

# Controle de Potência de Transmissão em Protocolos MAC para Redes de Sensores Sem Fio

Luiz H. A. Correia<sup>1,2</sup>, Daniel F. Macedo<sup>1</sup>, Daniel A. C. Silva<sup>1</sup>  
Aldri L. dos Santos<sup>1,3</sup>, Antonio A. F. Loureiro<sup>1</sup> e José Marcos S. Nogueira<sup>1</sup>

**Resumo**—Os protocolos de controle de acesso ao meio (MAC) gerenciam o consumo de energia dos elementos de rede durante a comunicação, que é o evento que mais consome energia em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). Uma das formas para redução do consumo de energia é o ajuste da potência de transmissão. Este artigo apresenta dois métodos de ajuste da potência de transmissão para protocolos MAC em RSSF. O primeiro emprega um ajuste dinâmico pela troca de informações entre os nós e o segundo calcula a potência mínima de transmissão em função da atenuação do sinal. Uma análise desses métodos usando experimentação e simulação também é apresentada.

**Palavras-Chave**—Controle de potência, redes de sensores sem fio, controle e acesso ao meio.

**Abstract**—Medium access control (MAC) protocols manage energy consumption on the network element during communication, which is the most energy-consuming event on Wireless Sensor Networks (WSNs). One method to mitigate energy consumption is to adjust transmission power. This paper proposes two approaches to adjust transmission power in WSNs. One approach employs dynamic adjustments by exchanging information among nodes, while the other calculates the ideal transmission power according to signal attenuation in the link.

**Keywords**—Transmission power control, wireless sensor networks, medium access control.

## I. INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são compostas de centenas ou milhares de nós sensores utilizados para monitorar eventos em uma determinada área. Os nós sensores, ou elementos de rede, possuem processador, memória, transceptor, sensores e bateria, estabelecendo um sistema autônomo. Outro componente do nó sensor é o software, que corresponde ao componente lógico do nó [1]. A interligação desses sistemas autônomos estabelece uma rede de sensores sem fio.

As dimensões reduzidas dos nós sensores e as limitações de cada aplicação, em conjunto com as restrições de hardware, invalidam o uso de protocolos desenvolvidos para as tradicionais redes ad hoc sem fio, que não possuem limitações tão severas de energia [2]. Nós sensores podem ser lançados em regiões inóspitas, impossibilitando a recarga das baterias. Mesmo em ambientes não agressivos, a troca das baterias é inviável devido ao grande número de nós existentes. Assim, um dos desafios em RSSF é a economia de energia.

Os protocolos MAC podem alterar parâmetros do rádio para diminuir o consumo de energia, ou até mesmo alterar a topologia da rede, utilizando mecanismos de controle do ciclo

de operação e da potência de transmissão do rádio. O controle de potência de transmissão provê uma maior economia de energia e utilização da largura de banda, devido ao menor número de colisões e ao estabelecimento de rotas de maior qualidade, susceptíveis a menor erros de transmissão [3], [4], [5]. Mesmo sendo um mecanismo eficiente para diminuir o consumo de energia e aumentar o reuso espacial do meio, o ajuste do controle de potência ainda não é explorado nos protocolos MAC existentes em RSSF. Isto ocorre devido à alta imprecisão e variabilidade das leituras de potência de sinal oferecidas pelos rádios empregados que, aliadas às restrições de processamento dos nós sensores, dificultam o cálculo confiável da potência mínima de transmissão.

Neste trabalho desenvolvemos dois métodos de gerência de controle de potência em RSSF, que podem ser empregados sobre qualquer protocolo MAC existente. Experimentos realizados na plataforma Mica Motes2 mostram a eficiência dos métodos de controle de potência considerando parâmetros como consumo de energia e vazão.

O trabalho está organizado da seguinte forma. A seção II apresenta os principais eventos consumidores de energia na comunicação. A seção III apresenta os trabalhos relacionados. Os métodos de controle de potência são apresentados na seção IV. A seção V apresenta o método de avaliação empregado para os protocolos avaliados. Os resultados obtidos são descritos na seção VI. Finalmente, na seção VII são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

## II. CONSUMO DE ENERGIA NA COMUNICAÇÃO

O transceptor é o maior consumidor de energia dentre os componentes empregados em nós sensores [2]. O consumo de energia do transceptor está relacionado principalmente aos eventos de comunicação e à organização da rede.

*Eventos de comunicação:* englobam eventos como escuta promíscua (um nó mantém o seu rádio ligado escutando uma transmissão que não é destinada para ele), escuta ociosa (o nó escuta o meio de transmissão mesmo quando não existe tráfego na rede), colisão e sincronização de transmissões. A escuta promíscua e a escuta ociosa são minimizadas desligando o rádio periodicamente (ciclos de operação), ou quando não há transmissões de interesse do nó. As colisões e a sincronização de transmissões são tratadas com o uso de técnicas de *backoff*, reserva do meio e troca de mensagens [6].

*Organização da rede:* está relacionada à topologia da rede e à forma de comunicação entre os nós (multi-saltos ou direta). A topologia pode ser modificada pela alteração da potência de transmissão. Com um alcance menor, a probabilidade de

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais. <sup>2</sup>Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Lavras. <sup>3</sup>Departamento de Computação, Universidade Federal do Ceará. E-mails: {lcorreia,damacedo,daniacs,aldri,loureiro,jmarcos}@dcc.ufmg.br.

terminais escondidos [3], [7] e o número de colisões na rede [8] são diminuídos, reduzindo o consumo de energia. A organização da rede também pode ser modificada por protocolos de controle de potência, que desligam nós sem acarretar prejuízo aos dados coletados sobre o ambiente monitorado e à conectividade da rede [9].

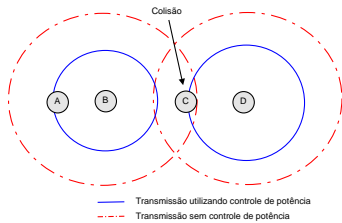


Fig. 1. Ajustando a potência de transmissão para evitar colisões.

Os protocolos MAC existentes tratam apenas dos eventos da comunicação, não se preocupando com a organização da rede. Entretanto, o uso de mecanismos de controle de potência com protocolos de controle de topologia podem ser empregados, pois estes utilizam métodos complementares de economia de energia. A figura 1 ilustra o ajuste de potência de transmissão. Nesta topologia, caso os nós *B* e *D* transmitam com a potência típica de transmissão (linha tracejada) ao mesmo tempo para *A* e *C*, respectivamente, ocorrerá colisão no nó *C*. Caso a potência seja reduzida ao valor ideal, a possibilidade de colisões é eliminada (linha sólida).

### III. TRABALHOS RELACIONADOS

Vários estudos caracterizaram a propagação do sinal em redes sem fio. Lal et al. [10] mostraram que é possível identificar a qualidade do sinal de uma forma eficiente em energia. Reijers et al. [11] mostraram a influência dos obstáculos e do ambiente na variação do sinal, e verificaram que a propagação é assimétrica e sofre de direcionalidades das antenas. Os autores identificaram que as amostras da potência de sinal feitas pelos circuitos de RSSI (Received Signal Strength Indicator) são altamente dependentes do ambiente, devendo ser utilizadas com cautela. Tendo em vista a irregularidade do meio de propagação, Zhou et al. [12] desenvolveram um novo modelo de propagação, mais fiel às medidas empíricas, com o objetivo de aperfeiçoar os modelos utilizados em simulação.

Inúmeros protocolos têm sido propostos para redes ad hoc com o intuito de reduzir o consumo de energia por meio do controle da potência de transmissão. O PCMA (*Power Controlled Multiple Access*) é um protocolo MAC que proporciona uma comunicação com raio mínimo de propagação, permitindo o reuso espacial [3]. Agarwal et al. propõem um esquema de controle de potência distribuído para redes *ad hoc* sem fio [7]. Pires et al. propõem um método para controle de potência superior ao anterior, adicionando uma tabela em cada nó, onde serão armazenados os valores das potências usadas nas suas últimas transmissões [13]. Para resolver problemas com enlaces assimétricos, causados pela variação de potência em redes móveis ad hoc, Jung & Vaidya propõem um esquema em que o quadro de dados é transmitido com potência variável [4].

Os métodos de controle de potência empregados nas redes ad hoc tradicionais não são adequados às RSSF. O cálculo da

potência mínima de transmissão é complexo, assim os protocolos optam por métodos de ciclo reduzido de operação [14], [15], [16]. Nossa solução para o controle de potência emprega medidas empíricas a fim de melhorar a operação da rede, diminuindo a contenção e permitindo uma economia de energia. Para isso utilizamos tabelas de potência, como as soluções anteriores, e adaptamos o cálculo de potência mínima de transmissão para as restrições dos nós sensores.

### IV. IDENTIFICANDO A POTÊNCIA MÍNIMA DE TRANSMISSÃO

O cálculo da potência mínima de transmissão é baseado em leituras do nível de sinal recebido (RSSI), na sensibilidade de recepção do rádio e na tensão da bateria, que podem ser definidos como:

- RSSI (*Received Signal Strength Indicator*): é o nível do sinal medido pelo transceptor em sua interface de entrada. O RSSI pode amostrar o nível ruído do meio e o nível de sinal recebido.
- Sensibilidade: é valor mínimo do sinal em que o rádio consegue detectar e decodificar os dados corretamente.
- Tensão da bateria: os valores de RSSI têm como referência a tensão da bateria. Assim, esta é necessária para converter as leituras de RSSI para valores de potência.

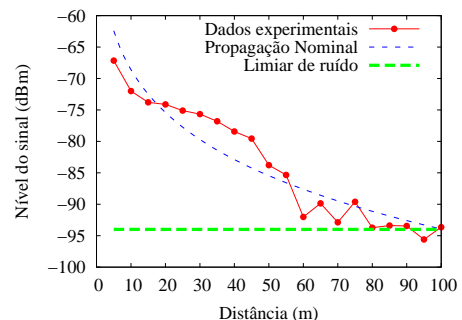


Fig. 2. Nível do sinal recebido, variando a distância entre os nós.

Em uma transmissão bem-sucedida, o nível de sinal recebido é superior ao nível de ruído do meio (nível do sinal amostrado quando não ocorrem transmissões). A qualidade da comunicação ainda depende da distância entre o emissor e receptor e a existência de fontes de reflexão, refração e dispersão do sinal. A figura 2 apresenta o comportamento do sinal à potência de 5 dBm, variando-se a distância do emissor ao receptor, na plataforma Mica Motes2. A curva “Propagação nominal” mostra o comportamento esperado, enquanto a curva “Dados experimentais” apresenta o comportamento empírico. Inferimos destas curvas que a potência do sinal recebido é inversamente proporcional à distância entre o emissor e o receptor. O ruído do meio, entretanto, permanece inalterado.

A propagação do sinal ocorre de maneiras distintas para ambientes internos e externos, existindo modelos de propagação específicos para cada ambiente [17], [18]. Apesar de fornecerem uma boa aproximação para o cálculo da potência mínima, esses modelos são complexos para serem executados em nós sensores. Desta forma, são necessários

métodos adequados às restrições encontradas em RSSF, que são apresentados a seguir.

A. Estimativa da potência mínima por interação entre nós

A potência mínima de transmissão pode ser calculada dinamicamente, pela interação entre os nós. Os transceptores fornecem um número fixo de potências que podem ser utilizadas. O rádio utilizado na plataforma Mica Motes2, por exemplo, disponibiliza 22 níveis diferentes de potência, separados de 1 dBm [19]. Podemos, desta forma, iterar sobre as potências possíveis, aumentando ou diminuindo a potência de transmissão quando necessário.

Um dos métodos propostos para a determinação da potência mínima de transmissão utiliza refinamentos sucessivos, e opera em duas fases, como mostrado na figura 3. Inicialmente, a potência de transmissão se encontra no valor máximo. O nó envia então uma mensagem para o seu vizinho. Caso ele responda a esta mensagem (ACK), a potência de transmissão é decrementada, e uma nova mensagem é enviada na nova potência de transmissão. Este processo termina quando o nó vizinho não responder a uma mensagem, determinando assim que a potência não pode mais ser decrementada, e identificando a potência mínima de transmissão. Após encontrar

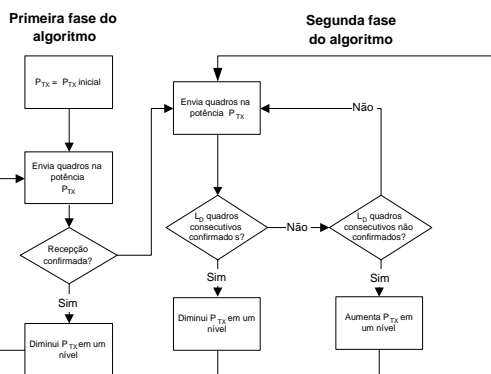


Fig. 3. Operação do algoritmo de interação.

a potência mínima de transmissão, o protocolo modifica o seu modo de operação, caracterizando uma nova fase do seu funcionamento. Nesta fase, o protocolo utiliza os quadros de confirmação de recebimento (ACK) para identificar variações no ruído. Caso o nó emissor não receba um número seguido de ACKs equivalente ao limiar de aumento da potência de transmissão ( $L_A$ ), a potência de transmissão é aumentada. Da mesma forma, caso o emissor receba corretamente um número de ACKs sucessivos igual ao limiar de decréscimo ( $L_D$ ), o protocolo diminui a potência de transmissão. Os valores de  $L_A$  e  $L_D$  devem ser ajustados de acordo com a periodicidade de envio de dados da aplicação, evitando assim que a reação às modificações no ruído do meio ocorram tarde demais em aplicações que enviam poucos dados, ou que sejam muito frequentes em aplicações que enviam muitos dados. Nesse método de controle de potência, as falhas de nós e de transmissão são tratadas da mesma forma, ou seja, quando  $L_A$  quadros de confirmação não são recebidas pela origem, a potência é aumentada. Mensagens enviadas em difusão (*broadcast*) não são tratadas pelo mecanismo, já que essas

não devem retornar quadros de confirmação.

B. Estimativa da potência mínima usando atenuação do sinal

A potência mínima de transmissão pode ser calculada em função da atenuação do sinal, devendo satisfazer as seguintes restrições [3]:

- A potência mínima de transmissão deve estar dentro dos limites de potência do rádio (equação 1):

$$P_{TXinferior} \leq P_{TXmin} \leq P_{TXsuperior} \quad (1)$$

- Para que um quadro seja recebido corretamente deve ter uma potência superior à atenuação imposta pelo meio. Essa atenuação é dada pela relação entre as potências dos sinais recebido e transmitido, dado pela equação 2:

$$G_{A \rightarrow B} = \frac{P_{RX}}{P_{TX}} \quad (2)$$

O valor da mínima potência necessária para a recepção de um quadro sem erros ( $RX_{desejada}$ ) é obtido empiricamente, e se relaciona com a potência mínima de transmissão pela equação 3:

$$P_{TXmin} \geq \frac{RX_{desejada}}{G_{A \rightarrow B}} \quad (3)$$

- O sinal recebido deve ser igual ou superior ao limite mínimo de separação entre o sinal ruído local (equação 4). Este limite é dado pela relação entre o nível de sinal, ruído e interferência do meio ( $SINR$ ), e o ruído percebido pelo nó  $B$  ( $N_B$ ).

$$P_{TXmin} \geq \frac{SINR_{desejado} \times N_B}{G_{A \rightarrow B}} \quad (4)$$

A estimativa de potência funciona como descrito a seguir. Periodicamente os nós amostram o nível de ruído do meio quando não ocorrem transmissões para determinar o ruído base ( $N_B$ ). Um nó  $A$ , ao enviar um quadro para  $B$ , informa a potência de transmissão no cabeçalho do quadro, sendo inicialmente utilizada uma potência padrão. O nó  $B$ , ao receber o quadro de  $A$ , amostra o nível do sinal recebido, e calcula a potência mínima de transmissão ( $P_{TXmin}$ ). Para satisfazer as restrições citadas anteriormente e garantir a recepção do sinal, é escolhido o maior valor obtido das equações 3 e 4. Assim, a potência mínima de transmissão será dada pela equação 5<sup>1</sup>:

$$P_{TXmin} = \max \left\{ \frac{RX_{desejada}}{G_{A \rightarrow B}}, \frac{SINR_{desejado} \times N_B}{G_{A \rightarrow B}} \right\} \quad (5)$$

Para o cálculo da potência, o nó sensor irá prover valores inteiros para as leituras de RSSI, assim devem ser utilizadas funções de conversão destes valores para medidas em dBm. Como os nós sensores não possuem unidades de ponto flutuante, este cálculo deve ser feito com variáveis inteiras, comprometendo a sua precisão. Além disto, os níveis de potência amostrados variam com o tempo e são pouco precisos, desta forma os dados devem ser tratados para que a potência calculada não sofra de flutuações e imprecisões. Finalmente, o nó sensor deve mapear a potência calculada para uma configuração de valores nos pinos do rádio que produzam a potência de transmissão esperada. O desafio deste método de estimativa de potência se encontra em definir um algoritmo eficiente em memória e processamento, que possa ser implementado utilizando somente as operações de hardware disponíveis, e que obtenha uma precisão e estabilidade aceitável da potência de transmissão.

<sup>1</sup>As relações usadas nas equações são expressas em mW.

### C. Armazenando a potência mínima de transmissão

Para evitar o cálculo da potência mínima de transmissão a cada envio de dados, o protocolo MAC armazena a potência mínima de transmissão para cada nó em uma tabela [13]. Ao enviar dados, o nó verifica se o destino possui uma entrada na tabela. Caso possua, é utilizada a potência armazenada. Caso contrário, o processo de cálculo de potência é executado, e o seu resultado é armazenado na tabela para uso futuro. Os campos armazenados na tabela são mostrados na tabela I. O nó armazena a configuração de bits fornecidos ao rádio para que a potência de transmissão seja a desejada (campo *PotTx*). O campo *NoReduce* indica se a potência mínima já foi alcançada, enquanto o campo *Addr* registra o endereço MAC do nó vizinho.

TABELA I  
CAMPOS DA TABELA DE POTÊNCIA E CONSUMO DE MEMÓRIA NA  
PLATAFORMA MICA MOTES2.

Campo	Tamanho	Descrição
<i>PotTx</i>	1 byte	Potência para transmissão ao vizinho
<i>NoReduce</i>	1 byte	Indica se a pot. está no valor mínimo
<i>Addr</i>	2 bytes	Endereço de rede do nó vizinho

## V. AVALIAÇÃO

Na avaliação da eficácia de mecanismos de controle de potência, realizamos experimentos na plataforma Mica Motes2, modificando o protocolo MAC padrão da plataforma, chamado B-MAC, para transmitir quadros na potência mínima de transmissão. Denominamos o protocolo B-MAC com o módulo de controle de potência de B-MAC-PC. A seguir descrevemos brevemente esses protocolos.

### A. Protocolo B-MAC

O protocolo B-MAC foi projetado para aplicações dirigidas a eventos, e tem como objetivo ser eficiente em energia, evitar colisões, possuir menor tamanho de código, e fornecer *interfaces* para a reconfiguração de parâmetros pela aplicação [14].

Por não reservar o canal antes da comunicação, o B-MAC procura diminuir a probabilidade de colisões utilizando uma heurística, conhecida como CCA (*Clear Channel Assessment*), que identifica transmissões no meio. Esta amostra periodicamente a força do sinal recebido quando não existe tráfego na rede, de modo a determinar o ruído base. Caso a força do sinal amostrada seja superior ao ruído base, o protocolo detecta uma transmissão em andamento.

Os períodos de *idle-listening* são minimizados utilizando um ciclo de operação. O nó periodicamente verifica se existe alguma transmissão em progresso. Para garantir a escuta dos quadros, o tamanho do preâmbulo é ajustado para que seu tempo de transmissão seja superior ao intervalo de tempo de repouso dos nós. Esse método de escuta assíncrona do canal é conhecido como LPL (*Low Power Listening*).

### B. Protocolo B-MAC-PC

O protocolo B-MAC-PC foi implementado sobre o protocolo B-MAC. Para economizar energia, as mensagens de ajuste de potência são enviadas em *piggy-back* nos quadros de

dados e de confirmação (ACK). Os quadros de dados do B-MAC foram acrescidos de um campo de um byte, indicando a potência de transmissão, e um campo de dois bytes que informa o endereço do emissor da mensagem. O quadro de confirmação foi aumentado em 5 bytes, adicionando os identificadores do emissor e receptor do ACK e a potência em que o ACK foi enviado.

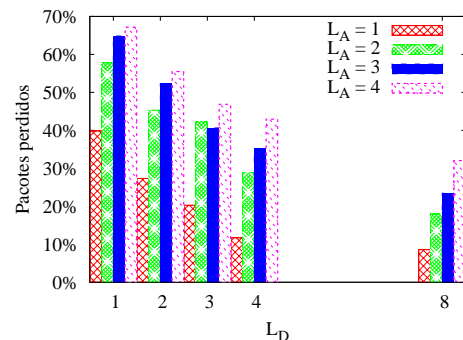


Fig. 4. Número de pacotes perdidos ao variarmos  $L_D$  e  $L_A$ .

Além de novos campos nos quadros transmitidos, o B-MAC-PC utiliza a tabela de vizinhos descrita na seção IV-C. Esta tabela possui espaço para até 20 vizinhos. O nó não necessariamente irá comunicar com todos os seus vizinhos, assim o tamanho da tabela pode ser diminuído de acordo com a necessidade da aplicação. No total, o módulo de controle de potência aumentou o tamanho de código do B-MAC de 7614 bytes para 8512 bytes, e o consumo de memória RAM do nó de 242 bytes para 461 bytes, sendo que a maior parte deste consumo é atribuída à tabela de vizinhos.

Os valores ideais dos limiares  $L_A$  e  $L_D$  foram determinados experimentalmente, de forma a minimizar a perda de quadros, como mostra a figura 4. Ao aumentarmos  $L_D$ , a perda de quadros é menor, pois um  $L_D$  alto propicia um comportamento conservador. O valor do limiar  $L_A$ , ao contrário, deve ser o menor possível, pois permite uma resposta rápida ao aumento de ruído do meio. As figuras 5 e 6 mostram o comportamento da potência em função de  $L_D$  e  $L_A$ , respectivamente. Vemos pela figura 5 que valores maiores de  $L_D$  mantém a potência mais estável, enquanto valores pequenos de  $L_A$  aumentam o consumo de energia, uma vez que os aumentos na potência de transmissão serão maiores e mais frequentes.

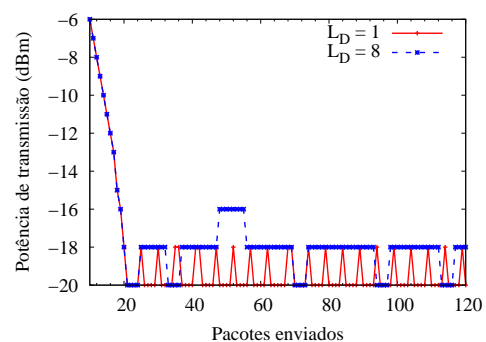


Fig. 5. Comportamento da potência de transmissão variando  $L_D$ .

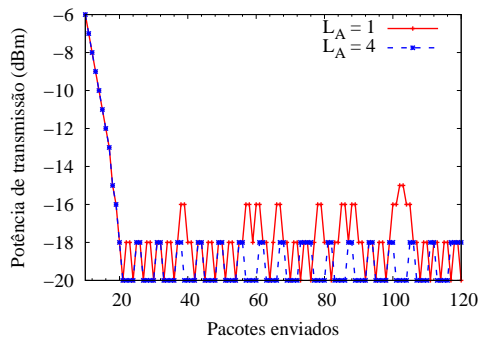


Fig. 6. Comportamento da potência de transmissão variando  $L_A$ .

### VI. RESULTADOS

A avaliação dos protocolos é composta de duas etapas. Inicialmente avaliamos o método iterativo para determinação da potência mínima de transmissão. Em seguida, utilizamos logs obtidos em experimentos para validar, via simulação, o uso da atenuação do sinal no cálculo de controle de potência.

#### A. Método iterativo

Para avaliar os benefícios do uso de controle de potência, medimos o comportamento dos protocolos B-MAC e B-MAC-PC de acordo com a distância entre os nós. Utilizamos nós sensores da arquitetura Mica Motes2, enviando 400 mensagens a uma taxa de duas mensagens por segundo. Os experimentos foram realizados em uma área externa livre de obstáculos. Somente dois nós, emissor e receptor, foram utilizados para evitar interferências de outros nós, criando um cenário controlado para os experimentos. Os nós foram elevados a uma altura de 71cm do solo para evitar fenômenos de reflexão e absorção. Verificamos o comportamento da comunicação para distâncias entre 5 e 20 metros. Utilizamos os valores de  $L_A = 1$  e  $L_D = 8$ , respectivamente. Para o protocolo B-MAC, utilizamos a potência de transmissão padrão dos nós sensores, que é 0 dBm. Os resultados apresentados são a média dos valores obtidos em cinco experimentos independentes, com intervalo de confiança de 95%.

A figura 7 mostra a taxa de entrega dos protocolos. Verificamos que a taxa de entrega do B-MAC-PC é inferior à obtida pelo B-MAC até distâncias de 15 metros, pois o B-MAC envia quadros a uma potência superior, diminuindo a probabilidade de erros de transmissão. Para 20m de espaçamento entre os nós, entretanto, a potência de transmissão do B-MAC é insuficiente, assim menos de 5% dos pacotes são entregues. O B-MAC-PC, por outro lado, manteve a sua taxa de entrega próxima de 95%. Isto ocorre porque a potência para comunicação nesta distância (4,5 dBm) foi superior à potência utilizada pelo B-MAC (0 dBm), como mostra a figura 8.

#### B. Potência mínima utilizando a atenuação

Para utilizar a atenuação do sinal no cálculo da potência mínima de transmissão, é necessário definir os valores dos parâmetros  $RX_{desejada}$  e  $SINR_{desejada}$ . Estes foram determinados experimentalmente variando-se as distâncias de transmissão entre transmissor e receptor até que o receptor não decodificasse os dados transmitidos. Os experimentos

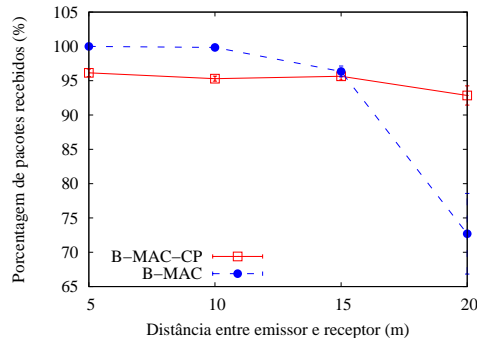


Fig. 7. Taxa de entrega média variando a distância entre os nós.

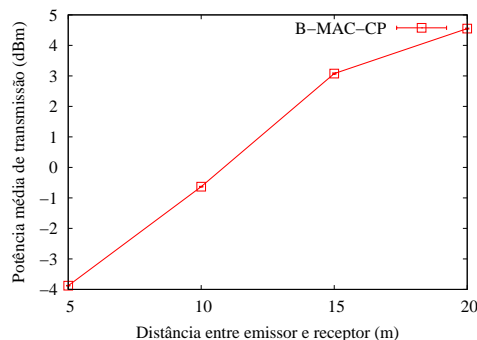


Fig. 8. Potência média de transmissão variando a distância entre os nós.

foram realizados em uma área externa livre de obstáculos, utilizando dois nós, elevados do solo à uma altura de 1,5m para evitar reflexão e absorção de sinais. A potência de transmissão empregada foi de 5 dBm. O valor de  $SINR_{desejada}$  foi determinado como 9,7 dBm para as condições descritas, enquanto  $RX_{desejada}$  foi estabelecido em -85 dBm.

Utilizamos os dados de ruído e propagação de sinais coletados na seção VI-A para validar o cálculo de potência pela atenuação do sinal. Devido à falta de unidades de ponto flutuante em nós sensores, os cálculos devem ser feitos utilizando somente operações em números inteiros. Inicialmente, simulamos o cálculo em um PC, para verificar se o uso de variáveis inteiras acarretaria em grande imprecisão. A tabela II mostra que é possível calcular a potência mínima de transmissão com um erro inferior a 1dBm, sendo que o erro médio é próximo do erro esperado no arredondamento de valores reais. A mediana do desvio mostra que 50% dos valores calculados terão erro abaixo de 0,2342 dBm.

Em seguida, verificamos o custo em processamento do cálculo em um simulador do processador empregado na arquitetura Mica Motes2. Verificamos que, para 20.480 execuções de um código compilado sem otimizações, o cálculo do controle de potência necessita de 834,17 ciclos de CPU em média, com um tempo médio de execução de 208,54µs. Não usamos um código otimizado pelo compilador pois este diminuía de forma irreal o tempo de execução do cálculo de controle de potência. Entretanto, um código otimizado pode diminuir o tempo de execução do algoritmo em um nó sensor real.

Determinado que o cálculo proposto é factível e preciso, utilizamos novamente os dados experimentais para verificar

TABELA II  
VALIDANDO A PRECISÃO DO CÁLCULO DE POTÊNCIA MÍNIMA.

Propriedade	Valor
Número de amostras	7929
Desvio médio	0,2887 dBm
Desvio máximo	0,7526 dBm
Desvio mínimo	0,0013 dBm
Primeiro quartil do desvio	0,1178 dBm
Mediana do desvio	0,2342 dBm

como o valor calculado se comporta no tempo. Como mostra a figura 9, a potência mínima de transmissão sofre de flutuações significativas. Desta forma, faz-se necessário o uso de filtros de sinal, para que o comportamento da curva seja suavizado. Dentre os filtros existentes na literatura, verificamos que o EWMA, além de ser passível de implementação em RSSF [20], possui resultados satisfatórios. A curva “Potência suavizada” mostra a potência suavizada por uma EWMA. Com a suavização, a potência de transmissão possui um comportamento mais estável, evitando que fontes efêmeras de interferência imponham um aumento desnecessário. O uso de EWMA, entretanto, insere um tempo inicial para que o valor da potência de transmissão se aproxime do valor mínimo.

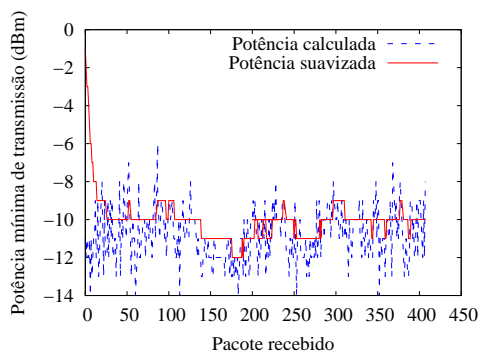


Fig. 9. Potência mínima de transmissão, com e sem de funções de suavização.

## VII. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A comunicação é a tarefa que mais consome energia em RSSF, desta forma os protocolos de controle e acesso ao meio em RSSF devem utilizar algoritmos que diminuam o consumo de energia do rádio. O controle da potência de transmissão é um destes mecanismos, mas este não tem sido utilizado em RSSF devido às limitações dos nós sensores, que dificultam a sua implementação.

Esse trabalho propõe e avalia, por experimentações e simulações, dois métodos para controle de potência de transmissão em RSSF. Estes métodos permitem a definição de novos protocolos, que atendem aos requisitos de controle de potência.

Como trabalhos futuros, pretendemos aperfeiçoar o método de cálculo de potência pela atenuação, avaliando experimentalmente um conjunto de filtros de sinal (filtros de passa alta, passa baixa, entre outros), tendo em vista a economia de energia e taxa de entrega da rede.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, processo 55.2111/2002-3. Alguns autores são bolsistas da CAPES.

## REFERÊNCIAS

- [1] Antonio Alfredo F. Loureiro and José Marcos S. Nogueira and Lynnier Beatrys Ruiz and Raquel Aparecida de Freitas Mini and Eduardo Freire Nakamura and Carlos Maurício Seródio Figueiredo. Redes de Sensores Sem Fio. In *21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 179 – 226, Maio 2003.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications*, 40(8):102–114, 2002.
- [3] Jeffrey Philip Monks. *Transmission Power Control for Enhancing the performance of wireless packet data networks*. Doctor of philosophy, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.
- [4] Eun-Sun Jung and Nitin H. Vaidya. A power control MAC protocol for ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 36–47. ACM Press, 2002.
- [5] Phill Karn. A New Channel Access Protocol for Packet Radio. In *American Radio Relay League – 9th Computer Networking Conference*, April 1990.
- [6] Luiz H. A. Correia, Daniel F. Macedo, Aldri L. dos Santos, José M. Nogueira, and Antonio A. F. Loureiro. A taxonomy for medium access control protocols in wireless sensor network. *Annales des télécommunications*, 2005. to appear.
- [7] S. Agarwal, S. Krishnamurthy, R. Katz, and S.K. Dao. Distributed power control in ad hoc wireless networks. In *Personal and Indoor Mobile Radio Communication – (PIMRC)*, volume 2, pages 59–66. IEEE, October 2001.
- [8] Sameer Tilak, Nael B. Abu-Ghazaleh, and Wendi Heinzelman. Infrastructure Trade-offs Sensor Networks. In ACM, editor, *First International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Electrical and Computer Engineering, 2002.
- [9] Mihaela Cardei and Jie Wu. Energy-Efficient Coverage Problems in Wireless Ad Hoc Sensor Networks. *Journal of Computer Communications on Sensor Networks*, 2004.
- [10] D. Lal, A. Manjeshwar, F. Herrmann, E. Uysal-Biyikoglu, and A. Keshavarzian. Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. In *IEEE GLOBECOM*, pages 172–187, December 2003.
- [11] Niels Reijers, Gertjan Halkes, and Koen Langendoen. Link layer measurements in sensor networks. In *1st IEEE Int. Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS '04)*, Oct 2004.
- [12] Gang Zhou, Tian He, Sudha Krishnamurthy, and John A. Stankovic. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 125–138. ACM Press, 2004.
- [13] Alexandre Andrade Pires, Marcelo Fernandes Fontes, and José Ferreira de Rezende. Proposta e avaliação de um esquema de controle de potência com memória em redes ad hoc 802.11. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Gramado, RS, Maio 2004.
- [14] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107. ACM Press, 2004.
- [15] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, pages 1567–1576, New York, NY, USA, June 2002. USC/Information Sciences Institute, IEEE.
- [16] Koen Langendoen and Gertjan Halkes. Energy-efficient medium access control. In R. Zurawski, editor, *Embedded Systems Handbook*. CRC Press, 2005.
- [17] H. T. Friis. A note on a simple transmission formula. *Proc. IRE*, 34, 1946.
- [18] William C. Lee. *Mobile Communications Engineering*. McGraw-Hill Professional, 1982.
- [19] CC 1000. Chipcon corporation. CC1000 low power FSK transceiver. <http://www.chipcon.com>, March 2005.
- [20] Alec Woo, Terence Tong, and David Culler. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 14–27. ACM Press, 2003.