

# Política Híbrida para Determinar o Momento Acordado do Próximo Nó na Comunicação em Redes de Sensores Sem Fio\*

Max do Val Machado<sup>1,2</sup>, Raquel A. F. Mini<sup>2</sup>, Antonio A. F. Loureiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DCC/UFMG      <sup>2</sup>DCC/PUC Minas

{maxm, raquelmini}@pucminas.br, {loureiro}@dcc.ufmg.br

**Resumo.** *A camada de Controle de Acesso ao Meio em Redes de Sensores Sem Fio trata das falhas que acontecem quando um nó envia um pacote para um vizinho adormecido. Alguns protocolos fazem com que cada nó informe aos seus vizinhos quando estará acordado e cada nó emissor agende sua transmissão para o momento em que o próximo nó estiver acordado. Em outros, o nó que precisa enviar um pacote inicia um processo de descoberta desse momento. As duas políticas são limitadas pelas transmissões extras dos processos de compartilhamento e de descoberta. Este trabalho propõe uma política para eliminar o custo de compartilhamento e minimizar o de descoberta, geralmente reduzindo o número de transmissões e o consumo de energia das políticas existentes.*

**Abstract.** *The Media Access Control layer for Wireless Sensor Networks deals with the fails that happen when a node sends a packet to a sleeping neighbor. Some protocols make each node share its working schedule with its neighbors and sender nodes schedule their transmissions to their next hop awaking moment. In others, when a node has to send a packet, it initiates a process to discover this moment. Both policies are limited by the extra transmissions of their share or discovery processes. This work proposes a policy to eliminate the sharing cost and minimize the discovery one, often reducing the number of transmissions and energy consumption of the existing policies.*

## 1. Introdução

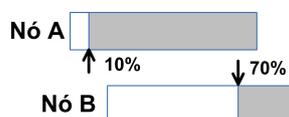
O principal desafio para transformar as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [1] na tecnologia de sensoriamento do futuro é projetar soluções eficientes em termos de energia. A energia é o recurso mais escasso em RSSFs, pois a bateria dos nós apresenta capacidade finita e sua recarga nem sempre é possível. A melhor forma de economizar energia nessas redes é fazer com que os nós sensores adormeçam sempre que possível.

A maioria das soluções para RSSFs considera algum mecanismo para fazer com que os nós adormeçam. Esse mecanismo divide o tempo de vida dos nós em ciclos operacionais tal que cada ciclo é composto por um período em que o nó permanece acordado seguido por outro em que ele dorme. A fig. 1 ilustra um ciclo operacional para os nós A e B em que o período acordado (cor branca) equivale a 10% e 70% dos respectivos ciclos operacionais. O período em que o nó dorme é ilustrado pela cor cinza. A porcentagem de tempo em que um nó permanece acordado em um ciclo operacional é chamada de ciclo de trabalho e esse é definido a partir de parâmetros como, por exemplo, o tráfego. A agenda

---

\*Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e FAPEMIG.

de quando um nó estará acordado ou dormindo é chamada de escalonamento de trabalho. Dado que os nós devem operar com um ciclo de trabalho reduzido para economizar energia, a indisponibilidade periódica dos nós adormecidos pode afetar as tarefas da rede.



**Figura 1. Exemplo do ciclo operacional de dois nós**

A comunicação de dados é uma das tarefas afetadas por essa indisponibilidade. Quando um nó envia um pacote, a comunicação pode falhar se o próximo nó estiver dormindo. A camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) das RSSFs trata esse desafio através do controle do acesso ao meio sem fio para que cada próximo nó receba seu pacote sem colisões nem falhas. Logo, os protocolos MAC devem determinar o momento em que o próximo nó estará acordado para que os nós emissores possam transmitir.

O próximo período acordado de um nó é chamado de momento acordado. A literatura apresenta várias técnicas para determinar o momento acordado do próximo nó [7, 8, 9]. Elas podem ser divididas em políticas pró-ativa e reativa. A primeira faz com que cada nó compartilhe seu escalonamento com seus vizinhos o que permite a cada emissor agendar sua transmissão para o momento acordado do próximo nó. A reativa não compartilha informações e quando um nó precisa enviar um pacote, ele efetua um processo para descobrir esse momento. A vantagem da pró-ativa é a disponibilidade da informação sobre o próximo nó o que permite o agendamento de transmissões. Sua limitação é que o processo de compartilhamento é baseado na troca de pacotes, aumentando o consumo de energia. Além disso, a informação compartilhada pode desatualizar, exigindo novas trocas de pacotes. As desatualizações acontecem devido às restrições de hardware dos nós (e.g., atraso de relógio) ou à dinamicidade das RSSFs. A vantagem da reativa é a inexistência do custo de compartilhamento e sua limitação é que o processo de descoberta é baseado em retransmissões o que também aumenta o consumo de energia. A escolha da política a ser utilizada na camada MAC deve considerar a relação custo-benefício entre compartilhar informações, obtê-las quando necessário e a frequência com que elas serão utilizadas. Dadas as limitações das duas políticas, novas soluções deveriam ser investigadas.

Uma solução híbrida entre as políticas existentes poderia ser investigada para determinar o momento acordado do próximo nó. A ideia é que cada nó emissor insira seu escalonamento no pacote e cada receptor explore essa informação para criar e atualizar uma base de dados contendo o escalonamento de vizinhos. Diferente da política pró-ativa, a informação é obtida sem troca extra de pacotes o que elimina o custo de compartilhamento. Quando um nó precisa enviar um pacote, ele verifica se conhece o momento acordado do próximo nó. Caso afirmativo, como na política pró-ativa, ele agenda sua transmissão para esse momento, senão, ele inicia um processo de descoberta do escalonamento do próximo nó. Quando o nó emissor descobre essa informação, ele atualiza sua base de dados e efetua sua transmissão. Ao contrário da política reativa, as transmissões futuras podem explorar tal informação para evitar o processo de descoberta. Todavia, uma desvantagem da solução híbrida é que cada nó emissor insere um *overhead* nos pacotes.

Este trabalho apresenta e avalia uma política híbrida para determinar o momento acordado do próximo nó. Resultados de simulação revelam o efeito da política híbrida

em protocolos MAC pró-ativo e reativo. A solução proposta reduziu o número de transmissões e o consumo de energia das políticas existentes na maioria dos cenários avaliados.

O restante deste trabalho é dividido da seguinte forma. A seção 2 aborda os trabalhos relacionados. A seção 3 mostra a política híbrida e a seção 4, os resultados de simulação. A seção 5 descreve as conclusões e as direções futuras deste trabalho.

## 2. Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta alguns protocolos MAC baseados nas políticas pró-ativa e reativa. Além disso, ela mostra o *Multi* [3], um protocolo híbrido que combina técnicas pró-ativa e reativa de roteamento. Alguns exemplos de protocolos MAC pró-ativos são o *Sensor MAC* (SMAC) [12], *Battery Aware MAC* (BAMAC) [6] e *Opportunistic MAC* (OMAC) [4]. Alguns exemplos de reativos são o *Asynchronous MAC* (AMAC) [8], *High Efficient Sensor MAC* (HESMAC) [11] e *Receiver-based MAC* (RbMAC) [9]. Este trabalho utiliza a política híbrida no OMAC e no AMAC e compara cada um com sua política original.

A diferença entre os protocolos pró-ativos propostos na literatura está na forma como eles compartilham o escalonamento de trabalho e tratam das colisões e das falhas. O SMAC faz com que os nós vizinhos sincronizem seus escalonamentos para dormirem e acordarem ao mesmo tempo. O BAMAC explora o efeito de recarga das baterias para estender o tempo de vida da rede e faz com que cada nó compartilhe seu escalonamento e energia residual com seus vizinhos. O OMAC faz com que os nós vizinhos compartilhem seus escalonamentos e cada nó emissor agende sua transmissão para o momento acordado do próximo nó. Caso um emissor esteja adormecido quando o próximo nó acordar, o OMAC utiliza a comunicação oportunista em que o emissor acorda, transmite e retorna ao seu escalonamento de trabalho. Os protocolos MAC pró-ativos normalmente exploram técnicas tradicionais de redes sem fio para tratar de colisões e falhas. O SMAC, BAMAC e OMAC escutam o meio e utilizam a troca de pacotes de *request-to-send* (RTS) e *clear-to-send* (CTS) do IEEE 802.11 para tratar o problema do terminal escondido.

A diferença entre os protocolos reativos propostos na literatura está no processo de descoberta e como eles lidam com colisões e falhas. O AMAC e o HESMAC exploram os pacotes de RTS e CTS no processo de descoberta de forma que cada emissor retransmite o RTS até que o próximo nó envie um CTS. O número máximo e o intervalo entre as retransmissões do RTS são baseados no escalonamento de trabalho dos nós. Protocolos semelhantes foram propostos em [2, 5]. O RbMAC considera que a escolha do próximo nó é baseada no receptor para aumentar as chances de encontrar o próximo nó acordado o que minimiza o consumo de energia do processo de descoberta.

A ideia do *Multi* é prever a necessidade de se criar e manter uma árvore de coleta. Quando o número de eventos sensoriados é maior que certo limiar, o *Multi* apresenta um comportamento pró-ativo no qual ele cria e atualiza a árvore de coleta. Caso contrário, ele possui um comportamento reativo em que cria a árvore sobre demanda.

Os autores deste trabalho desconhecem outros trabalhos que proponham uma política híbrida para determinar o momento acordado do próximo nó. Os protocolos MAC mostrados nesta seção se diferenciam da solução híbrida por considerarem somente uma das duas políticas existentes. O *Multi* se assemelha à política híbrida por combinar técnicas pró-ativa e reativa, contudo, ele trata um problema distinto.

### 3. Política Híbrida

Esta seção propõe a política híbrida cuja ideia básica é que cada nó emissor insira seu escalonamento de trabalho no pacote e cada receptor mantenha uma base de dados com essa informação que será explorada em transmissões futuras. Caso um nó tenha que enviar um pacote para outro cujo escalonamento é desconhecido, o nó emissor inicia um processo de descoberta baseado em retransmissões periódicas. A seção 3.1 discute o funcionamento básico da política proposta. A seção 3.2 mostra os parâmetros que cada emissor insere no pacote. A seção 3.3 define o número máximo e o intervalo entre as retransmissões do processo de descoberta.

#### 3.1. Funcionamento Básico

O funcionamento básico da política híbrida pode ser modelado a partir de eventos e ações tal que quando um evento acontece, tem-se uma ação como resposta. Uma ação também pode chamar outra ação. Os eventos considerados nesta política são enviar e receber pacote, descobrir e excluir escalonamento de trabalho. As figs. 2 até 5 mostram as ações da política híbrida.

A geração do evento enviar pacote acontece através de requisições das camadas de rede ou MAC. A sua ação resultante faz o nó corrente verificar se conhece o escalonamento do próximo nó (fig. 2, ponto A). Caso verdadeiro, o nó corrente verifica se o próximo está acordado (fig. 2, ponto B), como na política pró-ativa. Se verdadeiro, o nó corrente insere seu escalonamento no pacote a ser enviado e o envia (fig. 2, pontos C e D), senão, ele reescala o evento enviar pacote para o momento acordado do próximo nó (fig. 2, ponto F). Quando o nó não conhece o escalonamento do próximo nó (fig. 2, ponto A), ele executa a ação de descoberta (fig. 2, ponto G), como na política reativa.

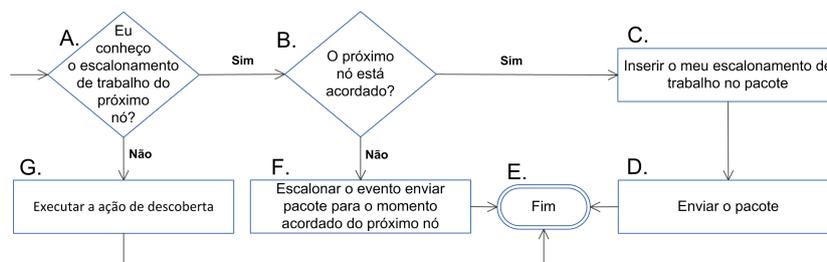
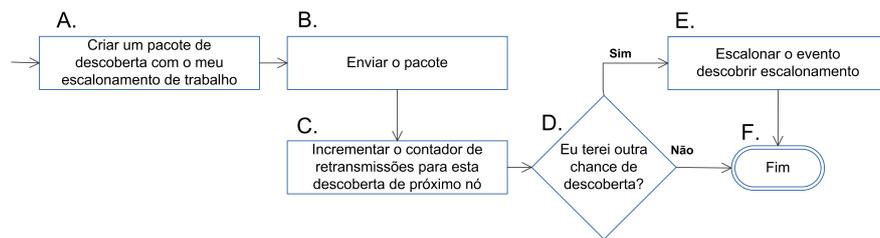


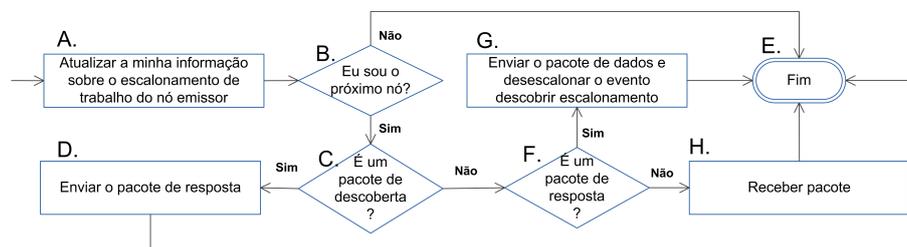
Figura 2. Ação resultante para o evento enviar pacote

A ação de descoberta faz com que o nó corrente retransmita periodicamente um pacote de descoberta. O nó retransmite esse pacote até receber uma resposta do vizinho cujo escalonamento é desconhecido ou alcançar o número máximo de retransmissões. O sucesso da descoberta acontece quando o nó corrente recebe um pacote de resposta enviado pelo vizinho. O primeiro passo da ação de descoberta faz com que o nó corrente crie e envie um pacote de descoberta contendo seu escalonamento de trabalho (fig. 3, pontos A e B). Em seguida, o nó incrementa um contador de retransmissões para a descoberta corrente (fig. 3, ponto C) e verifica se terá outra chance de descobrir o escalonamento do próximo nó (fig. 3, ponto D). O número de chances corresponde ao número máximo de retransmissões. Se o contador de retransmissões for menor que o máximo, o nó escala o evento descobrir escalonamento (fig. 3, ponto E), senão, ele termina o processo sem sucesso na descoberta (fig. 3, ponto F).



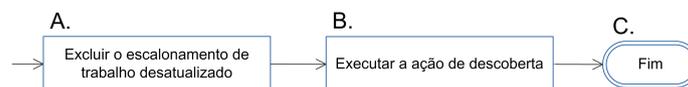
**Figura 3. Ação de descoberta**

A ação resultante do evento receber pacote faz com que o nó corrente atualize sua informação sobre o escalonamento do nó emissor (fig. 4, ponto A). Em seguida, o nó verifica se ele é o próximo nó (fig. 4, ponto B). Se verdadeiro, ele verifica se o pacote é de descoberta (fig. 4, ponto C). Caso afirmativo, o nó é o próximo em um processo de comunicação com o emissor do pacote. Logo, o nó corrente envia um pacote de resposta para informar ao emissor da descoberta que o nó corrente está acordado (fig. 4, ponto D). Se o pacote não for de descoberta, o nó verifica se o pacote é de resposta (fig. 4, ponto F). Se verdadeiro, isso significa que o nó corrente havia iniciado um processo de descoberta cujo próximo nó está no momento acordado e que o nó corrente pode enviar dados. Nesse caso, o processo de descoberta terminou com sucesso e o nó pode cancelar o evento descobrir escalonamento (fig. 4, ponto G). Quando o pacote não é de descoberta nem de resposta, o nó encaminha o pacote para as camadas MAC e de rede (fig. 4, ponto H). Quando o nó não é o destino (fig. 4, ponto B), a ação termina (fig. 4, ponto E).



**Figura 4. Ação resultante para o evento receber pacote**

O evento excluir escalonamento acontece devido às requisições geradas pela camada MAC quando um nó tem que enviar um pacote para um vizinho que não responde. Sua ação resultante faz com que o nó corrente exclua a informação de escalonamento sobre o vizinho que não responde e execute a ação de descoberta (fig. 5, pontos A e B).



**Figura 5. Ação resultante para o evento excluir escalonamento**

As ações da política híbrida efetuam um chaveamento dinâmico entre as políticas existentes. O comportamento inicial é similar ao da reativa em que não existe troca extra de pacotes. Outra característica reativa é a existência de um mecanismo de descoberta. Contudo, a política híbrida utiliza esse mecanismo apenas quando o nó corrente desconhece o escalonamento do próximo nó ou essa informação estiver desatualizada. O fato da política híbrida criar e atualizar uma base de dados com o escalonamento dos nós vizinhos mostra um comportamento pró-ativo, contudo, sem a troca extra de pacotes.

### 3.2. Parâmetros Inseridos nos Pacotes

A definição dos parâmetros inseridos no pacote é baseada nas suposições listadas abaixo:

- O tempo de vida dos nós é dividido em ciclos operacionais contínuos, de tamanho constante e com o período acordado sempre antecedendo o de dormir. Assim, um nó conhece seu escalonamento de trabalho (ou o de um vizinho) tendo o ciclo de trabalho e a posição  $p \in [0, 1]$  no ciclo operacional. Por exemplo, como o ciclo de trabalho dos nós A e B na fig. 1 é respectivamente 10% e 70%, o nó A está acordado se estiver entre as posições 0 e 0,1, e B, entre 0 e 0,7.
- A posição dos nós sensores em seus ciclos operacionais é assíncrona porque a aplicação pode ativá-los em momentos distintos.
- Um nó adormecido acorda conforme seu escalonamento de trabalho ou para efetuar uma transmissão de forma oportunista [4].

Dadas as suposições, os parâmetros inseridos por cada nó emissor no pacote são seu ciclo de trabalho e a posição no ciclo operacional. Essas informações permitem que os receptores conheçam o escalonamento de trabalho do nó emissor que pode ser explorado em transmissões futuras. Contudo, como a posição de um nó em seu ciclo operacional muda ao longo do tempo, os receptores usam a posição do emissor para calcular e armazenar sua diferença de ciclo para esse nó. As vantagens desse parâmetro são que seu valor não muda durante o tempo de vida da rede (exceto com desatualizações de ciclo) e que um nó sabe o momento acordado de outro a partir da diferença entre eles e do ciclo operacional do outro. Por exemplo, suponha que o nó A da fig. 1 sabe que sua diferença para B é de 0,23 e que o ciclo de trabalho desse é 70%. Se A tiver que enviar um pacote para B, A envia quando sua posição estiver entre 0,23 e 0,93. Se B sabe que sua diferença para A é de 0,77 e que o ciclo de trabalho de A é 10%, B envia entre 0,77 e 0,87.

Os nós receptores utilizam a equação (1) para calcular sua diferença de ciclo para o emissor.  $Minha_{pos}$  e  $Outro_{pos}$  são respectivamente as posições do receptor e do emissor em seus ciclos operacionais no fim da transmissão. Como a subtração delas pode ser negativa e a posição é cíclica, a equação (1) adiciona um ciclo à subtração se seu resultado for negativo. Por exemplo, se os nós A e B da fig. 1 estiverem respectivamente nas posições 0,28 e 0,05 quando B receber um pacote de A, a diferença de B para A será  $0,05 - 0,28 + 1 = 0,77$ , pois  $Minha_{pos} < Outro_{pos}$ . Se eles estiverem nas mesmas posições e A receber um pacote de B, a diferença de A para B será  $0,28 - 0,05 = 0,23$ .

$$\text{diferença} = \begin{cases} Minha_{pos} - Outro_{pos} & \text{se } Minha_{pos} \geq Outro_{pos} \\ Minha_{pos} - Outro_{pos} + 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

A desvantagem da inserção de parâmetros nos pacotes é o aumento do seu tamanho o que minimiza os ganhos de energia da política híbrida. Uma forma de minimizar ou eliminar essa desvantagem é explorar técnicas de codificação ou reduzir o número de pacotes contendo esse *overhead*.

### 3.3. Número Máximo e Intervalo entre as Retransmissões

A política híbrida define o número máximo e o intervalo entre as retransmissões com os objetivos de garantir que o próximo nó estará acordado em pelo menos uma das retransmissões do pacote de descoberta e de minimizar o número de retransmissões no processo

de descoberta. Para isso, ela escalona as retransmissões obedecendo a duas condições. Primeiro, o tempo total do processo de descoberta (o intervalo entre a primeira e a última retransmissões) deve ser maior ou igual ao período adormecido, garantindo que o próximo nó sempre acorda durante o processo de descoberta. Segundo, o intervalo entre as retransmissões deve ser menor ou igual ao período acordado para garantir que quando o próximo nó acordar, o emissor fará pelo menos uma retransmissão antes que o próximo nó adormeça novamente. Dado que o próximo nó sempre acorda durante o processo de descoberta e que quando ele está acordado, o emissor sempre faz pelo menos uma retransmissão, a política híbrida consegue garantir que o próximo nó estará acordado em pelo menos uma das retransmissões do processo de descoberta.

A política híbrida minimiza o número de retransmissões maximizando o intervalo entre elas e minimizando o tempo total do processo de retransmissão. Para isso, ela faz com que o tempo total do processo de descoberta e o intervalo entre as retransmissões sejam iguais aos períodos adormecido e acordado, respectivamente. O número total de retransmissões é o teto da divisão do período adormecido pelo acordado.

#### 4. Resultados de Simulação

Esta seção avalia os efeitos da política híbrida em protocolos MAC pró-ativo e reativo em cenários de disseminação de dados em que um nó monitor envia dados para a rede. Esse tipo de comunicação é crucial, pois o nó monitor realiza tarefas específicas tais como alterar o modo de funcionamento dos sensores, ativar/desativá-los e enviar requisições ou interesses para eles. A seção 4.1 mostra os parâmetros de simulação. As seções 4.2 e 4.3 avaliam os efeitos da política proposta em protocolos pró-ativo e reativo, respectivamente.

##### 4.1. Parâmetros de Simulação

Todos os protocolos foram implementados no *Network Simulator 2* e os resultados de simulação correspondem à média aritmética de  $n$  simulações, onde  $n$  é o menor tamanho de amostra que proporciona o intervalo de confiança desejado. O nível de confiança foi de 95% e utilizou-se o teste- $T$  com 0,05 de significância para afirmar que um protocolo é melhor ou pior do que outro para uma dada métrica.

Em todas as simulações, utilizou-se uma rede com 500 nós estáticos, homogêneos e com capacidade de energia finita e não renovável. O consumo de energia de cada nó é baseado no Mica2, sua energia inicial foi suficiente para nenhum nó morrer por falta de energia durante a simulação e seu raio de comunicação foi de 100 m. Eles foram depositados de forma aleatória em uma área  $1000 \times 1000 \text{ m}^2$  e considerou-se que cada nó conhece sua localização. A rede também é composta de um nó monitor sem restrição de recursos, localizado no canto inferior esquerdo da rede e cujo ciclo de trabalho é de 100%.

Este trabalho avalia os efeitos da política híbrida no OMAC pró-ativo e no AMAC reativo. A principal alteração para a versão híbrida do OMAC foi a remoção do compartilhamento de pacotes e a inserção do processo de descoberta. Para a versão híbrida do AMAC, foram as inserções da comunicação oportunista e da base de dados com informações sobre vizinhos. Nos dois protocolos híbridos, cada nó emissor inseriu seus parâmetros de escalonamento somente nos pacotes de RTS e CTS. Isso porque seus receptores são praticamente os mesmos dos demais pacotes (de dados e ACK). A inserção de parâmetros nos pacotes de dados e ACK aumentaria o consumo de energia e seria redundante para os receptores. Como o aumento do tamanho dos pacotes influencia o consumo

de energia, as simulações deste trabalho consideram que o tamanho dos pacotes de RTS e CTS híbridos é 1,25 vezes maior que o dos não híbridos. Além disso, o tamanho dos pacotes de RTS e CTS não híbridos é igual ao dos pacotes de ACK e de compartilhamento (usado no protocolo pró-ativo) e o tamanho dos pacotes de dados é o dobro desse valor.

Nos cenários avaliados, o nó monitor executa uma série de disseminações para um nó escolhido aleatoriamente em três regiões circulares com centros equidistantes do nó monitor e raio igual ao de comunicação. Utilizou-se o *Trajectory Based Forwarding* [10] na camada de rede porque ele é um protocolo de roteamento eficiente em termos de energia e concebido para a disseminação de dados em RSSFs. O tempo de simulação é de 200 s. Porém, a primeira disseminação acontece após 10 s para que os protocolos sejam inicializados e a última acontece antes de 150 s para que todos os pacotes sejam roteados.

Este trabalho considera dois cenários de simulação: um em que os nós sensores operam com um ciclo de trabalho estático e outro em que esse parâmetro é dinâmico. Escolheu-se o parâmetro ciclo de trabalho porque ele influencia o momento acordado e os valores avaliados são baseados nos apresentados na literatura sobre RSSFs (e.g., [4, 9]). No cenário com ciclo estático, o escalonamento dos nós não se modifica ao longo do tempo de vida da rede o que favorece a política pró-ativa que compartilha informações. Todos os protocolos foram avaliados com os valores estáticos de 1%, 10% e 100%. Além disso, nesse cenário, o nó monitor disseminou 500 pacotes de dados gerados pela distribuição de probabilidade uniforme. No outro cenário, os nós possuem um comportamento adaptativo, operam com um ciclo de trabalho dinâmico em que o escalonamento de trabalho se modifica ao longo do tempo de vida da rede. Isso favorece a política reativa que não compartilha informações. Esse cenário considera um fluxo de dados que varia ao longo da simulação e faz com que os nós sensores que participarem da disseminação adaptem seu ciclo de trabalho para prover suporte à variações no tráfego de dados. O nó monitor dissemina 1000 pacotes de dados dos quais ele gera metade a partir da distribuição de probabilidade uniforme e a outra metade a partir da distribuição Gaussiana com média 100 e desvio padrão de 20. O ciclo de trabalho inicial de nós sensores é de 1% e quando um nó envia um pacote de dados, ele atualiza seu ciclo de trabalho de acordo com um valor definido pelo nó monitor em cada pacote de dados. Como esse nó gera o tráfego de dados, este trabalho assume que ele pode solicitar aos nós sensores para atualizarem o ciclo de trabalho, provendo suporte às flutuações do tráfego de dados.

#### **4.2. Política Híbrida com um Protocolo MAC Pró-ativo**

Esta seção avalia a influência da política híbrida no protocolo pró-ativo OMAC. As figs. 6 até 9 mostram o desempenho do OMAC pró-ativo e do híbrido em um cenário de disseminação de dados em que os nós operam com um ciclo de trabalho estático. Na fig. 10, o ciclo é dinâmico. As métricas avaliadas são a taxa de entrega, o número de transmissões, o consumo de energia com transmissões e a latência. A taxa de entrega é fundamental, pois pacotes podem ser perdidos durante a disseminação. O número de transmissões e seu consumo de energia indicam o custo dos protocolos. Em especial, o consumo com transmissões mostra o efeito da política híbrida inserir um *overhead* no cabeçalho dos pacotes. O aumento do tamanho dos pacotes normalmente eleva esse consumo. A latência é um parâmetro crucial porque o atraso pode causar congestionamentos e perdas. Principalmente, quando os nós operam com um ciclo de trabalho reduzido em que os emissores esperaram mais tempo até momento acordado do próximo nó.

A fig. 6 mostra a taxa de entrega que significa a porcentagem de pacotes entregues aos seus destinos durante as disseminações. Nos três gráficos, os protocolos híbrido e pró-ativo entregam praticamente todos os pacotes disseminados. O teste- $T$  com 0,05 de significância mostra que os protocolos não apresentam qualquer diferença. A taxa de entrega para os ciclos de trabalho de 1%, 10% e 100% foi de 98%, 99% e 100%, respectivamente. As perdas nos dois primeiros acontecem porque a redução do ciclo de trabalho minimiza o tempo disponível para a comunicação o que causa colisões e atrasos.

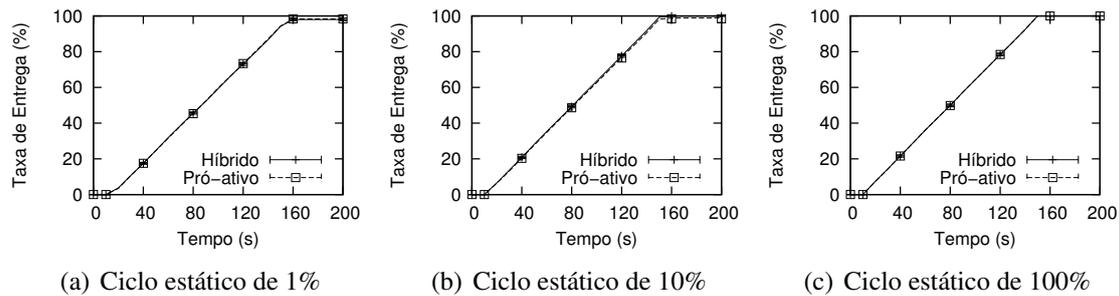
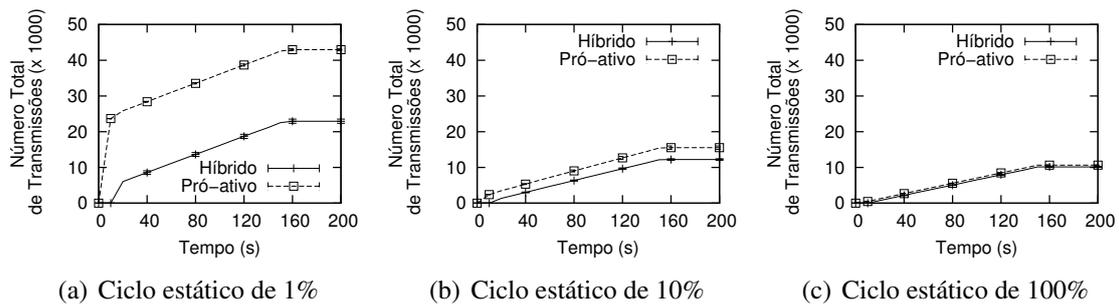


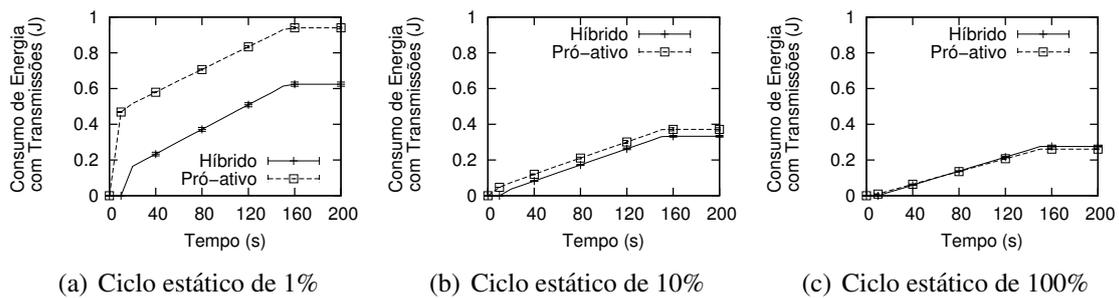
Figura 6. Taxa de entrega do híbrido e do pró-ativo com ciclo estático

A fig. 7 mostra o número total de transmissões. No protocolo pró-ativo, cada nó compartilha seu escalonamento com apenas 50% de seus vizinhos para reduzir o custo de compartilhamento. Essa fração foi escolhida empiricamente como o menor valor que não reduzisse a taxa de entrega do protocolo pró-ativo. Se ela fosse maior, o protocolo pró-ativo faria mais transmissões. Na figura, à medida que o ciclo de trabalho aumenta, o número de transmissões reduz. Isso porque quando os nós ficam mais tempo acordados, aumenta-se a chance do próximo nó estar acordado e faz com que o processo de compartilhamento pró-ativo e o híbrido de descoberta demandem menos transmissões. O compartilhamento pró-ativo acontece no início da simulação até 10 s. Nas figs. 7-a até 7-c, até 10 s, o número de transmissões do pró-ativo corresponde a respectivamente 55%, 16% e 5% do seu número final de transmissões. Por outro lado, o custo de descoberta do híbrido está concentrado nas primeiras disseminações. Isso porque o destino de cada disseminação está localizado em uma das três áreas de destino, fazendo com que as rotas de disseminação sejam praticamente as mesmas e permitindo que os nós emissores explorem as informações descobertas em disseminações subsequentes. Nas primeiras disseminações (entre 10 e 20 s), o híbrido com ciclo de trabalho de 1%, 10% e 100% efetua respectivamente 4,8, 1,7 e 1,1 mais transmissões que nas outras disseminações. Nas figs. 7-a até 7-c, o pró-ativo efetua respectivamente 2,0, 1,3 e 1,1 vezes mais transmissões que o híbrido. Isso porque no pró-ativo, todos os nós compartilham seus escalonamentos e no híbrido, somente os emissores efetuam a descoberta.

A fig. 8 mostra a energia consumida com transmissões ao longo do tempo de vida da rede. O aumento do ciclo de trabalho reduz o consumo de energia com transmissões nos dois protocolos porque eles efetuam menos transmissões. Nas figs. 8-a e 8-b, o consumo do pró-ativo foi respectivamente 1,4 e 1,1 vezes maior que a do híbrido. Isso mostra que a economia de energia obtida pelo híbrido ao eliminar o compartilhamento pró-ativo foi maior que o consumo extra dos pacotes híbridos de RTS e CTS. Para o ciclo de trabalho de 100% (fig. 8-c), o consumo do híbrido foi de 1,1 vezes maior que o do pró-ativo. Isso porque o aumento do ciclo de trabalho minimiza o número de transmissões necessárias para o compartilhamento pró-ativo e não afeta o *overhead* híbrido.

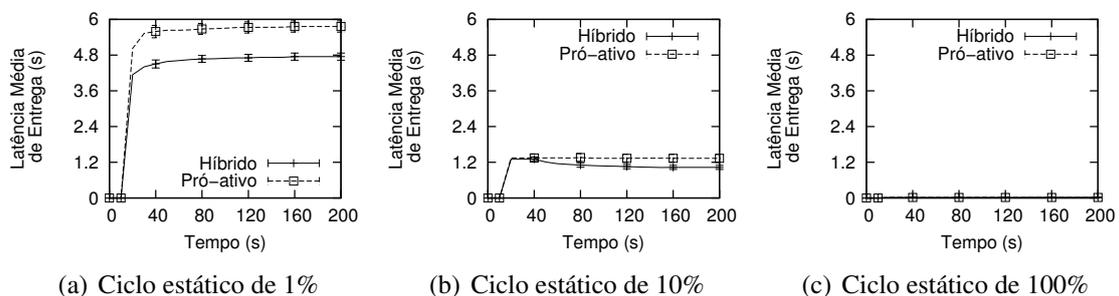


**Figura 7. Transmissões do híbrido e do pró-ativo com ciclo estático**



**Figura 8. Consumo de energia com transmissões do híbrido e do pró-ativo com ciclo estático**

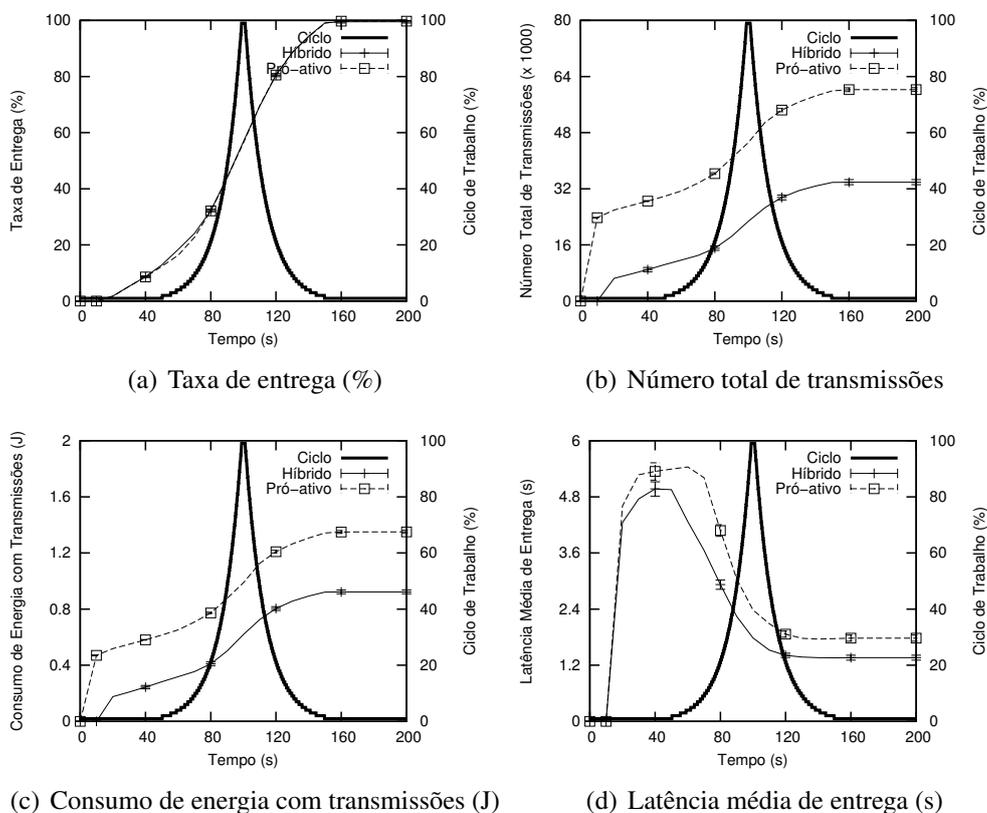
A fig. 9 mostra a latência média de entrega ao longo do tempo de vida da rede. O aumento do ciclo de trabalho reduz a latência porque os nós esperam menos tempo pelo momento acordado do próximo nó. Nas figs. 9-a e 9-b, a latência do pró-ativo foi respectivamente 1,2 e 1,3 vezes maior que o do híbrido. Isso porque no pró-ativo, cada nó conhece somente 50% de seus vizinhos o que reduz as opções de próximo nó. Destaca-se que a latência do pró-ativo pode ser reduzida se cada nó conhecer o escalonamento de trabalho de todos seus vizinhos, contudo, isso exige mais transmissões no compartilhamento. Para o ciclo de trabalho de 100% (fig. 9-c), os dois protocolos apresentaram a mesma latência porque todos os nós ficam acordados durante todo o tempo de vida da rede. Nesse caso, o *teste-T* com 0,05 de significância mostra que os dois protocolos não apresentam qualquer diferença na latência.



**Figura 9. Latência do híbrido e do pró-ativo com ciclo estático**

A fig. 10 mostra o desempenho dos protocolos quando os nós operam com um ciclo de trabalho dinâmico. As figs. 10-a até 10-d mostram as métricas avaliadas no eixo y à esquerda e no da direita, o ciclo de trabalho esperado para os nós que participam das disseminações. A fig. 10-a mostra que os dois protocolos entregam quase todos os pacotes. A inclinação das curvas é maior no meio da simulação porque o nó monitor

dissemina mais pacotes. A fig. 10-b mostra o número total de transmissões em que o pró-ativo efetuou 1,8 vezes mais transmissões que o híbrido devido às transmissões iniciais do compartilhamento pró-ativo. A fig. 10-c mostra o consumo de energia com transmissões em que mesmo os pacotes de RTS e CTS híbridos tendo 1,25 do tamanho original, o consumo de energia do pró-ativo é 1,5 vezes maior que o híbrido. A fig. 10-d mostra a latência média de entrega em que o pró-ativo apresenta um atraso de 1,3 vezes maior que o híbrido porque no pró-ativo, cada nó conhece o escalonamento de apenas 50% de seus vizinhos. A latência inicial dos dois protocolos é maior que no restante da simulação porque os nós operam com um ciclo de trabalho reduzido. No final da simulação, eles também operam com um ciclo de trabalho reduzido, contudo, esse atraso é minimizado pelo valor mostrado ser a latência média durante toda a simulação.



**Figura 10. Métricas avaliadas para o híbrido e o pró-ativo com ciclo dinâmico**

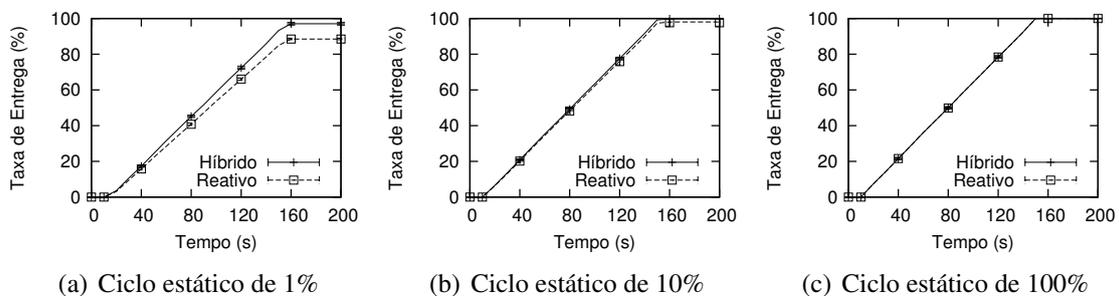
Os resultados de simulação revelam que para o cenário avaliado, a política híbrida é mais indicada que a pró-ativa quando os nós operam com um ciclo estático reduzido. Como a melhor forma de economizar energia em RSSFs é reduzir o ciclo de trabalho, esse resultado é positivo. Além disso, a política proposta também apresenta resultados expressivos para o ciclo dinâmico, outro cenário crucial em RSSFs (e.g., [9]).

### 4.3. Política Híbrida com um Protocolo MAC Reativo

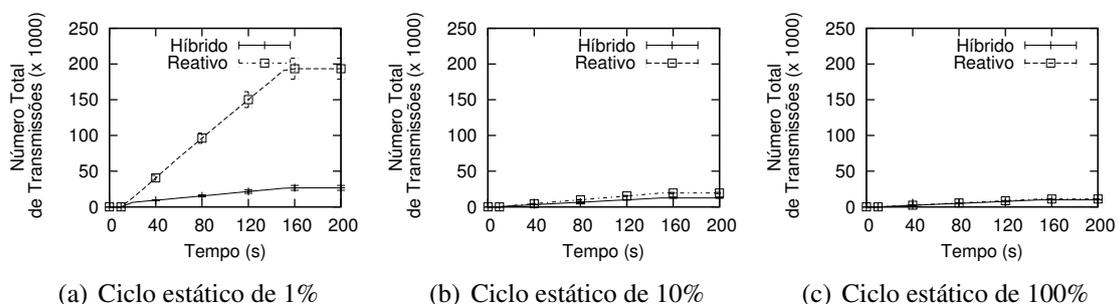
Esta seção avalia a influência da política híbrida no protocolo reativo AMAC. As métricas avaliadas são as mesmas da seção anterior. As figs. 11 até 14 comparam o AMAC reativo e o híbrido quando os nós operam com ciclos de trabalho estático de 1%, 10% e 100%. A fig. 11 mostra a taxa de entrega em que os dois protocolos entregam praticamente todos os pacotes. Nas figs. 11-a e 11-b, o reativo apresenta algumas perdas por causa de

colisões com os pacotes de descoberta. Isso porque quando os nós permanecem adormecidos por mais tempo, o processo de descoberta efetua mais transmissões para encontrar o momento acordado do próximo nó. Para o ciclo de trabalho de 1%, o protocolo híbrido entregou 1,03 vezes mais pacotes que o reativo. A fig. 12-b mostra o número total de transmissões em que o reativo com os ciclos de trabalho de 1%, 10% e 100% efetua 7,8, 1,5 e 1,1 vezes mais transmissões que o híbrido, respectivamente. Isso porque no reativo, os nós emissores efetua o processo de descoberta para cada salto do pacote. No híbrido, um nó emissor realiza esse processo somente quando desconhece o escalonamento do seu próximo nó. As figs. 13-a, 13-b e 13-c mostram a energia consumida com transmissões em que o reativo consome 4,9, 1,4 e 1,1 vezes mais energia que o híbrido, respectivamente. Isso significa que para todos os cenários considerados, os ganhos de energia obtidos pelo protocolo híbrido evitar o processo de descoberta são maiores que o consumo extra de energia dos pacotes híbridos de RTS e CTS. A fig. 14 mostra a latência média de entrega em que os dois protocolos apresentaram o mesmo resultado para todos os ciclo de trabalho avaliados. O teste- $T$  com 0,05 de significância mostra que os dois protocolos não apresentam qualquer diferença na latência.

Na fig. 15, os nós operam com um ciclo de trabalho dinâmico. Como os dois protocolos entregaram praticamente todos os pacotes e tiveram a mesma latência, a fig. 15 mostra apenas o número total de transmissões e o consumo de energia com transmissões. O reativo efetua 3,2 vezes mais transmissões e consumiu 2,5 vezes mais energia que o híbrido. Isso porque o híbrido executa o processo de descoberta somente para as primeiras disseminações. Além disso, a diferença entre os protocolos nas duas figuras é maior no início e no final da simulação quando os nós operam com um ciclo de trabalho reduzido.

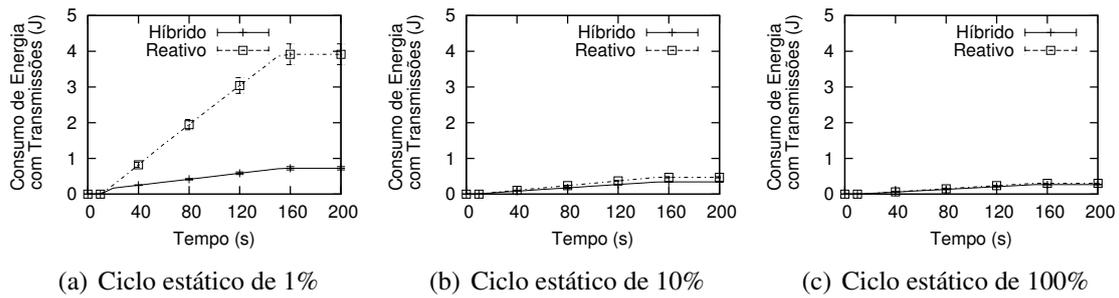


**Figura 11. Taxa de entrega do híbrido e do reativo com ciclo estático**

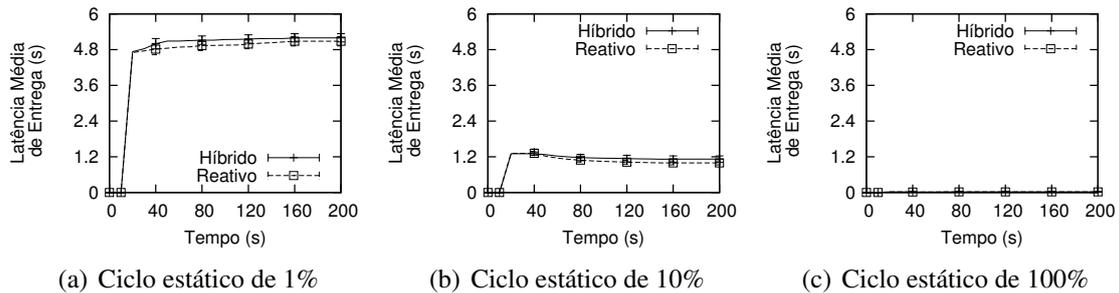


**Figura 12. Transmissões do híbrido e do reativo com ciclo estático**

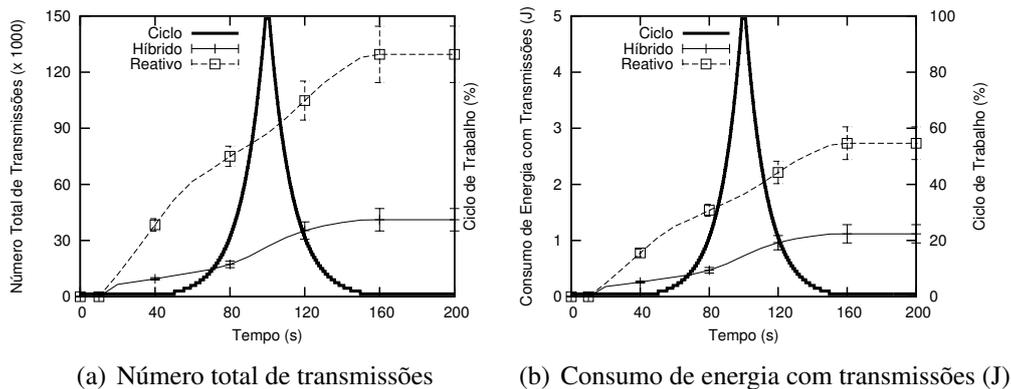
Os resultados simulação também mostram que para o cenário avaliado, a política híbrida é mais indicada que a reativa quando os nós operam com ciclos estático reduzido ou dinâmico. Como observado na seção anterior, esses ciclos são cruciais em RSSFs.



**Figura 13. Consumo de energia com transmissões do híbrido e do reativo com ciclo estático**



**Figura 14. Latência do híbrido e do reativo com ciclo estático**



**Figura 15. Métricas avaliadas para o híbrido e o reativo com ciclo dinâmico**

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma política híbrida para determinar o momento acordado do próximo nó na comunicação de dados em RSSFs. A ideia básica dessa política é que cada nó emissor insira seu escalonamento de trabalho no pacote e cada receptor mantenha uma base de dados com essa informação que será explorada em transmissões futuras. A informação inserida nos pacotes pode eliminar o custo de compartilhamento dos protocolos MAC pró-ativos e minimizar o de descoberta dos reativos. Resultados de simulação revelam que a política híbrida reduziu o número de transmissões e o consumo de energia dos protocolos MAC pró-ativos e reativos na maioria dos cenários avaliados. Em especial, a política híbrida é mais indicada que a pró-ativa e que reativa quando os nós operam com ciclos estático reduzido ou dinâmico – cenários cruciais em RSSFs.

Trabalhos futuros devem investigar outras formas de alterar o ciclo de trabalho dos nós sensores. Por exemplo, os nós podem modificar seus respectivos ciclos de trabalho a partir do tráfego percebido pelo nó. Outros trabalhos podem avaliar o *overhead* inserido

pela política híbrida através da codificação ou da compactação dessa informação. Além disso, trabalhos futuros podem avaliar outros cenários de comunicação ou o número de bits necessários para implementar a política híbrida.

## Referências

- [1] I. AKYILDIZ, W. SU, Y. SANKARASUBRAMANIAM, AND E. CAYIRCI, *Wireless sensor networks: A survey*, Computer Networks, 38 (2002), pp. 393–422.
- [2] Y. CHANG, J. JIANG, J. SHEU, AND H. SHIH, *Adca: An asynchronous duty cycle adjustment mac protocol for wireless sensor networks*, in Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'08), pp. 1–5.
- [3] C. FIGUEIREDO, E. NAKAMURA, A. LOUREIRO, AND L. RUIZ, *An event-detection estimation model for hybrid adaptive routing in wsns*, in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'07), pp. 3887–3894.
- [4] S. GUO, Y. GU, B. JIANG, AND T. HE, *Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links*, in Proceedings of the 15<sup>th</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'09), pp. 133–144.
- [5] B. JANG, J. LIM, AND M. SICHITIU, *As-mac: An asynchronous scheduled mac protocol for wireless sensor networks*, in Proceedings of the 5<sup>th</sup> IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS'08), pp. 434–441.
- [6] S. JAYASHREE, B. S. MANOJ, AND C. MURTHY, *On using battery state for medium access control in ad hoc wireless networks*, in Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'04), pp. 360–373.
- [7] J. KIM, J. ON, S. KIM, AND J. LEE, *Performance evaluation of synchronous and asynchronous mac protocols for wireless sensor networks*, in Proceedings of the 2nd International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM'08), pp. 500–506.
- [8] W. LIAO AND H. WANG, *An asynchronous mac protocol for wireless sensor networks*, Journal of Network and Computer Applications, 31 (2008), pp. 807–820.
- [9] M. MACHADO, R. MINI, AND A. LOUREIRO, *Comunicação de dados baseada no receptor para redes de sensores sem fio*, in Proceedings of the XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC'10), pp. 61–74.
- [10] D. NICULESCU AND B. NATH, *Trajectory-based forwarding and its applications*, in Proceedings of the 9<sup>th</sup> Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'03), pp. 260–272.
- [11] S. RASHWAND, J. MISIC, V. MISIC, S. BISWAS, AND M. HAQUE, *A novel asynchronous, energy efficient, low transmission delay mac protocol for wireless sensor networks*, in Proceedings of the 29<sup>th</sup> IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'09), pp. 186–193.
- [12] W. YE, J. HEIDEMANN, AND D. ESTRIN, *Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks*, IEEE/ACM Trans. Netw., 12 (2004), pp. 493–506.