

# Relatório Científico

**Período de Referência:** Agosto de 2010 a Julho de 2011

**Número do Processo:** 139499/2010-5

**Chamada/Edital:** GM/GD - Cotas do Programa de Pós-Graduação

**Título do Projeto:** Integração de Redes de Sensores sem Fio com tecnologia Rádio-sobre-Fibra

**Beneficiário:** Tiago Pedroso da Cruz de Andrade

**Orientador:** Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca

# 1 Resumo do Plano Inicial de Pesquisa

Esta seção apresenta uma síntese da proposta de projeto aceita pela FAPESP. Nas subseções seguintes são feitas a introdução do problema e o objetivo do projeto.

## 1.1 Problema

As tecnologias sem fio permitem aos usuários maior flexibilidade de comunicação e têm se tornado disponíveis mais facilmente do que os serviços tradicionais que exigem a instalação de cabos para prover conectividade.

As Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) apresentam uma nova área no ramo das redes de computadores que vem ganhando força ao longo do tempo. As características apresentadas por esse tipo de rede as tornam atrativas em diversas aplicações e muitos estudos para determinar como essas redes influenciarão o cotidiano das pessoas e quais são suas características e áreas de atuação estão sendo feitos. Elas diferem das redes de computadores tradicionais em vários aspectos, pois normalmente possuem um grande número de dispositivos distribuídos com restrições de energia.

As RSSFs são formadas por pequenos dispositivos inteligentes que fornecem recursos de monitoramento e controle distribuído com propriedades interessantes em relação as redes cabeadas, tais como ausência de infra-estrutura, escalabilidade, baixo custo, flexibilidade e a não necessidade de uma largura de banda elevada para funcionar [1] [2]. 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, pois a comunicação se faz no meio sem fio e muitos tipos de interferências nos canais de rádio ocorrem. Esta situação é típica para RSSFs que transmitem em canais de rádio compartilhado com outros sistemas de comunicação [3]. Outros requisitos são a baixa latência e o baixo consumo de energia para preservar a vida útil das baterias.

A tecnologia Rádio-sobre-Fibra (*Radio-over-Fiber - RoF*) é considerada uma solução promissora para a expansão das RSSFs. O RoF pode levar à provisão de uma infraestrutura barata e expansível para que as redes sem fio possam aumentar a sua área de cobertura e, também, oferecer maiores taxas de dados para os usuários, a um baixo custo.

O RoF baseia-se no emprego de enlaces ópticos para a distribuição de sinais de rádio frequência (*Radio Frequency - RF*) entre uma ou mais Estações Base de Controle (*Base Station Controller - BSC*) e diversas Unidades de Antena Remota (*Remote Antenna Units - RAUs*). Os sinais de rádio frequência, que nas redes sem fio convencionais são modulados e tratados em cada uma das Estações Base (*Base Stations - BSs*), são convertidos para sinais ópticos nas RAUs e são transportados através de fibras até a BSC, onde, finalmente, são

(de)codificados e (de)modulados. Nestas, ocorrem, também, a conversão de banda e todos outros tratamentos necessários para o funcionamento da rede [4]. Assim, quase todos os componentes de RF são centralizados na BSC e as RAUs podem ser extremamente simples e baratas. Os enlaces ópticos funcionam como um meio de transmissão analógico, totalmente transparente para os nós da rede. O processamento centralizado possibilita o barateamento da instalação e manutenção das antenas, dado que o seu hardware é mais simples e todo o processamento e controle da rede (software) é centralizado na BSC, o que torna possível um conhecimento mais preciso sobre a demanda e posicionamento dos nós presentes em toda área de cobertura da rede.

Uma opção promissora para a implementação de RSSF em áreas de cobertura maiores é a integração destas através de RoF. Essa integração permite a comunicação com baixa latência e maior confiabilidade em comparação com RSSF *ad-hoc* e *mesh* tradicionais [5]. Além disso, o emprego de enlaces RoF 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*.

## 1.2 Objetivos

Pretende-se nesta pesquisa propor um novo sistema de Redes de Sensores sem Fio conectadas por enlaces de Rádio-sobre-Fibra chamado de *Sistema Híbrido Rede de Sensores sem Fio e Rádio-sobre-Fibra*, no qual um par de fibras ópticas é usado como backhaul e compartilhado entre todas as RAUs do sistema, além de estudar seu comportamento na camada de enlace através dos mecanismos de controle de acesso ao meio. Os principais objetivos iniciais desta pesquisa são:

- Implementação no *NS2* de um módulo de Rádio-sobre-Fibra para a realização de simulações com essa tecnologia.
- Desenvolvimento dos protocolos MAC específicos para este novo sistema, apresentados nas Seções 5 e 6.
- Implementação dos protocolos desenvolvidos no *NS2*.
- Implantação do sistema proposto em pequena escala para realização de experimentos.
- Implementação dos firmwares para a realização dos experimentos.

## 2 Conceitos Básicos

### 2.1 Redes de Sensores sem Fio

Uma nova classe de redes de computadores apareceu nos últimos anos, as chamadas Redes de Sensores sem Fio (RSSFs). Estas redes consistem de dispositivos individuais compactos capazes de interagir com o ambiente através de monitoramento e controle de parâmetros físicos. Estes dispositivos tem que colaborar para cumprir suas tarefas, onde, normalmente, um único dispositivo é incapaz de realizá-la, utilizando comunicação sem fio. Em essência, os dispositivos nesta rede contém, pelo menos, algum poder computacional, comunicação sem fio e sensoriamento ou funcionalidades de controle. Apesar do fato de que essas redes incluem, muitas vezes, atuadores, o termo 'Rede de Sensores sem Fio' tornou-se o comumente aceito. As vezes, outros termos como 'Redes sem Fio de Sensores e Atuadores' também são encontrados.

As RSSFs podem ser descritas resumidamente como redes formadas por pequenos dispositivos inteligentes dotados de sensores e capazes de comunicação sem fio entre si para disponibilização dos dados de monitoramento onde eles são necessários. Elas estão se tornando cada vez mais comuns em vista da compactação e diminuição do valor dos seus componentes. Com isso, o que antes era controlado por processos não automatizados, hoje é viável controlar através desse tipo de rede, quebrando paradigmas e conseguindo aumentar a eficiência desses processos.

A utilização de sensores sem fio atende a uma grande variedade de áreas de aplicações. Existem sensores para controle de processos químicos, de caldeiras, de detecção de contaminação em área de riscos, etc. Estas necessidades vão até o monitoramento do corpo humano. Os sensores muitas vezes estão ligados ao corpo humano para tentar salvar vidas, seja no monitoramento de pacientes em hospitais ou em exames rotineiros.

As redes de sensores sem fio podem ser encontradas em diversas áreas, como:

- automação residencial e industrial
- monitoramento de óleodutos, gasodutos e aquedutos
- controle agropecuário
- monitoramento de minas
- rastreamento
- detecção de intrusos

- cuidados pessoais

Construir uma RSSF exige, sobretudo, que os dispositivos que a constituem sejam desenvolvidos de maneira a cumprir os requisitos que vêm das exigências específicas da aplicação para a qual a rede foi projetada: eles podem ter de ser pequenos, baratos, energeticamente eficientes, devem estar equipados com os sensores certos, a memória necessária e necessitam de facilidades de comunicação adequadas.

Quando escolhermos os componentes de hardware para uma rede de sensores sem fio, devemos levar em consideração qual será a aplicação dessa rede.

Uma rede de sensores sem fio é composta por um conjunto de elementos sensores, que são formados por 5 componentes principais, como mostrado na Figura 1:

- **Microcontrolador:** onde ocorre todo o processamento do sensor. Nele ficam armazenados os programas do sensor, os protocolos, os dados a serem transmitidos e ele é responsável pela coleta de dados dos transdutores ou acionamento dos atuadores e pelo envio ou reconhecimento dos dados através do transceptor.
- **Memória:** é usada para armazenar os programas e dados.
- **Transdutores e Atuadores:** são os dispositivos que permitem a interação do sensor com o ambiente. Os transdutores são os elementos responsáveis por efetuar medidas ou capturar informações do ambiente e transformar em dados que possam ser trabalhados pelo microcontrolador. Os atuadores são dispositivos que podem interagir com o ambiente ao seu redor, por exemplo, ligando e desligando uma máquina.
- **Transceptor:** é especialmente o dispositivo que permite a comunicação sem fio
- **Fonte de Energia:** fornece energia ao sistema. No caso de sensores sem fio, muitas vezes estas fontes de energia são baterias.

Cada um destes componentes deve operar balanceando a realização de suas funções com o menor consumo de energia.

O desenvolvimento de elementos sensores foi possível graças ao processo de miniaturização, que hoje tornou possível carregar computadores ultraportáteis em bolsas e transportá-los para todos os lugares. Com essa evolução, os sensores sem fio, tornaram-se cada vez menores. Nesse tipo de rede, a utilização de equipamentos pequenos torna-se uma vantagem pela praticidade. Hoje, é possível encontrar pequenos equipamentos sensores que coletam informações e transmitem para centrais de monitoramento.

Para que todos os elementos consigam utilizar o meio de comunicação para enviar e receber dados é necessário que se estabeleça o protocolo de comunicação. Isso os tornam mais

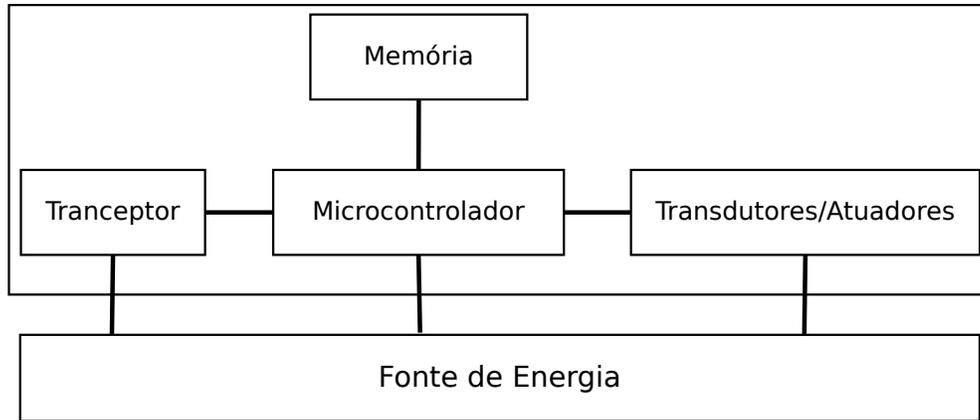


Figura 1: Principais componentes de um nó sensor.

complexos se comparados a simples sensores compostos somente por transdutores e atuadores. Porém, a complexidade trazida pela utilização de um protocolo torna sua utilização muito mais interessante. A complexidade não inviabiliza o seu uso, mas cria-se a necessidade de padrozinção. No início da utilização das redes de sensores, cada fabricante idealizou seu próprio protocolo de comunicação, mas isso inviabilizava a utilização de sensores de vários fabricantes e tornava a gerência desses elementos sensores muito complexas.

## 2.2 Rádio-sobre-Fibra

O uso de Rádio-sobre-Fibra em sistemas de telefonia sem fio foi primeiramente proposto e demonstrado em 1990 por Cooper [6]. Desde então, a comunidade científica tem investigado e desenvolvido essa técnica de transmissão, com foco, principalmente, nos sistemas de telefonia celular. Rádio-sobre-Fibra é, essencialmente, um sistema de transmissão analógico que distribui sinais de rádio frequência (RF) entre uma ou mais Estações Base de Controle e diversas Unidades de Antena Remota, utilizando como meio de transmissão fibras ópticas.

As RAUs são pequenas, simples e baratas, tendo um baixo custo de implantação para a expansão das células da rede sem fio. A centralização dos recursos da rede em uma estação central possibilita a alocação dinâmica de seus recursos e o melhor gerenciamento da carga da rede. Esses fatores têm tornado a tecnologia de RoF interessante também para redes de dados, como as redes WI-FI e WiMAX. A grande vantagem do emprego de fibras ópticas na distribuição de sinais de RF é a baixa atenuação que o sinal sofre (0,2 dB/Km para comprimento de onda de 1.550 nm), além da grande banda disponível no meio óptico (dezenas de THz). As transmissões ocorrem na mesma portadora do sinal RF e os sinais podem ter modulações digitais robustas. Um esquema simples de um enlace bidirecional RoF é apresentado na Figura 2. Nas duas direções, o sinal de RF na entrada é aplicado diretamente

em um diodo laser e utilizado para modular a intensidade de luz de saída. A luz transporta a informação e a converte novamente para o formato de ondas de RF no fotodiodo (lado receptor). Podem ser empregadas fibras ópticas multimodo e monomodo, mas o último tipo é preferido pelas melhores características de atenuação. Os comprimentos de onda normalmente empregados nesse esquema de transmissão são 1300 e 1550 nm; esse enlace óptico é denominado IM-DD (*Intensity Modulated-Direct Detection*) e é utilizado na maioria dos experimentos e aplicações de RoF existentes, principalmente pelo seu baixo custo [4].

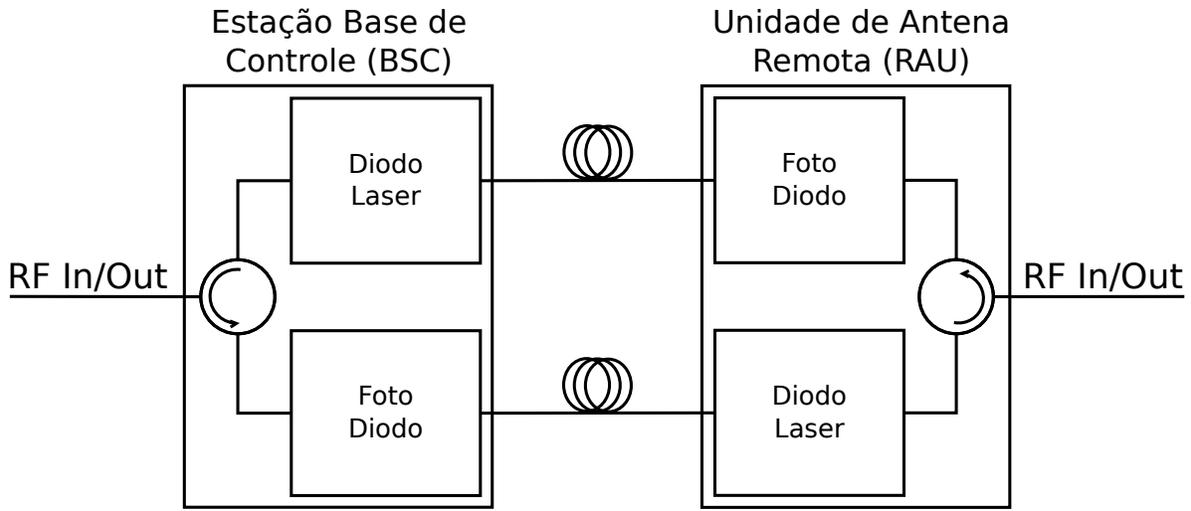


Figura 2: Layout de um enlace bidirecional.

Apesar das fibras possuírem ótimas características de atenuação e disponibilidade de banda, a natureza analógica dos sinais impõe problemas de limitações físicas devido ao ruído e distorção do sinal. Outro problema ainda mais grave é o atraso causado pela propagação do sinal na fibra quando esta possui grandes extensões. Esses fatores limitam o emprego da fibra a certas distâncias e podem limitar também a expansão da rede sem fio baseada em RoF. O atraso exige que as temporizações dos protocolos da rede sejam readequadas e algumas vezes pode degradar o desempenho da comunicação.

### 3 Atividades Realizadas

As atividades realizadas durante o período referente ao relatório estão descritas a seguir. As atividades enumeradas de 1 a 5 foram colocadas para ressaltar o andamento deste trabalho antes da vigência da bolsa de pesquisa FAPESP.

1. Término do cumprimento de créditos em disciplinas
2. Levantamento bibliográfico e avaliação do estado da arte

3. Levantamento do funcionamento da tecnologia Rádio-sobre-Fibra e como integrá-la com Redes de Sensores sem Fio
4. Defesa do EQM (Exame de Qualificação do Mestrado)
5. Participação no PED (Programa de Estágio em Docencia)
6. Aprendizado do funcionamento e implementação do Network Simulator 2 (*NS2*)
7. Adaptação na implementação *NS2* para suportar simulações com RoF
8. Implementação dos protocolos no *NS2*
9. Definição e implementação dos cenários para as simulações
10. Realização das simulações e avaliação dos resultados
11. Ajustes nos protocolos e nas implementações no *NS2*
12. Realização de novas simulações e novas avaliações dos resultados
13. Compra de equipamentos para a realização dos experimentos reais
14. Definição e montagem dos cenários para os experimentos
15. Aprendizado da codificação para os firmwares dos dispositivos
16. Implementação dos firmwares e do protocolo SPP-MAC nos dispositivos reais para os experimentos
17. Realização dos experimentos e avaliações dos resultados
18. Ajustes na implementação do protocolo e nos cenários dos experimentos
19. Realização de novos experimentos e novas avaliações dos resultados

## **4 Sistema Híbrido Rede de Sensores sem Fio e Rádio-sobre-Fibra**

Quando falamos em monitoramento através de redes de sensores sem fio para gasodutos, oleodutos, aquedutos, auto estradas, linhas de transmissão elétricas entre outros com as mesmas características, estamos falando em monitoramento em longas extensões lineares, chegando a milhares de quilômetros, e não em grandes áreas como uma floresta.

Sistemas convencionais de redes de sensores sem fio não são muito indicados para esse tipo de monitoramento, pois seriam necessários muitos nós que apenas funcionariam como roteadores para os dados trafegarem dos *clusters* de cobertura até a estação base, Figura 3. Porém esse conceito tem um grande problema, pois se algum destes nós roteadores falhar, os dados não serão entregues na estação base.

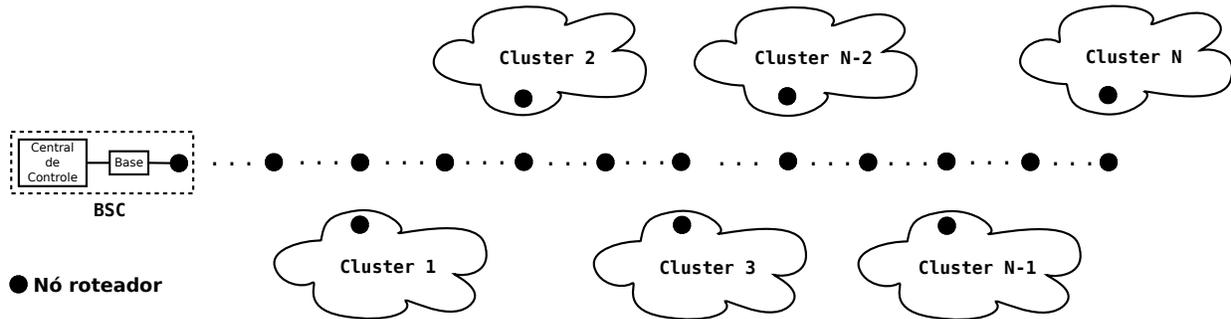


Figura 3: Sistema convencional.

Neste ponto, a tecnologia Rádio-sobre-Fibra mostra-se muito vantajosa para interligar a estação base e diversos *clusters* de cobertura.

Uma maneira de fazer essa interligação é utilizar um par de fibras ópticas para cada *cluster* de cobertura do sistema e com isso um equipamento de RoF seria necessário na Estação Base de Controle para cada *cluster* de cobertura. No entanto, a construção desse sistema tem a desvantagem de necessitar de uma quantidade de pares de fibras ópticas que aumenta com o aumento da quantidade de *clusters* de cobertura e o mesmo ocorre com a adição de equipamentos RoF no lado da Estação Base de Controle.

Por esses motivos, é proposto uma novo sistema no qual utiliza a tecnologia RoF como backhaul e somente um par de fibras ópticas é usado em todo o sistema (outros pares podem ser usados como backup) para conectar a Estação Base de Controle com os muitos *clusters* de cobertura do sistema.

Tal sistema é um sistema híbrido onde temos uma central de controle conectada a uma base na qual é chamada de estação base. A estação base por sua vez conecta-se aos sensores sem fio por um link rádio através de um sistema RoF, conforme a Figura 4. Os equipamentos de RoF e as antenas estão ligados através de circuladores de RF, como na Figura 28, para evitar a realimentação do equipamento de RoF.

O intuito deste sistema é possibilitar a troca de informações de cada um dos *clusters* de cobertura sem fio com a estação base e vice-versa, estando todos os *clusters* de cobertura conectados a estação base utilizando apenas um link de fibras ópticas compartilhado, mas sem a existência de comunicação direta entre os diversos *clusters* de cobertura. Como pode-se perceber, quando a informação é oriunda dos *clusters* de cobertura, apenas a Estação Base

de Controle receberá tais informações, porém quando a informação é oriunda da Estação Base de Controle todos os *clusters* de cobertura receberão.

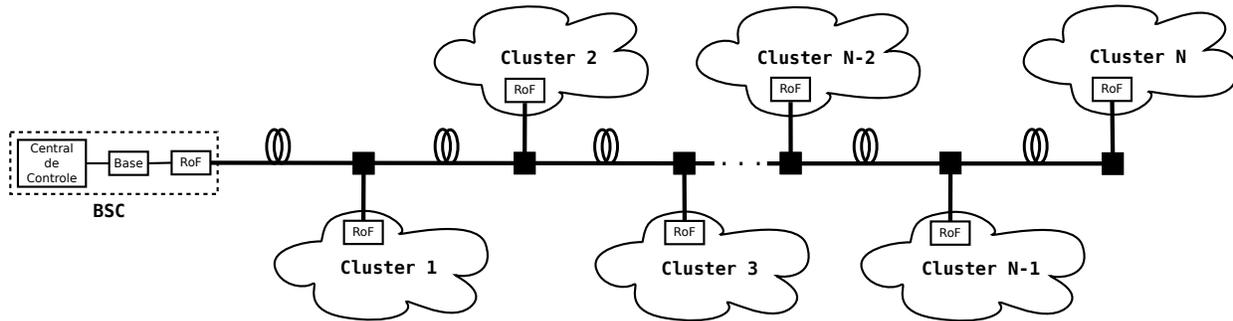


Figura 4: Sistema proposto.

Para utilizarmos tal sistema eficientemente, novos protocolos para controle de acesso ao meio (MAC) são necessário, pois este sistema apresenta características únicas não encontradas em nenhum outro sistema.

Até o presente momento, mesmo procurando em bases de pesquisa de conhecimento sobre o assunto, nenhuma rede de sensores sem fio utilizando como *backhaul* a tecnologia Rádio-sobre-Fibra com as características do sistema proposto foi encontrado.

## 5 Protocolo SPP-MAC

O protocolo SPP-MAC (Scheduling of **P**olling **P**riority **M**edium **A**ccess **C**ontrol) é um protocolo centralizado confiável baseado em seleção que combina o mecanismo de priorização para alocar uma quantidade de slots de tempo para cada nó sensor da rede que melhor se adequa a suas necessidades. Essa alocação é feita através da seleção - utilizando o quadro de sinalização - dos nós sensores que poderão transmitir.

A confiabilidade deste protocolo é dada pela utilização dos quadros de confirmação para cada quadro de dados se assim for requisitado. No entanto, essa confiabilidade tem um preço, o gasto de energia para a manipulação do quadro de confirmação.

Para a seleção dos dispositivos é necessário que alguma entidade tenha o conhecimento da topologia da rede. Essa entidade deve conhecer, a priori, quantos *clusters* de cobertura e nós existem na rede. Como essa entidade deve ter uma maior capacidade computacional, nada mais justo que seja a estação base a encarregada do mecanismo de seleção. Como o protocolo também trabalha com prioridades, é possível atribuir diferentes níveis de prioridade para os dispositivos da rede. Dessa maneira, quanto maior a prioridade, maior será a oportunidade de transmissão.

Como somente os nós sensores que recebem o quadro de sinalização podem transmitir, e apenas um quadro de sinalização é enviado por vez - nunca um quadro de sinalização é enviado se uma sinalização anterior não foi finalizada - não é possível que dois nós sensores possam transmitir de maneira que suas informações colidam na estação base, assim eliminando totalmente a probabilidade de colisão, tanto intra-cluster quanto inter-clusters.

Uma maneira de diminuir o consumo de energia foi implementar um mecanismo que analisa o endereço de destino dos quadros recebidos logo após receber os bytes dedicados ao endereço de destino dos quadros. Se a análise confirmar que o quadro é destinado ao nó, o recebimento do quadro é finalizado, se não, o recebimento é interrompido. Dessa maneira, a energia que seria desperdiçada no recebimento de quadros longos é economizada. Essa é uma maneira de diminuir a energia desperdiçada no overhearding.

Os nós sensores podem ser configurados para permanecerem no modo de economia de energia (transceptor desativado) e apenas ativar o transceptor quando ele tiver informações para transmitir. Isso permite que dispositivos com baixa taxa de geração de dados não desperdicem energia no estado idle listening.

## 5.1 Especificação do formato dos quadros MAC

As estruturas dos quadros foram projetadas para serem minimalistas e ao mesmo tempo serem robustas para transmissão em canais com ruídos. Cada camada sucessiva de protocolo adiciona para a estrutura do quadro os cabeçalhos e rodapés específicos da camada. Este protocolo define três tipos de quadros:

- Um quadro de sinalização, usado pela estação base para transmitir a sinalização.
- Um quadro de dados, usado por todas as transmissões de dados.
- Um quadro de confirmação, usado para confirmação de recepção bem sucedida.

Cada quadro MAC consiste dos seguintes componentes básicos:

- Um MHR, que é o cabeçalho do quadro e consiste dos campos controle do quadro, dos endereços de destino e fonte e do número de sequência.
- Um MAC Payload, de tamanho variado, no qual contém informações específicas para cada tipo de quadro.
- Um MFR, no qual contém um FCS.

### 5.1.1 Formato geral do quadro MAC

O quadro MAC é composto de um MHR, um MAC Payload e um MFR. Os campos do MHR aparecem em uma ordem fixa. O quadro MAC geral deve ser formatado como mostra a Figura 5:

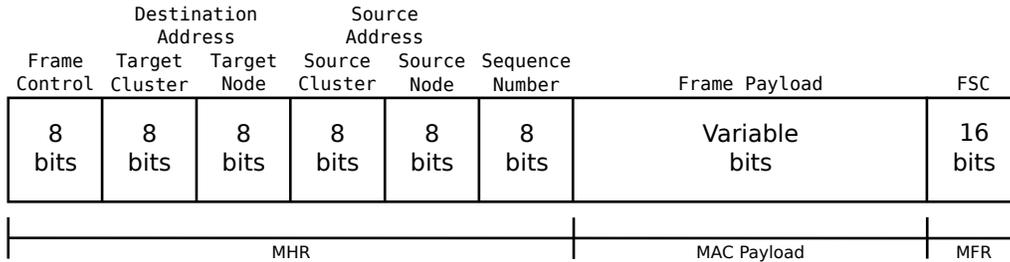


Figura 5: Formato geral do quadro MAC.

- Campo *Frame Control*: esse campo tem 8 *bits* de tamanho e contém informações que define o tipo do frame e outras flags de controle. O campo Frame Control deve ser formatado segundo a Tabela 1.

Tabela 1: Formato do campo Frame Control.

Subcampos	Tamanho	Posição
Frame Type	3 <i>bits</i>	0 - 2
Acknowledgement Request	1 <i>bit</i>	3
Data Pending	1 <i>bit</i>	4
Ready to Receive	1 <i>bit</i>	5
Reservado	2 <i>bits</i>	6 - 7

Tabela 2: Valores do subcampo Frame Type.

Valor do Frame Type	Descrição
000	Sinalização
001	Dados
010	Acknowledgement
011 - 111	Reservado

- Campos *Target Cluster* e *Target Node*: esses campos tem ambos 8 *bits* de tamanho e contém o identificador do *cluster* destino e o identificador do nó destino respectivamente. A junção dos dois forma o endereço de destino do quadro.
- Campos *Source Cluster* e *Source Node*: esses campos tem ambos 8 *bits* de tamanho e contém o identificador do *cluster* origem e o identificador do nó origem respectivamente. A junção dos dois forma o endereço de origem do quadro.
- Campos *Sequence Number*: esse campo tem 8 *bits* de tamanho e especifica o identificador da sequência do quadro.
- Campo *Frame Payload*: esse campo tem um tamanho variável e contém a carga útil dos quadros.
- Campo *FCS*: esse campo tem 16 bits de tamanho e contém um 16-bit ITU-T CRC e é calculado sobre o MHR e MAC payload.

### 5.1.2 Formato individual dos tipos de quadros MAC

Três tipos de quadros são definidos: sinalização, dados e confirmação.

- **Quadro de Sinalização:** O quadro de sinalização deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 6. Ele é usado para a estação base informar qual dispositivo terá a oportunidade de transmitir.

Frame Control	Destination Address		Source Address		Sequence Number	FCS
	Target Cluster	Target Node	Source Cluster	Source Node		
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	16 bits

Figura 6: Quadro de Sinalização.

- **Quadro de Dados:** O quadro de dados deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 7. Ele é usado para a transmitir os dados dos dispositivos para a estação base ou da estação base para os dispositivos.
- **Quadro de Confirmação:** O quadro de confirmação deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 8. Ele é usado para informar se o quadro de dados foi recebido com sucesso ou não.

Frame Control	Destination Address		Source Address		Sequence Number	Data Payload	FSC
	Target Cluster	Target Node	Source Cluster	Source Node			
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	Variable bits	16 bits

Figura 7: Quadro de Dados.

Frame Control	Destination Address		Source Address		Sequence Number	FSC
	Target Cluster	Target Node	Source Cluster	Source Node		
8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	16 bits

Figura 8: Quadro de Confirmação.

## 5.2 Atribuição de Prioridades

Nas redes de sensores sem fio, os nós sensores da rede tipicamente realizam diferentes funções sendo umas mais críticas do que outras. Desta maneira, alguns nós podem precisar de maiores probabilidades de transmissão enquanto outros nós podem precisar de menores probabilidades de transmissão, ou seja, a quantidade de sinalização dos nós da rede não podem ser iguais.

Para resolver esse problema, o SPP-MAC usa um mecanismo de prioridades, cuja função é atribuir prioridades diferentes para cada nó sensor da rede de acordo com a sua função. Esta atribuição é realizada estaticamente, ou seja, o administrador da rede deve atribuir uma prioridade, sendo 1 a maior e  $m$  a menor ( $m \geq 1$ ), para cada nó sensor da rede.

A estação base mantém um conjunto dos nós sensores para cada prioridade utilizada na rede, e, baseado nestes conjuntos é construída a lista do escalonamento da sinalização, e somente os nós sensores nesta lista são elegíveis para receber os quadros de sinalização.

No entanto, não é apenas necessário atribuir as prioridades ao nós sensores da rede mas também é necessário um modo de escalonar as sinalizações que satisfaça as condições impostas pelo protocolo que é a de permitir que nós sensores com as maiores prioridades possam ter maiores chances de transmissão.

## 5.3 Escalonamento da Seleção

O mecanismo de sinalização utiliza o quadro de sinalização para 'alocar' o slot de tempo necessário para um nó sensor da rede poder transmitir um quadro de dados. Para isso, um algoritmo de escalonamento (Algoritmo 2) é necessário para construir uma lista de sinalizações.

O objetivo mais importante deste algoritmo é evitar alocar slots de tempo para nós ociosos e alocar mais slots de tempo para dispositivos com tráfego maiores. Evitar alocar slots de tempo para os nós sensores da rede significa sinalizar estes nós com menos frequência.

Para isso, o algoritmo atribui um slot de tempo - envia um quadro de sinalização - a mais para os nós sensores com prioridade  $i$  em relação aos nós sensores com prioridade  $i + 1$  durante o ciclo de transmissão. Supondo que o número de nós sensores com prioridade  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) seja  $n_i$  e cada nó sensor com prioridade  $m$  terá exatamente 1 slot de tempo durante o ciclo de transmissão, então cada nó sensor com prioridade  $i$  terá  $m - i + 1$  slots de tempo durante o ciclo.

Portanto, o número total de sinalizações em cada ciclo de transmissão é:

$$\sum_{i=1}^m n_i * (m - i + 1) \quad (1)$$

Uma maneira de dispor os slots de tempo durante o ciclo de transmissão é atribuir  $m - i + 1$  slots de tempo consecutivos para cada nós sensores com prioridade  $i$ . Porém, essa estratégia não é adequada, pois os nós sensores terão que esperar um tempo considerável para voltar a transmitir que crescerá proporcionalmente com o aumento do número de nós sensores na rede. Ao invés disso, decidiu-se dividir o ciclo em  $m$  rounds e, para cada rounds, todos os nós sensores com prioridade de 1 até  $m - round\_ + 1$  serão inseridos no ciclo. O contador de rounds ( $round\_$ ) é iniciado com o valor 1 e incrementado depois que todos os nós sensores pertencentes ao rounds de transmissão forem inseridos no ciclo até seu valor chegar a  $m + 1$ . Quando o contador de rounds chega a  $m + 1$  significa que o ciclo de transmissão terminou de ser construído, ou seja, a lista de sinalização esta terminada.

Tabela 3: Principais variáveis e constantes do algoritmo.

1	a maior prioridade
$m$	a menor prioridade e o número de prioridades
$round\_$	o número do round (sub-ciclo), $1 \leq round\_ \leq m$
$i$	prioridade
$L\_$	lista de sinalizações ou ciclo de sinalização

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo de Escalonamento do Ciclo de Transmissão.

---

**Entrada:**  $P_i$  conjunto dos nós sensores com prioridade  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) e  $m$

**Saída** :  $L_- = \{P_1, P_2, \dots, P_{m-1}, P_m, P_1, P_2, \dots, P_{m-1}, \dots, P_1\}$  conjunto dos nós da rede escalonados

```
1  $L_- = \{\}$ 
2  $round_- = 1$ 
3 while  $round_- \leq m$  do
4   for each  $i \in [1, m - round_- + 1]$  do
5      $L_- = L_- \cup P_i$  (adiciona em  $L_-$  todos os nós de  $P_i$ )
6    $round_- = round_- + 1$ 
```

---

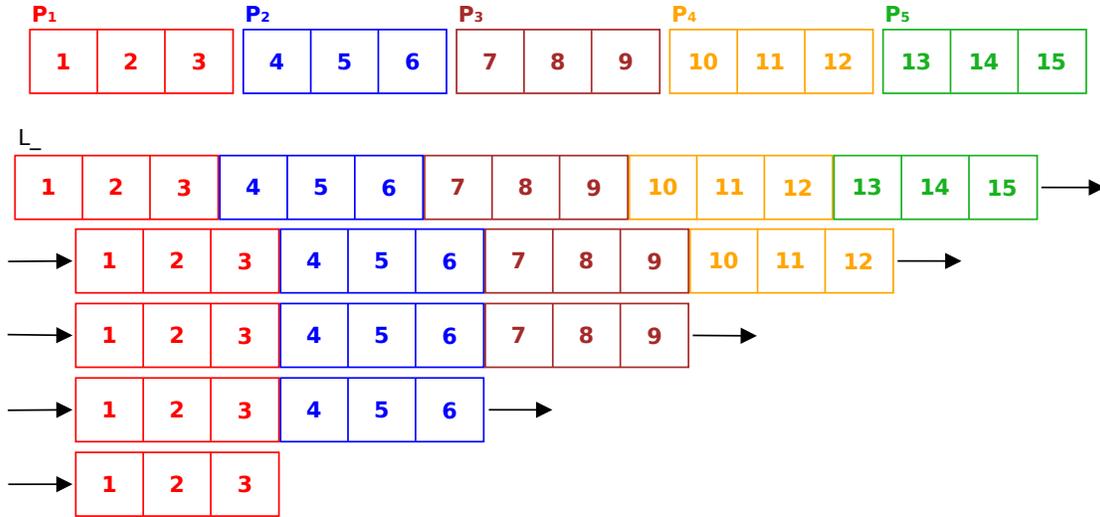


Figura 9: Exemplo de execução do algoritmo de escalonamento.

---

**Algoritmo 2:** Algoritmo de Sinalização.

---

**Entrada:**  $L_-$  e  $next\_poll$

**Saída** :  $next\_poll$

```
1  $sendPoll(L_-[next\_poll])$ 
2  $next\_poll = next\_poll + 1$ 
3 if  $next\_poll \geq len(L_-)$  then
4    $next\_poll = 0$ 
```

---

## 5.4 Transmissão de Dados

Existem dois tipos de transações de transmissão de dados. A primeira é a transmissão para a estação base na qual um nó sensor da rede transmite os dados. A segunda transação é a

transmissão da estação base para um nó sensor da rede. Não existe transmissão entre dois nós sensores da rede.

#### 5.4.1 Estação base para os nós sensores

Quando existe dados pendentes para serem enviados para os nós sensores da rede, a estação base deve ativar a flag *Data Pending* no campo de controle do quadro de sinalização mostrando que existem dados pendentes para serem enviados ao nó sensor a ser sinalizado.

Quando o nó sensor receber esse quadro de sinalização com a flag de controle *Data Pending* ativada, ele envia um quadro de acknowledgement para a estação base com a flag de controle *Ready to Receive* ativada indicando que ele está pronto para receber o quadro de dados. Logo após receber este quadro de acknowledgement, a estação base envia o quadro de dados.

Quando o nó sensor receber o quadro de dados, ele deve verificar se a estação base requisitou um quadro de acknowledgement analisando a flag *Acknowledgment Request* do campo de controle do quadro, e caso tenha requisitado, enviar um quadro de acknowledgement de volta para a estação base após a finalização da recepção do quadro de dados.

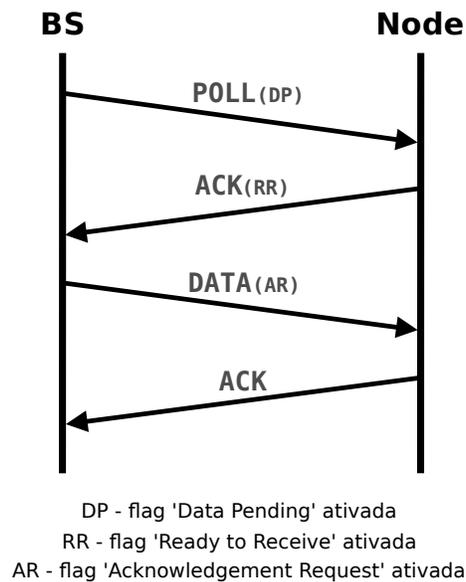


Figura 10: Comunicação entre a estação base e os nós sensores.

#### 5.4.2 Nós Sensores para a estação base

Sempre que um nó sensor da rede desejar transmitir dados para a estação base, ele primeiro deve habilitar o seu transceptor e esperar por um quadro de sinalização enviado pela estação base destinado a ele.

Ao receber esse quadro de sinalização, o dispositivo monta o quadro de dados corretamente e transmite para a estação base. Se o nó sensor requisitar um quadro de acknowledgement, ele permanece com o transceptor habilitado até recebê-lo. Se o nó sensor não requisitou e o modo de economia de energia está ativado, ele desativa o transceptor logo após o quadro de dados ser enviado; se ele não requisitou e o modo de economia de energia está desativado, ele permanece com o transceptor ativo.

Na chegada do quadro de dados, a estação base verifica se o nó sensor emissor requisitou um quadro de acknowledgement analisando a flag *Acknowledgment Request* no campo de controle do quadro, e caso tenha requisitado, transmite um quadro de acknowledgement de volta para o nó sensor emissor após a finalização da recepção do quadro de dados.

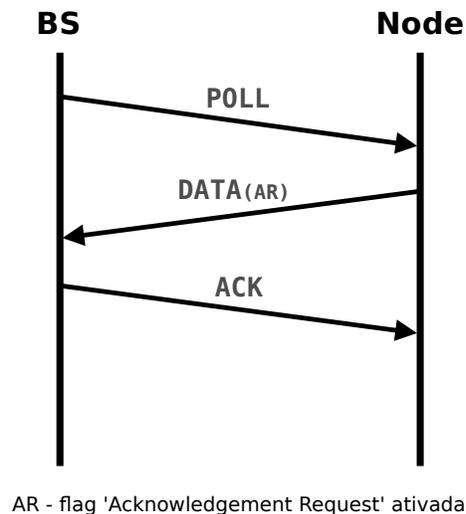


Figura 11: Comunicação entre os nós sensores e a estação base.

## 6 Protocolo HMARS

O protocolo HMARS (**H**ybrid **M**edium **A**ccess Control for Hybrid **R**adio-over-Fiber Wireless **S**ensor Network Architecture) foi desenvolvido exclusivamente para sistemas híbridos de Rede de Sensores sem Fio e Rádio-sobre-Fibra com a finalidade de ser o mais econômico energeticamente possível não importando as consequências na vazão e confiabilidade da rede.

Ele define um método de acesso híbrido combinando o Time Division Multiplexing (TDM) e o Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) não-persistente. Para o TDM, dois métodos foram usados o Time Division Duplex (TDD) e o Time Division Multiple Access (TDMA). O TDD foi usado para emular uma comunicação full-duplex no canal sem fio e o TDMA foi usado para permitir a comunicação de múltiplos *clusters* de cobertura.

O uso do TDM foi considerado para ser o método de acesso para o canal óptico, utilizando tanto o TDD quanto o TDMA. A utilização do TDD se deve ao fato que mesmo tendo uma fibra óptica para downlink e outra para uplink no meio óptico, não é possível separá-las fisicamente no meio sem fio. Dessa maneira, a utilização do TDD para emular uma comunicação full-duplex no meio sem fio é uma ótima solução, pois, ao invés de dividir fisicamente o downlink e o uplink ele o faz logicamente através da divisão do tempo. Assim, em uma transmissão TDD, a ocupação do canal é alternada entre tráfegos de downlink e uplink.

No entanto, o TDD apenas divide o tempo de comunicação em downlink e uplink não sendo eficaz quando tratamos vários *clusters* de cobertura na rede. Por esse motivo, foi implementado o TDMA, pois ele permite que muitos *clusters* de cobertura compartilhem a mesma frequência no canal sem fio. O TDMA é utilizado para evitar as colisões no canal óptico dos diferentes *clusters* de cobertura da rede através da separação de diferentes períodos de tempo destinados a cada *cluster* de cobertura. Para isso, faz-se necessária uma sincronização forte dos relógios dos componentes da rede como também o conhecimento prévio de toda topologia da rede por parte de uma unidade central que estabelecerá todo o escalonamento para a rede.

Para garantir as exclusividades de transmissão para o downlink e o uplink, uma estrutura de superframe é usada, na qual é definida pela estação base através de parâmetros de configuração. O superframe é dividido em dois frames, o frame downlink e o frame uplink, no qual o último é dividido em subframes, um para cada *cluster* de cobertura da rede.

Já o CSMA/CA é usado para minimizar as colisões no canal sem fio através do monitoramento prévio do canal para cada transmissão. Para isso foi proposto um mecanismo não-persistente que utiliza um backoff exponencial aleatório para diminuir a probabilidade de colisões e o consumo de energia.

Para reduzir o overhead, nem quadros de controle nem quadros de acknowledgement são usados, assim, não existe a troca de quadros RTS e CTS nem a confirmação da recepção de quadros de dados. Desta maneira, o protocolo não contém nenhuma disposição contra o problema dos hidden-terminal. Um mecanismo no qual tão logo quanto o endereço destino do quadro é recebido verifica se o quadro é destinado para o dispositivo foi implementado. Se o mecanismo verificar que o quadro não é destinado para o dispositivo, a recepção é suspensa imediatamente, se não, continua até o final do quadro.

O protocolo é organizado em rounds e cada round é dividido em duas fases, uma fase de setup e outra fase de execução. Na fase de setup é realizado a sincronização dos relógios dos componentes da rede e o escalonamento do superframe, e na fase de execução é realizado as transmissões dos dados.

Quando não estão dentro de seus subframes uplink, os dispositivos podem ser configurados

para entrar no modo de economia de energia, desligando seus transceptores.

## 6.1 Estrutura do Superframe

Como pode ser visto na Figura 12, o protocolo define uma estrutura temporal chamada de superframe que serve de referência para o sincronismo da rede.

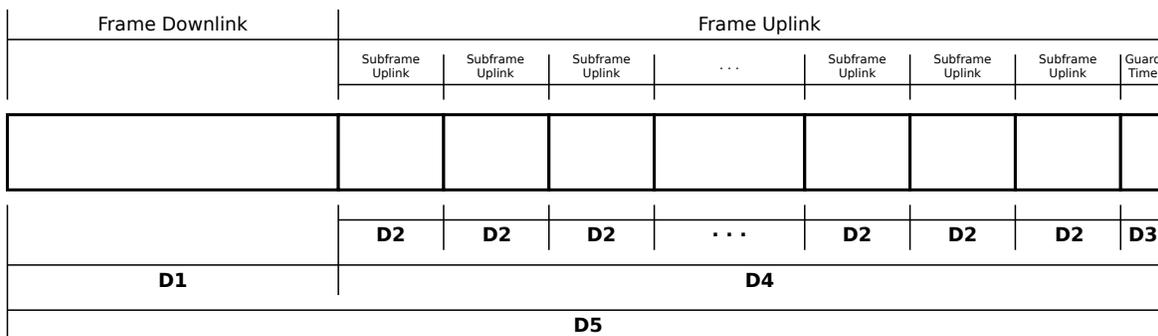
Antes do começo do superframe, uma fase de setup é realizada. Nesta fase tanto a sincronização dos relógios dos componentes da rede quanto o escalonamento do superframe é executado. O superframe é construído de acordo com configurações centralizadas na estação base e por propriedades contantes do protocolo, e o quadro de beacon é utilizado para transmitir as informações de sincronização do superframe para os nós da rede.

Dentro do período de um superframe, tem-se a divisão em dois intervalos de tempo assimétricos chamados de frames, definidos como downlink e o uplink. É importante perceber que, por padrão do protocolo, o frame downlink sempre precede o frame uplink.

O frame downlink é usado para a estação base transmitir seus dados para os nós da rede e o frame uplink para os nós da rede transmitirem seus dados para a estação base.

Para não haver colisões entre as transmissões de diferentes *clusters* de cobertura, o frame uplink é dividido em subframes, onde cada *cluster* de cobertura é atribuído a um único subframe dentro do uplink. Dessa forma, os nós pertencentes a cada *cluster* de cobertura só poderão tentar transmitir quando estiverem dentro do intervalo de tempo pertencentes ao seu subframe.

Quando os nós tem a permissão de tentar a transmissão, eles devem utilizar o mecanismo CSMA/CA não-persistente para transmitirem.



$$D1 = (\text{macBaseFrameDuration} * 2^{D0}) + (\text{Guard Distance} * 5 * 10^{-6})$$

$$D2 = \text{macBaseFrameDuration} * 2^{U0}$$

$$D3 = \text{Guard Distance} * 5 * 10^{-6}$$

$$D4 = (\text{Total Clusters} * D2) + D3$$

$$D5 = D1 + D4$$

Figura 12: Estrutura do Superframe.

É possível notar que tanto no frame downlink quanto no frame uplink existe um tempo de guarda chamado Guard Time. Esse tempo é necessário para garantir que os dados consigam trafegar por todo o comprimento da fibra óptica antes que outros dados sejam transmitidos.

## 6.2 Especificação do formato dos quadros MAC

As estruturas dos quadros foram projetadas para serem minimalistas e ao mesmo tempo serem robustas para transmissão em canais com ruídos. Cada camada sucessiva de protocolo adiciona para a estrutura do quadro os cabeçalhos e rodapés específicos da camada. Este protocolo define dois tipos de quadros:

- Um quadro de beacon, usado pela estação base para transmitir os beacons.
- Um quadro de dados, usado por todas as transmissões de dados.

Cada quadro MAC consiste dos seguintes componentes básicos:

- Um MHR, que é o cabeçalho do quadro e consiste dos campos controle do quadro, dos endereços de destino e origem e do número de sequência.
- Um MAC Payload, de tamanho variado, no qual contém informações específicas para cada tipo de quadro.
- Um MFR, no qual contém um FCS.

### 6.2.1 Formato geral do quadro MAC

O quadro MAC é composto de um MHR, um MAC Payload e um MFR. Os campos do MHR aparecem em uma ordem fixa. O quadro MAC geral deve ser formatado como mostra a Figura 13:

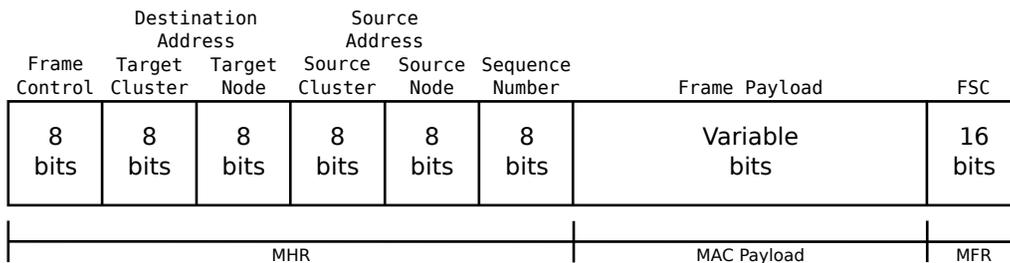


Figura 13: Formato geral do quadro MAC.

Tabela 4: Formato do campo Frame Control.

Subcampos	Tamanho	Posição
Frame Type	3 bits	0 - 2
Reservado	5 bits	3 - 7

Tabela 5: Valores do subcampo Frame Type.

Valor do Frame Type	Descrição
000	Beacon
001	Dados
010 - 111	Reservado

- Campo *Frame Control*: esse campo tem 8 bits de tamanho e contém informações que define o tipo do frame e outras flags de controle. O campo Frame Control deve ser formatado segundo a Tabela 4.
- Campos *Target Cluster* e *Target Node*: esses campos tem ambos 8 bits de tamanho e contém o identificador do *cluster* destino e o identificador do nó destino respectivamente. A junção dos dois forma o endereço de destino do quadro.
- Campos *Source Cluster* e *Source Node*: esses campos tem ambos 8 bits de tamanho e contém o identificador do *cluster* origem e o identificador do nó origem respectivamente. A junção dos dois forma o endereço de origem do quadro.
- Campos *Sequence Number*: esse campo tem 8 bits de tamanho e especifica o identificador da sequência do quadro.
- Campo *Frame Payload*: esse campo tem um tamanho variável e contém a carga útil dos quadros.
- Campo *FCS*: esse campo tem 16 bits de tamanho e contém um 16-bit ITU-T CRC e é calculado sobre o MHR e MAC payload.

### 6.2.2 Formato individual dos tipos de quadros MAC

Dois tipos de quadros são definidos: beacon e dados.

- **Quadro de Beacon:** O quadro de beacon deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 14. Ele é usado para a transmitir a configuração do escalonamento da rede para os nós sensores.

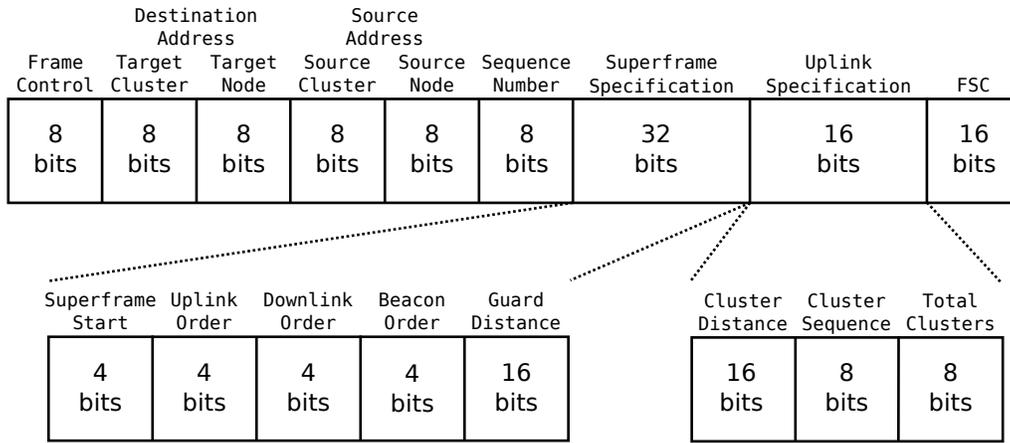


Figura 14: Quadro de Beacon.

- **Quadro de Dados:** O quadro de dados deve ser formatado conforme ilustrado na Figura 15. Ele é usado para a transmitir os dados dos nós sensores para a estação base ou da estação base para os nós sensores.

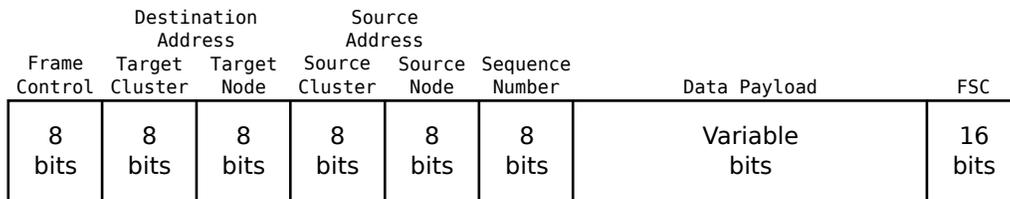


Figura 15: Quadro de Dados.

### 6.3 Escalonamento do Superframe

Para o uso eficiente do TDM nesse tipo de arquitetura, o conhecimento prévio da topologia da rede se faz necessário. Esse conhecimento engloba a quantidade de *clusters* de cobertura, os identificadores dos *clusters* de cobertura, a disposição dos *clusters* de cobertura ao longo do enlace de fibras ópticas e o comprimento do enlace de fibra óptica entre a estação base e cada *clusters* de cobertura. Por ser um método centralizado, o TDM necessita de um agente para gerenciar o escalonamento, e nada mais obvio que utilizar a estação base para essa tarefa.

A estação base mantém alguns parâmetros de configuração para serem usados somente no escalonamento:

- Superframe Start (SS): usado para determinar quando termina a fase de setup e começa o primeiro superframe da fase de execução.
- Beacon Order (BO): usado para determinar a duração da fase de execução, ou seja, indica quantos superframes serão realizados até a próxima fase de setup.
- Downlink Frame Order (DO): usado para determinar o tamanho do frame de downlink.
- Uplink Subframe Order (UO): usado para determinar o tamanho do subframe de uplink de cada *cluster* de cobertura.
- Guard Distance (GD): usado para calcular o tempo de guarda (guard time).

Depois de definir todas as durações do superframe, a estação base deve ensinar os nós da rede através dos quadros de beacons destinados a cada *cluster* de cobertura. Quando um dispositivo é incorporado na rede, ele deve ficar ouvindo o canal esperando pela sincronização e escalonamento que ocorrem na fase de setup. Quando o dispositivo recebe o quadro de beacon da estação base, ele aprenderá o escalonamento global da rede. Tanto a sincronização quanto o escalonamento são feitos durante a fase de setup que se repete em intervalos determinados pela estação base através de parâmetros de configuração.

Depois de receberem o quadro de beacon e computar os tempos pertinentes ao escalonamento, cada dispositivo saberá quando poderá receber dados da estação base (frame downlink), quando poderá transmitir dados para a estação base (subframe uplink) e quando será a resincronização e o reescalonamento.

A existência do frame downlink no superframe não é algo obrigatório. A estação base é a entidade que decide se terá ou não através do parâmetro de configuração Downlink Frame Order (DO) no qual quando seu valor é igual a 15, o frame de downlink não é colocado no superframe.

## 6.4 Mecanismo CSMA/CA não-persistente

O protocolo não contém nenhum tipo de mecanismo para evitar o problema do terminal oculto, como por exemplo, o uso da troca de quadros de controles RTS/CTS.

Cada dispositivo deve manter três variáveis para cada tentativa de transmissão: *CW*, *NB*, e *BE*. 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 *macCW* antes de cada tentativa de transmissão e resetado para *macCW* cada vez que o canal esta ocupado. *NB* é o número de vezes que o algoritmo CSMA/CA entro no período de backoff ao tentar a transmissão atual, esse valor deve ser inicializado em zero antes de

cada tentativa de transmissão.  $BE$  é o expoente backoff, que está relacionado com quantos períodos backoff um dispositivo deve esperar antes de tentar avaliar um canal; seu valor é inicializado em  $macMinBE$  antes de cada tentativa de transmissão.

Quando um dispositivo deseja transmitir um quadro, ele adia sua transmissão por um número aleatório de períodos completos de backoff entre 0 e  $2^{BE} - 1$  (Figura 16, Passo 2), para então requisitar à camada física a realização de uma operação de monitoramento do canal chamada de Clear Channel Assessment (CCA) (Figura 16, Passo 3).

Embora o receptor do dispositivo esteja ativado durante a porção de análise CCA deste algoritmo, o dispositivo deve descartar quaisquer quadros recebidos durante este tempo.

Se a operação avaliar que o canal está ocupado, a subcamada MAC deve incrementar tanto  $NB$  quanto  $BE$  por um, garantindo que  $BE$  não será maior do que  $macMaxBE$ . A subcamada MAC deve também redefinir  $CW$  como  $macCW$ . Se o valor de  $NB$  for menor ou igual a  $macMaxCSMABackoffs$ , o algoritmo do CSMA/CA deve retornar para (Figura 16, Passo 2). Se o valor de  $NB$  é maior que  $macMaxCSMABackoffs$ , o algoritmo de CSMA/CA deve terminar com um status de falha de acesso ao canal (Figura 16, Passo 7).

Se a operação avaliar que o canal está livre, a subcamada MAC deve assegurar que a janela de contenção expirou antes de iniciar a transmissão. Para fazer isso, a subcamada MAC deve primeiro decrementar  $CW$  por um (Figura 16, Passo 4) e, subsequentemente, determinar se seu valor é zero. Se não for igual a zero, o algoritmo CSMA/CA deve requisitar uma nova operação de CCA para a camada física. Se for igual a zero, a subcamada MAC deve começar a transmissão do quadro.

## 6.5 Transmissão dos dados

Existem dois tipos de transações de transmissão de dados. A primeira é a transmissão para a estação base no qual um nó sensor da rede transmite os dados. A segunda transação é a transmissão da estação base para um nó sensor da rede. Não existe transmissão entre dois nós sensores da rede.

O protocolo HMARS foi desenvolvido para sistemas de comunicação direta, ou seja, o destino da comunicação deve estar ao alcance direto da origem.

Para a transmissão dos quadros de dados poder ser iniciada, todos os nós sensores da rede devem conhecer o escalonamento do superframe, pois é através do superframe que as transmissões são executadas.

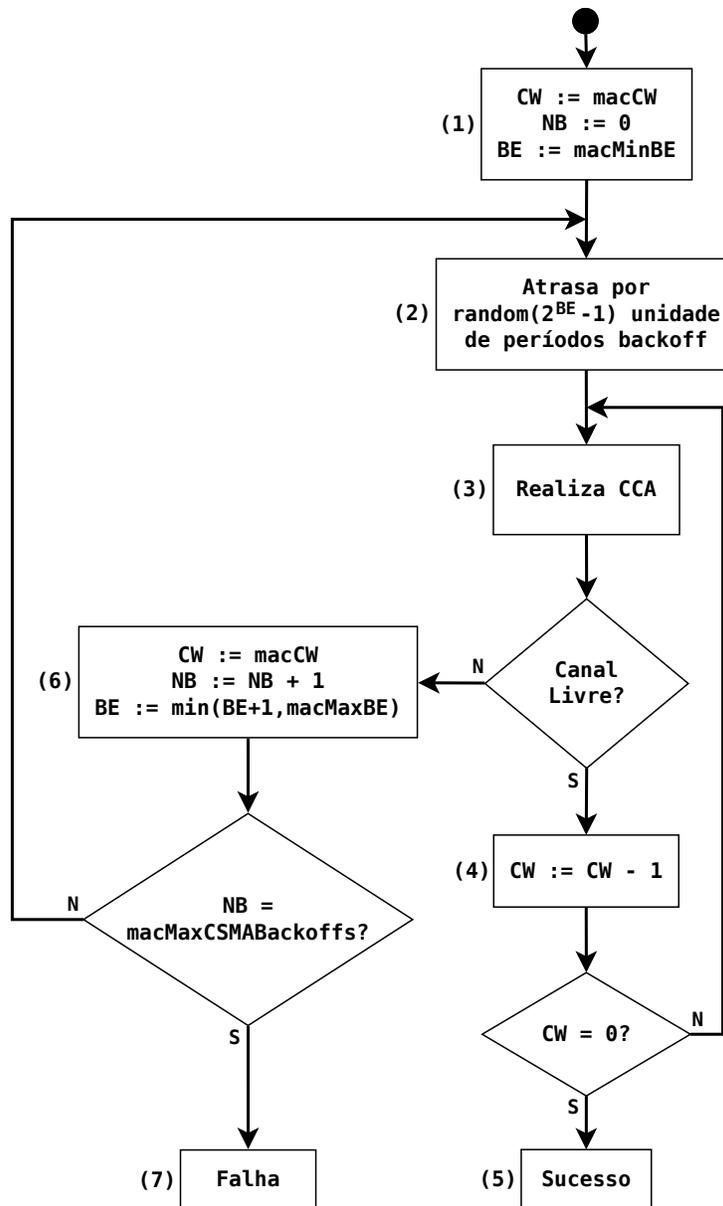


Figura 16: O Algoritmo CSMA/CA não persistente.

### 6.5.1 Transmissão de dados para a estação base

Quando um nó sensor da rede deseja transmitir dados para a estação base, ele deve esperar até o próximo subframe uplink relacionado ao seu *cluster* de cobertura.

Estando dentro do seu subframe uplink, o nó sensor da rede pode transmitir seus dados usando o mecanismo CSMA/CA.

### 6.5.2 Transmissão de dados apartir da estação base

Quando a estação base deseja transmitir dados para um nó sensor da rede, ela deve fazê-lo no frame downlink. Estando dentro do frame downlink, a estação base pode transmitir seus dados usando o CSMA/CA.

## 7 Avaliação de Desempenho dos Protocolos Propostos por Simulações

Nesta seção é apresentado a avaliação de desempenho dos protocolos de controle de acesso ao meio propostos HMARS e SPP-MAC em comparação com outros protocolos. Todos os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através de simulações realizadas no Network Simulator 2 (*NS2*) [7].

Foram considerados diferentes cenários, abrangendo somente o sistema de rede infraestruturada proposto de comunicação direta.

Como a avaliação foi em cima da camada de enlace, não foi considerado os erros provenientes da camada física. Apenas a perda de potência devido a propagação do sinal foi considerado.

### 7.1 Implementação

Como não existe nenhuma funcionalidade para a tecnologia RoF implementada por padrão no *NS2*, foi preciso implementar essa funcionalidade, pois é algo extremamente importante nesse projeto. Para tal, foram criadas três novas classes: *RoFWirelessPhy*, *RoFWiredPhy* e *OpticalChannel*; além de inserir modificações em outras classes existentes no simulador.

Os protocolos foram implementados de acordo com suas funcionalidades de forma a integrarem o simulador com perfeição.

### 7.2 Configuração das Simulações

Para avaliar os protocolos HMARS e SPP-MAC, foram definidos quatro cenários. O simulador *NS2* foi configurado para operar em conformidade com as necessidades das simulações.

O modelo de propagação de ondas adotado foi o Shadowing em conjunto com a comparação da potência percebida durante a recepção dos pacotes com a potência de sensibilidade dos transeptores para decidir se o pacote será aceito ou descartado. Foi usado o tipo de tráfego com distribuição Poisson.

As principais métricas de desempenho consideradas durante as simulações desse capítulo são a Taxa de Entrega, o Goodput Agregado e o Consumo Médio de Energia.

Nas simulações foi utilizado o agente de roteamento DumbAgent, disponível no *NS2*. Este é um bom agente para avaliação de protocolos MAC, pois estabelece comunicação direta, sem reencaminhamento de pacotes nem mensagens de controle. A frequência de comunicação usada é 915 MHz, com uma potência de transmissão de 10 dBm e uma potência de sensibilidade de  $-95$  dBm para todos os componentes da rede. Os ganhos das antenas de transmissão e recepção é 0 dBm e a taxa de transmissão de dados é 250 Kbps.

Todas as simulações foram replicadas 10 vezes e os resultados apresentados possuem intervalos de confiança de 95 %. Os fluxos de dados são sempre iniciados em tempos aleatórios inferior aos 10 primeiros segundos de simulação, sendo assim os 10 segundos iniciais considerados como transiente. A duração total padrão de cada simulação varia de cenário para cenário.

A seguir são descritos os cenários e apresentados os resultados obtidos durante as simulações.

### 7.2.1 Cenário 1

**Descrição:** A proposta deste primeiro cenário é verificar o comportamento dos protocolos de controle de acesso ao meio com relação a Taxa de Entrega e o Goodput Agregado. A topologia definida foi projetada para avaliar o desempenho quando ocorrem mudanças na quantidade de nós na rede tanto pelo acréscimo de novos *clusters* de cobertura quanto de nós sensores nos *clusters* de cobertura já existentes. Nenhum quadro de confirmação de recepção foi utilizado por nenhum dos protocolos envolvidos nesta simulação.

Na topologia usada, uma estação base é usada e a cada 5 Km no enlace de fibra óptica um *cluster* de cobertura é colocado. Os nós em cada *clusters* de cobertura são distribuídos aleatoriamente dentro de um raio de 15 metros da RAU.

O tamanho do payload dos quadros de dados usado é 48 bytes com carga de tráfego de 10 quadros por segundo e a duração total das simulações nesse cenário é de 810 segundos.

**Resultados:** Através da análise conjunta das Figuras 17 e 18, pode-se observar que tanto o protocolo Pure Aloha quanto o CSMA/CA p-persistente não são indicados para a nosso sistema. Como o protocolo Pure Aloha não utiliza nenhum mecanismo para evitar ou ao menos tentar evitar as colisões que podem ocorrer tanto intra-cluster quanto inter-clusters, muitas colisões ocorrem, assim diminuindo a taxa de entrega da rede. Por sua vez, o protocolo CSMA/CA p-persistente tenta evitar as colisões intra-cluster avaliando o canal sem fio antes da transmissão, desta maneira, diminuindo as colisões intra-cluster.

O protocolo S-MAC, mesmo tendo uma taxa de entrega constante e igual a 100 %, não garante um grande goodput, pois como ele utiliza quadros de controle RTS/CTS, muitos dos quadros de RTS colidem na estação base e assim não .

Devido a utilização de uma variação do CSMA/CA em sua concepção, colisões intra-cluster ainda podem ocorrer no HMARS quando duas transmissões são iniciadas ao mesmo tempo impossibilitando, assim, que ele mantenha uma taxa de entrega igual a 100 %. Por esse motivo, podemos perceber na Figura 17(d) que quando o número de nós no *cluster* de cobertura aumenta, a taxa de entrega diminui, indicando a ocorrência de colisões intra-cluster. Já o goodput aumenta com o aumento da quantidade de nós no *cluster* de cobertura, porém tendendo permanecer constante independentemente da quantidade de *clusters* de cobertura no sistema.

Como o SPP-MAC é baseado em seleção, ele utiliza sinalizações para indicar o nó que poderá transmitir, assim, apenas um nó estará transmitindo por vez. Dessa maneira, nem colisões inter-clusters nem intra-clusters ocorrerão, dessa maneira fazendo com que todos os quadros transmitidos sejam recebidos pela estação base, levando em consideração apenas as colisões como métrica de perda de pacotes e desconsiderando problemas pertinentes da comunicação. Pode-se observar ainda que, em relação ao goodput, Figura 18(e), existe um limite máximo que ele atingi dependendo da configuração do sistema, ou seja, um valor no qual o goodput não consegue ser melhorado, mesmo adicionando mais nós ao sistema. Depois que esse valor máximo é atingido, a tendência do goodput é diminuir com a adição de mais *clusters* de cobertura no sistema devido ao maior atraso que o sistema experimentará.

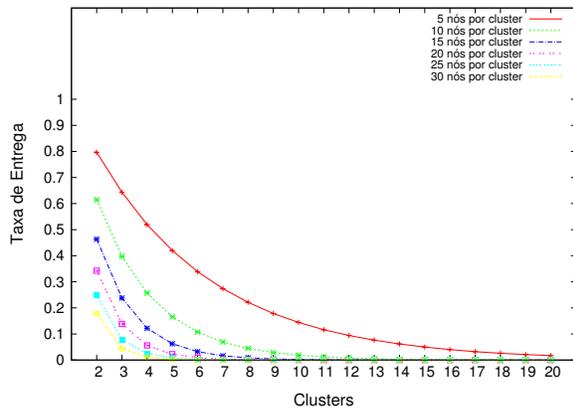
### 7.2.2 Cenário 2

**Descrição:** Este cenário foi utilizado para verificar as limitações impostas pelos protocolos MAC com relação ao comprimento da fibra óptica entre a estação base e o *cluster* de cobertura.

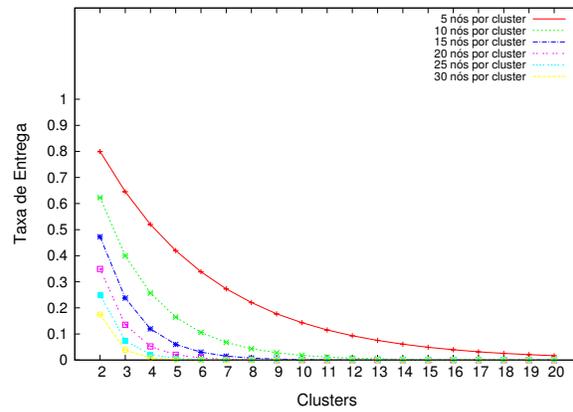
Foi definida uma topologia com uma Estação Base de Controle (BSC) conectada a uma única Unidade de Antena Remota (RAU) através de enlaces de fibra óptica, para a qual serve a um único dispositivo de monitoramento. O fluxo de dados é gerado no dispositivo de monitoramento, tendo como destino a estação base.

Apenas os protocolos HMARS, SPP-MAC e S-MAC (descrito anteriormente) foram usados nas simulações deste cenário. A duração total das simulações nesse cenário é de 1610 segundos.

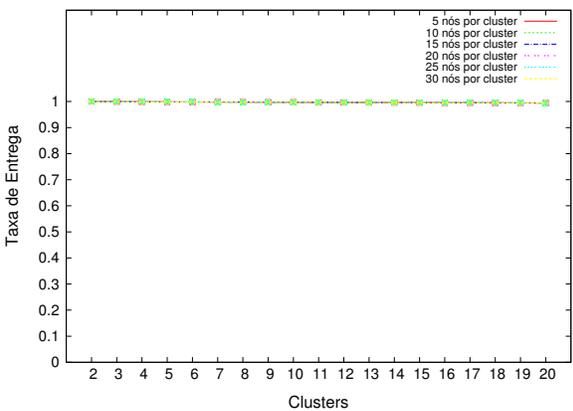
**Resultados:** Na Figura 19(a), pode-se observar que o protocolo S-MAC tem limitações em relação ao comprimento máximo da fibra óptica que conecta a estação base e o *cluster* de



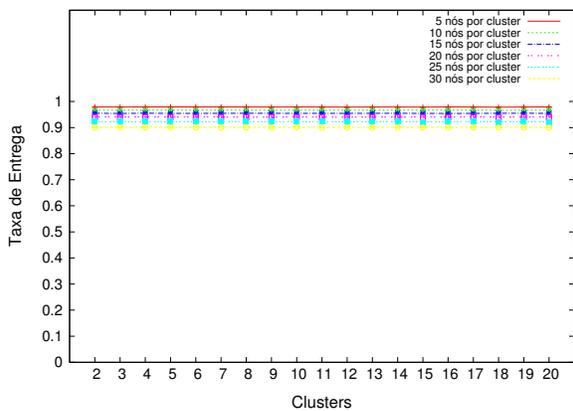
(a) Pure Aloha



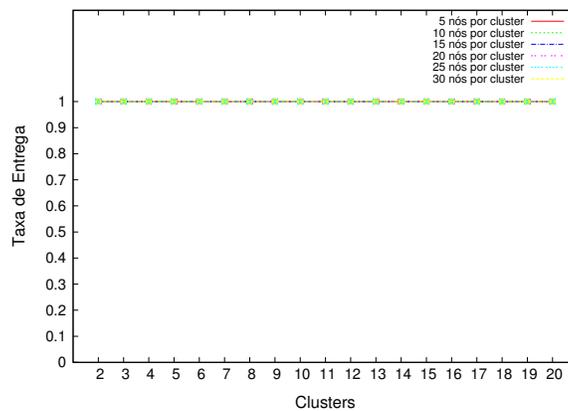
(b) CSMA/CA p-persistente



(c) SMAC



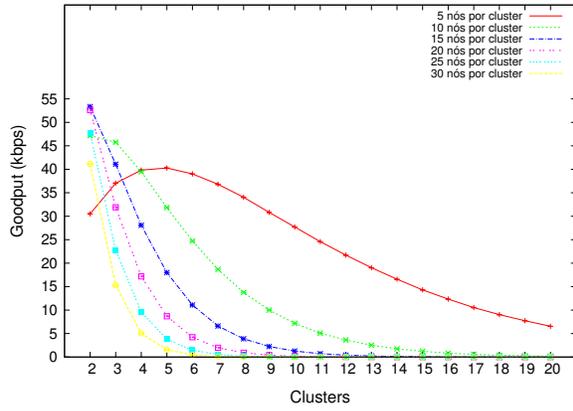
(d) HMARS



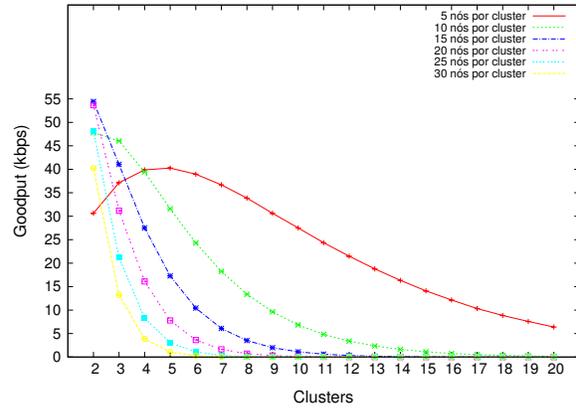
(e) SPP-MAC

Figura 17: Taxa de Entrega para tráfego gerado de 10 quadros/segundo.

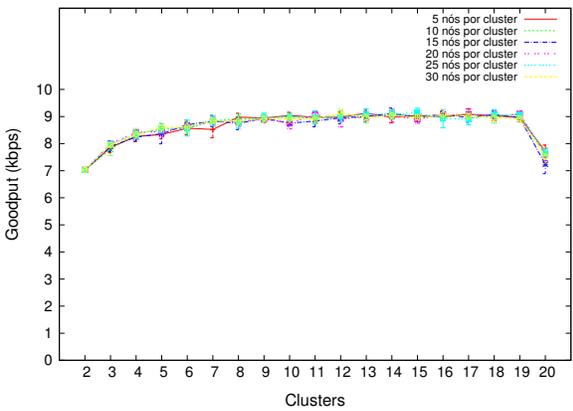
cobertura. Esta limitação, aproximadamente 100 Km, se deve ao temporizador fixo utilizado pelo S-MAC para os quadros de controle como o CTS e ACK. Sempre que um quadro RTS é transmitido por um nó da rede, um temporizador é iniciado para esperar o quadro CTS.



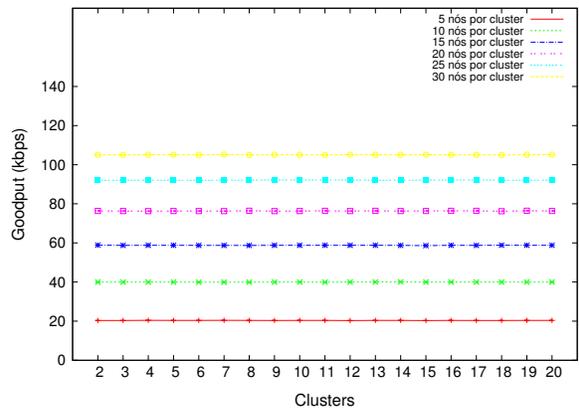
(a) Pure Aloha



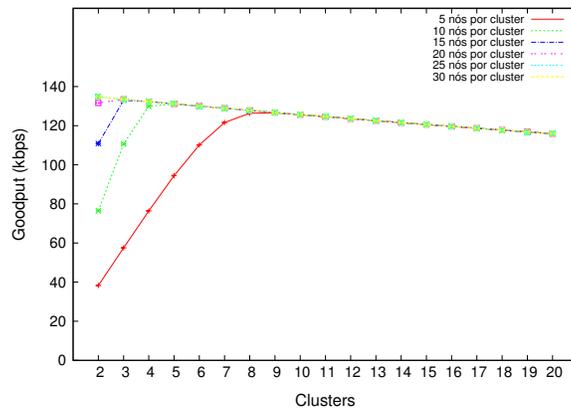
(b) CSMA/CA p-persistente



(c) SMAC



(d) HMARS



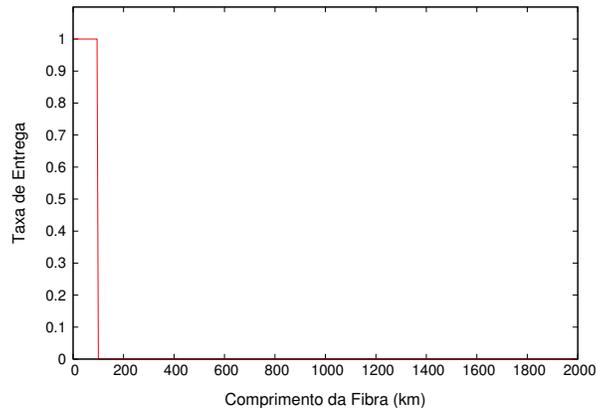
(e) SPP-MAC

Figura 18: Goodput para tráfego gerado de 10 quadros/segundo.

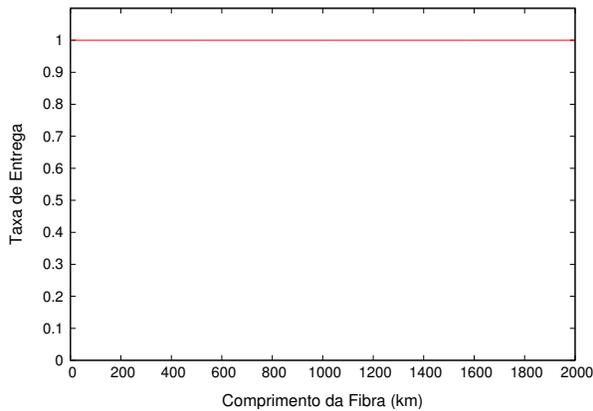
Se o quadro CTS não for recebido dentro deste tempo, um novo quadro RTS é transmitido, assim, se a atraso entre o nó e a estação base for igual ou maior que o tempo do timeout, nenhum quadro de dados será transmitido.

Já nas Figuras 19(b) e 19(c), observa-se que os protocolos HMARS e SPP-MAC não experimentam esta limitação, pois não trabalham com temporizadores fixos no envio de seus quadros. Porém, ao observar o comportamento destes protocolos com relação ao goodput, Figura 20, nota-se que com um enlace de fibra óptica de 5 Km de comprimento o goodput do SPP-MAC é 24% maior que o goodput do HMARS e com 2000 km de comprimento o goodput do SPP-MAC é 35 % menor em relação ao HMARS, ou seja, o SPP-MAC experimenta uma maior degradação com o aumento do comprimento do enlace de fibra óptica chegando a 82 % em comparação aos 37 % do HMARS.

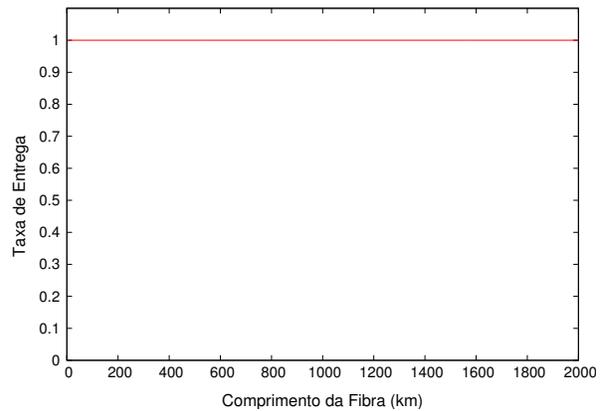
Quando aumenta-se o comprimento do enlace de fibra óptica entre a estação base e o *cluster* de cobertura, obviamente ocorre um aumento no atraso experimentado pelos dados na transmissão. Por isso, nada mais comum do que haver uma diminuição no goodput com o aumento do comprimento do enlace, porém, como no SPP-MAC existe a necessidade do envio do quadro de sinalização, ele sentirá os efeitos do aumento do atraso mais severamente.



(a) SMAC

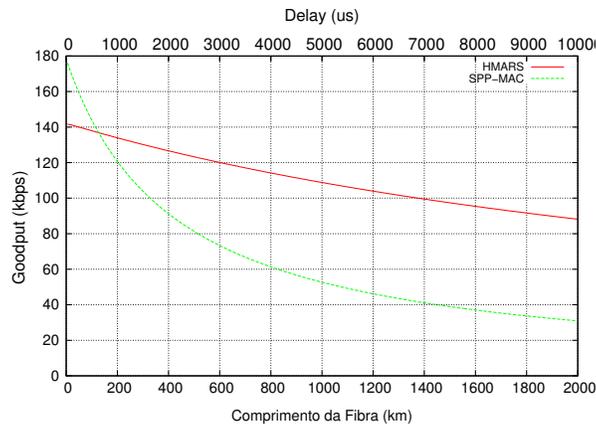


(b) HMARS



(c) SPP-MAC

Figura 19: Taxa de Entrega vs Comprimento da Fibra.



(a)

Figura 20: Goodput vs Comprimento da Fibra.

### 7.2.3 Cenário 3

**Descrição:** Este cenário foi utilizado para verificar o desempenho dos protocolos HMARS e SPP-MAC quando os nós da rede tem diferentes cargas de tráfego. Para o SPP-MAC foi usado duas configurações, uma usando o mecanismo de prioridade e outra não usando o mecanismo.

Na topologia usada, uma estação base é usada e a cada 5 km no link de fibra óptica um *cluster* de cobertura é colocado. Os nós em cada *clusters* de cobertura foram distribuídos aleatoriamente dentro de um raio de 15 metros da RAU.

As cargas de tráfego usados foram de 0, 5, 1, 2, 5, 10 e 20 quadros por segundo, distribuídas aleatoriamente entre os nós da rede, mas mantendo-se igual para todas as replicações. Dessa maneira, a quantidade de nós em cada carga de tráfego não são pré-fixadas antes do inicio da simulação. A duração total das simulações nesse cenário é de 1010 segundos.

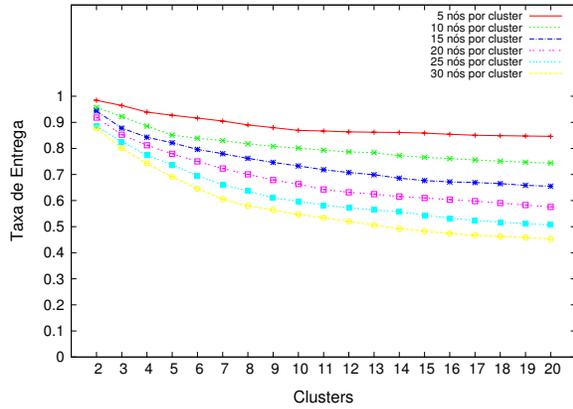
**Resultados:** Analisando a Figura 22 percebe-se que o SPP-MAC usando o mecanismo de prioridade tem um desempenho superior aos outros.

Isso é facilmente explicado quando analisamos a Figura 23, pois verifica-se que quando o SPP-MAC utiliza o mecanismo de prioridade, mais quadros de sinalização serão respondidos assim gerando um maior goodput.

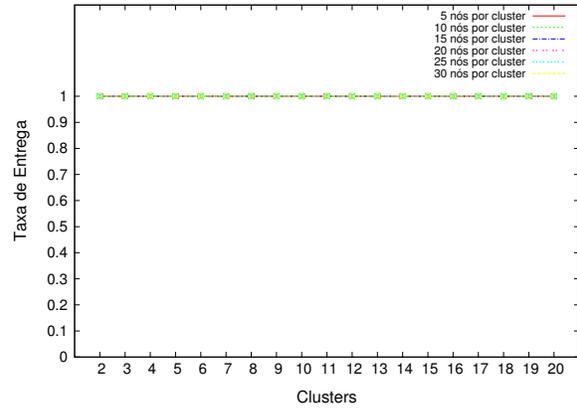
### 7.2.4 Cenário 4

**Descrição:** Este cenário foi utilizado para comparar o desempenho do protocolo SPP-MAC quando utilizando o quadro de confirmação de quando não utilizando.

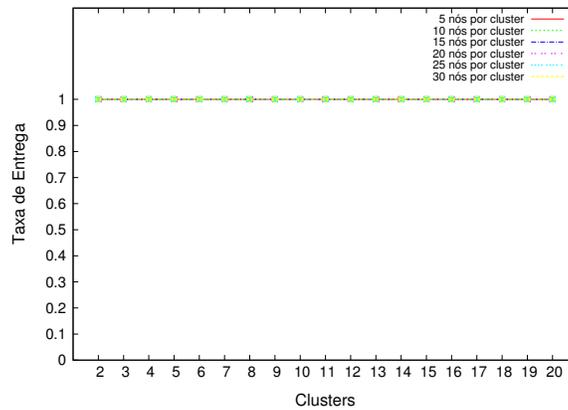
Na topologia usada, uma rstação base é usada e a cada 5 km no link de fibra óptica um



(a) HMARS



(b) SPP-MAC sem o mecanismo de prioridade



(c) SPP-MAC com o mecanismo de prioridade

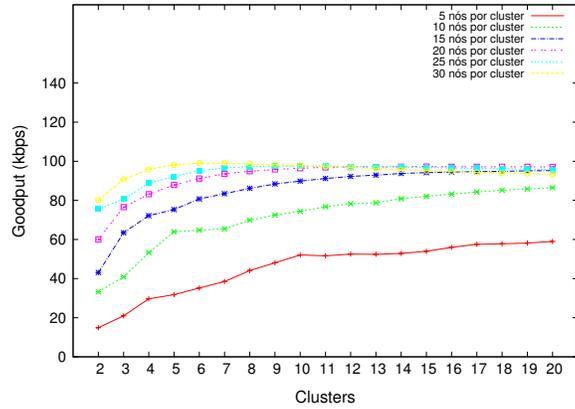
Figura 21: Taxa de Entrega.

*cluster* de cobertura é colocado. Os nós em cada *clusters* de cobertura foram distribuídos aleatoriamente dentro de um raio de 15 mestros da RAU.

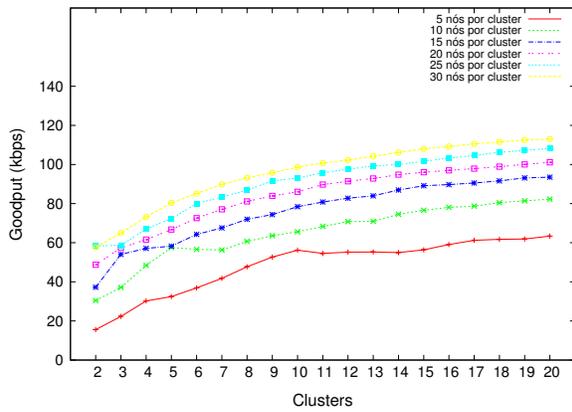
O tamanho do payload dos quadros de dados usado foi 48 bytes, com uma carga de tráfego de 10 quadros por segundo e a duração total das simulações nesse cenário é de 810 segundos.

**Resultados:** Quando a confirmação do recebimento dos quadros através do quadro de confirmação é utilizado (todos os quadros de dados enviados pelos nós da rede recebem um quadro de confirmação como resposta), a taxa de envio de quadros de sinalização diminui acarretando uma diminuição no goodput, pois uma quantidade menor de quadros de dados serão enviados pelos nós da rede. Pode-se observar isso analisando as Figuras 24(a) e 25(a), onde o goodput quando o quadro de confirmação é utilizado é menor de quando o quadro de confirmação não é utilizado.

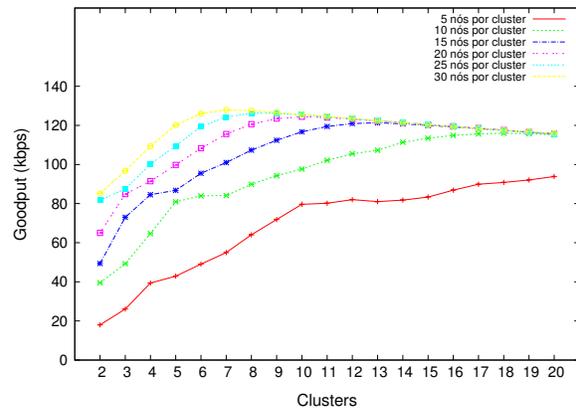
Em relação ao consumo de energia, Figuras 24(b) e 25(b), é esperado que com a utilização



(a) HMARS

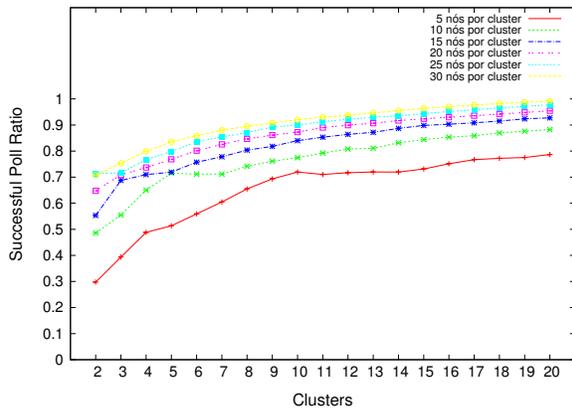


(b) SPP-MAC sem o mecanismo de prioridade

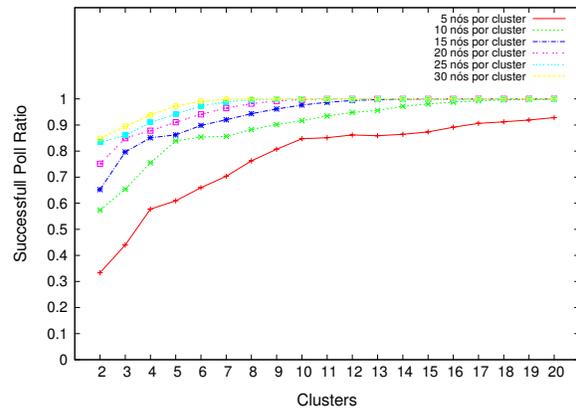


(c) SPP-MAC com o mecanismo de prioridade

Figura 22: Goodput.



(a) SPP-MAC sem o mecanismo de prioridade



(b) SPP-MAC com o mecanismo de prioridade

Figura 23: Successful Poll Ratio.

dos quadros de confirmação o consumo aumenta pois uma quantidade de energia será utilizada para processar estes quadros, além do dispositivo permanecer com o transceptor ativado enquanto espera a confirmação.

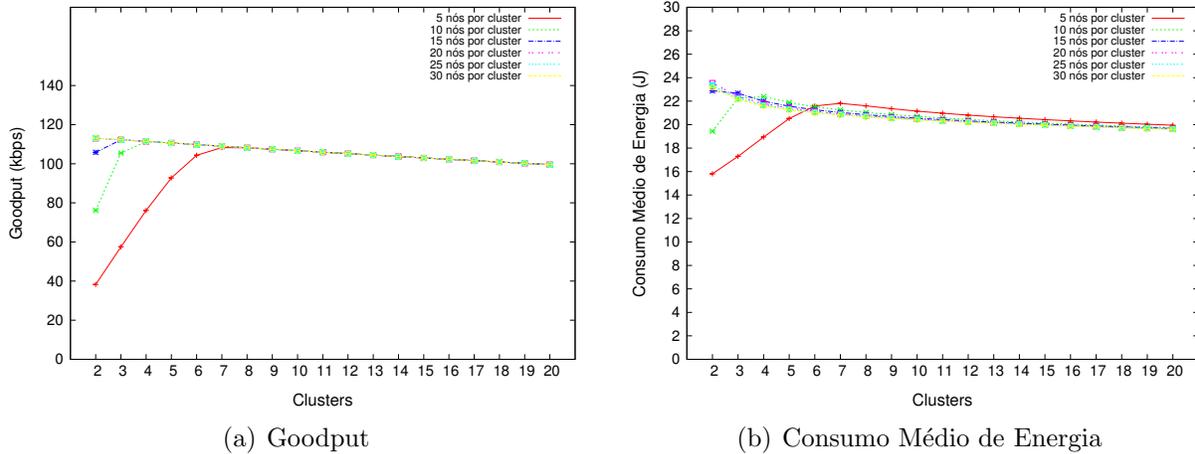


Figura 24: Com Ack.

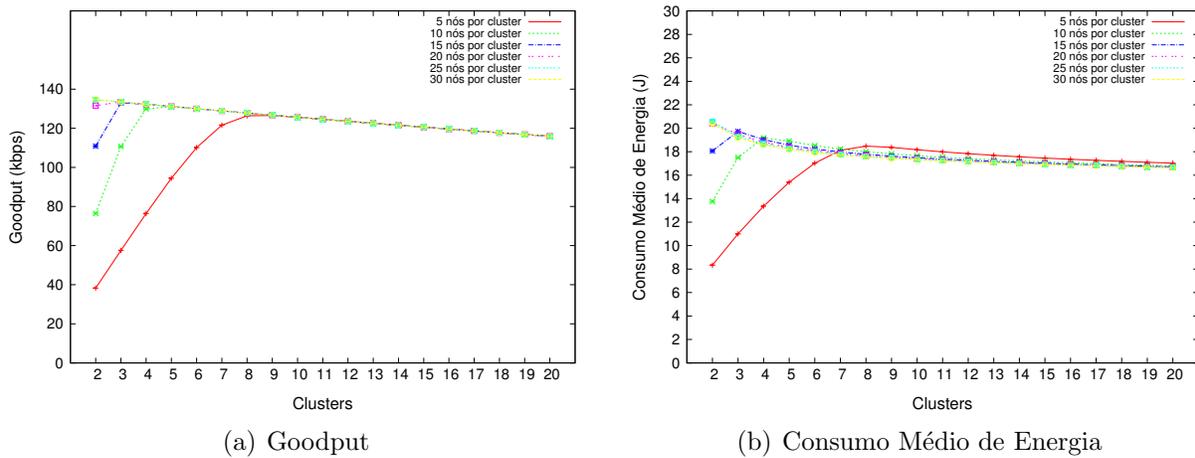


Figura 25: Sem Ack.

## 8 Avaliação de Desempenho por Experimentos

### 8.1 Introdução

O sistema para os experimentos foi montado em uma bancada para testes do laboratório. O objetivo dos experimentos é avaliar o comportamento do protocolo SPP-MAC no sistema híbrido Rede de Sensores sem Fio e Rádio-sobre-Fibra.

A bancada dos experimentos foi montada de modo a possibilitar que fossem executados testes com no máximo dois *clusters* de cobertura com seis nós sensores em cada *cluster* de cobertura.

## 8.2 Equipamentos utilizados nos experimentos

Para atender as necessidades do experimento, foram adquiridos dois módulos Arduino compatível para serem usados como nós sensores da rede e base. Também foram utilizados equipamentos de Rádio-sobre-Fibra, caixas blindadas, fibras ópticas e acopladores ópticos.

As caixas blindadas utilizadas têm como objetivo evitar que o sinal de rádio proveniente dos nós sensores alcance a base por algum caminho externo ao sistema que está sendo testado. Elas precisam ser utilizadas porque na bancada de teste os nós sensores e a base estão muito mais próximos do que estariam em um sistema fisicamente implantado. A atenuação das caixas blindadas é de 30 dBm aproximadamente.

O módulo utilizado como nós da rede foi o *RFBee*, e suas características principais são:

- **Microcontrolador:** ATmega168
- **Transceptor:** CC1101
- **RAM:** 1 KB
- **Flash:** 16 KB
- **EEPROM:** 512 B
- **Frequência do processador:** 8 MHz
- **Sensibilidade do receptor:**  $-95$  dBm
- **Potências de transmissão:**  $-30$ ,  $-20$ ,  $-15$ ,  $-10$ ,  $0$ ,  $5$ ,  $7$  e  $10$  dBm
- **Frequência de trabalho:** 868 MHz e 915 MHz
- **Taxa de transmissão de dados:** de 4800 bps a 500000 bps

O módulo utilizado como base foi o *BE900*, e suas características principais são:

- **Microcontrolador:** ATmega328
- **Transceptor:** CC1101
- **RAM:** 2 KB

- **Flash:** 32 KB
- **EEPROM:** 1 KB
- **Frequência do processador:** 8 MHz
- **Sensibilidade do receptor:**  $-95$  dBm
- **Potências de transmissão:**  $-30$ ,  $-20$ ,  $-15$ ,  $-10$ ,  $0$ ,  $5$ ,  $7$  e  $10$  dBm
- **Frequência de trabalho:** 868 MHz e 915 MHz
- **Taxa de transmissão de dados:** de 4800 bps a 500000 bps

As características principais do equipamento Rádio-sobre-Fibra são:

- **Impedância de entrada e saída:**  $50 \Omega$
- **Potência óptica de saída:** 3 dBm
- **Ganho em Rádio Frequência sem perda óptica:** 0 dBm
- **Frequência de operação:** 28 MHz até 3000 MHz
- **Input Noise Floor (EIN):**  $-134$  dBm/Hz

As características principais da fibra óptica são:

- **Atenuação:** 0,2 dBm/k

### 8.3 Montagem da Bancada de Testes

A bancada de testes foi montada com três caixas blindadas, uma para a Estação Base de Controle e as outras para os *clusters* de cobertura. O comprimento do par de fibras entre a Estação Base de Controle e o primeiro *cluster* de cobertura é 1 Km e o comprimento do par de fibras entre o primeiro *cluster* de cobertura e o segundo é 4 Km, assim, o comprimento do par de fibras entre a Estação Base de Controle e o segundo *cluster* de cobertura é 5 Km. Foram usados dois acopladores ópticos, três equipamentos de RoF e três circuladores. A Figura 29 mostra o esquemático de como a bancada foi montada.

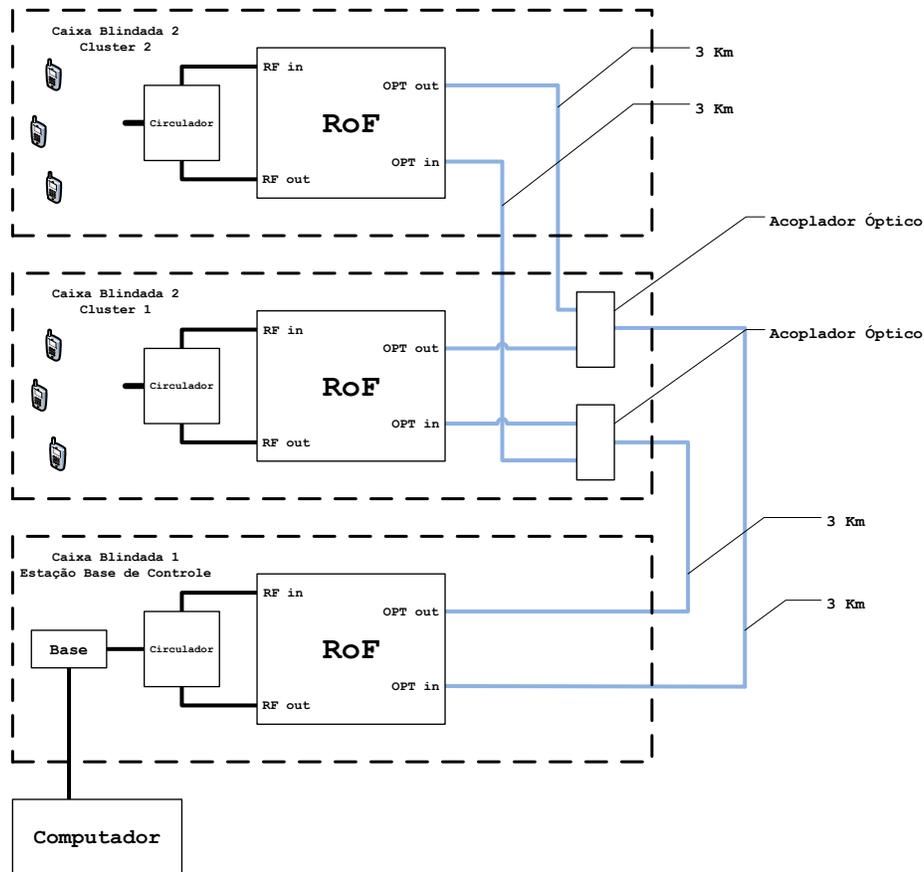


Figura 26: Esquemático da Bancada de Testes.

## 8.4 Implementação dos Firmwares

Para a realização dos experimentos foi desenvolvida uma pilha de protocolos para identificação das funções a serem realizadas pela rede de sensores, Figura 30. A definição das funções de cada camada seguiu as características conceituais semelhante ao que estabelece a pilha de protocolo *TCP/IP*, considerando uma pilha com 5 camadas. A construção de uma pilha específica para rede de sensores fez com que fossem definidas as funções para atender as necessidades que se apresentaram para o projeto.

Para o desenvolvimento do código e compilação dos firmwares, foi utilizada a plataforma Arduino. Esta plataforma se mostrou bastante interessante no projeto pela flexibilidade e disponibilização de códigos abertos, que permitiram o desenvolvimento de todos os algoritmos de transmissão e recepção.

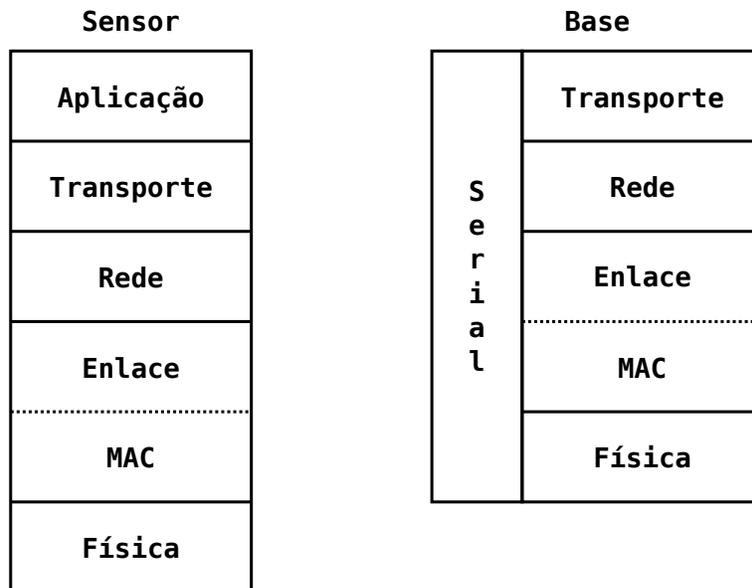


Figura 27: Pilha de Protocolos.

## 8.5 Configuração dos Experimentos

Todos os experimentos foram replicados 5 vezes e os resultados apresentados possuem intervalos de confiança de 90 % e a duração dos experimentos é 360 segundos.

As configurações utilizadas pelos dispositivos, tanto pelos nós sensores quanto pela base são:

- **Frequência utilizada:** 915 MHz
- **Espaçamento entre os canais:** 200 KHz
- **Canal utilizado:** 20
- **Modulação utilizada:** *GFSK*
- **Potência de transmissão:** 10 dBm
- **Taxa de transmissão:** 250 Kbps
- **Ganho das antenas:** 0 dBi

## 8.6 Cenário 1

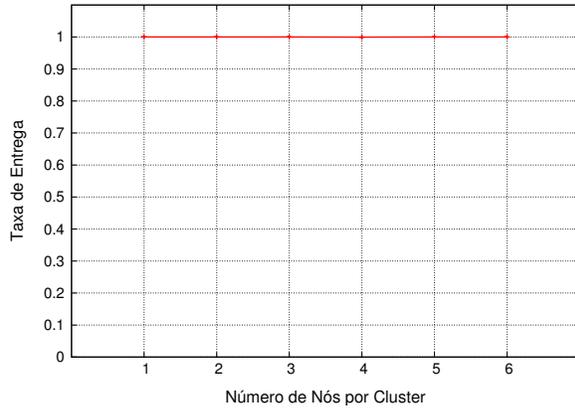
**Descrição:** A proposta deste cenário é verificar o comportamento do protocolo SPP-MAC. A topologia definida na Figura 29 foi projetada para avaliar o desempenho do protocolo SPP-MAC quando ocorrem mudanças na quantidade de nós na rede. A mudança na quantidade

se dá pelo aumento do número de nós sensores nos dois *clusters* de cobertura da rede e não no aumento na quantidade de *clusters* de cobertura, como feito nas simulações.

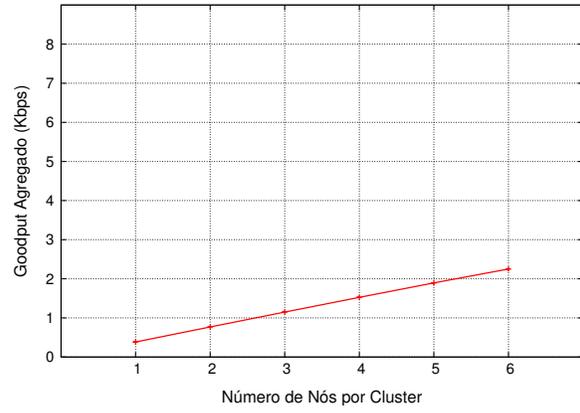
Neste cenário, nenhum quadro de confirmação de recepção foi utilizado e o tamanho do payload dos quadros de dados usado é 48 bytes com carga de tráfego de 0, 5, 1 e 2 quadros por segundo.

**Resultados:** Como foi mostrado pelas simulações, nos experimentos quanto maior a carga de tráfego da rede maior é o goodput agregado da mesma (Figuras 31(b), 32(b) e 33(b)), pois uma quantidade maior de quadros de sinalização serão respondidos com quadros de dados (Figuras 31(d), 32(d) e 33(d)), assim, aumentando o goodput. Essa maior carga de tráfego na rede pode ser tanto pelo aumento de quadros de dados gerados dentro de um intervalo de tempo quanto pelo aumento da quantidade de nós sensores na rede.

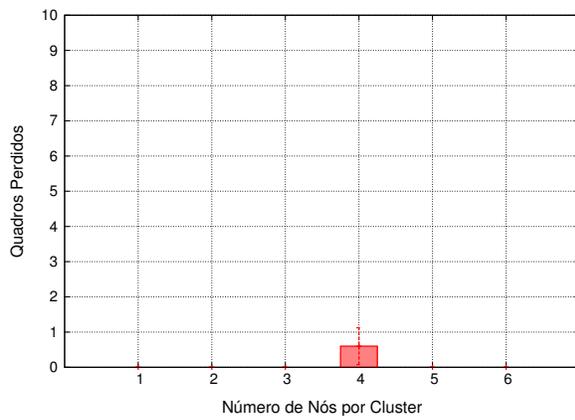
Diferentemente das simulações, que não contavam com problemas físicos do canal sem fio (apenas a atenuação do sinal foi usado), os experimentos contam com esses problemas, acarretando em perdas de alguns quadros de dados tanto nos nós sensores (quadros de sinalização e quadros de confirmação) quanto na estação base (quadros de dados). Por esse motivo, há alguns quadros perdidos como mostrado nas Figuras 31(c), 32(c) e 33(c).



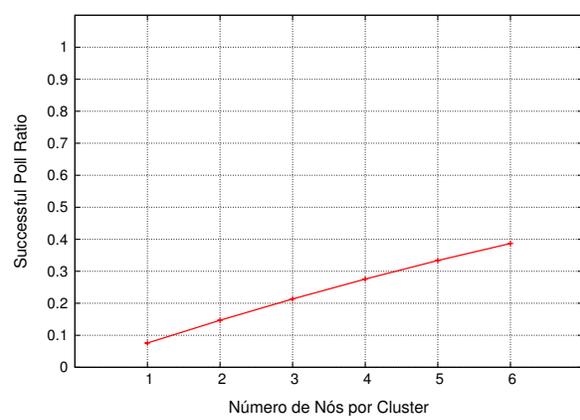
(a) Taxa de Entrega



(b) Goodput Agregado

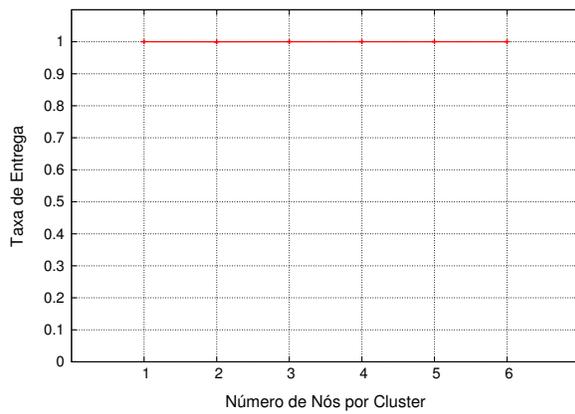


(c) Quadros Perdidos

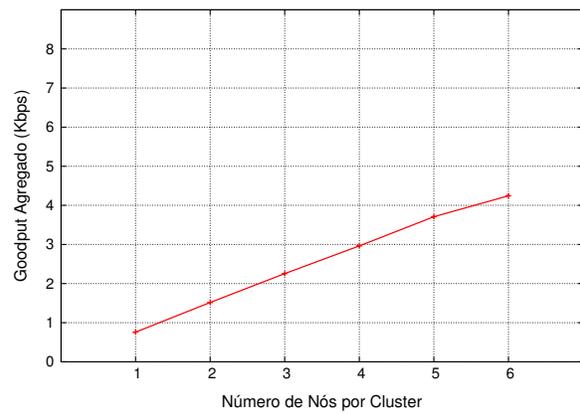


(d) Successful Poll Ratio

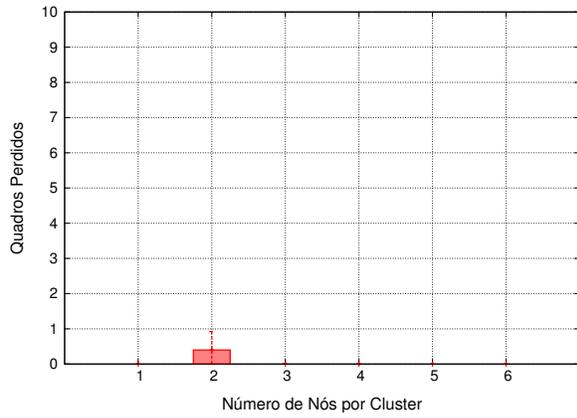
Figura 28: 0,5 quadros por segundo.



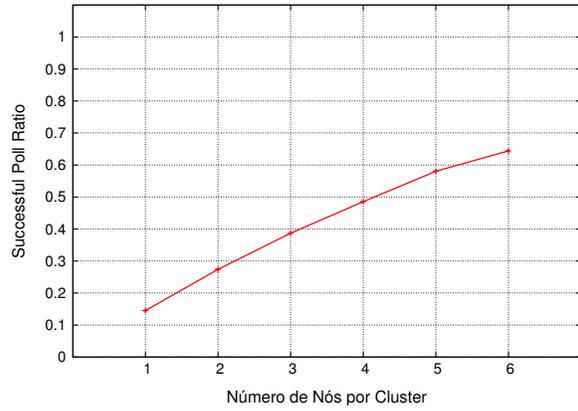
(a) Taxa de Entrega



(b) Goodput Agregado

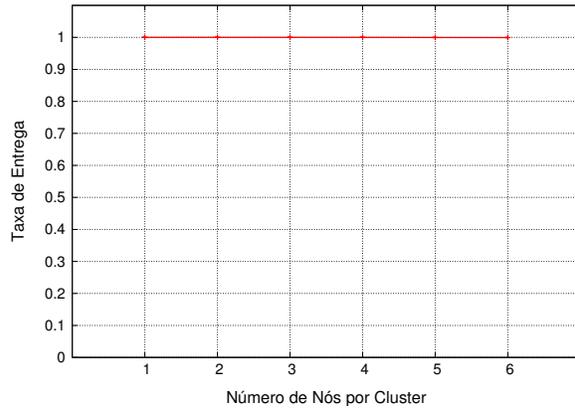


(c) Quadros Perdidos

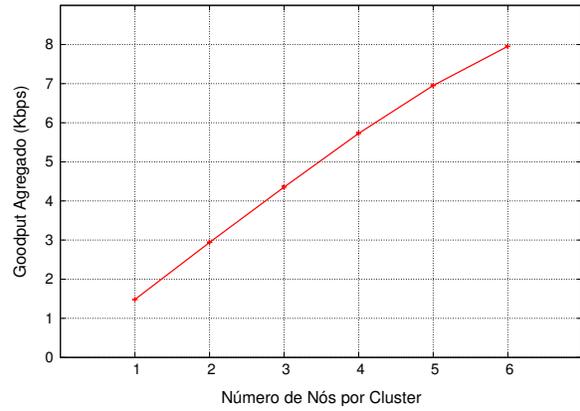


(d) Successful Poll Ratio

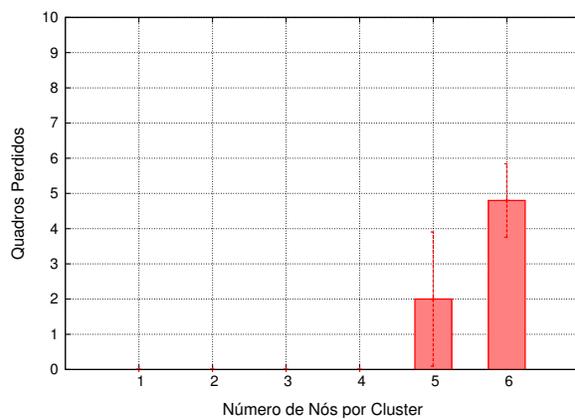
Figura 29: 1 quadro por segundo.



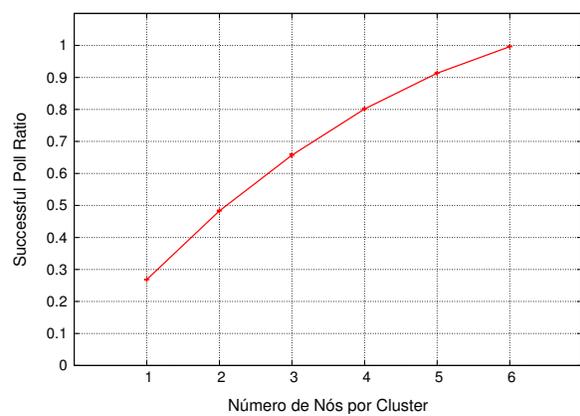
(a) Taxa de Entrega



(b) Goodput Agregado



(c) Quadros Perdidos



(d) Successful Poll Ratio

Figura 30: 2 quadros por segundo.

## 9 Produção Científica

- Artigo publicado na conferência internacional ”*IEEE Latin-America Conference on Communications (IEEE LATINCOM)*.”
- Artigo publicado na conferência internacional ”*IEEE International Conference on Communications (ICC)*.”
- Artigo publicado no ”*XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*.”

## 10 Conclusão

Este relatório apresentou as tarefas realizadas durante o período de bolsa do mestrado. No início, houve o estudo de como integrar as Redes de Sensores sem Fio com a tecnologia Rádio-sobre-Fibra e como atuam os diversos protocolos MAC existentes. Depois ocorreu a implementação das funcionalidades necessárias no simulador *NS2*, e, devido as dificuldades encontradas, essa implementação demandou mais tempo.

Foram propostos dois protocolos MAC para o Sistema Híbrido Rede de Sensores sem Fio e Rádio-sobre-Fibra, cada um com suas vantagens e desvantagens. Assim, não é possível falar qual protocolo é melhor, pois isso dependerá dos requisitos da rede a ser implantada.

A parte experimental da pesquisa demandou uma maior atenção, pois equipamentos tiveram que ser comprados e estudados para a implementação dos firmwares. No decorrer da implementação dos firmwares, muitas dificuldades foram encontradas, pois todo o código teve de ser desenvolvido do início, o que acarretou em um desenvolvimento por tentativa e erro.

As disciplinas do mestrado e as tarefas do plano de trabalho foram realizadas com sucesso.

## Referências

- [1] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, “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*, (New York, NY, USA), pp. 263 – 270, ACM, 1999.
- [2] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, “Wireless integrated network sensors,” *Commun. ACM*, vol. 43, pp. 51 – 58, May 2000.

- [3] A. Fanimokun and J. Frolik, “Effects of Natural propagation environments on Wireless Sensor Network coverage area,” in *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium*, pp. 16 – 20, 2003.
- [4] H. Al-Raweshidy and S. Komaki, *Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks*. 2002.
- [5] M. Hossen, B.-J. Jang, K.-D. Kim, and Y. Park, “Extension of wireless sensor network by employing rof-based 4g network,” in *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conference on*, vol. 01, pp. 275 – 278, feb. 2009.
- [6] A. Cooper, “Fibre/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network,” *Electronics Letters*, vol. 26, pp. 2054–2056, nov. 1990.
- [7] “NS-2, Network Simulator 2.” <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.