

Ajustando a Potência de Transmissão em Protocolos MAC para Redes de Sensores Sem Fio

Luiz H. A. Correia^{1,2}, Daniel F. Macedo¹ Aldri L. dos Santos^{1,3},
Antonio A. F. Loureiro¹, José Marcos S. Nogueira¹

¹ Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte-MG, Brasil

² Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Lavras
Lavras-MG, Brasil

³ Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza-CE, Brasil

{lcorreia,damacedo,aldri,loureiro,jmarcos}@dcc.ufmg.br

Abstract. *Communication is usually the most energy-consuming event on Wireless Sensor Networks (WSNs). Thus, by reducing the transmission power required to send data packets using transmission power control techniques (TPC), it is possible to significantly reduce energy consumption and extend network lifetime. This paper enhances two existing TPC techniques in WSNs and performs experiments in indoor and outdoor deployments. These experiments evaluate such techniques under different distances among nodes, concurrent transmissions and node mobility. Results show that our enhancements enabled energy savings of up to 57% over fixed transmission power communication, and an improvement of 10% in delivery rates over existing TPC protocols.*

Resumo. *A comunicação é normalmente o evento que mais consome energia nas redes de sensores sem fio (RSSFs). As técnicas de controle da potência de transmissão (CPT) diminuem significativamente o consumo de energia e aumentam o tempo de vida da rede, reduzindo a potência do sinal por quadro transmitido. Este artigo melhora e estende duas técnicas de CPT em RSSFs e apresenta experimentos em ambientes internos e externos. Os experimentos avaliam as melhorias considerando diferentes distâncias entre os nós, transmissões simultâneas e mobilidade. Os resultados mostram que as melhorias introduzidas reduzem o consumo de energia em até 57% em relação ao uso de uma potência fixa de transmissão, e melhoram a taxa de entrega em 10% em relação aos protocolos de CPT existentes.*

1. Introdução

Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) são uma subclasse das tradicionais redes móveis ad hoc sem fio (MANETs) e consistem de um grande número de nós sensores, compostos por processador, memória, bateria, um ou mais sensores e um transceptor. Esses nós enviam os dados monitorados para um ponto de acesso (PA), que repassa os

dados para os usuários [Akyildiz et al. 2002]. Ao contrário das MANETs, em geral não é possível recarregar ou trocar as baterias devido à grande quantidade de nós ou ao emprego dos nós em áreas de desastres ou inóspitas. Dessa forma, energia é um fator crítico em RSSFs. Em geral, o rádio é o maior consumidor de energia nas RSSFs, assim uma comunicação eficiente em energia é crucial para aumentar o tempo de vida da rede. Este requisito impossibilita o uso dos protocolos desenvolvidos para MANETs, que foram projetados para operar em redes que possuem comparativamente mais recursos. Em RSSFs, os protocolos de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*) implementam diversas técnicas que reduzem o consumo de energia.

Os protocolos MAC reduzem o consumo de energia modificando os parâmetros do transceptor, tais como o estado de operação do rádio (*transmissão, repouso, ocioso e escuta*) e a potência de transmissão. Os protocolos coordenam os modos de transmissão e recepção para maximizar os períodos de inatividade do rádio, condição em que este pode ser completamente desligado [Langendoen and Halkes 2005]. Essa estratégia permite que o rádio permaneça em repouso por cerca de 99% do tempo com baixa penalidade em desempenho [Polastre et al. 2004]. Outra maneira de reduzir o consumo de energia na camada MAC é diminuir a energia consumida no envio dos dados, utilizando técnicas de controle da potência de transmissão (CPT), que determinam a menor potência de transmissão, onde um quadro pode ser recebido e ainda ser decodificado corretamente pelo receptor. O uso de protocolos que empregam técnicas de CPT ainda possibilita menor número de colisões e o estabelecimento de enlaces com baixa taxa de erros [Correia et al. 2005]. Assim, a transmissão em potências mais baixas permite aumentar o número de transmissões simultâneas e a vazão da rede [Gomez and Campbell 2004].

O controle da potência de transmissão tem sido amplamente empregado nas redes de celulares CDMA, sendo também pesquisado e avaliado em MANETs. Entretanto, essa técnica é incipiente em RSSFs. Por empregarem *hardware* de baixo custo, os transceptores possuem somente um canal de transmissão e não possuem *hardware* auxiliar que ajusta automaticamente os parâmetros de comunicação para reduzir o consumo de energia. Dessa forma, devem ser empregadas técnicas de CPT na camada MAC para identificar a menor potência de transmissão para cada quadro.

A primeira implementação das técnicas de CPT para RSSFs é apresentada em [Correia et al. 2005], onde duas técnicas de CPT foram propostas. A primeira técnica determina a potência de transmissão usando estimadores da qualidade do enlace, enquanto a segunda calcula a potência de transmissão usando equações para inferir a atenuação imposta pelo meio. Resultados experimentais, entretanto, mostraram que esses protocolos sofrem uma penalidade de quadros perdidos de 10 a 15% em comparação com protocolos com potência de transmissão fixa, devido às variações constantes das medidas obtidas.

Este trabalho estende os dois algoritmos propostos em [Correia et al. 2005], adicionando novas técnicas de CPT e melhorando os algoritmos propostos. Os resultados mostram que as modificações propostas reduzem o consumo de energia em 57% e melhoram a taxa de entrega em 10% para ambientes externos em relação às técnicas propostas anteriormente. Realizamos uma avaliação exaustiva dos protocolos CPT considerando um conjunto de parâmetros como mobilidade, transmissões simultâneas e a natureza do ambiente (externo e interno). Realizamos experimentos para identificar as limitações e os benefícios dos protocolos CPT. Mostramos que os protocolos CPT devem se adaptar

ao meio, pois ambientes internos são mais dinâmicos que ambientes externos. Também mostramos que os protocolos CPT aumentam a capacidade de transporte da rede e aumentam a vazão por diminuírem a quantidade de *back-offs* ao enviar quadros.

Este trabalho está organizado como descrito a seguir. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 fornece uma visão das técnicas originais de CPT e descreve as técnicas propostas. A Seção 4 apresenta a avaliação experimental e os resultados encontrados. Finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

A potência de recepção é dependente da propagação do sinal no meio de transmissão. Lal et al. [Lal et al. 2003] mostraram que é possível identificar a qualidade do enlace usando algoritmos eficientes em energia. Reijers et al. [Reijers et al. 2004] avaliaram a qualidade do enlace considerando obstáculos e mudanças no ambiente.

Gomez e Campbell analisaram o desempenho das técnicas CPT em redes sem fio multsaltos [Gomez and Campbell 2004]. Os autores mostraram que o ajuste do alcance de transmissão por enlace permite uma economia de energia de até 50% ao uso de um valor global para o alcance de transmissão. Dessa forma, ao invés de definir um alcance de transmissão global que mantém a rede conectada, as redes sem fio devem ajustar o alcance para cada enlace. A utilização das técnicas de CPT ainda mantém a capacidade de tráfego por nó constante quando adicionamos mais nós à rede. Ao utilizarmos uma potência fixa de transmissão, entretanto, a capacidade decresce ao adicionarmos mais nós à rede, pois os nós interferirão uns com os outros ao transmitirem.

Os protocolos de controle de acesso em MANETs têm empregado técnicas para redução do consumo de energia na comunicação. No protocolo PCMA (*Power Controlled Multiple Access*), a comunicação entre os nós é realizada no alcance mínimo de transmissão, usando um rádio de dois canais [Monks 2001]. Um canal é usado para enviar os quadros de dados e outro para enviar as mensagens de controle. O PCMA elimina a ocorrência de colisões, pois o canal de controle evita que os nós enviem dados quando o canal de dados está ocupado. Agarwal et al. apresentam um algoritmo distribuído de controle de potência para MANETs que diminui a interferência entre os nós da rede e reduz o consumo de energia, mas aumenta a latência [Agarwal et al. 2001]. Pires et al. estenderam esse algoritmo adicionando uma tabela em cada nó que armazena a potência de transmissão usada na transmissão anterior [Pires et al. 2005]. Jung & Vaidya propõem que a potência de transmissão seja incrementada periodicamente durante a transmissão dos quadros de dados, o que evitaria colisões e degradação da vazão da rede, reduzindo assim o consumo de energia [Jung and Vaidya 2002].

As técnicas de controle de CPT desenvolvidas para MANETs não podem ser empregadas diretamente nas RSSFs devido aos altos custos de processamento envolvidos nos cálculos da potência mínima de transmissão. Essas soluções assumem que as potências de transmissão e recepção são calculadas com precisão. Em nós sensores, entretanto, as leituras são imprecisas, e a não existência de uma unidade de ponto flutuante aumenta a imprecisão do cálculo da potência mínima. Dessa forma, foram desenvolvidos novos métodos CPT que consideram essas restrições. Experimentos realizados na arquitetura Mica2 [Crossbow Technology, Inc. 2004], uma plataforma comercial desenvolvida na Universidade de Berkeley e largamente empregada em pesquisas de RSSFs, mostraram que as técnicas de CPT são passíveis de implementação nas atuais redes de

sensores sem fio [Correia et al. 2005]. Entretanto, em algumas situações os protocolos desenvolvidos apresentam uma taxa de entrega de 10 a 15% inferior às obtidas por protocolos de potência de transmissão fixa. Neste artigo apresentamos melhorias aos métodos propostos anteriormente, considerando as limitações dos nós sensores.

3. Técnicas de CPT

Esta seção descreve brevemente os protocolos CPT apresentados em [Correia et al. 2005] e introduz as técnicas de CPT propostas. O primeiro protocolo, chamado de *Iterativo*, é baseado em estimadores da qualidade do enlace, enquanto o protocolo chamado de *Atenuação* calcula a potência mínima de transmissão de acordo com a atenuação imposta pelo meio.

3.1. Protocolo Iterativo

Este protocolo utiliza controle em malha fechada, assim os nós interagem dinamicamente para determinar a potência mínima de transmissão para cada quadro transmitido. A potência de transmissão é ajustada por valores discretos, sendo incrementada ou decrementada dentro dos limites nominais do rádio. O ajuste da potência de transmissão é realizado de modo a manter a qualidade do enlace estabelecido, sendo monitorada pela troca de quadros entre os nós.

O protocolo *Iterativo* opera em duas fases, como mostra a Figura 1. Na primeira fase, o protocolo busca identificar a potência mínima de transmissão. O nó envia um quadro na potência máxima de transmissão, e caso receba uma confirmação, a potência é decrementada. O novo nível de potência é utilizado na transmissão do próximo quadro. A potência é decrementada a cada quadro transmitido até que a confirmação não seja mais recebida. Neste momento a potência mínima de transmissão é identificada.

Para evitar que variações de ruído ou interferência no meio causem perda de quadros, o protocolo entra na sua segunda fase, que ajusta dinamicamente o nível da potência de transmissão (mostrado na Figura 1). Nessa fase, caso um número de quadros consecutivos seja entregue com sucesso (denominado L_D), o método iterativo decrementa a potência de transmissão em um nível ($P_{TX} = P_{TX} - 1$). Por outro lado, quando um número consecutivo de quadros é perdido (denominado L_I), o protocolo incrementa a potência de transmissão em um nível ($P_{TX} = P_{TX} + 1$).

O método *Iterativo* possui o inconveniente de apresentar flutuação da potência mínima de transmissão. Suponha que a potência de transmissão atual (P) é a potência mínima de transmissão em que a comunicação ainda é confiável. Se o canal é confiável, muitos quadros serão recebidos, assim após receber corretamente L_D quadros consecutivos, a potência de transmissão será decrementada em um nível, para P^- . Entretanto, com P^- a entrega de quadros não é tão eficiente quanto com P . Dessa forma, as condições para incrementar a potência de transmissão são atingidas rapidamente, e a potência de transmissão é incrementada novamente para P . Esta flutuação contínua da potência de transmissão causa perdas desnecessárias de quadros.

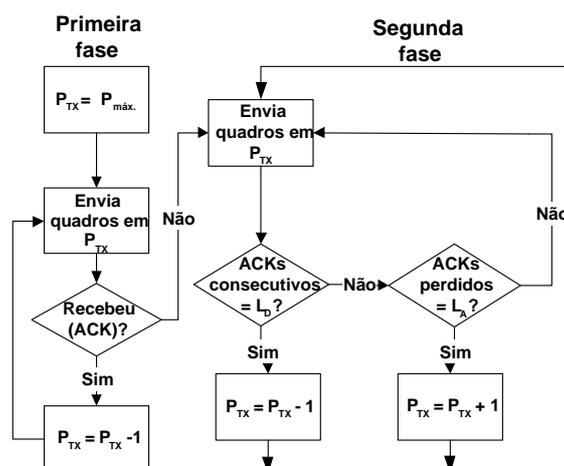


Figura 1. Operação do protocolo Iterativo

3.2. Protocolo de Atenuação

Neste protocolo, a potência de transmissão deve satisfazer as restrições abaixo:

- (i) a relação entre o sinal e o ruído deve garantir que o sinal seja decodificado corretamente no receptor (relação sinal ruído desejado ou $SNR_{desejado}$);
- (ii) a potência de transmissão deve compensar a atenuação do sinal no meio, de forma que o sinal ainda possa ser decodificado no receptor (chamado de ganho, dado por $G = \frac{P_{RX}}{P_{TX}}$);
- (iii) o quadro deve ser recebido em um nível de potência, acima de um limite mínimo ($RX_{desejada}$), que garanta sua decodificação correta ($P_{RX} \geq RX_{desejada}$);
- (iv) a potência mínima de transmissão deve estar dentro dos limites nominais do rádio ($P_{TX\ limite\ inferior} \leq P_{TXmin} \leq P_{TX\ limite\ superior}$).

O protocolo *Atenuação* 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 a potência máxima do rádio. O nó *B*, ao receber um quadro de *A*, amostra o nível do sinal recebido e calcula a potência mínima de transmissão (P_{TXmin}), dada pela equação 1 (valores expressos em mW), que garante que as restrições de (i) a (iv) sejam atendidas. O valor da potência mínima de transmissão é retornado para o nó *A* no cabeçalho do quadro de confirmação.

$$P_{TXmin} = \max \left\{ \frac{RX_{desejada}}{G_{A \rightarrow B}}, \frac{SNR_{desejado} \times N_B}{G_{A \rightarrow B}} \right\} \quad (1)$$

Como no método *Iterativo*, o método de *Atenuação* também sofre da flutuação da potência calculada, o que aumenta a perda de quadros. Isso ocorre porque os parâmetros de entrada (ruído médio, tensão da bateria e potência de recepção) estão sempre mudando devido às variações das condições do ambiente e da carga da bateria. Baseado nas limitações encontradas, propomos dois novos métodos de CPT, que são descritos a seguir.

3.3. Protocolo AEWMA

O primeiro método proposto, denominado *AEWMA* (Atenuação com filtro EWMA), estende o método de *Atenuação* e soluciona o problema de flutuação da potência de transmissão ao empregar uma função de amortização (EWMA - *Exponentially Weighted Moving Average*) no cálculo da potência mínima de transmissão. O EWMA é uma função de média móvel ponderada exponencial, em que os valores mais antigos são decrementados exponencialmente. Essa média é baseada em um fator α , onde $0 < \alpha < 1$. O valor de saída na iteração i (O_i) do *AEWMA*, é dado por $O_i = O_{i-1} \times (1 - \alpha) + v_i \times \alpha$, onde v é a seqüência de valores que desejamos para a média, e v_i é o valor dado pela equação 1. Essa função evita grandes flutuações como no método de *Atenuação*.

O cálculo do EWMA garante que, em uma dada iteração i , o $(i - k)$ -ésimo elemento da seqüência irá contribuir com peso $\alpha \times (1 - \alpha)^{i-k}$ para o valor atual. Outra propriedade dessa função é que, incrementando o valor de α , aumentamos a influência dos valores passados sobre os valores mais recentes no resultado final. Este cálculo é eficiente em termos de CPU e memória, e foi usado com sucesso no protocolo padrão de roteamento de nós sensores da plataforma Mica2 para avaliar a confiabilidade de enlaces [Woo et al. 2003]. O protocolo *AEWMA* funciona de maneira semelhante ao método de *Atenuação*, como descrito a seguir.

O nó emissor, que chamamos de A , ao transmitir para um nó B , envia no cabeçalho do quadro o valor da potência de transmissão. O receptor B amostra o nível de sinal do quadro recebido e do ruído local, e em seguida calcula a potência mínima de transmissão (equação 1). O nó A ao receber uma confirmação (ACK) de B , calcula a potência mínima de transmissão para o próximo quadro com base na potência mínima calculada por B e na potência de transmissão anterior, usando a função de amortização EWMA.

Considerando a saída do algoritmo de cálculo da potência de transmissão como um sinal discreto, o método de *Atenuação* implementa um controle Proporcional, enquanto o *AEWMA* implementa um controle Proporcional-Integral, que filtra o “ruído” introduzido pelas freqüentes variações dos parâmetros de entrada.

3.4. Protocolo Híbrido

O segundo método proposto, denominado *Híbrido*, incorpora a restrição (i) do método de *Atenuação* ao método *Iterativo*. Isso assegura que a potência de transmissão não decresce abaixo de um valor limite, garantindo a recepção correta dos quadros. O método *Híbrido* opera em duas fases, como no método *Iterativo*. Na primeira fase, o nó A envia um quadro para o nó B , inserindo em seu cabeçalho a potência de transmissão e em seguida aguarda uma confirmação (ACK) do nó B . O nó B , ao receber um quadro de A , amostra o nível do sinal recebido (P_{RX}). Se o sinal recebido é maior que o nível do ruído local do nó B e existe uma separação mínima entre o sinal e o ruído, que é a restrição (i) do método *Atenuação*, o nó B avisa o emissor pela mensagem de ACK que a potência de transmissão pode ser decrementada em um nível (linha 14 do Algoritmo 1). Caso a potência de recepção do sinal esteja abaixo desse limiar (ruído e separação desejada) e o quadro ainda é decodificado, o nó B informa que o emissor incremente a potência de transmissão em um nível (linha 10). Além disso, caso o ACK não seja recebido dentro de um período pré-determinado de tempo (*time-out*) o método entra na sua segunda fase.

A potência de transmissão é incrementada em um nível e o quadro é reenviado pelo nó A (linha 10).

Na segunda fase, o método *Híbrido* procura ajustar dinamicamente a potência de transmissão para refletir as mudanças ocorridas no meio. Para tanto, o nó A decrementa a potência de transmissão caso receba L_D quadros de confirmação consecutivos (linha 18). Por outro lado, caso o nó A perca L_I quadros de confirmação consecutivos ou a potência de recepção esteja abaixo do limiar apresentado anteriormente, a potência de transmissão será aumentada em um nível (linha 9). O valor de L_I foi definido como 1 para que o nó responda rapidamente a perdas de dados.

Algoritmo 1 Funcionamento do método Híbrido.

```

1: procedure Hybrid()
2:   phasei ← 1stphase ∨ i; // fase atual do nó i
3:   receivedi ← 0 ∨ i; // no. de acks consecutivos recebidos
4:   losti ← 0 ∨ i; // no. de quadros perdidos consecutivos
5:   txPoweri ← 0 ∨ i;
Require:   timeout(ACK, dst) ∨ PRX < Noise + SNRthreshold // quadros perdidos enviados para o destino
6:   phasedst ← 2ndphase;
7:   lostdst ← lostdst + 1;
8:   receiveddst ← 0;
9:   if lostdst = LI ∨ PRX < Noise + SNRthreshold then
10:    txPowerdst ← txPowerdst + 1;
11:    lostdst ← 0;
12:  end if
Require:   receive(ACK, dst) // quadro enviado com sucesso para o destino
13:  if phasedst = 1stphase then
14:    txPowerdst ← txPowerdst - 1;
15:  else
16:    receiveddst ← receiveddst + 1;
17:    lostdst ← 0;
18:    if receiveddst = LD then
19:      txPowerdst ← txPowerdst - 1;
20:      receiveddst ← 0;
21:    end if
22:  end if
23: end procedure

```

4. Avaliação dos Métodos de CPT

Esta seção avalia os novos métodos de CPT por meio de experimentos realizados em nós da plataforma Mica2. Para tal, usamos o protocolo MAC padrão dessa plataforma, conhecido como B-MAC [Polastre et al. 2004]. Os valores dos parâmetros usados nos métodos *Iterativo* e *Atenuação* são os mesmos empregados em [Correia et al. 2005]. Realizamos cinco experimentos, em ambientes internos e externos, para estudar a propagação do sinal em várias distâncias, testar os protocolos em caminhos multisaltos, avaliar o reuso espacial e o comportamento dos protocolos CPT frente a mobilidade dos nós.

4.1. Ambiente Externo

Os experimentos desenvolvidos no ambiente externo foram realizados em uma área livre de obstáculos, para evitar qualquer fonte externa de interferência. Foram usados dois nós Mica2, um receptor e outro emissor, separados de 5 em 5m até uma distância máxima de 20m, e elevados a 71cm do solo. O emissor transmitiu 4 quadros/segundo, num total de 1000 quadros. Comparamos os protocolos com CPT ao protocolo B-MAC, transmitindo nas potências de 5 e 0dBm. O protocolo *AEWMA* foi avaliado para dois

valores de α , 0,25 e 0,125. Esses valores foram escolhidos por apresentarem melhor desempenho em experimentos anteriores (não apresentados neste artigo).

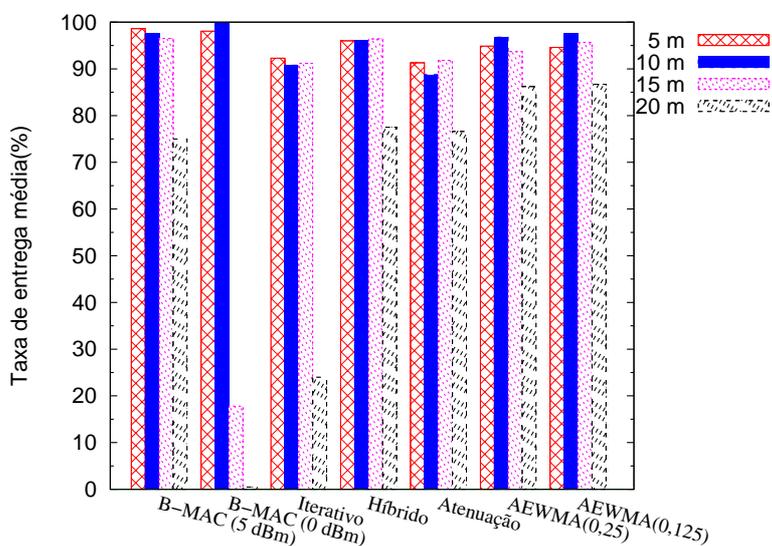


Figura 2. Taxa de entrega média no cenário externo

A Figura 2 apresenta a taxa de entrega média. O protocolo B-MAC transmitindo dados em 5dBm entrega 97% dos quadros para as distâncias de 5 a 15m. Para a distância de 20m, entretanto, seu desempenho diminuiu para 75%. O protocolo AEWMA entregou mais que 93% dos quadros para as distâncias de 5 a 15m. Para a distância de 20m, o protocolo AEWMA obteve desempenho melhor que os outros protocolos, com uma taxa de entrega de 86%. Neste cenário o método AEWMA usando $\alpha = 0,125$ é superior ao AEWMA com $\alpha = 0,25$. Por outro lado, o método de atenuação encontrou a menor taxa de entrega, ao contrário do método AEWMA, devido às constantes variações da potência de transmissão. Em 20m, por exemplo, o método AEWMA teve um desempenho 10% melhor que o método de Atenuação. Comparando os protocolos Iterativo e Híbrido, identificamos a vantagem de usar uma potência de transmissão limite. O método Híbrido obteve um desempenho 5% melhor que o Iterativo para as distâncias de 5 a 15m, entregando 96% dos quadros. Em 20m o método Híbrido mostrou o melhor resultado, entregando 77,5% dos quadros, maior que a taxa de entrega do protocolo B-MAC na potência máxima de transmissão (5dBm).

A Figura 3 mostra a potência de transmissão para todos os protocolos. O método Híbrido utiliza uma potência de transmissão cerca de 1dBm acima da potência do método Iterativo, dessa forma ele garante uma potência de recepção aceitável no receptor. A potência de transmissão para o protocolo AEWMA é menor ou igual ao do protocolo de Atenuação. Além disso, o desvio padrão no AEWMA é menor que o encontrado no método de Atenuação. Para distâncias superiores a 15m, todos os protocolos CPT usaram a potência de transmissão em 5dBm. Dessa forma, o baixo desempenho do B-MAC ocorre devido à sua potência de transmissão (0dBm), que é insuficiente para decodificar corretamente os quadros.

Convertendo o valor da potência de transmissão para a energia consumida pelo rádio, verificamos que o método AEWMA consumiu 57,7% e 43% menos que o B-

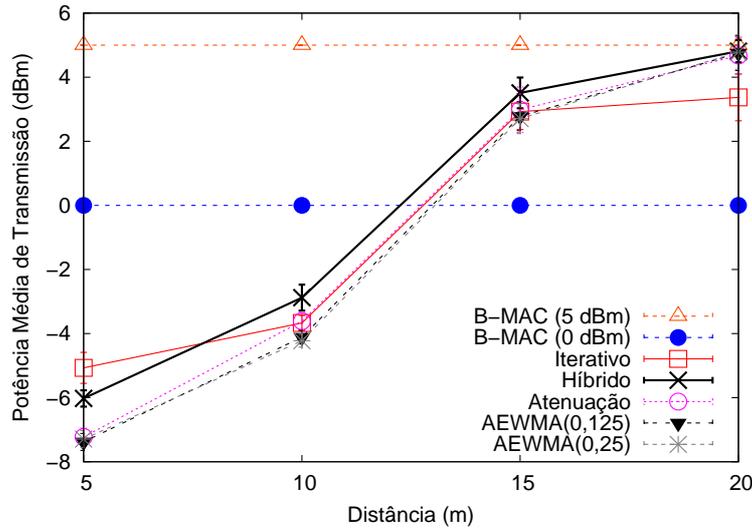


Figura 3. Potência média de transmissão em cenário externo

MAC (5dBm) para as distância de 5 e 10m respectivamente. Comparando o B-MAC utilizando 0dBm, o método *AEWMA* consumiu 35% e 13,5% menos energia para as mesmas distâncias. O método *Híbrido* consumiu aproximadamente 13% mais energia do que o método *AEWMA*, pois este foi mais conservador ao decrementar a potência de transmissão. Entre todos os protocolos avaliados, o mais eficiente em energia foi o *AEWMA*, que obteve a melhor relação de energia por quadro entregue, entregando mais quadros que o B-MAC e consumindo menos energia do que qualquer outro protocolo de CPT.

4.2. Ambiente Interno

Neste cenário, um nó emissor envia 7200 quadros para um receptor durante 30 minutos. Os dois nós foram distanciados de 3,9m dentro de um laboratório, com trânsito de pessoas interferindo no ambiente. O objetivo desse teste é observar o comportamento dos protocolos em um ambiente interno com várias fontes de interferência.

O primeiro conjunto de testes avaliou os parâmetros mais adequados para cada protocolo. O valor do parâmetro L_I (número de quadros perdidos consecutivos para incrementar a potência de transmissão) foi variado para o protocolo *Híbrido*, e o valor de α para o protocolo *AEWMA*. A primeira diferença observada em relação ao cenário externo é que o ambiente interno é mais propício a erros em rajadas, enquanto que no ambiente externo esses erros ocorrem ocasionalmente. Usando o protocolo *Híbrido* e comparando com o valor de L_I empregado no ambiente externo, ao definirmos $L_I = 2$, obtivemos uma taxa de entrega de 94% para o ambiente externo, com potência de transmissão média inferior em 14%, de 4,3dBm para 3,7dBm, e ao mesmo tempo diminuímos o desvio padrão (de 0,36dBm com $L_I = 1$, para 0,32dBm com $L_I = 2$).

Da mesma forma, usando o protocolo *AEWMA*, verificamos que valores maiores de α no ambiente interno produzem melhores resultados para a taxa de entrega, como mostrado na Figura 4. O valor 0,125 apresentou o melhor resultado para o ambiente externo, mas a resposta do algoritmo às variações das condições em um ambiente interno é muito lenta. Aumentando o valor de α para 0,25, a taxa de entrega subiu de 85,6% para 94,2%. O incremento de α causou um aumento insignificante na potência de transmissão média, de 2,12dBm para 2,17dBm. Quando α é ajustado para 0,5 o EWMA responde mais

rapidamente, mas o ganho de desempenho é marginal quando comparado a $\alpha = 0,25$. A taxa de entrega média aumentou para 94,8%, e ocorre um ligeiro aumento da potência de transmissão média para 2,20dBm. Ao mesmo tempo, o desvio padrão aumentou de 0,314dBm para 0,365dBm.

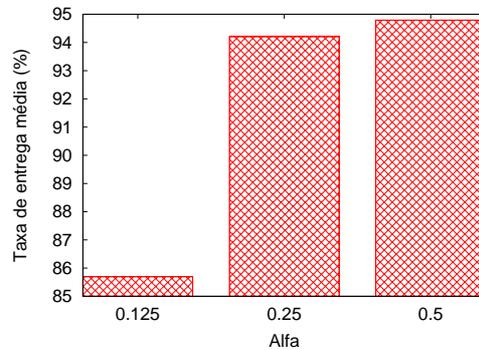


Figura 4. Taxa de entrega média do AEWMA variando α (ambiente interno).

O último protocolo avaliado foi o B-MAC transmitindo em 5dBm. Como ele usou uma potência de transmissão superior aos protocolos CPT, o B-MAC obteve uma taxa de entrega de 97,9%, superior em 4% aos melhores resultados encontrados pelos protocolos CPT. Esses resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Melhores resultados para cada protocolo em ambiente interno

Protocolo	Taxa de entrega	Potência de transmissão média
B-MAC	97,9%	5 dBm
AEWMA ($\alpha = 0,25$)	94,2%	(2,17 \pm 0,31) dBm
Híbrido ($L_I = 2$)	94,0%	(2,36 \pm 0,32) dBm

4.3. Transmissões Multisaltos

O ajuste da potência de transmissão propicia aos protocolos CPT reduzir o consumo de energia. Em redes densas, os nós tendem a estabelecer enlaces com a menor potência nominal de transmissão e com uma alta taxa de entrega. Para as redes esparsas, entretanto, os protocolos CPT tendem a usar a potência máxima de transmissão. Neste cenário utilizamos cinco nós alinhados, simulando um caminho multisaltos. Este experimento avaliou o comportamento dos protocolos CPT considerando transmissões simultâneas e a propagação de erros em um caminho multisaltos. No experimento, um dado nó na posição i , ao receber uma mensagem de outro nó na posição $i - 1$, repassa a mensagem para o nó na posição $i + 1$. Esse experimento foi realizado em ambiente externo, livre de obstáculos, semelhante ao utilizado na seção 4.1.

A Figura 5 apresenta os resultados para o cenário multisaltos. Nesse cenário observamos que os protocolos que empregam uma potência de transmissão fixa consomem mais energia do que os protocolos CPT. O protocolo *Híbrido* apresentou os melhores resultados, transmitindo nas potências de -16 a -13dBm. Em geral, o desempenho dos métodos *AEWMA* e *Híbrido* são muito próximos, por causa da pequena distância entre os nós. Entretanto, a potência de transmissão em cada enlace é ligeiramente diferente, seja

pelo posicionamento das antenas ou pelas características individuais do hardware de cada nó. A taxa de entrega para todos os protocolos (não mostrado) foi de 98%, pois a proximidade dos nós permite que, mesmo em potências baixas, sejam estabelecidos enlaces de boa qualidade.

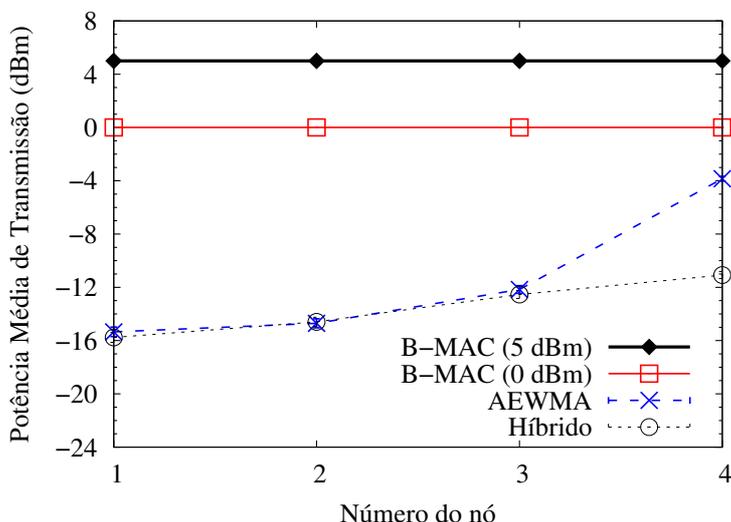


Figura 5. Potência média de transmissão em experimento multisaltos

4.4. Reuso Espacial

O próximo experimento apresenta um estudo do reuso espacial para as técnicas de CPT. Quatro nós foram colocados diretamente no chão em um corredor sem obstáculos, como apresentado na Figura 6 (as setas representam a transmissão de dados), transmitindo a uma taxa de 12,5 quadros/segundo. Como o alcance de transmissão diminui significativamente quando os nós são colocados no chão, posicionamos os nós próximos uns dos outros (60cm).

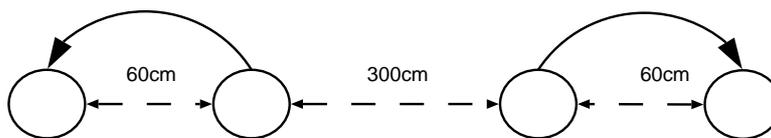


Figura 6. Experimento: reuso do meio

A Figura 7 mostra a probabilidade de perda de quadros, a probabilidade de um nó encontrar o meio ocupado e a potência de transmissão para cada protocolo. A potência de transmissão influencia o número de vezes que o meio é encontrado ocupado, como podemos observar ao comparar o protocolo B-MAC nas potências de 5 e 0dBm. Para essa configuração, o B-MAC em 5dBm tem 10% de chance de atrasar o envio de seus dados (*back-off*) em função da transmissão de outro nó, ou seja, este encontra o meio ocupado ao tentar transmitir seus dados 10% das vezes. Quando o B-MAC transmite em 0dBm, a probabilidade de encontrar o meio ocupado é de apenas 5%. Dessa forma, ao reduzir a potência de transmissão, os protocolos CSMA/CA têm menor probabilidade de atrasarem suas transmissões usando intervalos de *back-off*. Para os métodos AEWMA e Híbrido, a probabilidade de atraso de transmissão é reduzida para 3,9% e 2,3% respectivamente.

Dessa forma, reduzir a potência de transmissão decreta a probabilidade de *back-offs* e melhora a vazão da rede.

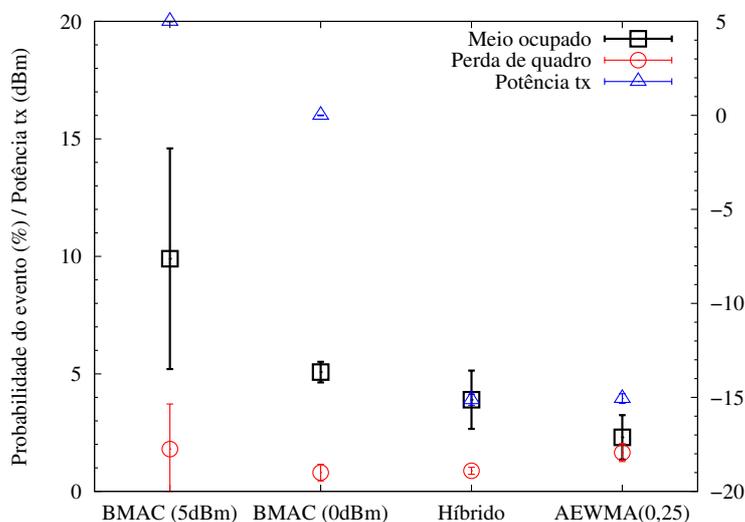


Figura 7. Resultados do experimento de reuso do meio

O percentual de quadros perdidos, entretanto, não é alterado quando existem transmissões simultâneas. Verificamos empiricamente que a quantidade de quadros perdidos para todos os protocolos é idêntico à quantidade de quadros perdidos sem transmissões simultâneas, quando comparamos os resultados para o ambiente interno (Seção 4.2). Isso ocorre devido ao efeito de captura, conforme observado para os nós da plataforma Mica2 [Whitehouse et al. 2005]. O efeito da captura ocorre quando dois nós transmitem simultaneamente, e a potência de recepção de ambos os sinais no receptor é diferente. Quando isso acontece, o receptor decodifica o sinal mais forte, ignorando o sinal mais fraco. Desta forma, as colisões ocorrem somente quando a potência de recepção dos dois sinais é muito próxima.

4.5. Mobilidade dos Nós

O último experimento avaliou como os protocolos se comportam com a movimentação dos nós. Neste cenário variamos a distância entre dois nós de 1 a 15m e os movimentamos com uma velocidade uniforme de 0,5m/s. Nossos testes foram realizados em uma única velocidade devido às limitações dos nossos experimentos. A movimentação foi realizada em duas etapas. Na primeira, um nó se aproxima, enquanto que na outra etapa os nós se afastam. Cada experimento foi repetido quatro vezes, sendo realizados em ambientes externo e interno e livres de obstáculos. Os resultados apresentados são a média das repetições dos experimentos, e mostram o respectivo desvio padrão.

As Figuras 8 e 9 apresentam as taxas de entrega, em cada momento, para as duas etapas da movimentação. Além disso, as figuras também apresentam a combinação das duas etapas de movimentação para os ambientes externo e interno respectivamente. Para nossa surpresa, os métodos *AEWMA* e *Híbrido* apresentaram 5% de quadros perdidos para os experimentos em ambiente externo, resultados muito similares aos experimentos com nós estáticos. Apesar de não observarmos variações nas taxas de entrega, acreditamos que em velocidades mais altas as perdas de quadros sejam significativas, pois os dois

protocolos necessitam de um certo período de tempo para responder a essas variações. Futuramente planejamos avaliar experimentos com maiores velocidades de deslocamento.

Para o ambiente interno, como mostra a Figura 9, todos os protocolos mostraram uma redução da taxa de entrega. A diferença entre os protocolos B-MAC e os CPT aumenta cerca de 10% e 20% para os métodos *AEWMA* e *Híbrido* respectivamente. Outra diferença significativa para o ambiente interno é que a taxa de entrega média é maior quando o nó se aproxima do nó fixo do que quando ele se afasta. Para diminuir a degradação no desempenho na presença de nós móveis, os protocolos CPT deveriam responder mais rapidamente ao movimento, usando uma amostragem mais freqüente ou aumentando o valor limite da relação do sinal-ruído ($SNR_{desejado}$).

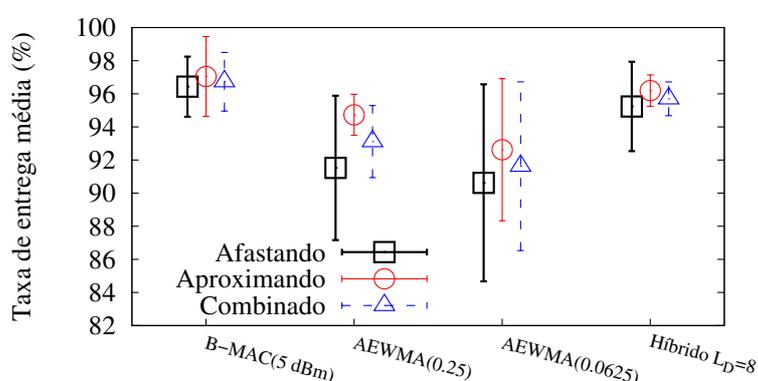


Figura 8. Taxa de entrega média para o nó móvel (ambiente externo).

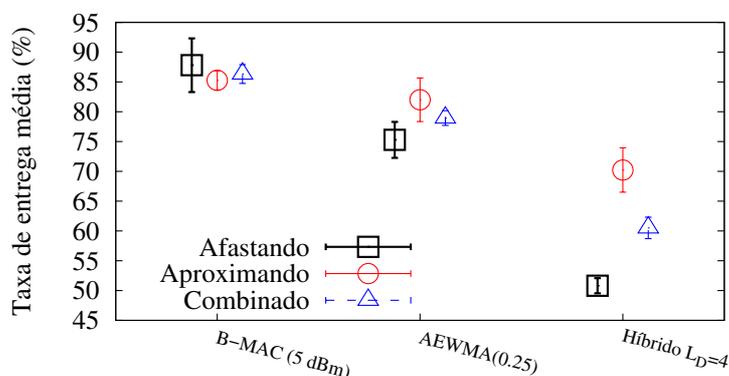


Figura 9. Taxa de entrega média para o nó móvel (ambiente interno).

A potência de transmissão é mostrada na Figura 10 para o ambiente externo e na Figura 11 para o ambiente interno. Nestas figuras traçamos a potência de transmissão para cada segundo do experimento. Antes da linha tracejada os nós estão se afastando, e após a linha tracejada, os nós estão se aproximando. O método *AEWMA* enviou quadros com menor potência de transmissão do que no método *Híbrido*, entretanto suas variações foram mais pronunciadas. Diferentemente do método *AEWMA*, o método *Híbrido* varia quando o nó está aproximando ou distanciando do receptor. Isso ocorreu por causa do valor alto de L_D (definido neste experimento como 8) quando comparado ao L_I (definido neste experimento como 2), assim o protocolo reduz a potência de transmissão lentamente, ao passo que os incrementos da potência ocorrem mais rapidamente. Dessa

forma, os valores dos parâmetros usados nesse experimento, também utilizados nas redes estáticas, não são apropriados para cenários de mobilidade. Comparado ao ambiente externo, a potência de transmissão no ambiente interno é mais dinâmica, como observado pelo alto valor do desvio padrão. Para esse experimento, entretanto, a diferença entre os métodos CPT é menos pronunciada.

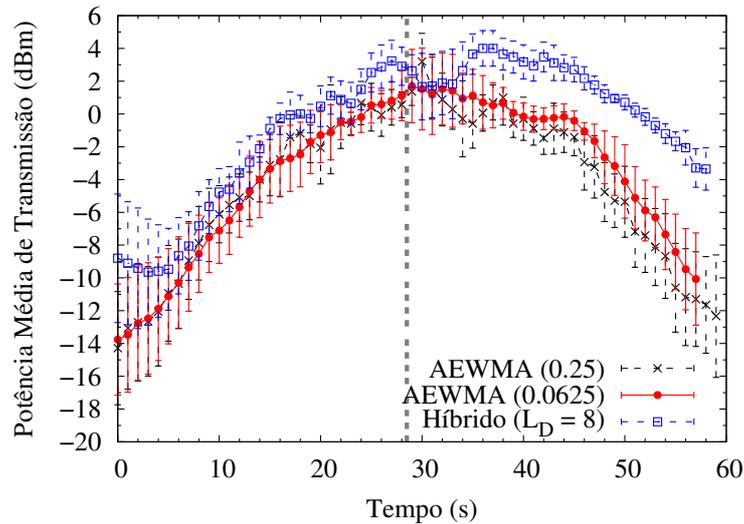


Figura 10. Potência média de transmissão para o nó móvel (ambiente externo).

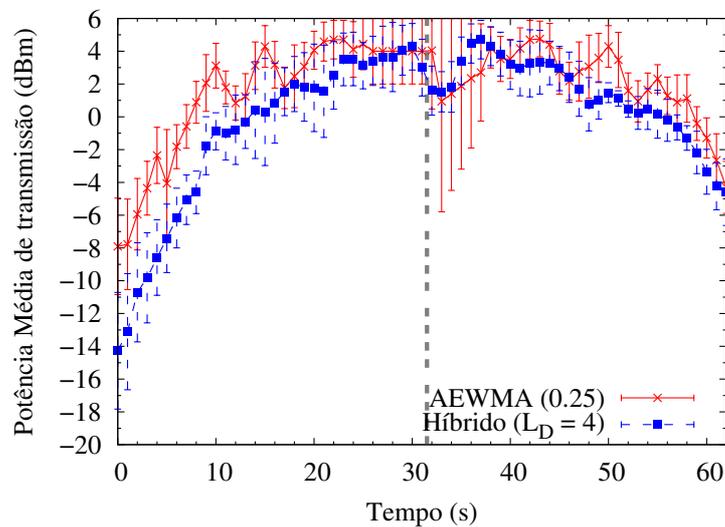


Figura 11. Potência média de transmissão para o nó móvel (ambiente interno).

4.6. Discussão

As técnicas CPT em RSSFs reduzem o consumo de energia na comunicação e apresentam os maiores ganhos quando emissor e receptor estão próximos. As técnicas de CPT propostas, *AEWMA* e *Híbrido*, obtiveram um desempenho superior que os apresentados pelos métodos *Iterativo* e *Atenuação* em cada cenário avaliado, melhorando a taxa de entrega média em pelo menos 5%, e conseguindo uma taxa de entrega próxima do valor encontrado quando usamos a máxima potência de transmissão.

A avaliação mostrou que as técnicas de CPT aumentam a vazão da rede pelo reuso espacial do meio. O uso de potências de transmissão mais baixas reduz a quantidade de *back-offs* necessária para que o nó encontre o meio livre, dessa forma os quadros aguardam menos tempo nas filas. Além disso, os protocolos de CPT devem ser ajustados para se adequarem à mobilidade dos nós, como apresentado em nosso último experimento. Nessas situações, a potência de transmissão deve ser ajustada mais frequentemente, para que os parâmetros dos protocolos forneçam uma resposta mais rápida às mudanças na topologia da rede.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Os protocolos para RSSFs devem ser projetados para serem eficientes em energia. O ajuste da potência de transmissão, realizado pelos protocolos de controle da potência de transmissão (CPT), permite reduzir o consumo de energia na comunicação. Este artigo propõe e avalia melhorias para protocolos CPT existentes e soluciona os problemas encontrados em estudos anteriores. Resultados mostraram que nossas melhorias reduzem o consumo de energia em 57% quando comparados a protocolos de potência de transmissão fixa, e melhoram a taxa de entrega em 10% em relação aos protocolos CPT existentes.

Os protocolos foram avaliados em diversos cenários, variando parâmetros tais como o tipo de ambiente (interno e externo), a distância de comunicação entre os nós, a ocorrência de transmissões simultâneas e mobilidade. Verificamos que os protocolos de CPT aumentam a vazão da rede, incrementam a taxa de entrega para um valor próximo do ótimo e diminuem o consumo de energia.

As técnicas de CPT podem conseguir maiores ganhos com a integração de outros protocolos de comunicação. Os protocolos de roteamento, por exemplo, deveriam ser modificados para usar a potência de transmissão como uma métrica de roteamento, definindo rotas eficientes em energia. As técnicas CPT devem também ser estendidas para suportar quadros *broadcast* e *multicast*.

Agradecimentos

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

Referências

- Agarwal, S., Krishnamurthy, S., Katz, R., and Dao, S. (2001). Distributed power control in ad hoc wireless networks. In *Personal and Indoor Mobile Radio Communication – (PIMRC)*, volume 2, pages 59–66. IEEE.
- Akyildiz, I. F., W. Su, Y. S., and Cayirci, E. (2002). A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications*, 40(8):102–114.
- Correia, L. H. A., Macedo, D. F., Silva, D. A. C., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A. F., and Nogueira, J. M. S. (2005). Transmission power control in mac protocols for wireless sensor networks. In *MSWiM '05: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 282–289, New York, NY, USA. ACM Press.
- Crossbow Technology, Inc. (2004). Mica2: Wireless Measurement System. <http://www.xbow.com>.

- Gomez, J. and Campbell, A. T. (2004). A case for variable-range transmission power control in wireless multihop networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, volume 2, pages 1425–1436.
- Jung, E.-S. and Vaidya, N. H. (2002). 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.
- Lal, D., Manjeshwar, A., Herrmann, F., Uysal-Biyikoglu, E., and Keshavarzian, A. (2003). Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. In *IEEE GLOBECOM*, pages 172–187.
- Langendoen, K. and Halkes, G. (2005). Energy-efficient medium access control. In Zurawski, R., editor, *Embedded Systems Handbook*. CRC Press.
- Monks, J. P. (2001). *Transmission Power Control for Enhancing the performance of wireless packet data networks*. Doctor of philosophy, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Pires, A. A., de Rezende, J. F., and Cordeiro, C. (2005). ALCA: A new scheme for power control on 802.11 ad hoc networks. In *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pages 475–477.
- Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). 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.
- Reijers, N., Halkes, G., and Langendoen, K. (2004). Link layer measurements in sensor networks. In *1st IEEE Int. Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS'04)*.
- Whitehouse, K., Woo, A., Jiang, F., Polastre, J., and Culler, D. (2005). Exploiting the capture effect for collision detection and recovery. In *The Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II)*.
- Woo, A., Tong, T., and Culler, D. (2003). 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.