tende a aumentar a latência na rede. A seguir, cada técnica é investigada mais detalhadamente com base nas análises de consumo dos nós ad hoc descritas na Seção II. As análises das técnicas são feitas isoladamente, assumindo que nenhuma outra técnica de conservação de energia é utilizada simultaneamente.

A. Roteamento com Energia como Métrica

O principal objetivo desta técnica é resguardar nós com menos energia, utilizando, quando possível, nós com mais energia restante na construção das rotas. Este procedimento

tende a distribuir a energia consumida com o roteamento pela rede.

A análise realizada se aplica para casos em que o tráfego é balanceado igualmente por n caminhos disjuntos, assim, cada nó destes caminhos participa da cadeia de encaminhamento $\frac{1}{n}$ do tempo. Para encontrar o ganho limite desta técnica, são necessárias duas informações: o consumo do nó quando continuamente encaminhando pacotes, e o consumo do nó que nunca participa do encaminhamento de pacotes. O limite do ganho alcançável por esta técnica depende desta diferença. Neste trabalho, é proposto que a potência média consumida pelo nó após o balanceamento do consumo ($P_{m_{bal}}$) seja calculada como

$$P_{m_{bal}} = \frac{P_{ce}}{n} + \frac{(n-1)P_{c\bar{e}}}{n}, \quad (5)$$

onde P_{ce} é a potência consumida pelos nós que compõem a cadeia de encaminhamento ativa e $P_{c\bar{e}}$ é a potência consumida pelo nó quando este não está na cadeia de encaminhamento ativa e, portanto, não participa no roteamento dos pacotes. Esta fórmula traduz a participação do nó na cadeia $\frac{1}{n}$ do tempo.

O consumo de nós que participam continuamente do encaminhamento de pacotes, P_{ce} , pode ser visto na Fig. 1. Quanto ao consumo do nó quando este não participa de cadeias de encaminhamento, $P_{c\bar{e}}$, existem dois casos extremos, o de menor e o de maior consumo. O primeiro caso, correspondente ao de menor consumo, ocorre quando os nós não participam da cadeia de encaminhamento ativa e não ouvem nenhum tráfego na rede. Os nós estão no estado ocioso, consumindo P_{oc} . Este caso ocorre quando o caminho utilizado no lugar do caminho do qual o nó em questão faz parte é distante o suficiente para que o nó não esteja no raio de interferência da comunicação da cadeia ativa. O segundo caso, correspondente ao de maior consumo, ocorre quando o nó não está encaminhando pacotes, mas escuta o tráfego da cadeia ativa. O nó fica constantemente na condição de *ouvinte*, consumindo $P_{o_{er}}$ (potência consumida por um nó ouvindo tanto a comunicação do emissor quanto a comunicação do receptor - Fig. 1). Este caso ocorre quando o nó em questão está perto o bastante do caminho alternativo para ser ouvinte do tráfego nos dois sentidos da cadeia de encaminhamento ativa, pois os raios de interferência dos diferentes caminhos são sobrepostos.

Com base nestes valores de potência média consumida, pode-se obter o ganho máximo da técnica de roteamento com energia como métrica. A Fig. 2 mostra o limite ($\frac{1}{n} \rightarrow 0$) para o ganho desta técnica em função do tamanho do pacote utilizado para os dois casos discutidos.

A partir da análise da Fig. 2, pode-se observar que o tamanho de pacote utilizado tem pouca influência neste limite, já que ele só depende das relações entre P_{oc} , $P_{o_{er}}$ e P_{ce} . A potência P_{oc} é fixa, enquanto $P_{o_{er}}$ e P_m apresentam variações pequenas com o tamanho do pacote. Pode-se concluir, ainda, que a utilização de caminhos disjuntos pode aumentar o tempo de vida da rede em até 11%, enquanto que se os caminhos disjuntos são também “não interferentes” este ganho pode chegar a 30%, para pacotes de 2000 bytes.

Enquanto os valores mostrados na Fig. 2 são limites com $\frac{1}{n} \rightarrow 0$, a evolução deste ganho em função do número de

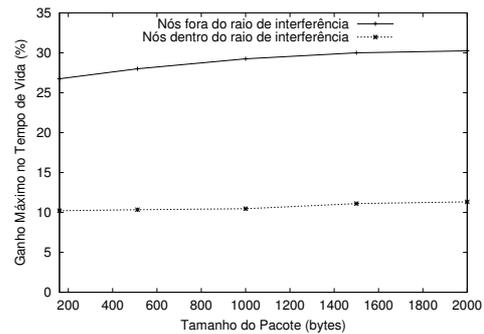


Fig. 2. Limite do ganho em função do tamanho do pacote.

caminhos (n) com pacotes de 2000 bytes, que possibilitam maior ganho limite dentre os tamanhos de pacote analisados, para as duas situações, é mostrada na Fig. 3.

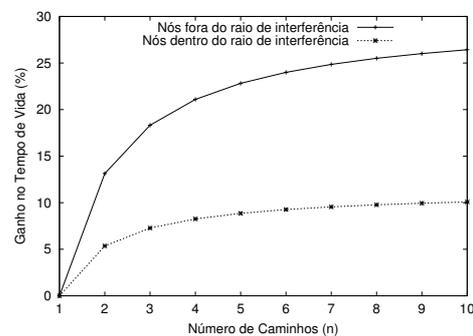


Fig. 3. Ganho em função de n com pacotes de 2000 bytes.

Como pode ser visto na Fig. 3, com $n = 4$ já é possível alcançar pelo menos 66% do ganho máximo em ambas as situações discutidas. Estes resultados confirmam a eficiência do uso do roteamento com energia como métrica na conservação de energia em redes ad hoc, já que ganhos significativos podem ser obtidos com a utilização de um número pequeno de caminhos alternativos.

Esta análise considera a utilização de cada cadeia $\frac{1}{n}$ do tempo. No entanto, esta análise pode ser generalizada para situações em que o tráfego não é balanceado igualmente. Assim, cada cadeia de encaminhamento é utilizada durante uma fração arbitrária do tempo. A análise deste caso mais geral deve ser feita individualmente para cada cadeia e, neste caso, a fração $\frac{1}{n}$ deixa de ter relação direta com o número de caminhos utilizados, representando a fração do tempo que um nó específico participa da cadeia de encaminhamento ativa.

B. Controle da Potência de Transmissão

A análise desta técnica será dividida em dois casos: a utilização de dois saltos ao invés da comunicação direta, e a redução da potência de transmissão até o menor nível capaz de possibilitar a comunicação direta. Existem certas condições sob as quais o uso de dois saltos com potência de transmissão reduzida é mais vantajoso do que a comunicação direta. Na análise realizada por Min e Chandrakasan [10] a energia consumida na transmissão de dados é modelada pela função $\alpha + \beta d^n$, onde α é a parcela independente e βd^n é a parcela dependente da distância de comunicação. O coeficiente n representa a atenuação do canal, tipicamente entre 2 e 6 [2].

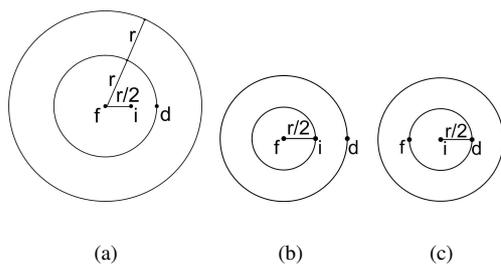


Fig. 4. Raios de transmissão e de interferência das comunicações.

O argumento de Min e Chandrakasan é que o uso de dois saltos é interessante quando a redução no termo dependente da distância é maior que o custo associado à inclusão de outro salto. A parcela variável βd^n está diretamente relacionada ao amplificador de potência.

As análises realizadas nesta parte do trabalho assumem que toda a diferença entre a potência consumida no estado Tx, P_{Tx} , e a potência consumida no estado Rx, P_{Rx} , se deve ao amplificador de potência. Desta forma, o limite inferior de P_{Tx} é P_{Rx} , e todo consumo acima deste valor é escalável com a distância como a parcela βd^n . Assim, para os valores adotados nesta análise, o consumo dependente da distância é igual a $0,6P_{oc}$, ou $P_{Tx} - P_{Rx}$, com $d = r$. Além disso, assumindo a ausência de transições para o estado de dormência, o consumo mínimo da interface é dado pelo consumo no estado ocioso, P_{oc} . Assim, o custo fixo associado a uma comunicação pode ser estimado pela diferença entre P_{Rx} e P_{oc} , que é $0,2P_{oc}$. Definindo T_{Tx} e T_{Rx} como os tempos que o Emissor passa respectivamente nos estados Tx e Rx no processo de transmissão de um pacote, as parcelas α e βd^n para $d = r$ nos casos do Emissor, Receptor e *ouvinte*_{er} são mostradas na Tabela II.

TABELA II

CUSTO ASSOCIADO À TRANSMISSÃO DE UM PACOTE.

Nó	α	βd^n
Emissor	$(T_{Tx} + T_{Rx}) 0,2P_{oc}$	$T_{Tx} \times 0,6P_{oc}$
Destino	$(T_{Tx} + T_{Rx}) 0,2P_{oc}$	$T_{Rx} \times 0,6P_{oc}$
<i>ouvinte</i> _{ed}	$(T_{Tx} + T_{Rx}) 0,2P_{oc}$	0

Sob estas condições e desconsiderando os nós ouvintes, o custo por pacote em comunicação direta é $2(T_{Tx} + T_{Rx})0,2P_{oc} + (T_{Tx} + T_{Rx})0,6P_{oc}$, enquanto que o custo da comunicação em dois saltos equivalentes, com $d = \frac{r}{2}$, é $4(T_{Tx} + T_{Rx})0,2P_{oc} + 2\beta(\frac{r}{2})^n$, onde $\beta(\frac{r}{2})^n$ é o custo de comunicação dependente da distância para um salto com distância $d = \frac{r}{2}$. Assim, o uso de dois saltos é vantajoso se a parcela $\beta(\frac{r}{2})^n$ resultante for menor que $(T_{Tx} + T_{Rx})0,1P_{oc}$, ou seja, o consumo resultante no estado Tx, P_{Tx} , for inferior a $1,3P_{oc}$. Isto indica que para canais com coeficiente de atenuação, n , maior que 2,58 o uso de dois saltos é vantajoso.

Contudo, os nós ouvintes podem aumentar significativamente o consumo de energia da rede como um todo para a transmissão de um pacote. A análise sobre o uso de dois saltos pode ser estendida considerando que para haver a possibilidade do uso de dois saltos devemos ter uma situação semelhante à mostrada na Fig. 4, onde um nó fonte, f , quer se comunicar com um nó destino, d , a uma distância r de f e existe um terceiro nó, i , a uma distância $\frac{r}{2}$ de f , que pode ser usado como

nó intermediário. Considerando apenas a presença destes três nós e o modelo de propagação onde o raio de interferência é duas vezes o raio de transmissão, o uso de dois saltos não é vantajoso pois os nós no raio de interferência serão ouvintes da comunicação. Na comunicação direta, f teria que usar um raio de transmissão igual a r e isto resultaria num raio de interferência de $2r$ (Fig. 4(a)). Assim, o nó d recebe o pacote e i é ouvinte da comunicação. Usando dois saltos, f usa um raio de transmissão $\frac{r}{2}$ para transmitir para i . O raio de transmissão $\frac{r}{2}$ implica num raio de interferência r , tornando d um ouvinte desta transmissão (Fig. 4(b)). O nó i pode, então, transmitir o pacote para d . Nesta segunda transmissão, f será um nó ouvinte (Fig. 4(c)). Considerando os nós ouvintes, o custo de comunicação direta de um pacote é $3(T_{Tx} + T_{Rx})0,2P_{oc} + (T_{Tx} + T_{Rx})0,6P_{oc}$, enquanto que o custo de dois saltos com $d = \frac{r}{2}$ é $6(T_{Tx} + T_{Rx})0,2P_{oc} + 2\beta(\frac{r}{2})^n$. Deve-se observar que os consumos nestes dois casos diferem pela parcela $\beta(\frac{r}{2})^n$. Como esta parcela só assume valores positivos, nesta situação, a comunicação em dois saltos mostrada na Fig. 4 sempre consumirá mais que a comunicação direta, independentemente do coeficiente de atenuação.

No entanto, a comunicação em dois saltos com raio de transmissão $\frac{r}{2}$ cobre uma área quatro vezes menor que a área coberta pela comunicação direta com raio r . Se assumirmos uma distribuição uniforme de nós numa rede ad hoc, cada transmissão no cenário de dois saltos terá $\frac{1}{4}$ dos ouvintes de uma comunicação direta. Considerando as duas transmissões do cenário de dois saltos, o número total de ouvintes neste cenário será metade do número de ouvintes do cenário de comunicação direta. Com isto, à medida que a densidade de nós ouvintes (N) por alcance de comunicação (dado por uma área de πr^2 unidades quadradas) aumenta, a razão entre a energia total consumida com o envio de um pacote de f para d no cenário de dois saltos e a energia total consumida no cenário de comunicação direta se aproxima de 0,5. Esta razão entre o consumo total de energia com o envio de um pacote no cenário com dois saltos e o consumo total no cenário com comunicação direta é definida como o consumo relativo de dois saltos. A Fig. 5 mostra o consumo relativo de dois saltos à medida que varia a densidade de nós ouvintes, e para diferentes coeficientes de atenuação, n . Como pode ser visto na Fig. 5, quando não há nenhum nó ouvinte próximo aos três nós envolvidos na comunicação, o consumo com dois saltos tende para o consumo da comunicação direta à medida que n aumenta, e a comunicação através de dois saltos pode resultar em economia significativa de energia mesmo para uma baixa densidade de nós ouvintes. Mesmo para $n = 2$, o consumo relativo de dois saltos é próximo de 0,7 para uma densidade de quatro nós ouvintes por alcance de comunicação.

Considerando agora apenas a possibilidade do uso de comunicação direta, a redução de P_{Tx} para o menor valor possível é especialmente atraente, já que reduz o consumo dos nós emissor e receptor e diminui o número de ouvintes da comunicação. A Fig. 6 mostra os limites dos ganhos em tempo de vida para o emissor e o receptor para diferentes tamanhos de pacote com $P_{Tx} \rightarrow P_{Rx}$ (e a distância entre emissor e receptor tendendo a zero). Neste caso, ao contrário do que ocorre com o roteamento com energia como métrica,

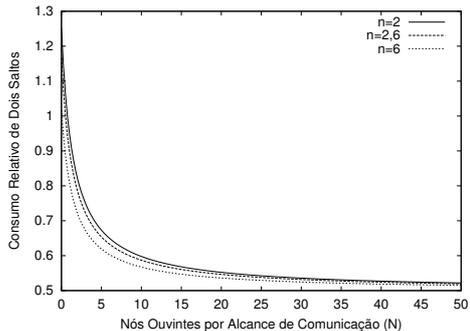


Fig. 5. Razão entre o consumo com dois saltos e em comunicação direta.

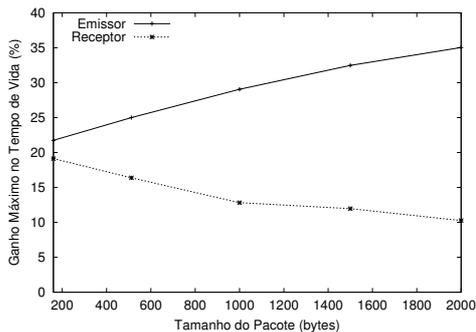


Fig. 6. Limite do ganho com o controle da potência de transmissão.

existe uma diferença significativa entre os ganhos em tempo de vida alcançáveis utilizando diferentes tamanhos de pacote. Isto ocorre porque à medida que o tamanho do pacote aumenta, a fração do tempo que o emissor fica no estado Tx aumenta, enquanto que a fração do tempo em que o receptor permanece neste estado diminui. É importante destacar que mesmo o receptor pode obter ganhos significativos com esta técnica, e que estes ganhos podem ser maiores que os obtidos pelo emissor quando utilizados pacotes muito pequenos.

C. Transição para o Estado de Dormência

A diferença significativa entre os consumos no estado ocioso e no estado de dormência do IEEE 802.11 torna a transição para o estado de dormência uma técnica interessante para conservar energia em redes ad hoc. Porém, devido à natureza distribuída destas redes, o uso desta técnica apresenta limitações. A ausência de uma infra-estrutura centralizada implica que um nó no estado de dormência deve depender de seus vizinhos armazenarem os pacotes endereçados a ele. A possibilidade do nó estar no estado de dormência quando um pacote estiver esperando para lhe ser enviado aumenta a latência da rede. Além disso, a transição entre estados possui um custo associado cuja influência aumenta se as transições forem frequentes.

O protocolo PAMAS [7] tem o objetivo de reduzir o consumo de energia sem aumentar a latência. No protocolo PAMAS, os nós entram no estado de dormência apenas quando não poderiam transmitir nem receber dados. Este é o caso quando um nó está sendo ouvido da comunicação entre outros dois nós. Esta abordagem reduz o período passado pelo nó no estado ocioso e reduz o custo associado à escuta de pacotes direcionados a outros nós.

O protocolo PAMAS utiliza um canal de sinalização separado para controlar a entrada dos nós em dormência. No

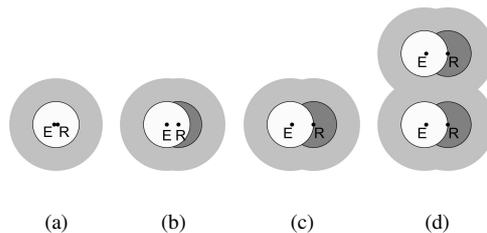


Fig. 7. Situação dos nós dependendo da distância d .

entanto, no presente trabalho é proposta a implementação de um esquema baseado no PAMAS sobre o IEEE 802.11.

No padrão IEEE 802.11, quando um nó recebe um quadro RTS ou CTS, o nó atualiza seu NAV (*Network Allocation Vector*) para realizar a escuta virtual do meio. Na prática, um nó que escuta uma negociação RTS/CTS não poderá transmitir quadros pelo período especificado no NAV. Como consequência, este nó pode ir para o estado de dormência por este período, sem prejudicar o desempenho da rede.

Como pode ser visto na Fig. 7, os nós no alcance do emissor, E , (área branca) podem fazer a transição logo após o fim da transmissão do RTS, enquanto que nós no alcance do receptor, R , (área cinza escura) só podem fazer a transição após a transmissão do CTS. A união destas duas áreas será chamada de Área de Economia de Energia (Área-EE). Os nós na área de interferência (área cinza claro) tanto do emissor quanto do receptor não fazem a transição para o estado de dormência, já que não podem receber corretamente os quadros RTS ou CTS e, portanto, não conhecem a duração da comunicação. Estes nós serão ouvintes da comunicação. Dependendo da distância, d , entre o emissor e o receptor, a quantidade de nós em cada uma das situações acima varia. As Figs. 7(a) e 7(c) mostram as situações limites onde esta distância, d , é 0 e r , respectivamente. A Fig. 7(b) mostra uma situação intermediária, a distância $d = 0,7r$ é o raio de um círculo com metade da área do círculo original de raio r .

A economia de energia aumenta à medida que a razão entre a Área-EE e a área de interferência aumenta. Por este motivo, serão consideradas Áreas-EE vizinhas o mais próximas possível umas das outras, ou seja, Áreas-EE com áreas de interferência sobrepostas (Fig. 7(d)). Assim, será admitido que cada Área-EE está associada a apenas metade da área de interferência ao seu redor (a outra metade é associada às Áreas-EE vizinhas). Suponha que P_{rts} e P_{cts} são as potências médias consumidas pelos nós que fazem transição após o RTS e após o CTS, respectivamente, e N é a densidade de nós por alcance de comunicação, dada por uma área de πr^2 unidades quadradas. Considerando a divisão igualitária do canal entre todos os nós e o custo de transições desprezível, é proposto o cálculo da potência média consumida pelos nós da rede ponderando-se o consumo de nós nos diferentes papéis de uma comunicação com base no número de nós em cada papel. O número de nós é obtido com base nas áreas envolvidas e na densidade de nós por alcance de comunicação. Desta forma, a potência média consumida para cada distância, d , mostrada na Fig. 7 será

$$P_{m_{d=0}} = \frac{P_e + P_r + (N-2)P_{rts} + 1,5NP_{o_{er}}}{2,5N} \quad (6)$$

$$P_{m_{d=0,7r}} = \frac{P_e + P_r + (N-2)P_{rts} + 0,44NP_{cts} + 1,82NP_{oer}}{3,26N}, e \quad (7)$$

$$P_{m_{d=r}} = \frac{P_e + P_r + (N-2)P_{rts} + 0,61NP_{cts} + 1,83NP_{oer}}{3,44N} \quad (8)$$

A Fig. 8 mostra o limite do ganho alcançável por esta técnica ($N \rightarrow \infty$) em função do tamanho de pacote utilizado. O ganho máximo pode ser alcançado com a distância limite $d = r$. Além disso, o ganho usando pacotes maiores é 50% maior que o ganho utilizando pacotes pequenos.

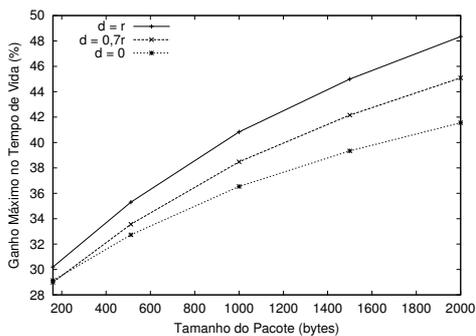


Fig. 8. Ganho em função do tamanho do pacote.

No entanto, o resultado mais importante, como a Fig. 9 mostra para o caso da utilização de pacotes de 2000 bytes, é que com uma densidade de nós por alcance de comunicação moderada, $N = 10$, mais que 70% do ganho limite pode ser alcançado.

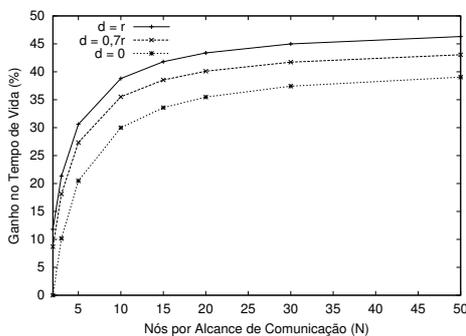


Fig. 9. Ganho em função da densidade da rede com pacotes de 2000 bytes.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo analisou os ganhos potenciais de três técnicas de economia de energia amplamente estudadas na literatura: o roteamento com energia como métrica, o controle da potência de transmissão e a transição para o estado de dormência. Além disso, um mecanismo específico de utilização do estado de dormência do IEEE 802.11 foi proposto. A análise das diferentes técnicas levou em conta características específicas de interfaces IEEE 802.11 operando no modo ad hoc.

A análise da técnica de roteamento com energia como métrica mostrou que o limite do ganho desta técnica não sofre grande influência do tamanho dos pacotes utilizados. Foi demonstrado, ainda, que os limites dos ganhos alcançáveis por esta técnica ficam entre 11%, se todos os caminhos utilizados no encaminhamento de pacotes são cobertos pelos raios de interferência uns dos outros e 30%, se a comunicação de um dado caminho não é percebida pelos nós participantes de

outro caminho. Além disso, mostrou-se que a utilização de apenas quatro caminhos disjuntos possibilita alcançar até 66% do ganho máximo da técnica.

A análise da técnica de controle da potência de transmissão foi dividida em dois casos: a utilização de dois saltos ao invés da comunicação direta, e a redução da potência de transmissão até o menor nível necessário. A utilização de dois saltos com alcance $\frac{r}{2}$ ao invés da comunicação direta com alcance r pode reduzir em até 50% a energia total consumida com a transmissão de um pacote. No caso da redução da potência, foi demonstrado que o ganho limite sofre grande influência do tamanho do pacote utilizado, e varia entre 21%, quando utilizados pacotes de 160 bytes e 35%, quando os pacotes são de 2000 bytes, para o emissor. Para os receptores, o comportamento do ganho em função do tamanho de pacote utilizado é inverso, ou seja, o ganho é maior com pacotes pequenos, sendo de 19% para pacotes de 160 bytes e de 10% para pacotes de 2000 bytes.

Por fim, este trabalho propôs um esquema baseado no protocolo PAMAS, que explora a transição para o estado de dormência. Foi, em seguida, demonstrado que seu desempenho é afetado pelo tamanho do pacote utilizado e pela distância entre o emissor e o receptor. Seu ganho limite é maior quando a distância entre estes nós é igual a r , sendo igual a 30% quando são utilizados pacotes de 160 bytes e 48% quando utilizados pacotes de 2000 bytes.

Com esta análise, foi possível determinar limites teóricos para os ganhos das principais técnicas de conservação de energia para redes ad hoc. Estes limites podem ser utilizados como referência na pesquisa de novos mecanismos de economia de energia em redes ad hoc.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] D. O. Cunha, L. H. M. K. Costa e O. C. M. B. Duarte, "Uma análise do consumo de energia em redes ad hoc", in *V Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel*, pp. 115–124, outubro 2003.
- [4] J. Li, C. Blake, D. S. J. D. Couto, H. I. Lee e R. Morris, "Capacity of ad hoc wireless networks", in *ACM MOBICOM*, pp. 61–69, julho 2001.
- [5] S. Singh, M. Woo e C. S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks", in *ACM MOBICOM*, pp. 181–190, outubro 1998.
- [6] S. Agarwal, S. V. Krishnamurthy, R. H. Katz e S. K. Dao, "Distributed power control in ad-hoc wireless networks", in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, outubro 2001.
- [7] S. Singh e C. Raghavendra, "PAMAS: Power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks", *ACM Computer Communication Review*, vol. 28, no. 3, pp. 5–26, julho 1998.
- [8] 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.
- [9] Y.-C. Tseng, C.-S. Hsu e T.-Y. Hsieh, "Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad hoc networks", in *IEEE INFOCOM*, junho 2002.
- [10] R. Min e A. Chandrakasan, "Top Five Myths about the Energy Consumption of Wireless Communication". *ACM MOBICOM*, setembro 2002. Poster.