

Uma Nova Abordagem para Acesso ao Meio em Redes de Sensores Sem Fio

Felipe D. Cunha¹, Ítalo Cunha¹, Antonio A. F. Loureiro¹, Leonardo B. Oliveira¹

¹Departamento de Ciéncia da Computaçao – Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte – MG – 31270–901 – Brasil

{fdcunha, cunha, loureiro, leob}@dcc.ufmg.br

Abstract. *Wireless sensor networks are designed to be deployed in the physical environment to monitor a variety of real-world phenomena. These networks are composed of various small sensor nodes deposited in a given area. In these networks, battery replacement is impractical and energy is a finite resource whose consumption must be minimized. MAC-layer protocols use techniques to turn off sensors' radio and save energy. One way of doing this is by scheduling, which incurs communication overhead to share and update the schedule. This paper proposes a new protocol able to non-interactively derive the instants of waking up and falling asleep based on node identifiers and, in turn, get rid of the scheduling overhead. Our results indicate that this approach is able to prolong WSN lifetime without degrading network performance.*

Resumo. *Redes de Sensores Sem Fio são instaladas em um ambiente físico para monitorar fenômenos do mundo real. Elas são compostas de vários sensores diminutos depositados numa dada área. Nestas redes, a troca de bateria é inviável e a energia é um recurso finito cujo consumo deve ser minimizado. Protocolos desenvolvidos para a camada MAC implementam técnicas de ligar e desligar o rádio dos sensores para economizar energia. Nos protocolos síncronos, as operações de liga/desliga seguem uma agenda e sensores precisam divulgá-la/atualizá-la, o que acarreta sobrecarga de comunicação. Este trabalho propõe um novo protocolo MAC capaz de derivar de forma não interativa os instantes de “dormir” e “acordar” sensores baseado nos seus identificadores, ou seja, remove a sobrecarga de comunicação para sincronização. Os resultados indicam que essa estratégia é capaz de prolongar o tempo de vida útil da rede sem degradar seu desempenho.*

1. Introdução

Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [Akyildiz et al. 2002, Loureiro et al. 2003] são um tipo particular de Redes Móveis Ad hoc (*Mobile Ad hoc Networks – MANETs*). Elas são compostas em sua maioria por pequenos nós (*nodes*) sensores cujos recursos (energia, largura de banda, processamento etc.) são extremamente limitados. Estes sensores, por sua vez, se conectam ao mundo externo por meio de dispositivos bem provisionados chamados de sorvedouros (*sink*) ou Estações Rádio Base (ERBs). RSSFs são utilizadas com o intuito de monitorar regiões, oferecendo dados sobre a área monitorada, também chamada de área de interesse (*interest area*), para o resto do sistema.

Dentre a vasta gama de aplicações de RSSFs existem operações de resgate em áreas de desastre e/ou conflito e monitoramento de recursos naturais [Akyildiz et al.

2002, Loureiro et al. 2003]. Muitas vezes, aplicações de RSSFs possuem como área de interesse ambientes inóspitos que dificultam, senão impedem, a recuperação dos sensores. Em outras palavras, os sensores são “descartáveis”. Se são descartáveis, os sensores devem ser baratos; e para torná-los baratos, são dotados de poucos recursos computacionais [Akyildiz et al. 2002, Loureiro et al. 2003]. Numa aplicação ao ar livre (*outdoor*), a energia é comumente o recurso mais limitado de um sensor [Akyildiz et al. 2002, Loureiro et al. 2003].

A comunicação, por sua vez, é a principal responsável pelo dispêndio energético em RSSFs. Ao contrário das redes cabeadas, a energia dissipada na transmissão de uma informação em RSSFs é ordens de grandeza maior que a dissipada durante o seu processamento [Akyildiz et al. 2002, Loureiro et al. 2003]. Assim, é natural que se repense o projeto de protocolos considerando os requisitos exclusivos de RSSFs para que se prolongue a vida útil da rede [Demirkol et al. 2006, Langendoen and Meier 2010]

No que tange à arquitetura de RSSFs, a camada de Controle de Acesso ao Meio (*medium access control – MAC*), em particular, desempenha papel chave no consumo de energia por parte da comunicação [Demirkol et al. 2006]. É essa camada que governa diversos fenômenos que impactam substancialmente o dispêndio energético, a saber: “escuta-ociosa” (*idle-listening*), “escuta-desnecessária” (*overhearing*), “transmissão-em-vão” (*overemitting*), colisões (*collisions*), e sobrecarga de comunicação (*communication overhead*) [Demirkol et al. 2006, Langendoen and Meier 2010]. A escuta-ociosa ocorre quando um sensor está pronto para receber quadros (*frames*), mas não está de fato recebendo. A escuta-desnecessária ocorre quando um sensor decodifica um quadro que não foi destinado a ele. A transmissão-em-vão ocorre quando um sensor transmite um quadro e o destinatário não está pronto para recebê-lo. E por fim, as mais comuns colisões e sobrecargas de comunicação.

Os protocolos MAC desenvolvidos para RSSFs adotam duas principais abordagens para combater tais fenômenos: síncrona e assíncrona. Nos protocolos síncronos (como [Ye et al. 2004, Van Dam and Langendoen 2003]), ou do tipo TDMA, sensores definem e compartilham *a priori* uma agenda de transmissão e recebimento de dados [Demirkol et al. 2006]. Por um lado, isso diminui a escuta-ociosa, mas por outro é pouco flexível e acarreta sobrecarga para o alinhamento quanto à agenda [Demirkol et al. 2006]. Nos protocolos assíncronos (como [Polastre et al. 2004, Lu et al. 2004]), os sensores remetentes precedem quadros com preâmbulos ligeiramente maiores que o período de dormência (*sleeping period*) dos seus respectivos destinatários. A vantagem dessa abordagem é que além de mitigar o escuta-ociosa, ela não requer quadros acerca de agendas [Demirkol et al. 2006]. A abordagem assíncrona, no entanto, sofre tanto de escuta-desnecessária quanto de transmissão-em-vão, ambos causados pelos preâmbulos por ela adicionados [Demirkol et al. 2006]. Cumpre lembrar que há abordagens que tentam unir os prós das abordagens síncronas e assíncronas. Essa abordagem é chamada de híbrida (por exemplo [Rhee et al. 2008]).

Neste trabalho adotamos uma abordagem inovadora e propusemos um protocolo MAC baseado em identidade. O ID-MAC, como o protocolo foi batizado, é síncrono na medida em que os sensores participantes da comunicação conhecem quando cada um estará pronto para enviar/receber; no entanto, o protocolo não requer que quadros de controle acerca do agendamento de enviar/receber sejam trocados. Isso porque no ID-

MAC tais agendas podem ser derivadas a partir das identidades dos próprios sensores – por exemplo, seu endereço físico (*MAC address*).

Contribuições: As contribuições do trabalho em questão são as seguintes:

1. concepção de uma abordagem inovadora de protocolos MAC para RSSFs que se baseia na identidade dos sensores;
2. apresentação do ID-MAC, um protocolo MAC concreto baseado nesta nova abordagem;
3. e avaliação de desempenho do ID-MAC frente ao protocolo S-MAC [Ye et al. 2004], comumente utilizado em trabalhos de MAC para RSSFs como base de comparação em avaliações de desempenho.

Organização: Este documento está organizado da seguinte forma. Primeiramente, apresentamos uma visão geral de protocolos MAC para RSSFs (seção 2). A seguir apresentamos nossa proposta de protocolo MAC (seção 3). As avaliações e seus respectivos resultados são apresentados na seção 4. Em seguida, discutimos os trabalhos relacionados (seção 5). Por fim, na seção 6, apresentamos as considerações finais acerca do trabalho.

2. MACs para RSSFs: Visão Geral

Em muitas aplicações de RSSFs é inviável trocar a fonte energética (por exemplo, a bateria ou pilha) dos sensores. Isso faz com que uma vez finda tal fonte, seu sensor torne-se inoperante. Logo, um objetivo central em uma RSSF é minorar o consumo de energia por parte dos seus sensores, prolongando assim o tempo de vida útil da rede [Akyildiz et al. 2002, Loureiro et al. 2003].

O padrão de comunicação de uma RSSFs é um fator chave para o seu desempenho do ponto de vista energético [Akyildiz et al. 2002, Loureiro et al. 2003]. Existem basicamente três formas de comunicação: (i) difusão (*broadcast*), (ii) comunicação convergente (*convergecast*) e (iii) comunicação local (*local gossip*). Respectivamente, elas ocorrem quando (i) o sorvedouro deseja disseminar uma informação para toda a rede¹; (ii) quando os sensores desejam reportar ao sorvedouro; e (iii) quando há uma comunicação local entre sensores de uma mesma vizinhança ou agrupamento (*cluster*).

Diversos fenômenos relacionados à comunicação são governados pelo protocolo MAC utilizado. Por exemplo, estar a postos para receber quadros (isto é, ativo e com o rádio ligado) consome muita energia mesmo se não ocorrer uma recepção [Demirkol et al. 2006, Langendoen and Meier 2010]. Assim, para poupar energia em RSSFs, os protocolos MAC buscam colocar os sensores em modo dormente (*sleeping mode*), no qual o rádio é desligado, sempre que possível. Em geral, os períodos ativos têm duração fixa enquanto que os períodos inativos dependem do ciclo de trabalho² (*duty cycle*) pré-definido.

Além dos problemas comuns a protocolos MAC como colisões e sobrecarga de comunicação, essa alternância de modos em RSSFs ocasionam os seguintes problemas [Demirkol et al. 2006, Langendoen and Meier 2010]:

¹Note-se que neste contexto o termo difusão denota algo diferente do usual difusão de pacote (*packet broadcast*), em que elementos da rede enviam um quadro para todos a seu alcance.

²O ciclo de trabalho é a fração do tempo total em que um sensor permanece ativo, ou seja, com o rádio ligado.

1. escuta-ociosa: acontece quando potenciais destinatários estão ativos, ou seja, prontos para receber quadros e consumindo energia, sem que de fato estejam recebendo.
2. escuta-desnecessária: ocorre quando sensores recebem quadros gratuitamente, isto é, quando no intuito de verificar se um quadro é destinado a eles, recebem e decodificam quadros endereçados a outrem.
3. transmissão-em-vão: é causada quando quadros são transmitidos sem que, no entanto, seu destinatário esteja pronto para recebê-las.

Assim sendo, um projeto eficiente e eficaz de protocolos MAC deve levar em consideração os fenômenos supracitados. Além deles, outros requisitos de projeto são escalabilidade e adaptabilidade a mudanças [Demirkol et al. 2006]. Alterações na topologia, tamanho da rede e densidade de sensores devem impactar o mínimo a eficácia e a eficiência do protocolo. Alguns requisitos centrais em redes tradicionais são secundários em RSSFs. Neste contexto, vazão e atraso são deveras importantes, mas o consumo energético é ainda mais premente. Por fim, o requisito de justiça (*fairness*) não é tão relevante como nas demais redes; os sensores que compõe uma RSSF possuem usualmente um objetivo comum, não importando quem mais colaborou para alcançá-lo.

Grosso modo, são duas as abordagens de protocolos MAC em RSSFs: (i) síncrona e (ii) assíncrona [Demirkol et al. 2006, Langendoen and Meier 2010].

Os protocolos síncronos (como [Ye et al. 2004, Van Dam and Langendoen 2003]) são baseados em agendas (*schedule-based*) em que cada participante da comunicação possui um intervalo de tempo agendado exclusivo para sua transmissão. De posse dessa agenda, os potenciais destinatários ficam ativos para receber transmissões nos períodos pré-agendados. Demais remetentes também respeitam a agenda e esperam sua vez para transmitir. Logo, protocolos síncronos são capazes de tanto mitigar o problema de transmissão-em-vão, como o de colisões. Por outro lado, eles precisam trocar quadros de controle para “acordar” e/ou anunciar uma agenda comum, o que resulta em sobrecarga de comunicação. Ademais, as agendas são usualmente fixas e essa inflexibilidade pode acarretar maior atraso.

Os protocolos assíncronos são baseados na disputa do meio de transmissão (*contention-based*) (como [Polastre et al. 2004, Lu et al. 2004]). Tais protocolos também tiveram que empregar novos mecanismos para lidar com a alternância de modos de RSSFs. Em diversos protocolos, por exemplo, o remetente precede o envio de um quadro com um preâmbulo ligeiramente mais longo que o período de dormência (*sleeping period*) do destinatário. Este último, ao “acordar”, nota pelo preâmbulo a intenção do remetente de enviar um quadro e se mantém ativo. Por outro lado, caso não escute preâmbulos, o potencial destinatário volta rapidamente a “dormir”. Tais protocolos possuem a vantagem de minorar o problema de escuta-ociosa e de não precisarem de sincronização, o que diminui a sobrecarga de comunicação. Contudo, eles sofrem tanto de transmissão-em-vão como de escuta-desnecessária, já que todos os sensores devem esperar o preâmbulo para que possam verificar se o quadro é ou não destinado a eles.

Dentre todos os protocolos, o mais popular e utilizado como base de comparação com os demais talvez seja o S-MAC [Ye et al. 2004]. O S-MAC opera em *rodadas de transmissão* (*transmission rounds*). Cada rodada alterna entre dois períodos, ativos e dormentes (vide figura 1). Nos períodos dormentes os sensores desligam o rádio e o

consumo energético é reduzido. Findo esse período, os sensores ligam o rádio e estão prontos para trocar informações. A duração desses períodos varia com a o valor do ciclo de trabalho.

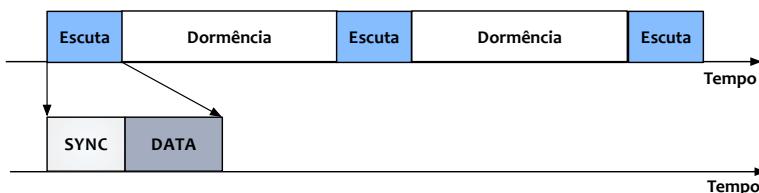


Figura 1. Períodos de escuta e dormência no S-MAC.

No S-MAC é necessário que cada sensor alinhe com seus vizinhos quanto ao início da rodada. Tal sincronização é feita na fase inicial, na qual cada sensor escolhe aleatoriamente um instante para “adormecer” e o difunde para os vizinhos. Assim, cria-se um agrupamento virtual (*virtual cluster*) de sensores que compartilham de uma mesma agenda. Mais precisamente, cada período de escuta pode ser dividido em duas etapas no S-MAC. São elas SYNC e DATA (vide figura 1). A etapa SYNC é destinada para sincronização, na qual os sensores podem enviar atualizações de agendamentos para vizinhos. Já a etapa DATA é destinada à comunicação por difusão e por ponto-a-ponto por parte dos sensores. Vale lembrar, que o S-MAC também emprega o mecanismo (RTS-CTS-DATA-ACK) [Tanenbaum 2002] para evitar colisões. Cumpre lembrar que o S-MAC, assim como os demais protocolos síncronos, gasta uma parte considerável da energia dos sensores com quadros de controle. Como veremos a seguir, tais quadros não são necessários no ID-MAC.

3. ID-MAC

A principal vantagem do ID-MAC é não ter que enviar quadros de controle e, assim, poupar energia. Isso é possível porque no ID-MAC sensores não precisam receber a agenda acerca de quando seus interlocutores estarão prontos enviar e receber dados. Ao invés disso, os sensores derivam tal informação de forma não-interativa. Para tal, a rede emprega uma função pseudo-aleatória pública, isto é, comum a todos os sensores.³ Os sensores remetentes derivam sua agenda semeando a função com seus próprios identificadores. E os destinatários, analogamente, derivam sua agenda semeando a função com os identificadores dos seus respectivos remetentes. Desta forma, remetentes e destinatários são capazes de construir de forma não interativa uma agenda comum. Assim o ID-MAC consegue reunir as vantagens dos protocolos síncronos – ou seja, mitigar o transmissão-em-vão e escuta-desnecessária sem, no entanto, “pagar o alto preço” dessas vantagens, isto é, enviar e receber quadros de controle.

A seguir, primeiro apresentamos uma visão geral do ID-MAC (seção 3.1), depois formalizamos o funcionamento do protocolo (seções 3.2 e 3.3) e por último discutimos seus detalhes de implementação (seção 3.4).

³A função pseudo-aleatória pode ser carregada nos sensores antes dos mesmos serem dispostos na área de interesse.

Tabela 1. Notação

NOTAÇÃO	DESCRIÇÃO
c	Contador de rodadas de transmissão
d	Duração das rodadas de transmissão
q	Duração da transmissão de um quadro
$t(c)$	Instante onde começa a rodada c
$t(s, c)$	Instante em que começa a transmissão de s na rodada c
f	Função pseudo-aleatória
\mathcal{V}_s	Conjunto de vizinhos conhecidos pelo sensor s

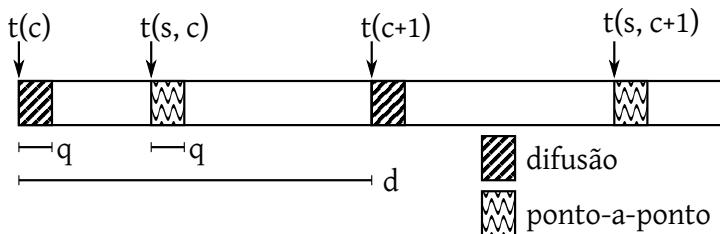


Figura 2. Ilustração das rodadas de transmissão c e $c + 1$ do sensor s .

3.1. Visão geral

Cada sensor s utilizando ID-MAC tem um identificador único, por exemplo, seu endereço físico. A figura 2 mostra rodadas de transmissão de um sensor s . Sensores executando o ID-MAC compartilham um contador de rodada c , o qual é incrementado após cada rodada de transmissão. A duração d destas rodadas é fixa. O instante de tempo em que a rodada c começa é denominado $t(c)$ e a próxima rodada de trabalho começa imediatamente após a anterior, $t(c + 1) = t(c) + d$. Os sensores são sincronizados e iniciam a rodada de transmissão no mesmo instante $t(c)$.

O início de cada rodada de transmissão é reservado para transmissão de quadros de difusão. Todos os sensores “acordam” no início de uma rodada para verificar se um quadro de difusão será transmitido e recebê-lo. A seção 3.2 detalha o algoritmo que seleciona qual sensor deve transmitir quadros de difusão em uma rodada. Seja q a duração da transmissão de um quadro de tamanho máximo e sua possível confirmação, então o período entre $t(c)$ e $t(c) + q$ é reservado para difusão.

Um sensor pode enviar um quadro ponto-a-ponto por rodada de transmissão. O instante em que um sensor s transmite seu quadro varia a cada rodada. Seja $t(s, c)$ o instante onde a transmissão do sensor s na rodada c começa. Por exemplo, a transmissão do sensor s na rodada c pode começar logo após a transmissão de difusão na rodada c , $t(s, c) \approx t(c) + p$; e a transmissão do sensor s na rodada $c + 1$ pode começar próxima ao início da rodada $c + 2$, $t(s, c + 1) \approx t(c + 2) - p$. A figura 2 ilustra como o instante da transmissão do quadro de um sensor s varia entre rodadas.

Cada sensor s calcula o instante de sua transmissão na rodada c , $t(c, s)$ usando uma função pseudo-aleatória f compartilhada por todos os sensores. A função f recebe como parâmetro o identificador do sensor s e o marcador da rodada atual c e retorna um valor aleatório entre $[0, 1]$ (nossa implementação de f usa SHA256). O valor $f(s, c)$ é

usado como o deslocamento da transmissão de s na rodada c (vide detalhes na seção 3.3). Por fim, cada sensor s mantém um conjunto \mathcal{V}_s de identificadores vizinhos, ou seja, dos sensores que estão no seu raio de transmissão. Note-se que um sensor s tem todos os dados necessários para calcular os instantes de transmissão $t(s', c')$ de todos os seus vizinhos $s' \in \mathcal{V}_s$ em qualquer rodada c' . Isso permite a um sensor s saber quando “acordar” para receber quadros de um vizinho s' .

3.2. Transmissões de difusão

O ID-MAC reserva os primeiros q milissegundos de cada rodada para a transmissão de um quadro de difusão. Cada sensor s decide transmitir um quadro de difusão na rodada c verificando se

$$f(s, c) < f(v, c) \text{ para todo } v \in \mathcal{V}_s \text{ e} \quad (1)$$

$$f(s, c) < \frac{1}{|\mathcal{V}_s|}. \quad (2)$$

A eq. (1) distribui a banda disponível para difusão de forma justa entre os sensores. Cada sensor recebe uma fração da banda de difusão inversamente proporcional à quantidade de vizinhos que possui. Todos os sensores eventualmente conseguem enviar quadros de difusão e não existe inanição. A eq. (2) limita a utilização da banda de difusão (em torno de 70 a 75% para vizinhanças de 3 a 10 sensores) para que novos sensores entrando na rede possam informar sua presença aos sensores que lá já estão.

3.3. Transmissões ponto-a-ponto

Cada sensor pode transmitir um quadro por rodada de transmissão. Cada sensor s calcula o instante $t(s, c)$ durante a rodada c quando ele começa sua transmissão como

$$t(s, c) = t(c) + q + (d - 2q)f(s, c). \quad (3)$$

O termo $t(c) + q$ é o instante quando acaba a transmissão de difusão na rodada c e podem começar as transmissões ponto-a-ponto. O termo $d - 2q$ é a duração do intervalo onde podem começar transmissões durante a rodada c . Subtraímos $2q$ por que a transmissão de difusão ocupa q milissegundos no início da rodada e por que precisamos começar a transmissão de um quadro antes de $t(c) + d - q$ para terminar a transmissão do quadro antes do fim da rodada.

Todos os vizinhos de um sensor s conseguem calcular $t(s, c)$. Vizinhos interessados em receber dados de s “acordam” no instante $t(s, c)$ para verificar se s tem dados para transmitir. Em particular, em redes de sensores onde os dados são transmitidos para um sorvedouro, o próximo sensor na árvore de roteamento de s até o sorvedouro precisa “acordar” nos instantes $t(s, \cdot)$ para receber e reencaminhar o quadro de s .

3.4. Detalhes de implementação e operação

Construção da rede. Sensores precisam saber o contador da rodada atual, c , e quando a rodada de transmissão se inicia, $t(c)$.⁴ Vale lembrar que a escolha de c e $t(c)$ para a junção de múltiplos agrupamentos (*clusters*) em uma única rede pode ser feita com algoritmos

clássicos para eleição de líder [Lynch 1996] e, portanto, tal questão não foi alvo deste trabalho.

Sincronização. Sensores precisam sincronizar o início das rodadas de transmissão $t(c)$. Os instantes de início das rodadas podem ser sincronizados usando mensagens de difusão de referência [Elson and Estrin 2002].

Modo de operação. Descrivemos o ID-MAC assumindo que um sensor s sabe de qual vizinho s' ele deve receber dados e, então, “acorda” no instante $t(s', c)$. Este modo de operação é adequado para redes em que os sensores encaminham dados para um sorvedouro e reduz colisões pois as transmissões começam em instantes aleatórios.

O ID-MAC ainda é eficiente em cenários em que os sensores não sabem de quais outros sensores devem receber dados. Para tal, basta utilizar a eq. (3) para determinar o instante no qual o sensor s “acorda” para receber dados (em vez de enviar). Este modo de operação está mais sujeito a colisões, pois dois nós que querem transmitir para s podem transmitir no mesmo instante $t(s, c)$.

Confirmação e retransmissão. Destinatários executando o ID-MAC confirmam o recebimento de um quadro para o remetente com um pequeno quadro de confirmação (ACK). No caso de colisão ou falha na decodificação de um pacote recebido, o remetente não recebe o quadro de confirmação e tenta retransmitir o quadro.

Escalabilidade. Quando a densidade da rede e o número de vizinhos dos sensores aumenta, a duração da rodada de transmissão também deve aumentar. O aumento da duração da rodada de transmissão evita que a probabilidade de colisão em transmissões ponto-a-ponto aumente e degrade o desempenho da rede.

4. Resultados

Nessa seção descrevemos o ambiente de simulação no ns-2 [ns2 2002] (seção 4.1) utilizado na avaliação do ID-MAC e discutimos os resultados (seção 4.2).

4.1. Ambiente de Simulação

A proposta das simulações é realizar uma coleta de dados sobre eventos que acontecem numa área de interesse. Utilizamos o modelo de Mini *et al.* [Mini et al. 2004], no qual eventos ocorrem em locais uniformemente distribuídos na área de interesse e o tempo entre eventos é dado por um processo de Poisson [Ross 1996]. Sensores que detectam um evento coletam e transmitem informações sobre o evento para o sorvedouro.

Consideramos uma rede com 200 sensores estáticos dispostos aleatoriamente numa área de interesse de $100 \times 100 m^2$. O sorvedouro é posicionado no canto inferior esquerdo, isto é, na posição $(0, 0)$. Executamos simulações variando a taxa de ocorrência de eventos em 0, 03, 0, 09 e 0, 12 eventos por segundo. O raio de influência r de cada evento é uniformemente distribuído entre 2 e $10 m^2$. A duração de um evento é uniformemente distribuída entre 5 e 50 segundos. O tempo entre os eventos é modelado pelo processo de Poisson e definido pela equação $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ [Mini et al. 2004].

⁴Note-se que a manutenção de um contador de rodada global c não é obrigatória. Alternativamente, cada sensor s pode ter seu próprio contador de rodada c_s ; basta aos vizinhos de s armazenar c_s para calcular as eqs. (1), (2) e (3).

A rede é homogênea, i.e., todos os sensores têm a mesma configuração. A energia inicial atribuída a cada sensor é de 25 J. Tal valor foi escolhido de modo a não permitir a morte prematura de um sensor devido à escassez de energia. O raio de comunicação e sensoriamento de cada sensor é 10 m. O modelo de dissipação de energia utilizado segue o modelo do ns-2 [ns2 2002], o qual decrementa o consumo de energia dos sensores de acordo com o modo de operação do sensor. O consumo de cada modo de operação é definido com parâmetros reais de consumo do sensor Mica2 [Mica2 2004]. O ciclo de trabalho dos sensores é fixo em 20 % e a duração da rodada de transmissão resultante é de aproximadamente 140 ms. Este valor de 20 % foi escolhido para que todos os sensores possam enviar dados sem muita sobreposição nos seus intervalos de envio. Por fim, na camada de rede foi utilizado um protocolo que constrói a árvore de roteamento a partir da distância Euclidiana entre os sensores. A escolha por um protocolo simples como esse se deve ao fato de que o foco deste trabalho é na camada MAC. A tabela 2 sumariza a configuração dos parâmetros utilizados nas simulações.

Tabela 2. Configuração dos cenários de simulação.

Parâmetros Gerais	
Topologia da rede	plana
Sensores	estáticos & homogêneos
Número de sensores	200
Área	$100 \times 100 \text{ m}^2$
Posição do sorvedouro	(0, 0)
Energia inicial	25 J
Potência de transmissão	+5 dBm
Raio de comunicação e sensoriamento	10 m
Ciclo de trabalho	20 %
Período de operação	1200 s
Parâmetros de Consumo de Energia do Rádio	
Envio	27 mA
Recepção	10 mA
Dormente	1 μ A
Parâmetros do Modelo de Eventos	
Raio do evento	Uniforme(2, 10) m
Duração do evento	Uniforme(5, 50) s
λ	{0.03, 0.09, 0.12}

Para termos uma base de comparação na nossa avaliação, simulamos os mesmos cenários para o ID-MAC e para S-MAC. Conforme mencionamos anteriormente (seção 2), em RSSFs o S-MAC é comumente utilizado como base de comparação para novas propostas de protocolos MAC. Como o S-MAC retransmite pacotes apenas uma vez, configuramos o ID-MAC para retransmitir pacotes apenas uma vez e remover o impacto do número de retransmissões nos resultados. As métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos dois protocolos foram as seguintes:

1. *atraso fim-a-fim*: o intervalo de tempo entre envio de um quadro pelo sensor e sua recepção pelo sorvedouro;
2. *consumo de energia*: a energia consumida por todas as operações realizadas por um sensor na rede, durante o funcionamento da rede;
3. *entrega fim-a-fim*: o número de quadros que foram entregues com sucesso para o sorvedouro.

Todos os resultados abaixo descartam os 60 primeiros segundos da simulação, onde os nós executam descoberta de vizinhos e construção da árvore de roteamento, para focar no desempenho dos protocolos MAC para transmissão de dados ao sorvedouro. Simulamos cada cenário 33 vezes com sementes para geração de números aleatórios distintas. Quando não mostramos a variação dos dados, o coeficiente de variação foi menor que 0,1.

4.2. Resultados

A figura 3 apresenta o atraso médio acumulado ao longo da operação da rede. Para certa taxa de ocorrência de eventos (por exemplo, na figura 3(a)), a latência média aumenta ao longo do tempo. Como apresenta-se a média, com o decorrer do tempo de simulação, quadros de eventos mais afastados do sorvedouro, com atraso maior, chegam e elevam o atraso médio. O atraso também cresce com a taxa de ocorrência de eventos λ , pois quanto maior a frequência dos eventos, maior também a quantidade de dados trafegada na rede. Em relação aos protocolos, é possível verificar que o protocolo ID-MAC apresentou melhor desempenho. O atraso do ID-MAC e a variância do seu atraso são menores que os do S-MAC. Duas propriedades do ID-MAC contribuem para a redução do atraso: (i) as transmissões são feitas em instantes aleatórios, o que diminui a probabilidade de colisão; e (ii) mais de uma transmissão pode acontecer numa rodada de transmissão.

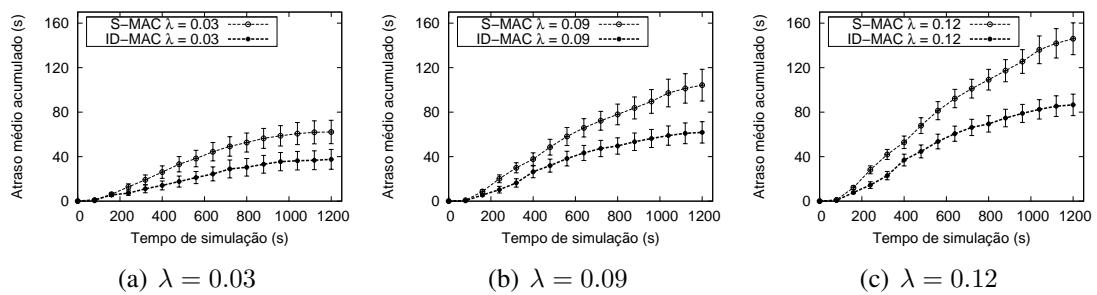


Figura 3. Atraso médio em função de λ .

A avaliação do consumo de energia dos protocolos pode ser observada através da energia residual média nos sensores da rede. A figura 4 mostra o decaimento da energia média na bateria dos nós da rede ao longo do tempo para ambos os protocolos. Nota-se um pequeno acréscimo do consumo de energia quando a frequência de eventos aumenta. Isto ocorre porque uma quantidade de dados maior será trafegada, o que necessita de mais transmissões. Além disso, o protocolo ID-MAC apresentou um consumo de energia menor que o S-MAC, cerca de 10 %, nos três cenários. Duas características do ID-MAC contribuem para essa economia de energia: (i) o ID-MAC não possui quadros RTS-CTS para reserva do canal; e (ii) redução de colisões e, consequentemente, de retransmissões pela utilização da função pseudo-aleatória definindo o instante de transmissão.

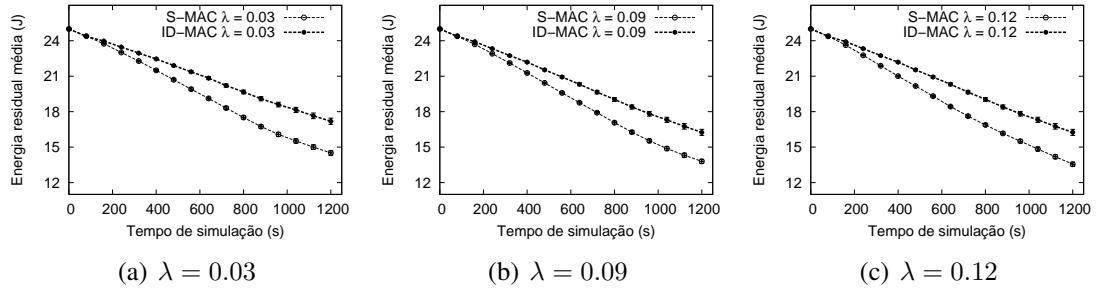


Figura 4. Energia residual média em função de λ .

A figura 5 apresenta a taxa de entrega de pacotes na rede. Pode-se notar que o aumento na quantidade de eventos também aumentou a entrega fim-a-fim de dados para os protocolos comparados. Entretanto, percebe-se que o aumento na entrega fim-a-fim não foi expressivo, algo em torno de 15 %. Isso ocorre pois o tamanho do período de escuta e transmissão permanece constante nos cenários avaliados, o que limita a quantidade de transmissões. Nota-se que o tamanho desse período é um fator limitante para a entrega fim-a-fim. Também é possível verificar que o protocolo proposto apresentou uma entrega fim-a-fim 20 % maior. Esse aumento médio de 20 % é alcançado devido ao modo de operação do ID-MAC, permitindo mais de uma transmissão por rodada, quando necessário, enquanto o S-MAC realiza no máximo uma transmissão por rodada.

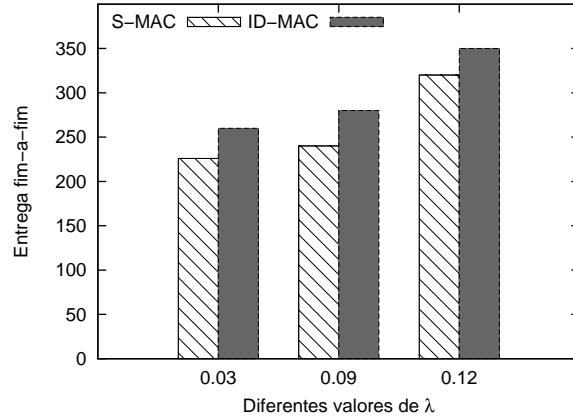


Figura 5. Entrega fim-a-fim em função de λ .

5. Trabalhos Relacionados

Protocolos MAC desempenham um papel chave em RSSFs e diversas propostas foram desenvolvidas exclusivamente para este tipo de rede [Ye et al. 2004, Hill and Culler 2002, Van Dam and Langendoen 2003, Polastre et al. 2004, Lu et al. 2004, El-Hoiydi and Decotignie 2004, Zheng et al. 2005, Rhee et al. 2008, Ye et al. 2006, Halkes and Langendoen 2007, Kim et al. 2008, Liu et al. 2009, Hsu et al. 2009, Parker et al. 2010, de Andrade et al. 2012].

De acordo com a linha do tempo apresentada na figura 6, Ye *et al.* propuseram o protocolo S-MAC [Ye et al. 2004], um dos primeiros para RSSFs. O protocolo segue a abordagem síncrona, utiliza ciclos de trabalho e foi discutido na seção 2 deste trabalho.

Em seguida, outros protocolos foram propostos com o objetivo de aprimorá-lo. Dentre eles, o protocolo T-MAC [Van Dam and Langendoen 2003], proposto por Dam *et al.* é um protocolo cujo objetivo é reduzir a escuta-ociosa e a latência na comunicação. O T-MAC ajusta o ciclo de trabalho dos sensores de acordo com as flutuações de tráfego da rede. Para tal, antes de iniciar o modo dormente, um sensor verifica se não há nenhuma comunicação corrente ou iminente. Caso haja, o sensor permanece ativo e apto para realizar a transferência. A desvantagem desta abordagem é o sensor ficar ativo sem que de fato ocorra uma nova transmissão, gerando um gasto desnecessário de energia.

Seguindo a evolução dos protocolos, Polastre *et al.* e Lu *et al.* propuseram, respectivamente, o B-MAC [Polastre et al. 2004] e D-MAC [Lu et al. 2004]. Ambos empregaram períodos dormentes para economizar energia. O protocolo B-MAC reduz o tempo do ciclo de trabalho e minimiza a escuta-ociosa ao empregar um esquema de preâmbulo adaptativo configurado pelas camadas superiores. O protocolo D-MAC, por sua vez, concentra-se em melhorar a comunicação convergente. Seu funcionamento evita a quebra nas transmissões em direção ao sorvedouro. Para isso, cada sensor escolhe o instante de “dormir” de acordo com sua posição na árvore de roteamento. Além disso, o D-MAC ajusta a duração do seu ciclo de trabalho em função do tráfego de rede.

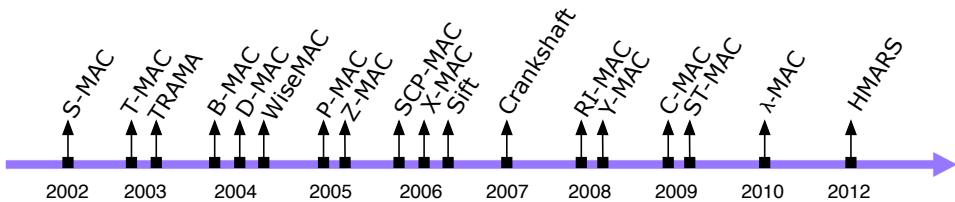


Figura 6. Linha do tempo de protocolos MAC para RSSFs.

O protocolo SCP-MAC [Ye et al. 2006] de Ye *et al.*, por sua vez, tem como principal característica a redução expressiva do ciclo de trabalho. Ele pode operar com valores de 0.1% ou até menores. Para a utilização desta abordagem os autores propõem um esquema de otimização do agendamento e mecanismos de sondagem do canal de comunicação, utilizando melhor o mesmo. Neste cenário, os sensores vão acordar em curtos espaços de tempo, apenas para checar a atividade do canal. Tal abordagem, no entanto, apresenta melhor desempenho em situações de pouco tráfego.

Por fim, há ainda protocolos que foram concebidos para contextos específicos. Por exemplo, Andrade *et al.* [de Andrade et al. 2012] propuseram o HMARS, um protocolo MAC específico para a integração de RSSFS com rádio sobre fibra (*radio over fiber – RoF*); e Hsu *et al.* propuseram o ST-MAC, um protocolo para RSSFs Aquáticas [Hsu et al. 2009].

6. Conclusão

A substituição da fonte energética é comumente inviável em RSSFs. Assim, a energia se torna um recurso crítico que deve ser considerado por toda a pilha de protocolos. Neste contexto, o protocolo da camada MAC desempenha um papel especialmente importante. Objetivando poupar energia, os protocolos MAC exclusivamente voltados para RSSFs implementam técnicas de ligar e desligar o rádio dos sensores. Nos protocolos síncronos,

tal operação de liga/desliga segue uma agenda e sensores precisam divulgá-la/atualizá-la, o que acarreta sobrecarga de comunicação.

Neste trabalho propusemos o ID-MAC, um protocolo em que os sensores participantes da comunicação são capazes de derivar, de forma não interativa, quando cada um deles estará pronto para enviar/receber. Para tal, os sensores utilizam seus identificadores e uma função comum a todos. As principais contribuições do trabalho foram as seguintes: (i) a concepção de uma abordagem inovadora de protocolos MAC para RSSFs que se baseia na identidade dos sensores; (ii) a apresentação do ID-MAC, um protocolo MAC concreto baseado nesta nova abordagem; (iii) e a avaliação de desempenho do ID-MAC frente ao protocolo S-MAC. Os resultados mostraram que essa estratégia é capaz de prolongar o tempo de vida útil da rede sem, no entanto, degradar seu desempenho.

Referências

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114.
- de Andrade, T. P. C., da Fonseca, N. L. S., Oliveira, L. B., and Branquinho, O. C. (2012). Protocolos MAC para integração de redes de sensores sem fio baseado em rádio-sobre-fibra. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC'12)*.
- Demirkol, I., Ersoy, C., and Alagoz, F. (2006). MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 44(4):115–121.
- El-Hoiydi, A. and Decotignie, J.-D. (2004). WiseMAC: an ultra low power mac protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In *International Symposium on Computers and Communications 2004 Volume 2 (ISCC'04)*, ISCC '04, pages 244–251, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Elson, J. and Estrin, D. (2002). Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcast. In *OSDI*.
- Halkes, G. P. and Langendoen, K. G. (2007). Crankshaft: An energy-efficient mac-protocol for dense wireless sensor networks. In *4th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN'07)*. Blackwell.
- Hill, J. and Culler, D. (2002). Mica: a wireless platform for deeply embedded networks. *IEEE Micro*, 22(6):12–24.
- Hsu, C.-C., Lai, K.-F., Chou, C.-F., and Lin, K. C.-J. (2009). ST-MAC: Spatial-temporal mac scheduling for underwater sensor networks. In *INFOCOM'09*, pages 1827–1835. IEEE.
- Kim, Y., Shin, H., and Cha, H. (2008). Y-MAC: An energy-efficient multi-channel mac protocol for dense wireless sensor networks. In *7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks IPSN'08*, pages 53–63, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Langendoen, K. and Meier, A. (2010). Analyzing mac protocols for low data-rate applications. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 7(2):19:1–19:40.

- Liu, S., Fan, K.-W., and Sinha, P. (2009). CMAC: An energy-efficient mac layer protocol using convergent packet forwarding for wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 5(4):29:1–29:34.
- Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A., Nakamura, E. F., and Figueiredo, C. M. S. (2003). Redes de sensores sem fio. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC'03)*, pages 179–226, Natal, RN, Brazil. Tutorial.
- Lu, G., Krishnamachari, B., and Raghavendra, C. (2004). An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks. In *18th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDP'04)*, pages 224–231.
- Lynch, N. A. (1996). *Distributed Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- Mica2 (2004). Mts/mda sensor and data acquisition boards user's manual. www.xbow.com.
- Mini, R. A. F., Loureiro, A. A. F., and Nath, B. (2004). A more realistic energy dissipation model for sensor nodes. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC'04)*, pages 365–378, Gramado, RS, Brazil. ISBN 85-88442-80-9.
- ns2 (2002). The network simulator. www.isi.edu/nsnam/ns.
- Parker, T., Halkes, G., Bezemer, M., and Langendoen, K. (2010). The lambdamac framework: redefining MAC protocols for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 16(7):2013–2029.
- Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *2nd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys'04)*, pages 95–107, New York, NY, USA. ACM.
- Rhee, I., Warrier, A., Aia, M., Min, J., and Sichitiu, M. L. (2008). Z-MAC: a hybrid mac for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 16(3):511–524. SenSys'05.
- Ross, S. M. (1996). *Simulation (Statistical Modeling and Decision Science)*. Academic Press, second edition.
- Tanenbaum, A. S. (2002). *Computer networks (4. ed.)*. Prentice Hall.
- Van Dam, T. and Langendoen, K. (2003). An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *International Conference on Embedded networked Sensor Systems SenSys'03*, pages 171–180, New York, NY, USA. ACM.
- Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2004). Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3):493–506. INFOCOM'02.
- Ye, W., Silva, F., and Heidemann, J. (2006). Ultra-low duty cycle mac with scheduled channel polling. In *4th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems SenSys'06*, pages 321–334, New York, NY, USA. ACM.
- Zheng, T., Radhakrishnan, S., and Sarangan, V. (2005). PMAC: an adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *19th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDP'05)*.