

Protocolos MAC para Integração de Redes de Sensores sem Fio baseado em Rádio-sobre-Fibra

Tiago P. C. de Andrade¹, Nelson L. S. da Fonseca¹,
Leonardo B. Oliveira², Omar C. Branquinho³

¹ Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

² Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

³ Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUCC)

tiagoandrade@lrc.ic.unicamp.br, nfonseca@ic.unicamp.br

leob@dcc.ufmg.br, branquinho@puc-campinas.edu.br

Abstract. *With the growing demand for Wireless Sensor Networks (WSNs), the integration of these networks via Radio-over-Fiber (RoF) infrastructure allows larger coverage areas, as well as increased reliability when compared to ad-hoc WSNs and traditional mesh. In this paper, two protocols for Medium Access Control (MAC) for WSNs interconnected by RoF (RWSNs), called SPP-MAC and HMARS, are proposed. They deal with major issues in RWSNs i.e., the delay imposed by optical fiber and the existence of two collision domains: the wireless and optical. Performance evaluation of these protocols demonstrate their effectiveness.*

Resumo. *Com a crescente demanda por Redes Sensores sem Fio (RSSFs), a integração destas por meio de uma infraestrutura de Rádio-sobre-Fibra (RsF) permite áreas de cobertura maiores, bem como maior confiabilidade quando comparado com RSSF ad-hoc e mesh tradicionais. Neste trabalho, são propostos dois protocolos de Controle de Acesso ao Meio (MAC) para RSSFs interconectados por RsF (RWSNs) chamados SPP-MAC e HMARS. Eles lidam com os principais problemas em RWSNs, ou seja, o atraso imposto pela fibra óptica e a existência de dois domínios de colisão: o sem fio e o óptico. A avaliação do desempenho destes protocolos evidencia a eficácia dos mesmo.*

1. Introdução

Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) fornecem recursos de sensoriamento distribuído com propriedades interessantes em relação as redes cabeadas, tais como ausência de infra-estrutura, escalabilidade, baixo custo e flexibilidade [Estrin et al. 1999] [Pottie and Kaiser 2000]. No entanto, desafios ainda longe de serem completamente resolvidos atrasam a ampla implantação deste sistema em larga escala. Uma questão crítica, por exemplo, é a baixa confiabilidade das RSSFs, quando algum tipo de interferência nos canais de rádio ocorre. Esta situação é típica para RSSFs que transmitem em canais de rádio compartilhado com outros sistemas de comunicação [Fanimokun and Frolik 2003].

A Tecnologia Rádio-sobre-Fibra (RsF) foi sugerida como uma solução promissora para a integração de redes sem fio, bem como para aumentar a disponibilidade de largura de banda e reduzir os custos de implantação.

A tecnologia RsF é baseada no uso de enlaces ópticos para a distribuição de sinais de rádio-frequência (RF) entre uma Estação Base Controladora (BSC) e várias Unidades de Antenas Remotas (RAUs). Em tal sistema, quase todos os componentes RF são mantidos centralizados e as RAUs podem ser extremamente simples e baratas, desde que o processamento dos sinais RF seja feito pela BSC. A fibra óptica funciona como um meio transparente para o sinal e as RAUs são responsáveis somente pela conversão eletro-óptica. A tecnologia RsF é, portanto, uma tecnologia viável para a expansão das redes sem fio, já que pode reduzir drasticamente o custo das estações base (bem como o custo de suas redes de acesso backhaul) [Smyth 2003], além da fibra óptica possuir uma atenuação muito baixa (tipicamente 0,2 dB/km).

Uma opção promissora para a implementação de RSSF em áreas de cobertura maiores é a integração destas através de RsF. Essa integração permite transporte com baixo atrasos quando comparada com RSSF *ad-hoc* e *mesh* tradicionais e alta confiabilidade quando comparada com conectividade tradicionais [Hossen et al. 2009]. Além disso, o emprego de enlaces RsF para conectar RSSFs reduz significamente o custo do desenvolvimento das RSSFs em áreas com fibras ópticas não utilizadas, pois não é necessário a instalação de várias Estações Base. Uma questão importante que surge com a introdução de conexões de fibra óptica entre a BSC e as RAUs é o atraso de propagação introduzido por essas conexões. Este atraso adicional precisa ser abordado pelos protocolos, principalmente os protocolos MAC que são responsáveis pela sincronização e *timeouts*.

Nesse trabalho, propõe-se uma nova arquitetura de Redes de Sensores sem Fio conectadas por enlaces de Rádio-sobre-Fibra. Propõe-se também dois protocolos MAC para essa nova arquitetura, chamados SPP-MAC (baseado em revezamento) e HMARS (baseado em TDMA/CSMA).

Este artigo é organizado da seguinte maneira. A Seção 2 resume os trabalhos sobre protocolos MAC para RSSFs e trabalhos que utilizam o RsF. A Seção 3.2 apresenta a arquitetura proposta. A Seção 4 e a Seção 5 apresentam, respectivamente, os protocolos MAC SPP-MAC e HMARS. A Seção 6 descreve as configurações e cenários das simulações feitas e os resultados. Finalmente, a Seção 7 conclui o artigo.

2. Trabalhos Relacionados

Um grande esforço tem sido dedicado para desenvolver protocolos MAC eficientes para RSSFs. Tais protocolos foram projetados, primeiramente, para minimizar o atraso na transmissão e maximizar a vazão, e, nos últimos anos, o foco voltou-se para a redução do consumo energético.

Um dos protocolos mais difundidos, o protocolo Sensor MAC (S-MAC) [Ye et al. 2002] provê um ciclo periódico ativo/inativo para conservar energia. Durante o período inativo, os nós desligam os seus transceptores para economizar energia e durante o período ativo, os nós ligam os seus transceptores para transmitir ou receber os quadros. Os períodos ativo tem duração fixa enquanto que a duração dos períodos inativo

depende do parâmetro de ciclo-de-trabalho pré-definido. Além disso, os nós vizinhos podem formar *clusters* virtuais para configurar períodos de inatividade comuns.

Outro protocolo, o Timeout MAC (T-MAC) [van Dam and Langendoen 2003] segue a idéia básica introduzida pela S-MAC. A novidade de sua solução é a adaptação do ciclo-de-trabalho em que a duração dos períodos ativo não é mais fixa, mas varia de acordo com o tráfego. A idéia principal consiste em fazer o nó prever a atividade do canal durante o período ativo para que, no caso de nenhum tráfego ser recebido durante um determinado intervalo de tempo, ele possa desligar seu transceptor antes do período ativo terminar.

O protocolo Berkeley MAC (B-MAC) [Polastre et al. 2004] usa uma técnica baseada na detecção de outliers para melhorar a qualidade da *Clear Channel Assessment* (CCA) comparado com o padrão IEEE 802.15.4 [802 2006]. Nesta técnica, um nó pesquisa por *outliers* no sinal recebido tal que a energia do canal esteja significativamente abaixo do patamar de ruído. Se o nó detectar o outlier durante a amostragem do canal, então ele declara que o canal está livre. Se o nó não encontrar nenhum outlier em cinco amostras, então ele declara que o canal está ocupado.

O princípio do protocolo Framelet MAC (F-MAC) [Roedig et al. 2006] é reduzir as colisões e minimizar a interferência. Ele decompõe um pacote em vários framelets e os envia em diferentes frequências, e, como cada nó potencialmente interferente opera em uma frequência diferente, a probabilidade de colisões é reduzida.

O protocolo Sparse Topology and Energy Management (STEM) [Schurgers et al. 2002] utiliza dois canais: um canal de despertar e um canal de dados. O canal de despertar é utilizado para organizar o escalonamento entre o transmissor e o receptor, enquanto o canal de dados é utilizado apenas para a troca de dados uma vez que o escalonamento tenha sido feito. Para garantir um escalonamento entre o transmissor e o receptor, os nós seguem um método de amostragem de preâmbulo.

A maioria dos trabalhos sobre Rádio-sobre-Fibra concentra-se no nível físico dos sistemas; esses estudos tem focado na infra-estrutura de telefonia celular e nas redes 3G emergentes. Mais recentemente, RsF chamou a atenção de pesquisadores de redes como Wi-Fi, WiMAX, UWB e RSSF, como uma forma para expandir os serviços de redes sem fio. Os problemas que impactam a viabilidade e o desempenho desses protocolos vão além das questões na camada física. O maior efeito é o atraso adicional introduzido pelos enlaces de fibra que pode exceder os tempos limites dos protocolos MAC impossibilitando a rede de funcionar corretamente.

Entre os trabalhos que consideram RsF como um *backhaul* para aplicações de rádio, [Gomes et al. 2009] apresenta uma análise do uso da tecnologia RsF em redes WiMAX. O atraso de propagação introduzido pelo comprimento da fibra afeta o ajuste de parâmetros das camadas MAC e física. Para um ajuste eficaz, o trabalho apresenta um estudo abrangente da degradação do desempenho de redes WiMAX empregando infra-estrutura RsF e conclui-se que cenários RsF com degradação limitada a 20% na camada física são viáveis ao se usar os enlaces de fibra com comprimento máximo de 115 km ou degradação limitada a 20% na camada de aplicação ao se usar fibra de até 80 km de comprimento.

O trabalho em [Tang et al. 2007] apresenta um nova arquitetura híbrida de Rede

de Sensores sem Fio baseada em Rádio-sobre-Fibra para compensar as deficiências da arquitetura das RSSFs tradicionais. Ele investiga diferentes regras e comportamentos das RAUs nessa nova arquitetura. Resultados mostram que esta arquitetura melhora o desempenho da RSSF bem como diminui o atraso fim-a-fim da rede e o consumo de energia.

Redes de Sensores baseadas em Zigbee são a tecnologia chave na implementação de Cidades Ubíquas (u-City). No entanto, caso somente redes ad-hoc forem usadas em redes de sensores de grande porte como a u-City, é necessário muitos saltos para a informação chegar até o *sink* (PANC), causando problemas na atribuição de endereço e no atraso fim-a-fim da rede. Em [Hossen et al. 2009], a solução proposta para esses problemas divide a rede em vários *clusters*, cada um com um coordenador (nó responsável pela transmissão até o PANC), e interliga todos os coordenadores com o PANC através de enlaces ópticos utilizando RsF.

O trabalho em [Kalantari-Sabet et al. 2008] investiga as restrições e limitações enfrentados no desempenho de redes híbridas óptica-802.11. Através de simulações, experimentos e aproximações teóricas, mostrou-se que, devido aos atrasos adicionais inerentes a fibra óptica, uma pequena degradação de 15 % no desempenho ocorre. Foi, também, evidenciado que, quando os timeouts definidos no padrão são excedidos, ocorre uma falha na comunicação. Essa falha ocorre quando o comprimento da fibra atinge 13,2 km para o método de acesso básico e 8,2 km quando se usa o mecanismo RTS/CTS.

3. Arquitetura Híbrida Rádio-sobre-Fibra Rede de Sensores sem Fio

3.1. Tecnologia Rádio-sobre-Fibra

A tecnologia RsF não é uma solução recente e vem sendo empregada de forma vantajosa para prover diversos serviços. RsF consiste na transmissão de um sinal de RF através de uma fibra óptica. Esta transmissão, diferentemente do que ocorre na maioria dos sistemas de transmissão de dados ópticos, é feita de forma analógica, ou seja, o sinal RF modula diretamente o sinal óptico. Este sinal óptico é então transmitido através de uma fibra óptica e é recebido por um fotodetector que faz a conversão óptico-elétrica. Estando novamente no domínio elétrico, o sinal pode ser transmitido através de uma antena.

As principais vantagens deste sistema é a baixa atenuação dos sinais ópticos quando propagados e também a resistência a interferências eletromagnéticas.

Torna-se importante observar que idealmente todo o processo (modulação óptica do sinal, propagação do sinal pela fibra óptica e demodulação no fotodetector) deveria ser transparente, mas devido a características do sistema de RsF, existe uma degradação do sinal RF.

3.2. Arquitetura Proposta

A tecnologia RsF pode não ser uma solução recente, porém empregá-la em redes de sensores sem fio é algo inovador. A arquitetura proposta emprega um par de fibras ópticas para conectar várias RSSFs usando a tecnologia RsF, ampliando a área de cobertura e aumentando a eficiência das RSSFs.

Como considera-se uma rede infra-estruturada, não há a necessidade de nenhum protocolo de roteamento na rede pois os nós sensores transmitem diretamente para a

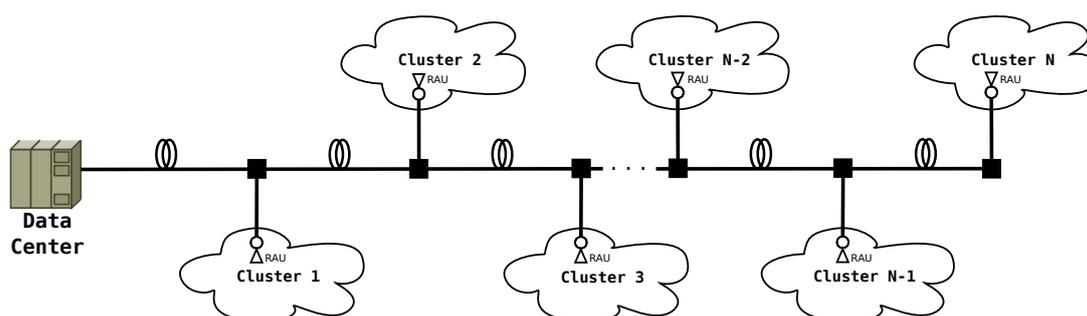


Figura 1. Nossa Proposta de Arquitetura.

Estação Base. Todos os nós sensores dentro da área de cobertura da RAU formam um *Cluster*, sendo a RAU o *Cluster Head* (CH). Como todos *clusters* têm a mesma Estação Base, podemos dizer que eles estão no mesmo domínio de colisão.

Em nossa arquitetura, a maioria dos componentes da Estação Base são mantidos em um local centralizado, longe das RAUs, onde a maior parte do processamento de sinal é realizada. A Figura 1 ilustra esta arquitetura, onde a unidade principal, ou seja, a BSC fica centralizada no *Data Center* (DC), e suas antenas, as RAUs são colocadas ao longo do par de fibras distantes alguns (ou até centenas) de quilômetros da BSC.

É necessário ter uma fibra óptica para o *downlink* e outra para o *uplink*. O *uplink* é usado para o transporte das informações dos *clusters* para a Estação Base Controladora e o *downlink* para transportar as informações da Estação Base Controladora para os *clusters*. Dessa maneira, um *cluster* não tem acesso as informações originadas em outro *cluster*.

4. Protocolo SPP-MAC

O SPP-MAC (Scheduled Priority Polling Medium Access Control) é um protocolo de revezamento que combina a técnica de priorização para alocar a quantidade certa de fatias de tempo para cada nó sensor. Dessa maneira, ele elimina as colisões e os intervalos vazios que atormentam os protocolos de acesso aleatórios.

Dois mecanismos para diminuir o consumo energético foram implementados no SPP-MAC. Um deles faz os transceptores dos nós sensores ficarem na maioria do tempo desligados, ligando-os apenas quando o nó sensor desejar transmitir; e o outro evita o overhearing fazendo o nó receptor examinar o endereço de destino do quadro logo após receber o cabeçalho MAC. Se o quadro for *unicast* e estiver endereçado para outro nó, o receptor imediatamente interrompe a recepção do quadro.

4.1. Especificação do Formato dos Quadros SPP-MAC

A Figura 2 mostra os três tipos de quadros do SPP-MAC. O *Quadro de Sinalização* é utilizado para a Estação Base Controladora informar qual nó sensor terá a oportunidade de transmitir, o *Quadro de Dados* é utilizado pelos nós sensores para transmitir seus dados e o *Quadro de Ack* é utilizado para a Estação Base Controladora informar que um quadro foi recebido. Todos os quadros utilizam o mesmo cabeçalho, que contém:

- *Frame Control* carrega as informações sobre o tipo do quadro e outras flags de controle.

- *Target Cluster* e *Target Node* carregam, respectivamente, os IDs do Cluster e do Nó de destino. Estes dois campos compõem o Endereço de Destino.
- *Source Cluster* e *Source Node* carregam, respectivamente, os IDs do Cluster e do Nó de origem. Estes dois campos compõem o Endereço de Origem.
- *Sequence Number* é o Número de Sequência do quadro.

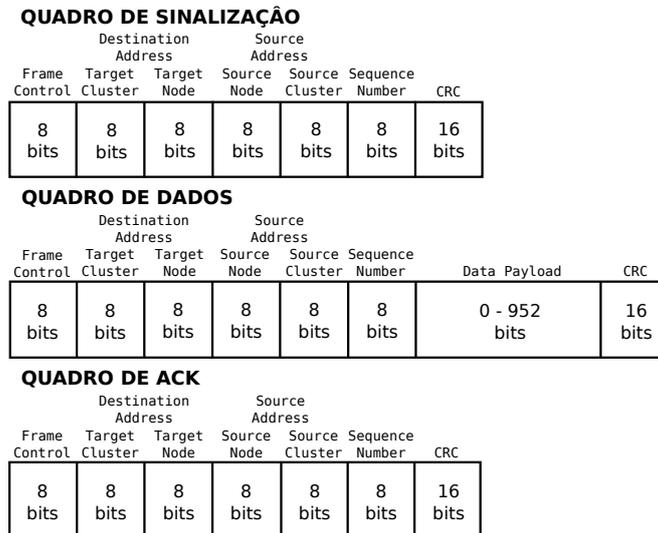


Figura 2. Formatos dos Quadros do SPP-MAC.

4.2. Atribuição de Prioridades

Nas RSSFs, os nós sensores tipicamente realizam diferentes funções (umas mais críticas que outras) tendo, assim, diferentes níveis de prioridades. Como resultado, os nós sensores podem ter diferentes oportunidades de transmissão, ou seja, os nós sensores com funções críticas na rede podem ter prioridades maiores e, conseqüentemente, maior chances de transmissão. Para resolver isso, o SPP-MAC usa uma política de prioridades.

A Estação Base Controladora mantém uma lista com os nós sensores para cada prioridade, e, baseado nessas listas é construída a lista de sinalização; somente os nós sensores nessa lista são elegíveis para receber os quadros de sinalização.

4.3. Escalonamento do Revezamento

O algoritmo de sinalização atribui uma fatia de tempo (quadro de sinalização) a mais para os nós com prioridade i em relação aos nós com prioridade $i + 1$. Supondo que o número de nós com prioridade i ($i \leq i \leq m$) é n_i e cada nó com prioridade m tem 1 fatia de tempo, então cada nó com prioridade i terá $m - i + 1$ fatias de tempo. As fatias de tempo são agrupadas em ciclos, e em cada ciclo, os nós com prioridade i obtêm $m - i + 1$ fatias de tempo. Isso significa que os nós com prioridade m obterão exatamente uma fatia de tempo durante o ciclo.

Uma maneira de dispor as fatias de tempo é atribuir a cada nó $m - i + 1$ fatias consecutivas. Porém, essa estratégia não é intuitiva pois os nós sensores tem que esperar um tempo considerável para transmitir. Ao invés disso, dividiu-se o ciclo em m sub-ciclos e, para cada sub-ciclo, todos os nós sensores com prioridade de 1 até $m - \text{round}_- + 1$ são

escolhidos. O contador de sub-ciclos é iniciado com o valor 1 e é incrementado depois de cada sub-ciclo de transmissão até seu valor chegar a $m + 1$. Quando o contador de sub-ciclos chega a $m + 1$ significa que um ciclo de transmissão terminou e um novo ciclo de transmissão deve então começar.

Tabela 1. Principais Variáveis e Constantes do Algoritmo

1	a maior prioridade
m	a menor prioridade e o número de prioridades
round₋	o número do round, $1 \leq \text{round}_- \leq m$
priority₋	prioridade
L₋	lista de nós sensores elegíveis

Algoritmo 1 Algoritmo de Escalonamento do Revezamento

Entrada: m

Saída: lista L_- de escalonamento

$\text{round}_- = 1$

enquanto $\text{round}_- \leq m$ **fazer**

para cada $\text{priority}_- \in (1, m - \text{round}_- + 1)$ **fazer**

adiciona em L_- todos os nós com prioridade priority_-

fim do para

$\text{round}_- = \text{round}_- + 1$

fim do enquanto

4.4. Transferência de Dados

Sempre que um nó sensor desejar transmitir dados para a BSC, ele deve habilitar o seu transceptor e esperar que um quadro de sinalização seja recebido. O nó transmite seus dados assim que esse quadro é recebido.

Na chegada do quadro de dados, a BSC verifica se o emissor requisitou um quadro de ACK e, caso tenha requisitado, envia um quadro de ACK de volta para o nó emissor logo após a recepção do quadro. Caso contrário, a BSC transmite um quadro de sinalização para o próximo nó sensor da lista L_- .

5. Protocolo HMARS

O protocolo HMARS (**H**ybrid **M**edium Access Control for Hybrid **R**adio-over-Fiber Wireless Sensor Network Architecture) define um método de acesso híbrido combinando o Time Division Multiple Access (TDMA) para evitar colisões no canal óptico e o Carrier Sense Medium Access (CSMA) para evitar colisões no canal sem fio.

Como o TDMA é utilizado, é necessária uma sincronização forte dos relógios dos componentes da rede como também o conhecimento prévio da topologia da rede por parte de uma unidade central que estabelecerá todo o escalonamento da rede. Dessa maneira, longos slots de tempo serão atribuídos para os clusters, e dessa maneira os nós sensores pertencentes a esses clusters poderão utilizar o CSMA para tentarem transmitir.

Como o protocolo HMARS é utilizado um método de acesso básico, não há a troca de quadros de controle RTS/CTS além de ser empregado um backoff aleatório a fim de reduzir o overhead e as colisões intra-clusters. Outra forma de reduzir o overhead foi não utilizar quadros ACK, dessa maneira o quadro é considerado recebido com sucesso sempre quando o nó sensor o transmite.

5.1. Especificação do Formato dos Quadros HMARS

A Figura 3 mostra os dois tipos de quadros do HMARS, chamados *Quadro de Dados* e *Quadro de Escalonamento*. O *Quadro de Dados* é utilizado pelos nós sensores para transmitir seus dados e o *Quadro de Escalonamento* é utilizado para a Estação Base Controladora informar o escalonamento da rede para os nós sensores. Todos os quadros utilizam o mesmo cabeçalho, que contém:

- *Frame Control* carrega as informações sobre o tipo do quadro e outras flags de controle.
- *Target Cluster* e *Target Node* carregam, respectivamente, os IDs do Cluster e do Nó de destino. Estes dois campos compõem o Endereço de Destino.
- *Source Cluster* e *Source Node* carregam, respectivamente, os IDs do Cluster e do Nó de origem. Estes dois campos compõem o Endereço de Origem.
- *Sequence Number* é o Número de Sequência do frame.

No *Quadro de Escalonamento*, o campo *Start* contém a informação de quando o primeiro período ativo começará; o campo *Active* contém a duração (em segundos) do período ativo; o campo *Sleep* contém a duração (em segundos) do período inativo; e o campo *Schedule* contém o tempo para o próximo escalonamento.

QUADRO DE DADOS									
Frame Control	Destination Address		Source Address		Sequence Number	Data Payload	CRC		
	Target Cluster	Target Node	Source Node	Source Cluster					
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	0 - 952 bits	16 bits		

QUADRO DE SCHEDULE									
Frame Control	Destination Address		Source Address		Start	Active	Sleep	Schedule	CRC
	Target Cluster	Target Node	Source Node	Source Cluster					
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	16 bits

Figura 3. Formato dos Quadros do HMARS.

5.2. CSMA - Acesso ao Canal sem Fio

Três variáveis são mantidas em cada nó sensor: *CW*, *NA*, e *MAXAttempt*. A variável *CW* é o tamanho da janela de contenção que define o número de períodos de backoff sem atividade no canal antes da transmissão poder começar; seu valor é inicializado em 2 antes de cada tentativa de transmissão e resetado para 2 cada vez que o canal está ocupado. *NA* é a quantidade de tentativas de transmissão; seu valor é inicializado em 2 antes de cada transmissão. *MAXAttempt* é a quantidade máxima de tentativas de transmissão para cada quadro.

A subcamada MAC adia a transmissão por um número aleatório de períodos completos de *backoff* entre 0 e 2 (Figura 4, Passo 2), para então requisitar à camada física a realização de um Clear Channel Assessment (CCA) (Figura 4, Passo 3).

Se o canal estiver ocupado, *NA* é incrementado de um e ao *CW* é atribuído o valor 2 (Figura 4, Passo 5). Se o *NA* é menor ou igual a *MAXAttempt*, uma nova tentativa de transmissão é feita depois de uma quantidade entre 0 e 2 períodos de backoff (Figura 4, Passo 2). Se *NA* for maior do que *MAXAttempt*, a subcamada MAC relata um erro de transmissão para a camada acima.

Se o canal estiver livre, o protocolo MAC garante que a janela de contenção expirou. Para fazer isso, *CW* é decrementado monotonicamente de um (Figura 4, Passo 4) e, subsequentemente, verifica-se se seu valor é nulo. Se não for nulo, a subcamada MAC imediatamente requer um novo CCA para a camada física. Se for nulo, a transmissão começa. Limita-se, portanto, o número de transmissões simultâneas e diminui-se o número de colisões nos clusters.

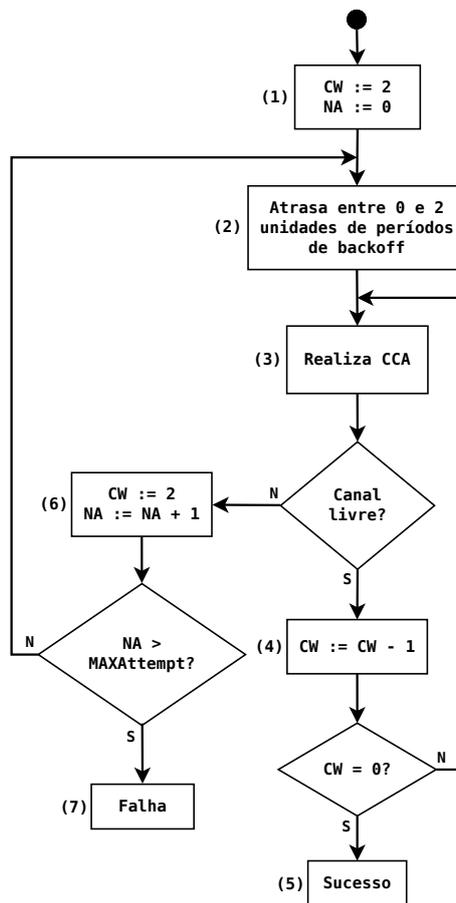


Figura 4. O Algoritmo CSMA do HMARS.

5.3. TDMA - Acesso ao Canal Óptico

Pela arquitetura proposta, a Estação Base Controladora é a unidade central por definição, assim sendo a responsável pelo processo de escalonamento dos clusters da rede.

Na fase inicial do protocolo (configuração), é feita a sincronização dos relógios dos componentes da rede juntamente com o escalonamento dos tempos para cada cluster. Para manter o escalonamento o mais preciso possível e permitir a entrada de novos nós sensores no escalonamento, a configuração é refeita de tempos em tempos.

Como no TDMA o tempo é dividido em quadros temporais, cada quadro é dividido em logas fatias de tempo e cada clusters é atribuído a uma única fatia de tempo diferente, as colisões inter-clusters são evitadas.

O número de fatias de tempo nos quadros é igual ao número de clusters na rede.

6. Simulações e Avaliação do Desempenho

6.1. Configuração da Simulação

Utilizou-se o simulador NS-2 para realizar as simulações. Como não existia nenhum módulo para RsF implementado no NS-2, implementou-se um módulo para RsF.

As características físicas do transceptor de cada nó sensor e da Estação Base de Controle (tal como o ganho das antenas, a potência de transmissão e a sensibilidade do receptor) são mostradas na Tabela 2.

Nos cenários, todos os clusters contém 10 nós sensores distantes 10 metros de sua RAU e a quantidade de clusters na rede variou de 2 até 14 clusters. Foram utilizados três diferentes distâncias separando os clusters: 2, 5 km, 5 km e 10 km. Os efeitos degradantes que os equipamentos RsF causam na rede não foram considerados nas simulações, porém, a atenuação sofrida na fibra óptica de 0.4 dBm/km foi considerada. Cada nó sensor gera um fluxo *Poisson* para o *BSC* com quadros de 52 bytes.

Foram realizadas 5 simulações independentes cada uma com um semente diferente. Intervalos de confiança possuem níveis de confiança de 95 %.

Tabela 2. Valores dos Parâmetros Utilizados

Parâmetros do Módulo PHY	
Taxa de Transmissão	250kbps
Frequência	915 MHz
Potência de Transmissão	10 dBm
Sensibilidade de Recepção	-95 dBm
Modelo de Propagação	
Modelo	Shadowing
Fator de Atenuação (β)	3.41
Desvio Padrão (σ)	5
Distância de Referência (d_0)	1
Outros Parâmetros	
Consumo de Transmissão	$90 \times 10^{-3}W$
Consumo de Recepção	$45 \times 10^{-3}W$
Consumo Ocioso	$15 \times 10^{-3}W$
Consumo Dormindo	$20 \times 10^{-6}W$

6.2. Métricas de Desempenho

Para avaliar o desempenho dos protocolos propostos, estes foram comparados com dois outros protocolos MAC tradicionais de grande aceitação, o Aloha e o CSMA p -persistente (ambos usando o Quadro de Dados do SPP-MAC e HMARS). Esses protocolos foram escolhidos por serem amplamente utilizados em comparação de RSSFs.

Duas métricas para a avaliação do desempenho dos protocolos foram utilizadas, (i) **Taxa de Entrega** é a razão entre os quadros entregues à Estação Base Controladora com sucesso e o total de quadros enviados por todos os nós sensores e (ii) **Vazão Agregada** é a quantidade de dados recebidos corretamente pela Estação Base Controladora dentro de um determinado intervalo.

6.3. Resultados das Simulações

A Figura 5 mostra a taxa de entrega para os protocolos Aloha, CSMA 0,85-persistente, HMARS e SPP-MAC quando se varia a quantidade de clusters na rede entre 2 e 14 separados por 5 km de fibra óptica, com taxa de transmissão de 25 quadros/segundo. Pode-se notar que os dois protocolos propostos tem um desempenho superior aos outros protocolos testados.

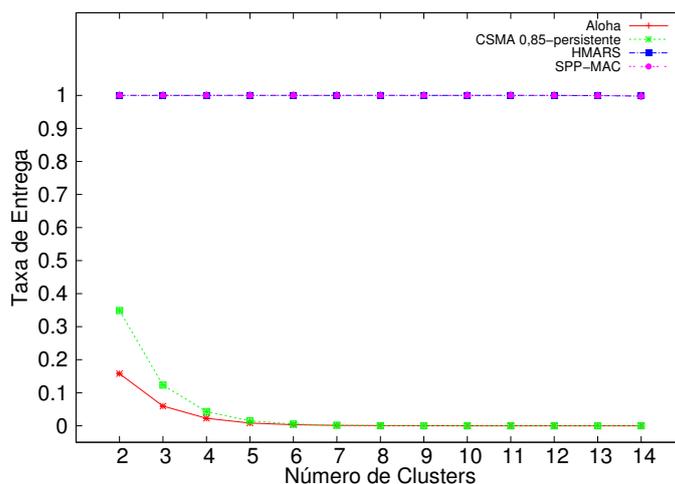


Figura 5. Taxa de Entrega dos protocolos (25 quadros/segundo).

O protocolo Aloha permite que os nós sensores transmitam sempre que tiverem dados a serem enviados. Como o protocolo não implementa nenhum mecanismo para evitar transmissões concorrentes, ocorre um aumento no número de colisões com o aumento da quantidade de clusters na rede, pois o número de nós sensores concorrendo pelo canal aumenta. As colisões que ocorrem nesse protocolo são tanto intra-clusters quanto inter-clusters.

O protocolo CSMA p -persistente implementa um mecanismo para evitar as transmissões concorrentes no canal sem fio. Nesse protocolo, antes de transmitir o nó sensor averigua a condição do canal, ou seja, verifica se o canal sem fio encontra-se ocupado ou livre. Se o canal estiver ocupado, o nó sensor deve esperar para transmitir, se não, ele começa a transmissão com probabilidade p . As colisões que ocorrem nesse protocolo são, em sua grande maioria, inter-clusters.

Como o protocolo HMARS separa cada cluster em uma fatia de tempo diferente, e cada nó sensor dentro do cluster verifica a condição do canal antes de transmitir, a probabilidade de transmissões concorrentes inter-clusters é nula e a probabilidade de transmissões concorrentes intra-cluster é próxima de zero (se duas transmissões começarem ao mesmo tempo, haverá colisão).

Por sua vez, o protocolo SPP-MAC utiliza quadros de sinalização. Desse modo, apenas os nós sensores que receberem esses quadros de sinalização tem permissão para transmitir.

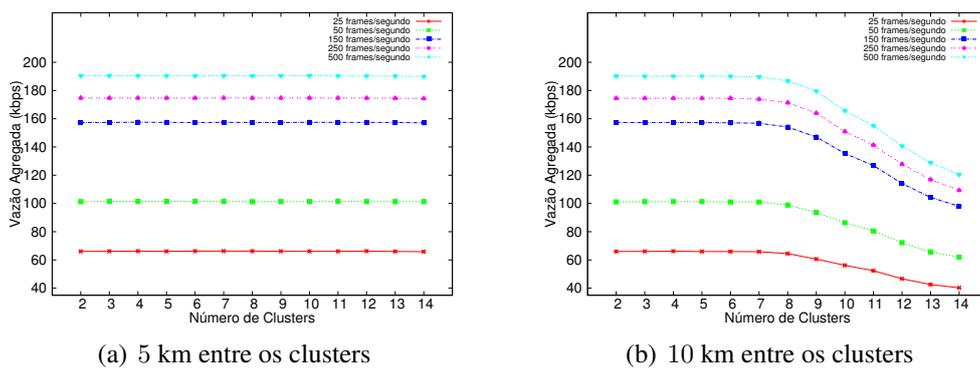


Figura 6. Vazão Agregada do protocolo HMARS.

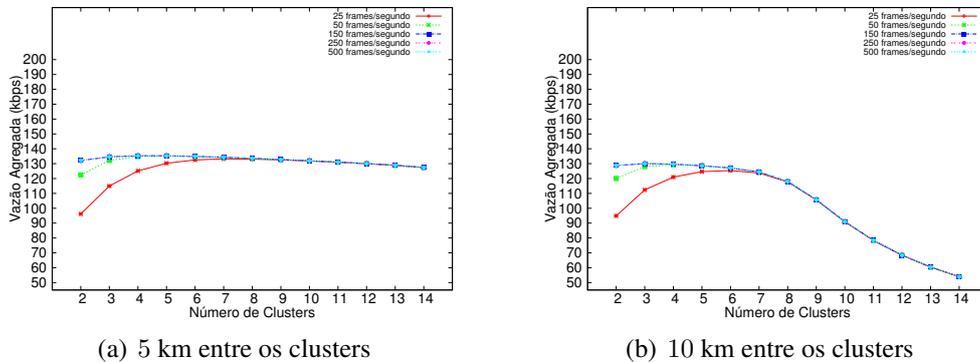


Figura 7. Vazão Agregada do protocolo SPP-MAC com o quadro de ACK.

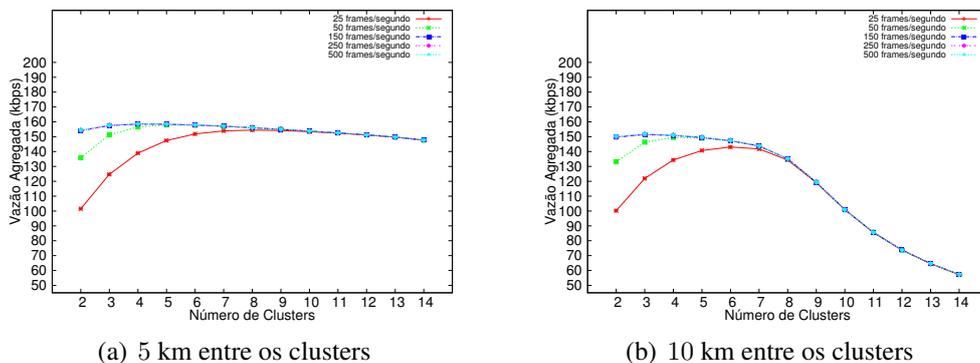


Figura 8. Vazão Agregada do protocolo SPP-MAC sem quadro de ACK.

A Figura 6(a) mostra a vazão agregada para o protocolo HMARS quando os clusters estão separados por 5 km. Percebe-se que a vazão é constante para cada taxa de transmissão, independentemente da quantidade de clusters na rede, pois, como as fatias de tempo tem a mesma duração, praticamente a mesma quantidade de dados é transmitida pela rede.

As Figuras 7(a) e 8(a) mostram a vazão agregada para o protocolo SPP-MAC com e sem o quadro de ACK, respectivamente, quando os clusters estão separados por 5 km. Ao se analisar os gráficos, percebe-se que as vazões convergem com o aumento da quantidade de clusters na rede. Nota-se que a vazão do protocolo sem o quadro de ACK é maior do que com o quadro de ACK para a mesma quantidade de clusters, pois o tempo gasto com o envio do quadro de ACK é usado para o envio de carga útil, ou seja, quadros de dados.

As Figuras 6(b), 7(b) e 8(b) mostram a vazão agregada do HMARS, SPP-MAC com o quadro de ACK e SPP-MAC sem o quadro de ACK, respectivamente, quando a distância entre os clusters é 10 km. Percebe-se que a partir do oitavo cluster, a vazão começa a diminuir. Isso ocorre porque a atenuação combinada do meio sem fio e da fibra óptica começa a degradar o sinal de rádio frequência de maneira que a potência do sinal recebida na Estação Base Controladora é menor do que a necessária para o recebimento. Assim, quanto maior o comprimento da fibra óptica maior é a atenuação sofrida e menor é a quantidade de quadros recebidos.

Comparando os protocolos HMARS e SPP-MAC, nota-se que o HMARS tem um desempenho superior em altas taxas de dados e o SPP-MAC tem um desempenho superior em baixas taxas de dados.

7. Conclusão

Nesse trabalho, propõe-se dois protocolos MAC exclusivos para Redes Híbridas de Rede de Sensores sem Fio com Rádio-sobre-Fibra, chamados HMARS e SPP-MAC. Através de simulações realistas avaliou-se o desempenho de nossos protocolos comparados com outros protocolos amplamente difundidos. Os resultados indicaram que tanto o HMARS quanto o SPP-MAC são consideravelmente melhores do que o outros protocolos MAC tradicionais analisados.

Referências

- (2006). 802.15.4-2006 IEEE Standard for Information Technology.
- Estrin, D., Govindan, R., Heidemann, J., and Kumar, S. (1999). Next century challenges: scalable coordination in sensor networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '99, pages 263–270, New York, NY, USA. ACM.
- Fanimokun, A. and Frolik, J. (2003). Effects of Natural propagation environments on Wireless Sensor Network coverage area. In *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium*, pages 16–20.
- Gomes, P., da Fonseca, N., and Branquinho, O. (2009). Analysis of performance degradation in Radio-over-Fiber systems based on IEEE 802.16 protocol. In *LATINCOM '09. IEEE Latin-American Conference on Communications 2009*, pages 1–6.

- Hossen, M., Jang, B.-J., Kim, K.-D., and Park, Y. (2009). Extension of wireless sensor network by employing rof-based 4g network. In *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conference on*, volume 01, pages 275–278.
- Kalantari-Sabet, B., Mjeku, M., Gomes, N. J., and Mitchell, J. E. (2008). Performance impairments in single-mode radio-over-fiber systems due to mac constraints. *J. Light-wave Technol.*, 26(15):2540–2548.
- Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '04*, pages 95–107, New York, NY, USA. ACM.
- Pottie, G. J. and Kaiser, W. J. (2000). Wireless integrated network sensors. *Commun. ACM*, 43:51–58.
- Roedig, U., Barroso, A., and Sreenan, C. J. (2006). F-MAC: A Deterministic Media Access Control Protocol without Time Synchronization. In *European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, pages 276–291, Zurich, Switzerland.
- Schurgers, C., Tsiatsis, V., Ganeriwal, S., and Srivastava, M. (2002). Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space. In *IEEE Trans. Mobile Comput.*, pages 70–80.
- Smyth, P. (2003). Optical radio - a review of a radical new technology for wireless access infrastructure. *BT Technology Journal*, 21:22–31. 10.1023/A:1025198729319.
- Tang, J., Jin, X., Zhang, Y., Zhang, X., and Cai, W. (2007). A hybrid radio over fiber wireless sensor network architecture. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on*, pages 2675 – 2678.
- van Dam, T. and Langendoen, K. (2003). An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '03*, pages 171–180, New York, NY, USA. ACM.
- Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2002). An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks. In *Annual Joint Conference of the Computer and Communication Societies (INFOCOM)*, volume 3, pages 1567–1576, New York, NY, USA.