

Um Protocolo MAC com Critérios de Controle do Consumo de Energia entre Nós Sensores de uma Rede Sem Fio

Sandro S. De Oliveira¹

¹ Estudante de Doutorado do Departamento de Telemática da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação – FEEC, da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. End.: Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas, São Paulo – Brasil, CEP: 13083-970.

sandro@dt.fee.unicamp.br

Abstract. *In this article a MAC protocol for wireless sensor networks based on the TDMA (Time Division Multiple Access) access method with control of energy consumption between sensory nodes of network is proposed. The protocol is intended for applications which the sensors concentrated in a small region with moderate traffic. The main feature of the proposed protocol is the simplified transmission scheduling that guarantees a low consumption of energy with a reduced overhead and guarantee of a greater time of life of network. The energy consumption is analytically estimated and compared to others protocols. The results have showed that the protocol is fitted for proposed purpose in energy consumption.*

Resumo. *Neste artigo é apresentado um protocolo MAC para redes de sensores sem fio baseado no método de acesso TDMA (Time Division Multiple Access) com controle de consumo de energia entre os nós sensores da rede. É voltado para aplicações que possuem um pequeno número de sensores concentrados em uma pequena região e com tráfego moderado. A principal característica do protocolo proposto é o agendamento de transmissão simplificado que garante um consumo de energia baixo com um overhead reduzido e garantia de um maior tempo de vida da rede. O consumo de energia é estimado analiticamente e comparado com outros protocolos. Os resultados mostram que o protocolo é adequado para a finalidade proposta em termos de consumo de energia.*

1. Introdução

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) são constituídas de um grande número de nós distribuídos que colaboram uns com os outros para executarem tarefas. Um nó é representado por um pequeno hardware, composto de um ou mais sensores, um rádio transmissor/receptor, bateria e um processador. Assim, o eficiente consumo de energia é de extrema importância para o tempo de vida da rede de sensores. Vários critérios são propostos para minimizar o consumo de energia, como Heidemann e Estrin (2002), Ye, Heidemann e Estrin (2004): evitar colisão, diminuir o *overhearing* (escuta inútil), controle do *overhead* e *idle listening* (escuta ociosa, quando não há tráfego na rede). Nas arquiteturas de protocolos das RSSFs, uma das camadas de maior relevância é a MAC

(*Medium Access Control*). Os métodos de controle de acesso ao meio influenciam no consumo de energia dos dispositivos de rede, na forma como as informações são encaminhadas e na maneira como as aplicações são concebidas. Vários protocolos MAC para RSSFs têm sido propostos na literatura Heidemann e Estrin (2002), Van Dam e Langendoen (2003), Kalidindi, Ray, Kannan e Iyengar (2003), Oliveira e Motoyama (2007), Oliveira e Motoyama (2008) visando obter eficientes esquemas de acesso, e são baseados em contenção ou então em TDMA.

Neste artigo é apresentada uma extensão do protocolo MAC proposto por Oliveira e Motoyama (2008), voltado para uma aplicação em que os nós sensores estão concentrados em uma pequena área física. Nesta área a mobilidade dos nós sensores é baixa e o sinal de rádio de cada nó é alcançado por todos outros nós, reduzindo o *overhead* de comunicação e o consumo de energia de cada nó. A modificação (extensão) no protocolo proposto por Oliveira e Motoyama (2008) diz respeito ao uso do conceito de um controle uniforme do consumo de energia, em função da energia residual dos nós sensores da rede. Permitindo um maior tempo de vida útil da rede de sensores. O nível de energia será balanceado uniformemente entre os nós da rede, não prejudicando o monitoramento, coleta de dados ou encaminhamento de informações de determinadas áreas (regiões) por falta de energia nos nós sensores. Assim, nós com nível de energia residual baixo serão tratados diferentemente e usados com menor frequência no encaminhamento de mensagens.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na seção II, são apresentados trabalhos correlatos ao artigo, alguns dos principais protocolos MAC para RSSFs encontrados na literatura. O protocolo proposto é descrito na seção III. Na seção seguinte, a estimativa de consumo de energia do protocolo proposto é analisada e comparada com alguns dos protocolos existentes na literatura. Finalmente, as principais conclusões são descritas na seção V.

2. Trabalhos Relacionados

Pode-se classificar os protocolos de acesso MAC para RSSFs em dois tipos principais, aqueles que são baseados em agendamento (*scheduling*) ou alocação de recursos, representado pelo método TDMA, e aqueles que são baseados em contenção.

Os protocolos baseados em TDMA utilizam, em geral, quadros repetitivos, divididos em vários slots de tempo (ou canais). No TDMA tradicional, em cada quadro, cada nó tem o acesso a um slot de tempo dedicado, em que pode enviar e/ou receber dados, utilizando toda a largura de banda do canal. Já nos protocolos de contenção baseados no *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - CSMA/CA, os nós disputam o acesso ao canal, existindo a probabilidade de colisões no envio de dados. Os protocolos baseados no CSMA/CA necessitam de quadros de controle para estabelecer um diálogo de comunicação entre as estações. Neste método há colisões e um *overhead* maior. Nesta seção são apresentados alguns dos principais protocolos MAC para RSSFs presentes na literatura e que são relevantes para comparação com o protocolo proposto.

O S-MAC, protocolo proposto por Heidemann e Estrin (2002) é baseado em CSMA/CA, utiliza sincronização para ordenação dos modos de operação do rádio. É destinado a aplicações dirigidas a eventos, insensíveis a latência e com baixa taxa de

envio de mensagens. O S-MAC usa o método de comunicação baseado em RTS/CTS/DATA/ACK para detectar a portadora física e resolver o problema de colisão. O esquema do S-MAC é baseado em um ciclo de operação dos nós com tempos fixos de escuta (*listen*) e repouso (*sleep*). A desvantagem do S-MAC está na utilização do ciclo de atividade (*duty cycle*) fixo, não permitindo o controle dinâmico do tempo dos modos de operação de escuta e repouso.

O protocolo T-MAC apresentado por Van Dam e Langendoen (2003) é semelhante ao S-MAC e visa reduzir o tempo de *idle listening*, utilizando-se de ciclos de atividade e repouso dinâmicos para diminuir o consumo de energia do nó. O controle do tempo ativo é feito por um temporizador chamado T_A (*time-out*), que ao seu término coloca o rádio em repouso. O nó escuta a rede, transmite e recebe dados durante o seu tempo ativo. A recepção de pacotes RTS ou CTS é suficiente para renovar o tempo T_A . O T-MAC é mais eficiente em consumo de energia que o S-MAC, mas é limitado em largura de banda, não sendo adequado para grandes transferências de dados e tráfego variável. O T-MAC é indicado para aplicações de pequeno tráfego.

Em Oliveira e Motoyama (2008) é apresentado um novo protocolo MAC (SA-MAC) para redes de sensores sem fio baseado no método de acesso TDMA (*Time Division Multiple Access*). É voltado para aplicações que possuem um pequeno número de sensores altamente concentrados em uma pequena região. A principal característica do protocolo é o agendamento de transmissão simplificado que garante um baixo consumo de energia e um *overhead* reduzido. O protocolo apresentado por Oliveira e Motoyama (2007) denominado FS-MAC (*Fixed Scheduling Medium Access Control*) é semelhante ao protocolo apresentado por Oliveira e Motoyama (2008), chamado SA-MAC (*Slotted Aloha Medium Access Control*). No esquema do FS-MAC, o agendamento é bastante simplificado, tendo cada sensor uma posição fixa na parte de agendamento e no esquema proposto para o SA-MAC, há um número limitado de slots de tempo que são disputados pelos nós sensores para transmitirem solicitações de agendamento.

Os trabalhos existentes tratam todos nós de forma igualitária, não prolongando uniformemente o tempo de vida da rede de sensores. O consumo de energia balanceado entre os nós é uma solução chave para prolongar o tempo de vida da rede. O protocolo ER-MAC apresentado por Kalidindi, Ray, Kannan e Iyengar (2003) possui estas características e é baseado no método de acesso TDMA. O ER-MAC utiliza um índice de controle do nível de energia disponível (*energy-criticality*) como uma função de balanceamento entre consumo de energia e a taxa de tráfego dos nós sensores. O ER-MAC faz agrupamento de um conjunto de nós e elege um nó líder. O líder do grupo é responsável por estabelecer a sincronização entre os nós membros do grupo. Quando um nó membro do grupo não é utilizado, ele repousa para preservar energia. Devido o ER-MAC ser um TDMA distribuído com sincronização local garantida, ele apresenta uma boa economia de energia tanto quanto um bom desempenho. O presente artigo acrescenta uma modificação no protocolo SA-MAC, introduzindo um indexador que prove um balanceamento do consumo de energia entre os nós sensores da rede. Na seção a seguir é descrito o esquema de funcionamento do protocolo SA-MAC e suas modificações.

3. Apresentação do protocolo SA-MAC modificado

Em algumas aplicações específicas, a mobilidade dos sensores é limitada a uma pequena área. Desse modo, pode-se utilizar nessas áreas, um nó sensor central e um grupo de sensores de modo que os sensores em cada grupo se comuniquem através desse nó sensor central. A existência de um nó sensor central possibilita uma comunicação mais simples, reduzindo *overhead* de sinalização (trocas de informação antes da transferência de dados). O nó central também será responsável pelo controle dos níveis de energia residual (ER_n) dos nós, obtido no campo do slot de agendamento de acesso (conforme Figura 1). Um algoritmo distribuído será responsável por determinar quais nós deverão repousar por mais tempo que outros nós, baseado no índice do nível de energia residual dos sensores. Este algoritmo não será descrito neste artigo. A comunicação de um sensor de um grupo com sensor de um outro grupo pode ser feita através dos nós sensores centrais. Assim, a rede pode ser expandida com a introdução de vários grupos, tendo cada grupo um nó central. Considerando estas características, o esquema de acesso TDMA é mais conveniente, pois, é um esquema que utiliza um nó centralizado e fornece um acesso sem contenção, permitindo desse modo, atrasos reduzidos nas transferências de mensagens.

O protocolo proposto utiliza períodos de escuta e repouso e é baseado no método de acesso TDMA. Introduce o conceito de estado crítico de energia proposto por Kalidindi, Ray, Kannan e Iyengar (2003), visando medir o tempo de vida de cada nó sensor baseado no seu estado (índice) de energia residual. Define-se como energia residual a energia que cada nó possui (energia resultante) em um determinado momento. Em um dado instante, um nó pode ficar um maior tempo ativo transmitindo pacotes do que o restante dos nós. Um nó com nível de energia baixo é considerado crítico. Dessa forma, nós com níveis de energia maior tendem a escutar mais frequentemente e fluxos de tráfego futuros deverão ser roteados para eles, balanceando o consumo de energia através da camada de enlace (MAC).

A Figura 1 é mostra a organização do quadro do protocolo SA-MAC modificado com a inclusão do parâmetro de controle de consumo de energia dos nós sensores. Este parâmetro é representado pelo índice ER_n localizado no slot de agendamento de acesso. Observe que o quadro é dividido em três partes. A primeira parte é utilizada para o sincronismo do quadro e, também, para reconfiguração dos nós sensores, no caso em que os nós sensores parem de funcionar ou no caso em que há inserção de novos nós sensores. A utilização desta parte pode, por exemplo, ser da seguinte forma. Em um quadro, são transmitidos os bits de sincronismo, como é feita em tradicionais sistemas PCM (*Pulse-Code Modulation*), em outro quadro, alternadamente, transmitem-se os bits de reconfiguração. A segunda parte é utilizada para enviar solicitação de agendamento. Esta parte é dividida em um determinado número de slots para que sejam utilizados para solicitar agendamento (dentro de cada slot de agendamento de acesso há mini-slot destinados ao nível de energia residual do nó sensor) e, também, para receber confirmações. Como há um número limitado de slots, neste esquema haverá contenções para o acesso a esses slots. Na terceira parte do quadro estão os canais ou slots de tempo para transportar os dados.

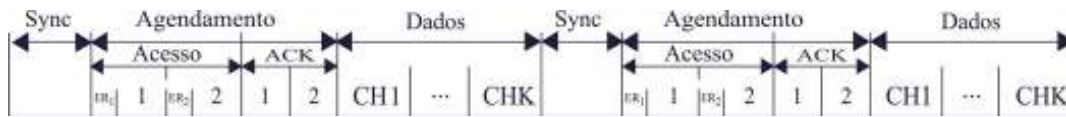


Figura 1. Formato de um quadro do protocolo SA-MAC modificado.

Para ilustrar o funcionamento do SA-MAC modificado, supõe-se a seguinte situação: se um dos nós quiser transmitir, primeiramente, é realizado um sorteio para escolher um dos slots de agendamento de acesso para transmitir. Então, a solicitação de agendamento é encaminhada, com informações de identificação do nó transmissor, o número de slots estimado para transmissão e com o índice de energia residual do nó (ER_n), esta informação de agendamento é recebida por todos os nós. Um nó ficará sabendo do sucesso ou falha na transmissão da informação de agendamento somente no quadro seguinte, quando receberá ou não o ACK. Para não aumentar a probabilidade de haver colisões sucessivas, a cada colisão o tempo de retransmissão poderá ser aumentado de acordo com o algoritmo de *backoff* exponencial. No caso em que um nó com baixo nível de energia deseja transmitir, em um dado momento, este nó poderá utilizar toda parte destinada à transmissão de dados. Os slots atribuídos de forma adaptativa permitem uma estratégia de gerenciamento de energia de acordo com as alterações dos níveis de energia residual dos nós sensores. O agendamento neste esquema é feito pelo nó central, que informará no ACK quantos canais os nós transmissores poderão utilizar.

4. Análise do consumo de energia

Para a análise de consumo de energia e na estimativa de atraso das mensagens dos protocolos propostos, pode-se desenvolver uma plataforma de simulação prática ou um programa de software. Outra forma de análise que foi a utilizada neste artigo é estimar o consumo de energia somente nos instantes ativos de transmissão. Essa estimativa poderá ser feita se for atribuído um tamanho ao quadro, se a quantidade de nós for dada e se as características do rádio transmissor forem conhecidas.

Para a análise do protocolo são feitas as seguintes suposições. Na parte de sincronismo e reconfiguração do protocolo serão reservados 4 bits. Na parte de agendamento serão considerados dois slots de tempo para acesso, incluindo o ER_n que registra o índice de energia residual e dois slots para os ACKs. Para análise do consumo de energia será utilizado um modelo de rádio transmissor TR1000 de 19,2 Kbps, cujo consumo de energia é de 36 mJ/s para transmissão, 5,4 a 14,4 mJ/s para recepção e 3 μ J/s para o estado de repouso. Serão consideradas duas redes de diferentes tamanhos: 32 e 128 nós sensores. Estes dados são utilizados para o cálculo analítico do consumo de energia do protocolo proposto, comparados com os protocolos S-MAC, T-MAC e FS-MAC apresentados na literatura.

Supõe-se para análise um ciclo de 100 ms (240 Bytes) para o S-MAC e T-MAC, e um quadro de 100 ms para o protocolo FS-MAC e o proposto SA-MAC modificado. No caso do S-MAC é considerado um período ativo de 20 ms e um período de repouso de 80 ms. Para o T-MAC o período ativo não é fixo e depende do tráfego, mas para fins de análise será considerado um tempo máximo da parte ativa de 82,5 ms e um valor de T_A de 15 ms, como usado em Van Dam e Langendoen (2003). Para o FS-MAC o período ativo depende do número de nós, do número de canais de dados e do tamanho

do pacote. Supondo, por exemplo, uma rede de 32 nós sensores, são necessários cinco bits para identificação do nó ($2^5 = 32$ nós) e três bits para alocação do canal, assim são necessários 8 bits para cada mini-slot, deste modo serão utilizados 256 bits para parte de agendamento do FS-MAC, mais quatro bits destinados a sincronização, totalizando 260 bits ou 32,5 Bytes. Para o modelo de radio descrito, o tempo de transmissão desses bits corresponde a 13,54 ms. Desta forma, para este exemplo, restam 86,46 ms para a parte de dados. Para protocolo modificado SA-MAC, considerando o mesmo cenário descrito, para um quadro de 100 ms (240 Bytes), 2,08 ms (4 bits de sincronização, 14 bits para os slots de acesso, mais 8 bits para os mini-slots do nível de energia residual ER_n e 14 bits para os slots de ACK) serão destinados para agendamento de acesso e confirmação do quadro, sendo que o restante, 97,92 ms (235 Bytes) serão destinados a parte de dados. São 4 bits para o nível de energia residual ER_n para cada slot de agendamento de acesso.

Para a comparação do consumo de energia dos três protocolos, é considerada a transferência de mensagem com tamanho de 20, 50, 100, 200 e 500 Bytes. Considerou-se somente o consumo de energia do modo de transmissão do rádio para um hop. O consumo de energia do S-MAC pode ser estimado pela Equação 1.

$$E_{S-MAC} = (NCS + NCT) * TE * CET \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo que o NCS é o número de ciclos de sinalização (RTS-CTS) antes da transmissão do arquivo; NCT é o número de ciclos necessário para a transmissão de arquivo; TE é o tempo de período ativo por ciclo e CET é a quantidade de energia consumida pelo rádio em um segundo na transmissão. O consumo de energia do T-MAC pode ser calculado pela Equação 2.

$$E_{T-MAC} = (TR + T_A + TT) * CET \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: TR é o tempo para transmissão de um quadro de RTS e CTS; T_A é o temporizador de controle de ciclos (ativo/repouso); TT é o tempo necessário para transmissão do arquivo de dados e CET é a quantidade de energia consumida pelo rádio em um segundo na transmissão. Para efeitos de análise, os cálculos de consumo de energia de S-MAC e T-MAC não foram considerados os tempos de escuta para a recepção de ACKs e na recepção do CTS foi considerado o mesmo consumo de energia de transmissão.

Para o cenário de uma rede de 32 nós sensores, o FS-MAC na parte de agendamento de acesso utiliza 32,5 bytes correspondente a 13,54 ms para transmissão. A variável que representa esta parte de agendamento será denominada TS. A Equação 3 representa o cálculo do consumo de energia do FS-MAC para o cenário descrito.

$$E_{FS-MAC} = ((TS * NQ) + TT) * CET \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: TS é o tempo de agendamento de acesso e de confirmação; NQ é o número de quadros necessários para a transmissão de dados e as variáveis TT e CET têm os mesmos significados das Equações 1 e 2.

No caso do protocolo SA-MAC modificado, para o cenário de uma rede de 32 nós, são necessários cinco bits para identificação do nó e mais dois bits para alocação de canais, totalizando sete bits para slot de tempo de acesso e também para cada slot de tempo de ACK, além de quatro bits referente ao nível de energia residual ER_n de cada slot.. Como serão utilizados dois slots para agendamento de acesso e dois para

confirmação, serão necessários 28 bits, 8 bits para o controle de energia residual, além dos quatro bits de sincronização (totalizando 40 bits, correspondente a cinco bytes). Os cinco bytes equivalem a 2,08 ms que são destinados ao agendamento de acesso com controle de energia dos nós sensores, confirmação do quadro (ACK) e sincronização, sendo que o restante, 97,02 ms (235 Bytes) serão destinados à parte de dados. A expressão geral para o consumo de energia para SA-MAC modificado pode ser dada pela Equação 4.

$$E_{SA-MAC} = ((TS * NQ) + TT) * CET \quad (\text{Equação 4})$$

Onde as variáveis têm os mesmos significados da Equação 3. As Equações (3) e (4) são semelhantes, o que difere é o valor da variável TS (referente ao tempo de agendamento de acesso e confirmação), que no protocolo proposto FS-MAC é maior do que no protocolo SA-MAC. Isso deve-se ao FS-MAC possuir um agendamento de acesso fixo, baseado no número de nós da rede, em que cada nó tem um mini-slot reservado para seu agendamento. Enquanto no protocolo SA-MAC, tem-se um número limitado de slots para agendamento. Para os demais tamanhos de mensagens, os consumos de energia podem ser calculados de modo similar, onde quanto maior o arquivo, maior o número de quadros necessários para efetuar a transmissão. O gráfico da Figura 2 mostra o consumo de energia para o S-MAC, T-MAC, FS-MAC e SA-MAC modificado considerando os diferentes tamanhos de mensagens, para uma rede de 32 nós (a) e uma rede de 128 nós (b).

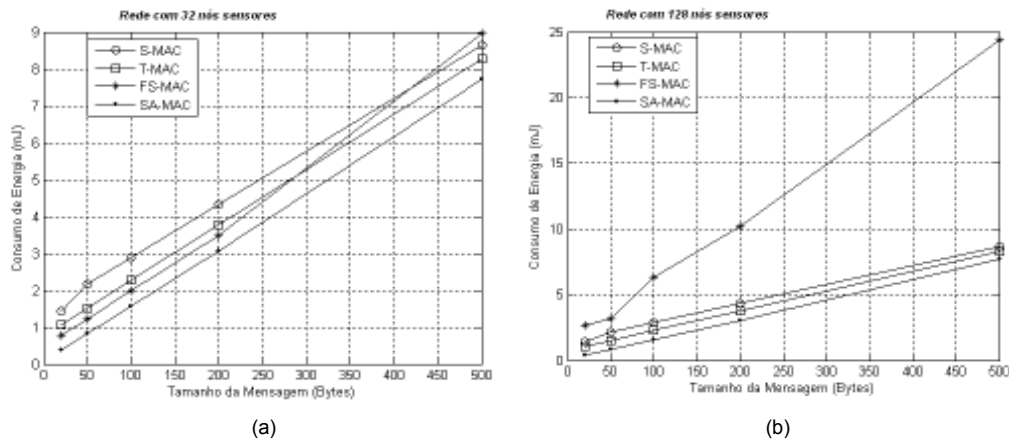


Figura 2. Consumo de energia dos protocolos para transmissão de diferentes tamanhos de mensagens – Rede de 32 nós (a) e Rede de 128 nós sensores (b).

Observa-se que para os protocolos S-MAC e T-MAC, diante do cenário proposto, o número de nós sensores na rede não influencia no consumo de energia. Para uma rede de 32 nós o S-MAC tem um alto consumo de energia por ter períodos fixos de transmissão e repouso, ou seja, sendo o T-MAC mais eficiente em consumo de energia quando comparado ao S-MAC. O FS-MAC é mais econômico que o T-MAC para uma rede de 32 nós com um tamanho de mensagem de até 270 Bytes (veja Figura 2-a). Se aumentar o número de nós, o FS-MAC, como esperado, é menos eficiente que os demais protocolos estudados (veja Figura 2-b). Entretanto, para redes maiores o FS-MAC não é eficiente devido ao crescimento da parte de agendamento com o número de

nós (alto *overhead*). A característica relevante do FS-MAC é que o software pode ser bastante simplificado e distribuído entre o nó centralizado e os nós sensores. O SA-MAC modificado é o protocolo que apresenta o menor consumo de energia independente do tamanho da rede e do quadro.

5. Conclusões

Neste artigo foi apresentado um protocolo MAC para redes de sensores sem fio baseado no método de acesso TDMA com um mecanismo de balanceamento de consumo de energia entre os nós sensores da rede. É um protocolo voltado para aplicações específicas com um agendamento de transmissão simplificado que garante um consumo de energia baixo com um *overhead* reduzido e garantia de um maior tempo de vida da rede. Os resultados mostram que o protocolo é adequado para a finalidade proposta tanto em consumo de energia como no atraso de transferência das mensagens pacotes.

O consumo de energia do protocolo SA-MAC modificado mostrou-se mais eficiente, pelo fato de ser mais flexível na forma de se fazer o acesso de agendamento, independente de número de nós da rede. Além disso, a inserção de um indexador para medir a energia residual individual de cada nó no período de agendamento garante ao nó central realizar o gerenciamento do consumo de energia dos nós, permitindo fazer um balanceamento da utilização dos nós da rede de forma estratégica.

6. Referências

- Demirkol, I., Ersoy, C. and Alagöz, F. (2006) “MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey”, IEEE Communications Magazine, vol. 44, pp. 115-121.
- Kalidindi, R., Ray, L., Kannan, R. and Iyengar, S. (2003) “Distributed Energy Aware MAC Layer for wireless sensor networks”, in International conference on wireless networks, Las Vegas, Nevada.
- Oliveira, S.S. and Motoyama, S. (2007) “Proposal of an MAC protocol for wireless sensor network with fixed scheduling of channels”, in Proceedings of the international workshop on telecommunications – IWT/07, pp. 178-182, Minas Gerais, Brasil, INATEL.
- Oliveira, S.S. e Motoyama, S. (2008) “Um Protocolo MAC para Redes de Sensores sem Fio voltado para Aplicações Específicas Utilizando o Método de Acesso TDMA”. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT'08), 2008, Rio de Janeiro.
- Van Dam, T. and Langendoen, K. (2003) “An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”, in Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 171-180, ACM Press.
- Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D. (2002) “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”, in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communication, pp.1567-1576, USC/Information Sciences Institute, New York, USA.
- Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D. (2004) “Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks”, IEEE/ACM Trans. Net., vol. 12, nº. 3, pp. 493–506.