PWAVE: Algoritmo para RSSF voltado para coleta de dados periódica utilizando escalonamento e sincronização.

Felipe L. Lobo[1], Marcelo B. Souza[2], Horácio A.B.F Oliveira[3]

[1]Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Roraima (UFRR)
Boa Vista – RR – Brasil

[2]Departamento de Matemática – Universidade Federal de Roraima (UFRR)
Boa Vista – RR – Brasil

[3]Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus – AM – Brasil

felipe@ufrr.br, marcelo@demat.ufrr.br, horacio@dcc.ufam.edu.br

Abstract. *Environmental monitoring of the existing fauna in forests and fields is one of the applications in Wireless Sensor Networks area. This paper describes an evaluation with the algorithm PWAVE applied in environments quality communication variable to collect data periodically, using a scheduling technique. The approach presents advances that minimize problems of clock synchronization and data collision. Its features were tested and compared to similar solutions. Results showed improvements of up to 51% in energy savings by keeping the packet loss rate below 1%.*

Resumo. *O monitoramento ambiental da fauna existente em florestas e campos é uma das aplicações da área de Redes de Sensores Sem Fio. Este trabalho descreve uma avaliação realizada com o algoritmo PWAVE aplicado em ambientes de qualidade de comunicação variável, para coletar dados periodicamente utilizando uma técnica de escalonamento. A abordagem apresenta avanços que minimizam problemas de sincronização de relógios e colisão de dados. Suas funcionalidades foram testadas e comparadas a soluções similares. Os resultados apontaram melhoras de até 51% na economia de energia mantendo a taxa de perda de pacotes abaixo de 1%.*

1. Introdução

Limitações de *hardware* são comuns em aplicações na área de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) devido ao tamanho dos nós sensores, os quais têm baixa capacidade de armazenamento, processamento e energia.

A restrição de energia é um dos maiores desafios para os projetos de RSSF. A quantidade de ações executadas pelos nós sensores, influenciam diretamente no desgaste das baterias que os alimentam. Em geral, os nós estão dispostos em locais de difícil acesso. Desta forma, em uma determinada rede, alguns sensores podem ficar inoperantes devido ao descarregamento da bateria, inviabilizando sua troca, dependendo da localização.

Este artigo descreve uma avaliação realizada com o algoritmo PWAVE. Uma nova solução de roteamento para RSSF com coleta periódica de dados, que utiliza tecnologia de escalonamento e sincronização dos nós sensores. Resultados apontam avanços na economia de energia dos nós sensores e no tempo de vida da rede como um todo.

O algoritmo foi inicialmente desenvolvido com a finalidade de monitorar e estudar a fauna em ambientes de florestas densas. RSSF neste tipo de ambiente têm sua comunicação afetada devido à degradação dos sinais dos rádios transceptores, ocasionado pelos obstáculos naturais, altas densidades e extremas variações de temperaturas [Figueiredo et al. 2009]. Diante disso, pode-se configurar o algoritmo apresentado para que a coleta periódica aconteça durante partes do dia em que a comunicação é menos afetada pelo ambiente (e.g., durante a noite), a fim de obter maior precisão na taxa de entrega de dados.

O restante deste trabalho está organizado como segue. Soluções atuais encontradas na literatura estão dispostas na Seção 2. Na Seção 3, é apresentado o algoritmo PWAVE, um algoritmo de roteamento voltado para RSSF com coleta periódica. O desempenho do algoritmo é avaliado na Seção 4. Por último, nas Seções 5, 6 e 7 serão feitas conclusões, algumas discussões para trabalhos futuros, agradecimentos e as referências bibliográficas que sustentam as ideias defendidas neste trabalho.

2. Trabalhos Correlatos

Diversos trabalhos têm sido propostos com a finalidade de encontrar novas técnicas para criação de algoritmos que reduzam o consumo de energia e, consequentemente, aumentam o tempo de vida da rede [Anastasi et al. 2009]. Alguns trabalhos que buscam reduzir o consumo de energia e utilizam técnicas de organização dos nós, aplicados em redes de sensores são apresentados nesta seção.

O S-MAC (*Sensor MAC*) [Ye et al. 2004], procura reduzir a escuta ociosa fazendo com que o ciclo de funcionamento do nó sensor seja dividido em períodos de escuta e dormência, os quais têm como finalidade reduzir o consumo de energia durante os longos tempos de ociosidade. Esta é uma das abordagens mais conhecidas no estado da arte, direcionado para coleta de dados reativa, quando detecta um evento os nós passam ao estado ativo para a transmissão de dados. Em Haque et al. [2010], foi proposto um eficiente esquema de contenção para protocolos MAC (*Medium Access Control*), baseados em CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) adequado para coleta de dados periódica, onde a rede é dividida em *clusters*, e o líder destes, são equipados com maiores recursos de energia comparados aos outros nós.

Um algoritmo que consegue economizar energia utilizando rotas mais curtas para transmissão de dados em direção ao *sink*, explorando as correlações espaciais e temporais é apresentado em Leandro Villa [2011]. Outro trabalho que visa a economia de energia [Nunes 2011] é o algoritmo FARES, o qual evita que mensagens replicadas desnecessariamente se espalhem pela rede.

Os protocolos aqui apresentados são desenvolvidos para aplicações gerais, com o objetivo de poupar energia. A eficiência destes é largamente dependente da aplicação da RSSF em questão.

3. Algoritmo PWAVE

O PWAVE é um algoritmo de roteamento integrado baseado em ciclos de tempo, onde as transmissões dos dados são feitas através de intervalos predeterminados. Desta forma, consegue diminuir uma das fontes de desperdício de energia, a escuta ociosa. Ao invés de manter os rádios dos nós ligados mesmo quando não há eventos, trabalha de maneira inversa, mantém os rádios desligados mesmo quando os eventos existem. Enquanto as transmissões não são executadas, os nós sensores permanecem coletando e processando as informações do ambiente.

3.1. Descrição do Algoritmo

Esta solução organiza os nós sensores em uma árvore de roteamento de dados. No início do algoritmo, os nós estão todos com seus rádios ligados e então é executado um *flooding* controlado na rede, onde o nó *sink* envia um pacote de dados Figura 1(a). Este pacote contém o número de saltos percorridos do *sink* até o nó destino. Cada nó sensor ao receber o pacote, incrementa a variável de número de saltos, fica ciente de qual é a sua altura, quem é seu respectivo pai na árvore e cria sua respectiva tabela de roteamento. O nó pai escolhido é o primeiro a receber o pacote.

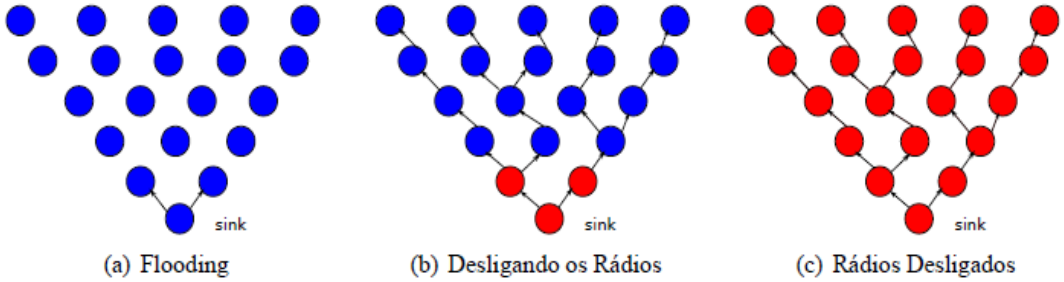


Figura 1. Árvore de Roteamento.

Em seguida, o nó que acabou de receber o pacote, o repassa para a altura seguinte até que o pacote alcance a rede toda, e imediatamente desliga seu rádio Figura 1(b). Pode acontecer de um nó receber mais de um pacote repetido. Então ao receber um pacote, o nó faz a verificação e se for repetido o descarta.

Quando a rede toda é alcançada, todos os nós estão com seus respectivos rádios desligados Figura 1(c). A partir disso, cada nó aciona o seu *timersleep*. Ao expirar este contador os nós ligam os rádios durante um intervalo de tempo para que a comunicação seja feita. Entretanto, os nós não se ligam todos ao mesmo tempo, mas de forma ordenada, conforme será explicado a seguir.

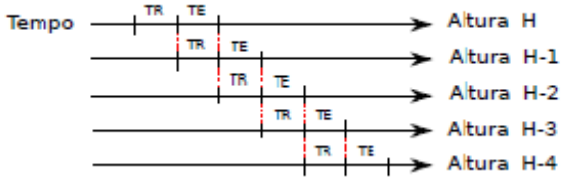


Figura 2. Agendamento Coordenado de Coleta Periódica.

O agendamento coordenado para a coleta periódica, ilustrado na Figura 2, ocorre da seguinte maneira: os nós folhas da altura H acordam durante Tslot de tempo que é

dividido em dois: tempo de receber (TR) e o tempo de enviar dados (TE). Os nós da altura H aguardam o TR. Como não há nenhuma outra altura acima com os nós ligados,

os sensores da altura H não irão receber dados. No momento TE da altura H, os nós da altura H-1 ligam seus rádios devendo o TR desta altura coincidir no tempo com o TE da altura acima (H) para que ocorra a comunicação.

No PWAVE todos os nós da rede encaminham os dados coletados. Logo, os nós da altura H enviam seus pacotes de dados para seus nós pais da altura H-1, enquanto isso todos os outros nós, que não pertencem às respectivas alturas da árvore de roteamento permanecem com seus rádios desligados. Assim que o TE dos nós da altura H termina, os sensores desligam seus rádios. Enquanto os nós da altura H-2 ligam os seus e o TR coincide com o TE da altura logo acima (H-1). Então, os nós da altura (H-1) agregam seus dados coletados com os dados recebidos da altura anterior e encaminham para altura seguinte (H-2). Este processo se repete até que os dados percorram todas as alturas da árvore de roteamento até chegarem ao destino, o nó *sink*.

Vale ressaltar que o Tslot pode ser variável proporcionalmente ao intervalo do tempo de coleta, já que um acúmulo de dados por um longo período de tempo pode sobrecarregar os nós, principalmente os mais próximos ao *sink*. Desta forma, o PWAVE mantém somente duas alturas por vez ligadas, evitando a escuta ociosa e, principalmente, colisões de pacotes. Esta rotina, a qual se assemelha a uma onda se repete a cada coleta de dados dando origem ao nome do algoritmo, PWAVE.

Um ponto crucial para que a solução seja aplicada é a sincronização, uma vez que para funcionar corretamente, os sensores de uma RSSF com coleta periódica precisam ter seus relógios sincronizados. Contudo, manter os relógios sincronizados é também um desafio, pois estes se dessincronizam devido às variações climáticas, a imprecisão e diferença do *hardware* empregado e condições do ambiente.

3.2. Sincronização no PWAVE

Conforme Vig [1992], no pior caso os relógios de quartzo sofrem uma interferência de 100 ppm para mais ou para menos. Portanto, o Tslot de cada altura na árvore é modificado e ajustado de acordo com o período de coleta dos dados. Não tem como precisar se o relógio dessincroniza para mais ou para menos. Assim o Tslot é ajustado de maneira não acumulativa, a cada agendamento de coleta, levando-se em consideração o pior caso da dessincronização dos relógios tanto para mais (soma-se ao tempo final do Tslot (tf) o tempo máximo que dessincroniza), quanto para menos (subtrai-se ao tempo inicial do Tslot (ti) o tempo máximo de dessincronização), como demonstrado na Figura 3. A cada nova onda de coleta de dados é feita a sincronização, os relógios se ajustam e os nós transmitem seus dados até o *sink*.

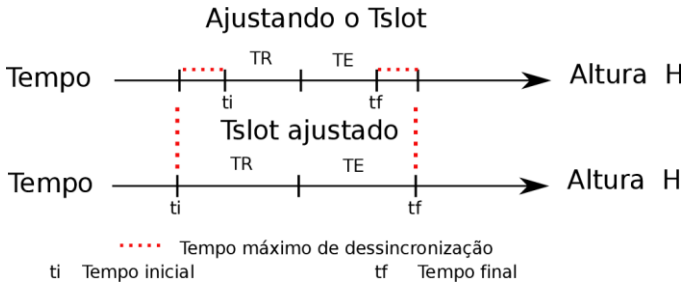


Figura 3. Ajuste de Tslot.

Em cenários onde os sensores são dispostos em locais com grande variação de temperaturas (e.g., florestas e campos), interfere no cristal de quartzo utilizado pelos relógios, podendo variar sua frequência de acordo com a temperatura ou condições do ambiente Vig [1992]. Então, faz-se necessária a sincronização dos relógios dos sensores, onde todos os nós da rede devem possuir uma escala de tempo comum entre si, levando em consideração um tempo como referência.

Neste trabalho, é apresentada uma técnica de sincronização em RSSF, que permite um agendamento coordenado de comunicação entre os nós. A solução proposta no PWAVE é fazer com que os relógios dos nós sincronizem com seus vizinhos, mesmo sem um nó de referência. Tal solução se mostrou suficiente para a execução do PWAVE e ao mesmo tempo capaz de economizar energia. Para realizar esta sincronização, foram utilizados os pacotes de dados da própria coleta periódica, evitando assim que mais pacotes trafegassem pela rede.

No momento em que os pacotes são enviados, os nós receptores armazenam o tempo do relógio do emissor, calcula a média de tempo, levando em consideração o atraso do salto do pacote e o erro de sincronização, atualizam os seus *offsets* e ajustam os seus relógios. Desta forma a cada novo ciclo de coleta de dados os nós sincronizam-se e evitam um atraso acumulativo. Esta solução de sincronização é detalhada no Algoritmo 1:

```
Entrada : Msg
    1 TE ← getMyTime();
    2 TR ← 0;
    3 TA ← 0;
    4 CompOffset ← 0;
    5 if Msg = PacotePeriodico then
    6     //Ajuste dos relógios
    7     TE ←TE + oneHopError();
    8     TR ← getMyTime();
    9     TA ← (TE + TR)/2;
   10     CompOffset ← (TR - TA);
Saída: Tempo Ajustado
```

Algoritmo 1: Sincronização dos Relógios.

3.3. Colisão de Dados

A colisão de dados é evitada ao manter-se o mínimo de nós ligados ao mesmo tempo. Entretanto, como todos os nós da mesma altura irão ligar seus rádios no instante idêntico, é ainda possível que mais de um nó transmita simultaneamente seus dados para outro, o que poderia resultar em colisão de dados. Para evitar ainda mais essas colisões, os nós ligam-se no igual momento, porém na etapa da transmissão, cria-se uma janela de contenção de dados, respeitando as características de uma distribuição normal de tempo aleatório dentro de um intervalo pequeno de tempo entre poucos milissegundos. Desta maneira, cada nó que tentar acessar o meio, tem uma probabilidade menor de colidir seus dados com os de outro nó.

Além disso, outra característica do PWAVE que contribui para diminuir o problema da colisão e opera em conjunto com a janela de contenção, é o Tslot, que por ser dividido em transmissão e recepção, distribuído em tempos diferentes para cada altura da árvore de roteamento, resulta em uma menor chance dos dados colidirem.

Outro fator que pode implicar em colisão de dados é o intervalo de coleta de dados. Em intervalos maiores de coleta, provavelmente a quantidade de dados coletados durante este período de tempo será maior, portanto o Tslot deve ser ajustado com um intervalo maior para garantir que não haja colisão de dados na rede.

4. Avaliação e Resultados

A avaliação é feita através do simulador de redes NS-2 (Network Simulator-2) na versão 2.34 [NS-2, 2013]. Foram feitos experimentos com um conjunto de diversas combinações de protocolos, como descrito a seguir.

Os parâmetros padrões utilizados nas simulações estão de acordo com a Tabela 1 e os parâmetros com relação ao consumo de energia são apresentados na Tabela 2.

Parâmetros	**Valores**
Campo de sensoriamento	130 × 130 m
Raio de Comunicação	15 m
Número de nós	128
Densidade	0,02 nós/m²
Intervalo de coleta	86400 s (1 dia)
Tempo de simulação	2592000 s (30 dias)

Tabela 1: Parâmetros Padrões.

Parâmetros de Energia	**Valores**
Transmissão	342×10^{-7} joules/byte
Recepção	$1888\text{x}10^{-8}$ joules/s
Escuta	$1000\text{x}10^{-8}$ joules/s
Inicial	50 joules

Tabela 2: Parâmetros da Simulação.

Os resultados obtidos através dos experimentos são as médias dos valores após executadas 33 diferentes instâncias (*seeds*). Em todos os gráficos, curvas representam a média dos valores, enquanto as barras de erro, o intervalo de confiança de 95%. Estes resultados obtidos estão descritos na próxima subseção.

Para uma avaliação mais justa do desempenho do PWAVE, compara-se sua utilização com o protocolo S-MAC que serve como referência para os protocolos atuais do estado da arte. Porém, foi feita uma adaptação do S-MAC para coleta de dados periódica com longos períodos de dormência dos rádios, fazendo seus rádios permanecerem desligados um período de tempo igual ao do PWAVE. O agendamento programado de coleta de dados também foi igual.

Para comprovar a escolha do *baseline*, foram comparadas quatro combinações diferentes descritas a seguir. Na primeira combinação, empregou-se o PWAVE em conjunto com o protocolo MAC 802.11, padrão do NS-2. Nesta combinação, que será chamada de PWAVE + MAC, inicialmente é feito um *flooding* na rede para a descoberta das rotas que serão utilizadas na coleta periódica. Em seguida os rádios dos sensores são desligados e agendados para ligá-los novamente no momento da coleta. Neste instante, os nós ligam seus rádios e transmitem seus dados coletados para seus respectivos pais na árvore de roteamento.

Posteriormente, foi combinado o PWAVE com o S-MAC (denominada de PWAVE + S-MAC), onde acontece o mesmo processo da combinação anterior, exatamente igual a maneira da descoberta das rotas e de como os rádios são desligados. Combinou-se também, o protocolo de coleta periódica básica que denominou-se de algoritmo de árvore, com o MAC 802.11 (Árvore + MAC). Nesta combinação, os rádios dos nós permaneceram ligados durante todo o tempo de simulação, a coleta de dados periódica foi feita através de *flooding* e cada nó mandou os dados coletados para seu pai na árvore. Outra combinação foi utilizar o protocolo de coleta periódica básica com o SMAC (Árvore + S-MAC). Aqui, é feito um *flooding* para a descoberta das rotas, os nós são desligados pelo protocolo S-MAC e permanecem desligados até que a coleta de dados ocorra.

4.1. Resultados

Conforme ilustrado na Figura 4(a) a combinação Árvore + MAC obteve o pior desempenho em eficiência de energia, pois nesta combinação os rádios permaneceram ligados durante todo o tempo de simulação. A combinação Árvore + S-MAC, já alcançou um desempenho melhor, porque o S-MAC desliga os rádios dos sensores. Observa-se que o PWAVE + MAC é a combinação que apresenta maior economia de energia, isto porque o S-MAC utiliza o estado de rádio *idle*, o qual implica em gasto de energia, enquanto o PWAVE só emprega três estado: transmissão, recepção e desligado.

Na Figura 4(b), pode-se notar que a taxa de perda de pacotes aumentou quando combinado o PWAVE com S-MAC, o conflito se dá no agendamento das transmissões, como o SMAC é reativo, ele agenda seu envio dos dados em um tempo diferente do PWAVE que utiliza a coleta agendada para um tempo futuro predeterminado. Nas demais combinações a taxa de perda de pacotes permaneceu estável.

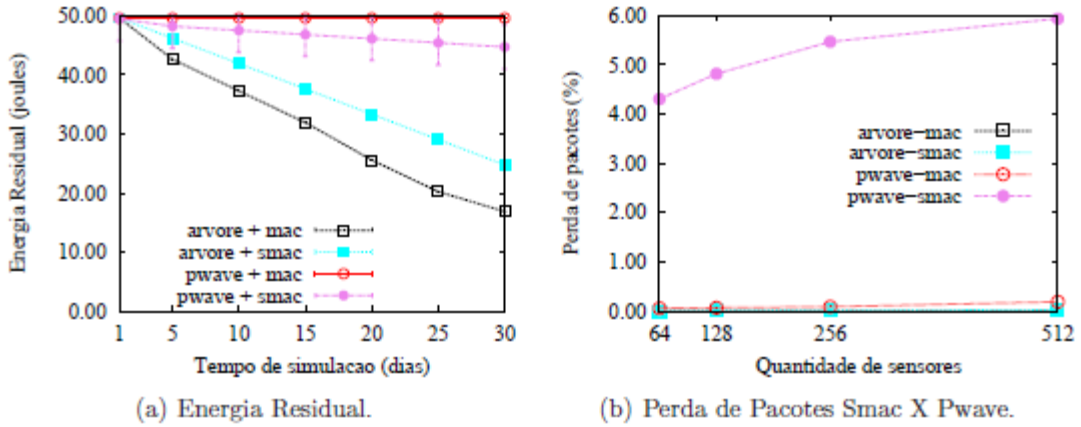


Figura 4. Comparação Entre os Algoritmos.

Depois de feita a análise inicial de acordo com os resultados acima, levando em consideração as métricas de energia residual e taxa de perda de pacotes, comparou-se para fins de resultados o PWAVE + MAC versus Árvore + S-MAC, que a partir de agora denominados respectivamente de PWAVE e SMAC.

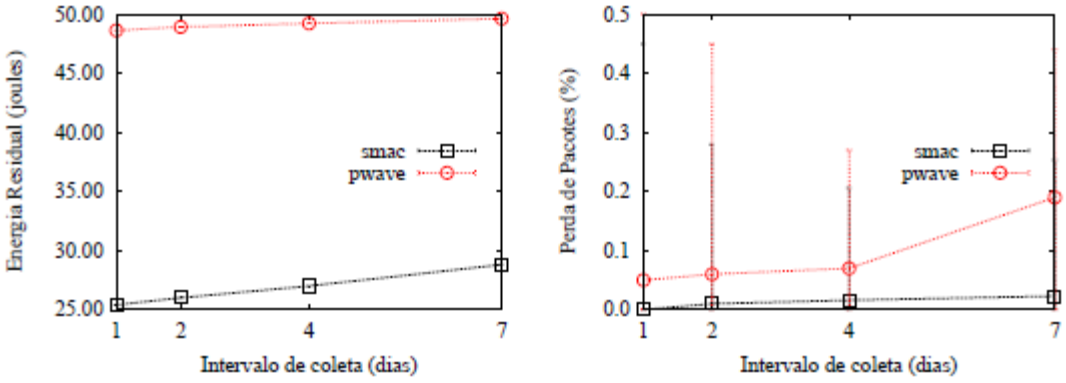
O motivo pelo qual se escolheu o S-MAC para comparação, é porque ele serve como base para muitos algoritmos propostos na literatura até os dias de hoje. Além

disso, o SMAC mostrou-se incompatível com o PWAVE, gerando as perdas de pacotes e o mau funcionamento quando testados em conjunto.

4.2. Impacto do Intervalo de Coleta X Eficiência em Energia

O objetivo desta avaliação é mostrar que o PWAVE é eficiente em energia. Para isso, utilizou-se este mesmo cenário e confrotou-se o PWAVE com o S-MAC. O algoritmo proposto PWAVE mostrou-se bem mais eficiente em termos de energia, devido à sua maneira de organização da rede, criando a árvore de roteamento, desligando os rádios e mantendo apenas os rádios de duas alturas ligados por vez. Como mostra a Figura 5(a), o PWAVE foi capaz de economizar 51,2% de energia quando comparado ao S-MAC.

Percebe-se que apesar do aumento da taxa de perda de pacotes, conforme ilustrado na Figura 5(b), o PWAVE não superou a marca de 1%, se equiparando ao S-MAC. Este aumento deve-se ao período de sincronização, pois a mesma é feita junto com a coleta periódica. Então quanto maior é o intervalo de coleta, maior é o erro de sincronização.

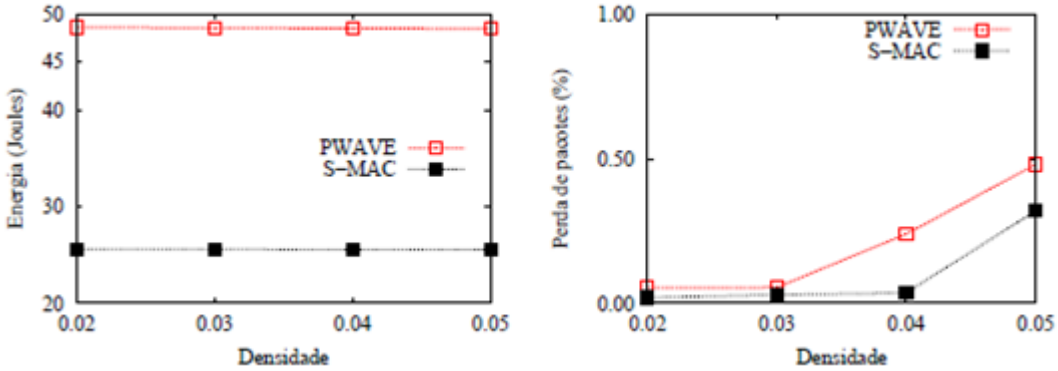


(a) Energia Residual Smac X Pwave. (b) Perda de Pacotes Smac x Pwave.

Figura 5. Energia x Intervalo de Coleta.

4.3. Impacto da Densidade

Avaliou-se o impacto da densidade da rede aumentando a quantidade de nós no mesmo +campo de sensores, de modo que a densidade da rede variou de 0,02, 0,03, 0,04 e 0,05 nós/m^2. A Figura 6(a) mostra que a média de energia residual da rede que diminuiu aproximadamente 0,3% com o aumento da densidade.



(a) Energia (b) Tráfego

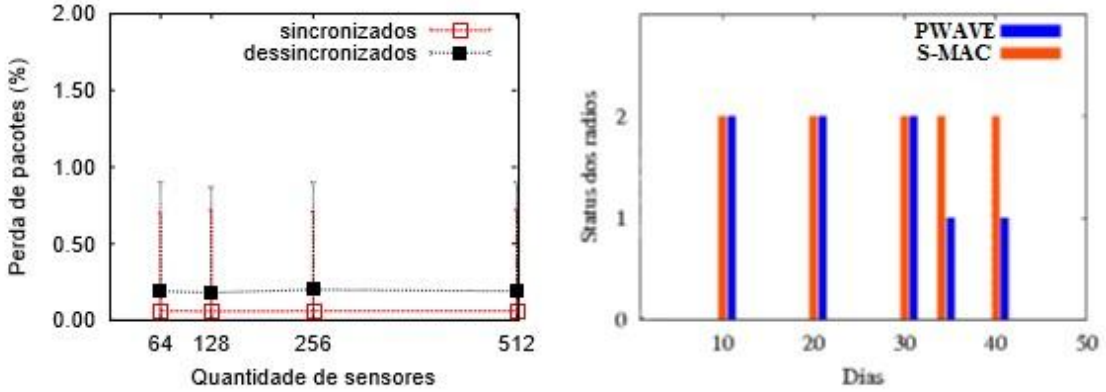
Figura 6. Densidade PWAVE X S-MAC.

A densidade impactou na métrica de perda de pacotes, devido a maior concentração do número de nós sensores no espaço. De acordo com a Figura 6(b) o aumento na taxa de perda de pacotes foi de 0,4%.

4.4. Impacto do Erro de Sincronização

Neste cenário, avaliou-se o impacto do erro de sincronização. Com os relógios sincronizados, a taxa de perda de pacotes atingiu apenas 0,06%. Com os relógios dessincronizados, no pior caso alcançou 0,19%. Uma das vantagens do PWAVE é que a taxa de perda de dados é constante mesmo com a variação do número de nós, como nota-se na Figura 7(a). Isto ocorre devido ao agendamento coordenado de coleta em conjunto com a sincronização dos relógios a cada ciclo de coleta. Caso contrário, a dessincronização seria acumulativa e em algum momento no tempo alguns nós da rede ficariam incapazes de se comunicar com o restante da rede.

Resultados mostram que foram precisos aproximadamente 34 dias, 17 horas e 16 minutos, como exibe a Figura 7(b), na qual o número 2 representa os rádios comunicando com outros e 1 é quando os rádios não conseguem se comunicar, tornando inviável a aplicação do PWAVE.



(a) Sensores Sincronizados X Dessincronizados. (b) Perda de comunicação.

Figura 7. Impacto da Imprecisão dos Relógios.

5. Conclusões

A principal contribuição deste trabalho foi mostrar que o PWAVE utiliza uma técnica de escalonamento para a coleta de dados periódica e minimiza o problema de sincronização dos relógios, com uma proposta inovadora, que sincroniza os nós de maneira descentralizada dispensando a necessidade de um nó raiz. Diminui também, o problema da colisão de dados, devido seu Tslot ser dividido em transmissão e recepção, distribuído em tempos diferentes para cada altura da árvore de roteamento, atuando em conjunto com as janelas de contenções de dados.

Resultados obtidos mostram que o PWAVE é um algoritmo candidato a solução de RSSF baseadas em árvores e coleta periódica, contribuindo para modelagem e desenvolvimento dessas aplicações, conseguindo economizar 51% de energia a mais que as outras soluções comparadas, mantendo a taxa de perda de pacotes abaixo de 1%.

Como trabalhos futuros, pretende-se desenvolver uma técnica adaptativa para utilizar a coleta de dados forçada, que ocorra fora do agendamento programado pela coleta periódica, quando, por exemplo, um nó da rede está prestes a estourar sua

memória de armazenamento, este deve transmitir seus dados imediatamente. Esta transmissão deve levar em consideração o momento do dia mais adequado (condições climáticas), para realizá-la sem que sofra muita interferência do meio. Outro ponto importante a se trabalhar é tratar da perda de pacotes, já que o PWAVE não retransmite o pacote perdido.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelas agências INCT-SEC, CNPq, FAPESP, e FAPEAM sob os processos 573963/2008-8, 08/57870-9, e 01135/2011.

7. Referências

Anastasi, G.; Conti, M.; Francesco, M. D. & Passarella, A. (2009). *Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. Ad Hoc Networks*, 7(3):537–568.

Figueiredo, C. M. S., Nakamura, E. F., Ribas, A. D., de Souza, T. R. B., and Barreto, R. S. (2009). *Assessing the communication performance of wireless sensor networks in rainforests. In Proceedings of the 2nd IFIP conference on Wireless days, WD'09, pages 226–231, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press*.

Haque, A.; Murshed, M. & Ali, M. (2010). *Efficient contention resolution in MAC protocol for periodic data collection in WSNs. In Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, IWCMC'10, pp. 437– 441, New York, NY, USA. ACM.

Leandro Villas, Azzedine Boukerche, Daniel L. Guidoni, Horacio A.B.F. Oliveira, Regina B. Araujo, and Antonio A.F. Loureiro. 2011. *Time-space correlation for real-time, accurate, and energy-aware data reporting in wireless sensor networks. In Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*(MSWiM '11) ACM, New York, NY,USA.

NS-2 (2013). *The network simulator-2*.http://www.isu.edu./nsnam/ns. *Online Available.*

Nunes, F. B. ; Silva Junior, E. T.; Varela, A.T. FARES: um algoritmo leve para roteamento de dados em RSSF planas. In: SBESC - Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais, 2011, Florianópolis. II Workshop de Sistemas Embarcados, 2011. p. 216-220.

Vig, J. R. (1992). *Introduction to quartz frequency standards. IEEE Ultrasonics, Ferroeletrics, and Frequency Control Society*, 1:14–23.

Ye, W.; Heidemann, J. & Estrin, D. (2004). *Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3):493–506.