

HMARS: A MAC Protocol for Integration of Radio-over-Fiber and Wireless Sensor Networks

T. P. C. de Andrade, L. B. Oliveira, N. L. S. da Fonseca, *Senior Member, IEEE* and O. C. Branquinho

Abstract— Radio-over-Fiber (RoF) has been employed in network infrastructures due to its large capacity, low attenuation, low operational cost and enlarged network coverage. Wireless Sensor Networks (WSNs) has also been broadly deployed. The integration of these two powerful technologies leads to new infrastructures. In this work, we introduce new approach for integrating of RoF and WSNs, and present HMARS, a MAC protocol proposed exclusively for this new type of integration. Our results indicate that HMARS performs considerable better than others MAC protocols in this integration.

Keywords— Radio-over-Fiber, Hybrid System, Wireless Sensor Networks, Medium Access Control and HMARS.

I. INTRODUÇÃO

Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) proveem características de sensoriamento distribuído com propriedades interessantes em relação às redes cabeadas, tais como ausência de infraestrutura, baixo custo de implantação, escalabilidade e flexibilidade. RSSFs são, em sua maioria, redes ad-hoc compreendidas principalmente de pequenos nós sensores com recursos limitados e uma ou mais Estações Base (BSs) comumente chamados de “sinks”, as quais conectam os nós sensores com o restante do mundo [1] [2]. RSSFs são normalmente usadas para prover informações sobre uma área monitorada para o restante do sistema.

As RSSFs são ferramentas singulares para integração de aplicações de monitoramento e controle. Entre essas aplicações, uma que chama atenção é o monitoramento ambiental, no qual nenhuma outra tecnologia consegue o mesmo desempenho. Um exemplo é a ubiquitous City (u-City) [3], que foi concebida para monitoramento e controle de cidades. No u-City, todos os sistemas de informação de uma cidade são interconectados, virtualmente, a um único sistema de informação através de RSSFs.

A tecnologia Rádio-sobre-Fibra (RsF) tem sido foco de interesse devido sua baixa atenuação [4] [5] [6] e grande área de cobertura. Na RsF, sinais de rádio são transmitidos na fibra óptica através de Unidades de Antena Remota (RAUs) enquanto o complicado processamento dos sinais é deixado a cargo da Estação Base de Controle (BSC). Como resultado, os custos operacionais são reduzidos e a área de cobertura ampliada. Recentemente, a tecnologia RsF tem sido empregada

em redes de telefonia celular, sistemas broadband, sistemas de Comunicação Veicular (RVC) e redes IEEE 802.11.

A tecnologia RsF tem grande potencialidade para ser usada em infraestruturas devido a disponibilidade de uma grande quantidade de fibras ópticas no mundo, especialmente no Brasil, onde cerca de 80% das fibras instaladas não são usadas. Esta subutilização é causada pela ampla instalação dessa tecnologia no passado e com o advento da tecnologia Wave Division Multiplexing (WDM) para aperfeiçoar o uso da fibra. A utilização desses recursos ociosos para suportar aplicações não tradicionais é desejável e tem grande potencialidade. Exemplos para esse uso é o monitoramento de oleodutos, gasodutos, autoestradas e linhas de transmissão elétricas.

Em RSSF, RAUs RsF atuam como nós sensores cabeça-de-cluster (CHSNs) (geralmente nós heterogêneos). Uma arquitetura híbrida de RSSF baseada em RsF (RWSN) é compreendida em nós sensores (SNs), CHSNs e um “sink” (chamado de Estação Base de Controle quando integrado em sistemas RsF).

Uma questão importante é o atraso que a fibra óptica introduz na rede. Se for muito grande, o desempenho do sistema pode degradar. Protocolos MAC para RSSF não consideram esse atraso e, por esse motivo, não são adequados para essa integração.

Nesse trabalho, nós apresentamos um novo protocolo MAC chamado HMARS, um protocolo adaptado para esse novo tipo de arquitetura.

O trabalho é organizado como se segue. Na Seção II, discutem-se os trabalhos relacionados. Na Seção III, apresenta-se o conceito da nova arquitetura. Na Seção IV, apresenta-se o funcionamento do HMARS. As simulações e os resultados são mostrados na Seção V. Finalmente, conclui-se o trabalho na Seção VI.

II. 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) [7] 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 dados. Os períodos ativos tem duração fixa enquanto que a duração dos períodos inativos

T. P. C. de Andrade, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil, tiagoandrade@lrc.ic.unicamp.br

L. B. Oliveira, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, leob@dcc.ufmg.br

N. L. S. da Fonseca, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil, nfonseca@ic.unicamp.br

O. C. Branquinho, Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC), Campinas, São Paulo, Brasil, branquinho@puce-campinas.edu.br

depende do parâmetro de ciclo-de-trabalho pré-definido.

Outro protocolo, o Timeout MAC (T-MAC) [8] segue a ideia básica introduzida pelo S-MAC. A novidade de sua solução é a adaptação do ciclo-de-trabalho em que a duração dos períodos ativos não é mais fixa, mas varia de acordo com o tráfego. A ideia 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) [9] usa uma técnica baseada na detecção de “outliers” para melhorar a qualidade do Clear Channel Assessment (CCA) comparado com o padrão IEEE 802.15.4 [10]. 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 amostragens, então ele declara que o canal está ocupado.

O princípio do protocolo Framelet MAC (F-MAC) [11] 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.

A maioria dos trabalhos sobre Rádio-sobre-Fibra concentra-se no nível físico dos sistemas (esses estudos têm focado na infraestrutura da 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 de 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 óptica que pode exceder os tempos limites dos protocolos MAC impossibilitando a rede de funcionar corretamente.

Entre outros trabalhos que consideram RsF como um backhaul para aplicações de rádio, [12] [13] [14] apresenta uma análise do uso dessa tecnologia em redes WiMAX. O atraso de propagação introduzido pelo comprimento da fibra afeta o ajuste de parâmetros das camadas MAC e PHY. Para um ajuste eficaz, [12] apresenta um estudo abrangente da degradação do desempenho de redes WiMAX empregando infraestrutura RsF e concluiu-se que cenários RsF com degradação limitada a 20% na camada PHY são viáveis ao se usar os enlaces de fibra com comprimento máximo de 115 km ou degradação limitada a 20% na camada de APP ao se usar fibra de até 80 km de comprimento.

O trabalho em [15] apresenta uma nova arquitetura híbrida de Redes de Sensores sem Fio baseada em Rádio-sobre-Fibra para compensar as deficiências da arquitetura das RSSFs tradicionais. Resultados mostram que esta arquitetura melhora o desempenho das RSSF bem como diminui o atraso fim-a-fim da rede e o consumo energético.

Redes de Sensores baseadas em Zigbee são a tecnologia

chave na implementação de ubiquitous City (u-City). No entanto, caso somente redes ad-hoc forem usadas nesse tipo de rede, será necessário muitos saltos para a informação chegar até o “sink”, causando problemas na atribuição de endereço e no atraso fim-a-fim da rede. Em [16], a solução proposta para esses problemas foi dividir a rede em vários clusters, cada um com um coordenador, interligando todos os coordenadores com o “sink” através de enlaces ópticos utilizando RsF.

O trabalho em [17] 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 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.

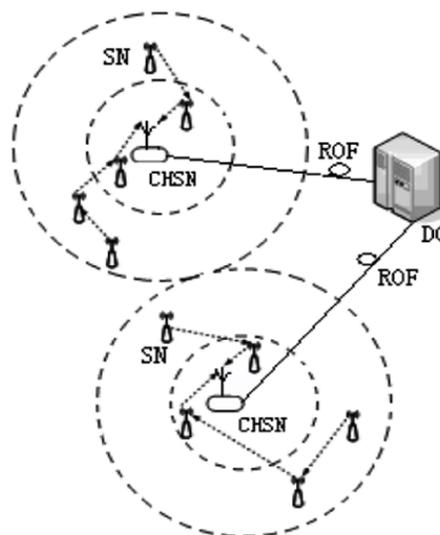


Figura 1. Arquitetura Híbrida RWSN [13].

III. RSSF E A ARQUITETURA PROPOSTA

RSSFs podem ser organizadas de diferentes maneiras. Nas RSSFs planas [18], todos os nós têm regras similares de monitoramento, processamento de dados e roteamento. Em particular, os nós sensores operam com alcance de transmissão limitado para diminuir o consumo energético e a comunicação node-sink é multi-hop, com nós comuns funcionando como roteadores. Nas RSSFs hierárquicas [1], a rede é tipicamente organizada em clusters, tendo os membros do cluster e os cabeças-de-clusters (CHs) regras diferentes. Enquanto os membros do cluster são responsáveis pelo monitoramento, os CHs são responsáveis por tarefas adicionais tais como coletar e processar dados transmitidos pelos membros e enviar os resultados para o “sink”.

A arquitetura proposta considera uma RSSF hierárquica, na qual as RAUs são os CHs. Fibras ópticas são usadas para

conectar as RSSFs e aumentar a área de cobertura. Essa proposta difere das apresentadas a Seção II. A Fig. 2 mostra a arquitetura proposta. Todos os nós dentro da mesma área de cobertura formam um cluster, tendo a RAU como o CH. Os clusters são distribuídos ao longo de um par de fibras ópticas e os SNs em cada cluster transmitem somente para a BSC localizada no Centro de Processamento de Dados (DC). Assim, todos os clusters estão no mesmo domínio de colisão.

Nesta arquitetura, o protocolo MAC precisa lidar com o desafio da contenção no domínio sem fio e no domínio óptico.

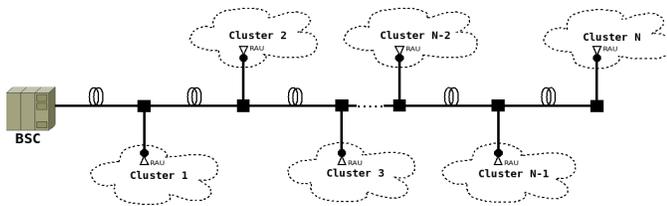


Figura 2. Arquitetura Proposta.

IV. VISÃO GERAL DO PROTOCOLO

Nesta seção, nós explicaremos o protocolo HMARS (*Hybrid Medium Access Control for Hybrid Radio-over-Fiber Wireless Sensor Network Architecture*), um protocolo MAC específico para Arquiteturas Híbridas Rádio-sobre-Fibra e Redes de Sensores sem Fio.

Combinando abordagens de reserva e contenção, ele usa *Time Division Multiple Access* (TDMA) para evitar colisões no canal óptico e o *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) não-persistente para evitar colisões no canal sem fio.

A abordagem baseada em reserva requer o conhecimento da topologia e a sincronização dos relógios do sistema para estabelecer um escalonamento que permita cada cluster acessar o canal óptico e transmitir para a BSC. Na abordagem baseada em contenção, os nós sensores competem pelo uso do canal sem fio e somente o vencedor desta competição pode acessar o canal para transmitir.

No TDMA, o tempo é dividido em frames e cada frame é dividido em “slots”. Durante um frame, cada cluster é atribuído a um único “slot” temporal durante o qual ele tem o direito de transmitir. Como consequência, transmissões de diferentes clusters não colidem. No CSMA, um nó sensor tendo dados para transmitir, primeiro monitora o canal sem fio por um período de tempo pré-determinado antes de transmitir. No caso de avaliar o canal ocupado, ele não transmite a fim de evitar interferir com uma transmissão em andamento. No caso de avaliar o canal livre, ele transmite os dados.

Para diminuir o overhead, o HMARS suprime a troca de quadros de controle RTS/CTS e de reconhecimento. Por isso, sempre que um nó sensor enviar um quadro de dados, ele assume que o quadro foi recebido com sucesso. Também usamos um backoff aleatório com a finalidade de reduzir as colisões entre os nós sensores nos clusters.

A Fig. 3 mostra o formato do quadro de dados do HMARS. O campo *Frame Control* contém informações que define o

tipo de quadro e outras “flags” de controle. O campo *Sequence Number* especifica o identificador para o quadro. O campo *Source Cluster* contém o identificador do cluster do nó de origem. O campo *Source Node* contém o identificador do nó de origem. O campo *Target Cluster* contém o identificador do cluster do nó de destino. O campo *Target Node* contém o identificador do nó de destino. O campo *FCS* contém um 16-bit CRC que é calculado sobre o cabeçalho e *data payload* do quadro.

FORMATO DO QUADRO MAC

Control	Sequence Number	Source Cluster	Source Node	Destination Cluster	Destination Node	Data Payload	FCS
8 bits	16 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	0 - 400 bits	16 bits

FORMATO DO PACOTE PHY

Preamble	Frame Length	PHY Payload
40 bits	8 bits	72 - 472 bits

Figura 3. Formato do quadro HMARS.

TABELA I
ACRÔNIMOS

RSF	RÁDIO-SOBRE-FIBRA
RSSF	REDES DE SENSORES SEM FIO
SN	NÓ SENSOR
BSC	ESTAÇÃO BASE DE CONTROLE
DC	DATA CENTER
RAU	UNIDADE DE ANTENA REMOTA
CCA	CLEAR CHANNEL ASSESSMENT
CW	JANELA DE CONTENÇÃO
NA	NÚMERO DE TENTATIVAS
MAXATTEMPT	NÚMERO MÁXIMO DE TENTATIVAS
RWSN	ARQUITETURA HÍBRIDA DE RSF E RSSFs
CHSN	NÓ SENSOR CABEÇA-DE-CLUSTER
FCS	FRAME CHECK SEQUENCE

A. CSMA – Acesso ao Canal sem Fio

O CSMA deve ser usado antes das transmissões dos frames. São usadas unidades de tempo chamadas de unidades de período backoff, onde o período backoff é igual à *macUnitBackoffPeriod* microssegundos. Duas variáveis são mantidas em cada dispositivo: *CW* e *NA*. A variável *CW* é o tamanho da janela de contenção que define o número de backoffs sem atividade no canal antes da transmissão poder começar; seu valor é inicializado em dois antes de cada tentativa de transmissão e redefinido para dois cada vez que o canal é avaliado como ocupado. *NA* é a quantidade de tentativas de transmissão; seu valor é inicializado em zero no início do algoritmo do CSMA. A constante *MAXAttempt* define a quantidade máxima de tentativas de transmissão e seu valor esta configurado para quadro.

A subcamada MAC adia a transmissão por uma quantidade aleatória de unidades de período backoff entre 0 e 3 (Fig. 4, Passo 2), para então requisitar à camada PHY a realização de um Clear Channel Assessment (CCA) (Fig. 4, Passo 3).

Se o canal for avaliado como ocupado, NA é incrementado de um e CW é redefinido para dois (Fig. 4, Passo 5). Se NA for menor ou igual a $MAXAttempt$, uma nova tentativa de transmissão é feita (Fig. 4, Passo 2). Se NA for maior do que $MAXAttempt$, um erro é relatado para a camada acima.

Se o canal for avaliado como livre, o valor de CW é decrementado de um (Fig. 4, Passo 4) e, subsequentemente, é determinado se seu valor é igual a zero. Se não for igual a zero, um novo CCA é realizado (Fig. 4, Passo 3). Se for igual a zero, a transmissão do frame é iniciada imediatamente.

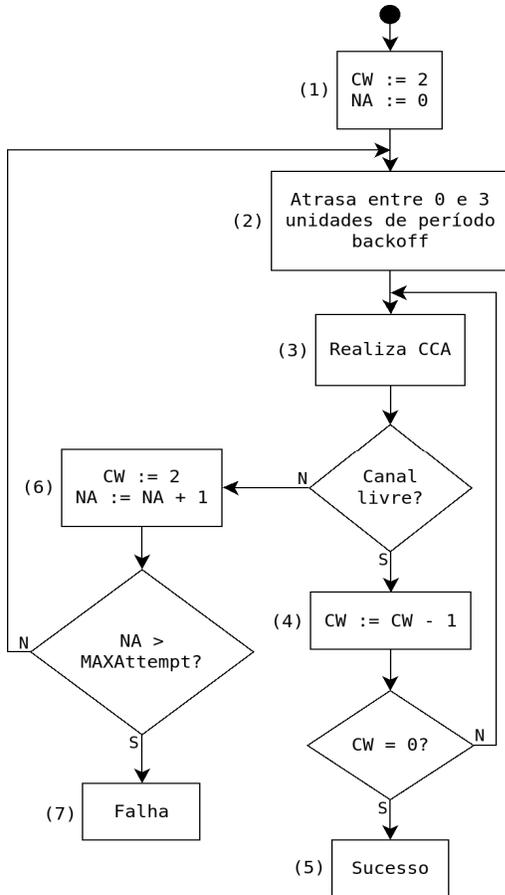


Figura 4. O algoritmo CSMA do HMARS.

B. TDMA – Acesso ao Canal Óptico

Assumi-se que a Estação Base de Controle conhece a topologia da rede e os atrasos para cada cluster.

Como o canal óptico é o domínio de colisão comum a todos os clusters, o TDMA tenta evitar a colisão entre eles. Para isso, o tempo é dividido em frames e cada frame é dividido em “slots” temporais. A quantidade de “slots” temporais em cada frame é a mesma quantidade de clusters na rede e cada “slot” temporal tem a mesma duração. O número de frames depende do intervalo de sincronização.

Durante um frame, cada cluster é atribuído a um único “slot” temporal de acordo com sua localização ao longo do par de fibras ópticas. Somente durante seu “slot” temporal o cluster tem permissão de transmissão. Como consequência, colisões entre os clusters são evitadas.

Como o escalonamento é uma parte crucial do protocolo e requer grande poder computacional, ele é feito pela Estação Base de Controle.

Algoritmo 1 - Escalonamento Centralizado do TDMA

Requisitos: todos os relógios do sistema sincronizados

Saída: clusters escalonados corretamente

1. **para cada** $cluster \in CHSN$ **faça**
2. BSC envia para $cluster$ um quadro de escalonamento
3. **fim para**
4. **para cada** $node \in SN$ **faça**
5. **se** $node$ recebeu o quadro de escalonamento **então**
6. $node$ computa o escalonamento
7. **fim se**
8. **fim para**

($CHSN$): conjunto dos clusters ordenados pela distância até a BSC.

(SN): conjunto de nós sensores.

V. SIMULAÇÕES

A. Configuração

Programou-se o protocolo HMARS no simulador de redes NS-2, fazendo todas as adaptações necessárias para a inclusão do RsF. Para efeito de comparação, implementaram-se outros três protocolos MAC: *Aloha*, *TDMA* e um *CSMA* [19] p -persistente. Utilizou-se a versão do *S-MAC* implementada no NS-2 rodando no modo full active.

No protocolo *Aloha*, quando um nó tem dados prontos para serem transmitidos, ele apenas os transmite sem a preocupação com outras transmissões.

No protocolo *TDMA*, cada cluster tem um “slot” de tempo específico para transmitir. Dessa maneira, quando um nó tem dados para transmitir, ele deve esperar o “slot” de tempo do seu cluster para começar a transmissão.

No protocolo *CSMA p-persistente*, quando um nó tem dados a serem transmitidos, ele começa a avaliar a condição do canal sem fio até encontrá-lo livre. Quando o canal é avaliado livre, o nó transmite seus dados com uma probabilidade p ou escolhe não transmiti-los com uma probabilidade $1-p$. Quando isso acontece (não transmitir), o nó volta a monitorar o canal até avaliá-lo livre.

Foram escolhidas três métricas para avaliar o desempenho do HMARS: **Taxa de Entrega** que é a razão entre os quadros recebidos com sucesso pela Estação Base de Controle e o total de quadros enviados pelos nós sensores da rede, **Frame Error Rate (FER)** que é a razão de quadros perdidos pela Estação Base de Controle pelo total de quadros enviados pelos nós sensores da rede e **Distância Máxima** permitida entre a Estação Base de Controle e as RAUs.

A Tabela II mostra alguns dos parâmetros usados nas simulações.

VALORES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS

PARÂMETROS DO MÓDULO PHY	
TAXA DE TRANSMISSÃO	250 kbps
FREQUÊNCIA	915 MHz
POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO	10 dBm
SENSIBILIDADE DE RECEPÇÃO	-104 dBm
PARÂMETROS DO MODELO DE TRÁFEGO	
TIPO	POISSON
TAXA	10 QUADROS/SEGUNDO
MODELO DE PROPAGAÇÃO	
MODELO	SHADOWING
FATOR DE ATENUAÇÃO (β)	3,41
DESVIO PADRÃO (σ)	7
DISTÂNCIA DE REFERÊNCIA (d_0)	1

Nas simulações, cada cluster contém 15 nós sensores distantes 15 metros de sua RAU. Os clusters foram distribuídos ao longo do par de fibras ópticas e separados por 10 km um dos outros.

Todas as simulações foram executadas independentemente usando cinco sementes diferentes. Todos os nós sensores geraram frames de acordo com o modelo de Poisson com uma taxa de 10 quadros por segundo.

B. Resultados

Nessa seção, os resultados das simulações são apresentados e discutidos.

1) Taxa de Entrega e Frame Error Rate:

As Fig. 5 e 6 mostram o desempenho dos protocolos para diferentes quantidades de clusters no sistema, e, conseqüentemente, diferentes quantidades de nós fontes. Com o aumento da quantidade de clusters, as interferências aumentam resultando no aumento da FER e diminuição da Taxa de Entrega para o *Aloha* e *CSMA 0,85-persistente*. Já o *TDMA* e *HMARS*, no entanto, podem manter uma boa taxa de entrega e FER, sendo o *HMARS* superior a todos eles.

Como todos os clusters podem transmitir ao mesmo tempo no *Aloha* e *CSMA 0,85-persistente*, o número de colisões aumenta com o aumento na quantidade de clusters, porém, a quantidade de colisões intraclusters é menor no *CSMA 0,85-persistente* em comparação ao *Aloha*.

2) Distância Máxima:

A Fig. 2 mostra a distribuição dos clusters ao longo do par de fibras ópticas. Realmente, a distância entre os clusters e a Estação Base de Controle afeta o desempenho da rede. Analisou-se o comportamento do sistema quando a distância entre um cluster, com apenas um nó sensor, e a Estação Base de Controle varia entre 10 e 300 km. Nessa análise, somente os protocolos *HMARS* e *S-MAC* foram usados e nenhuma deficiência no meio físico foi considerado.

Quando a fibra óptica é inserida no sistema, cada quadro transmitido sofre com o atraso adicional. De acordo com a Fig. 7, o aumento do atraso, devido à inserção da fibra é mais severo em protocolos que utilizam o método de acesso baseado em RTS/CTS do que em protocolos que utilizam o método de acesso básico. Dessa maneira, o *S-MAC* cobre um

máximo de 100 km enquanto o *HMARS* não tem limite na distância.

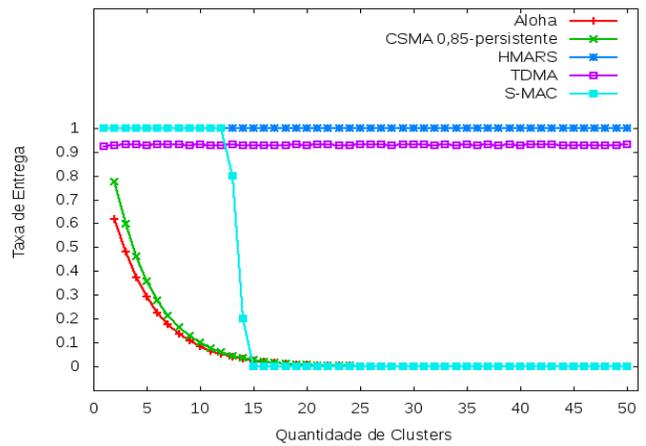


Figura 5. Taxa de Entrega.

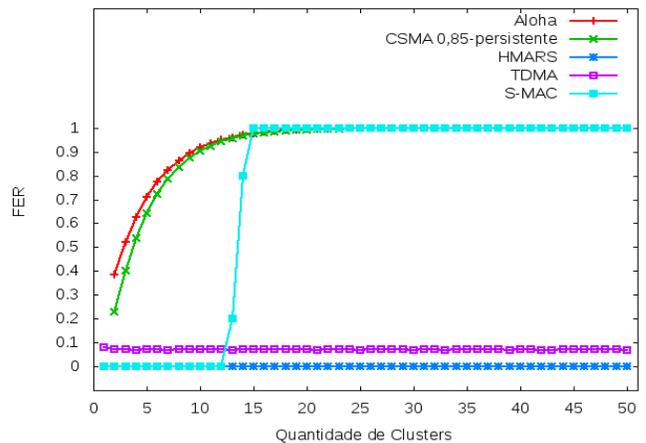


Figura 6. Frame Error Rate.

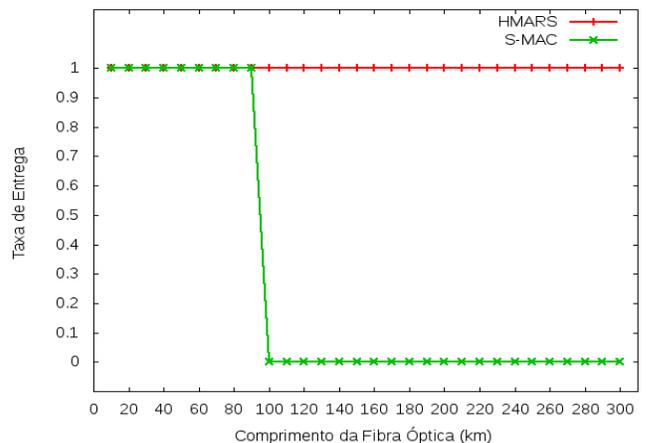


Figura 7. Distância Máxima.

VI. CONCLUSÃO

A tecnologia Rádio-sobre-Fibra (RsF) tem sido empregada nas infraestruturas de redes por causa de sua grande capacidade e baixa atenuação. Ela facilita a instalação do sistema, diminui os custos operacionais, e, por isso, tem sido usada para aumentar a cobertura das redes. RSSFs tem sido amplamente difundida e a integração dessas duas poderosas tecnologias tem tomado muita atenção.

Neste trabalho, apresentou-se uma nova arquitetura híbrida na qual fibras ópticas são usadas para conectar várias RSSFs usando a tecnologia RsF. Do nosso conhecimento, o protocolo HMARS é o primeiro protocolo MAC proposto exclusivamente para esse tipo de arquitetura. Os resultados indicam que o HMARS funciona consideravelmente melhor do que os demais protocolos MAC testados nesta arquitetura.

Os trabalhos futuro focam na análise do consumo de energia do HMARS.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann e S. Kumar, "Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks", *International Conference on Mobile Computing and Networking - MobiCom*, p.263-279, 1999.
- [2] G. J. Pottie e W. J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors", *Communications of the ACM*, v.43, p.51-58, May, 2000.
- [3] M. Hossen, B. J. Jang, K. D. Kim e Y. Park, "Extension of Wireless Sensor Network by Employing RoF-based 4G Network", *International Conference on Advanced Communication Technology - ICACT*, v.01, p.275-278, 2009.
- [4] X. Chu, J. Liu and Z. Zhang, "Analysis of Sparse-Partial Wavelength Conversion in Wavelength-Routed WDM Networks", *Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies - INFOCOM*, v.02, p.1363-1371, March, 2004.
- [5] M. L. Kodialam and T. V. Lakshman, "Minimum Interference Routing with Applications to MPLS Traffic Engineering", *Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies - INFOCOM*, v.02, p.884-893, 2000.
- [6] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelengthrouted optical networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5), pp. 840-851, 1996.
- [7] W. Ye, J. S. Heidemann e D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *Annual IEE International Conference of the Computer and Communication Societies - INFOCOM*, vol.3, p.1567-1576, November, 2002.
- [8] T. van Dam e K. Langendoen, "An adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *International Conference on Embedded Networked Sensor System*, p.171-180, 2003.
- [9] J. Polastre, J. Hill e D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", *International Conference on Embedded Networked Sensor System*, p. 95-107, November, 2004.
- [10] IEEE 802.15.4-2006 Standard for Information Technology.
- [11] U. Roedig, A. Barroso e C. J. Sreenan, "F-MAC: A Deterministic Media Access Control Protocol without Time Synchronization", *European Conference on Wireless Sensor Networks - EWSN*, p.276-291, 2006.
- [12] P. H. Gomes, N. L. S. da Fonseca e O. C. Branquinho, "Analysis of performance degradation in Radio-over-Fiber systems based on IEEE 802.16 protocol", *IEEE Latin-America Conference on Communications - LATINCOM*, p.1-6, September, 2009.
- [13] P. H. Gomes, N. L. S. da Fonseca e O. C. Branquinho, "Bi-criteria Optimization of Radio Resources for Radio-over-Fiber Access Network", *IEEE International Conference on Communications - ICC*, p.1-6, 2011.
- [14] P. H. Gomes, N. L. S. da Fonseca e O. C. Branquinho, "Optimization of use of Radio Resources of Radio-over-Fiber Access Network", *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM*, p.1-5, 2010.
- [15] J. Tang, X. Jin, Y. Zhang, X. Zhang e W. Cai, "A Hybrid Radio-over-Fiber Wireless Sensor Network Architecture", *International Conference*

Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing - WICOM, p.2675-2678, September, 2007.

- [16] M. Hossen, B. Jang, K. Kim e Y. Park, "Extension of Wireless Sensor Network by employing RoF-based 4G Network", *International Conference on Advanced Communication Technology*, v.01, p.275-278, February, 2009.
- [17] B. Kalantari-Sabet, M. Mjeku, N. J. Gomes e J. E. Mitchel, "Performance Impairments in Single-Mode Radio-over-Fiber Systems Due to MAC Constraints", *Journal of Lightwave Technology*, v.26, p.2540-2548, 2008.
- [18] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam e E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey", *Computer Networks*, v.38, p.393-422, March, 2002.
- [19] A. Woo e D. E. Culler, "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks", *International Conference on Mobile Computing and Networking - MobiCom*, p.221-235, 2001



Tiago Pedroso da Cruz de Andrade obteve o título de Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 2009. Atualmente é aluno de Mestrado em Ciências de Computação na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Suas principais áreas de pesquisa incluem sistemas Rádio-sobre-Fibra, Redes de Sensores sem Fio e protocolos MAC.



Leonardo B. Oliveira é professor de Ciência da Computação na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Antes de ingressar na UFMG, foi professor na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Campinas (UNICAMP). Também detém um Bacharelado (UFMG, 2002), um Mestrado (UFMG, 2005) e um Doutorado (UNICAMP, 2008) em Ciência da Computação. Seus principais interesses incluem Computação Ubíqua e Segurança da Informação.



Nelson Luis Saldanha da Fonseca possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em sistemas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1984), mestrado em Informática pela PUC-Rio (1987), mestrado em Master In Computer Engineering - University of Southern California (1993) e PhD in Computer Engineering - University of Southern California (1994). Obteve o título de Livre Docente em Redes de Computadores pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) em 1999. É professor titular da Universidade Estadual de Campinas, onde, atualmente, chefe do departamento de Sistemas de Computação.



Omar C. Branquinho possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (1985), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1991) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2001). Atualmente é professor doutor da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Sem fio, atuando principalmente nos seguintes temas: WLAN, 802.11, sistemas móveis, redes de dados e 3G. Vem trabalhando em redes de sensores para monitoração de grandezas em propriedades rurais através de rede hierárquica de dados.