

Um Framework de Rádios Cognitivos para Redes de Sensores sem Fio

Luiz H. A. Correia^{1,3}, Erasmo E. Oliveira^{1,2}, Daniel F. Macedo²,
Pedro M. Moura¹, Antonio A. F. Loureiro², Jorge Sá Silva³

¹ Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Lavras – Lavras-MG, Brasil

² Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte-MG, Brasil

³ Departamento de Engenharia Informática
Universidade de Coimbra – Coimbra, Portugal

lcorreia@dcc.ufla.br, erasmo@dgti.ufla.br, damacedo@dcc.ufmg.br,
pemmoura@comp.ufla.br, loureiro@dcc.ufmg.br, sasilva@dei.uc.pt

Abstract. *The growth of mobile computing has increased the demand for wireless communication, causing a higher demand for the wireless medium as well as spectrum pollution. Smart radios, also called cognitive radios, monitor the network in order to identify the best available channel, in order to avoid interference and increase the communication quality and spectrum utilization. This paper proposes a framework for the development and testing of protocols for wireless sensor networks that employ cognitive radios (CWSN). We also developed two spectrum decision protocols for CWSNs, which provide distributed mechanisms to select the best wireless channel based on the application's QoS requirements. Simulations of medium and high noise scenarios have shown that the protocols improve the delivery rate by up to 69%, while keeping the delay and energy consumption unaltered.*

Resumo. *A popularização da computação móvel tem aumentado a demanda de comunicação sem fio, causando maior disputa pelo canal e poluição do espectro. Os rádios inteligentes ou cognitivos visam monitorar a rede e encontrar o melhor canal disponível a fim de evitar problemas de interferência, aumentar a qualidade da comunicação e a utilização do espectro. Este artigo propõe um framework para desenvolvimento e teste de protocolos para redes de sensores que empregam rádios cognitivos (RSC). Foram desenvolvidos dois protocolos para decisão do espectro em RSC, que empregam mecanismos distribuídos de seleção dinâmica do melhor canal considerando os requisitos de QoS da aplicação. Simulações mostraram que, em cenários de médio e alto ruído, os protocolos melhoram a taxa de entrega em até 69%, mantendo a latência e o consumo de energia quase inalterados.*

1. Introdução

O desenvolvimento de dispositivos móveis e ubíquos tem aumentado a demanda por serviços de comunicação e conseqüentemente a disputa pelo espectro de frequências.

Grande parte desses dispositivos emprega a faixa de frequências livres ISM, que não requer licenças para a sua operação (*Industrial, Scientific and Medical*). Entretanto, esse mesmo espectro de frequências tem sido usado em aplicações diversas como telefones sem fio, acionamentos remotos, fornos de microondas e sistemas de áudio e vídeo. Essa diversidade de aplicações, aliada ao crescimento de inúmeras redes de comunicação nas frequências ISM, tem gerado interferências nos sistemas de comunicação e até mesmo a indisponibilidade do espectro em determinadas regiões. Em algumas localidades a faixa de frequências de 2,4 GHz chega a ter uma ocupação de até 90% do espectro [McHenry et al. 2006].

As atuais redes de sensores sem fio (RSSF) empregam frequências fixas nas bandas ISM, que também são utilizadas por outros sistemas de comunicação sem fio como o Wi-Fi, Bluetooth e IEEE 802.15.4. A coexistência entre essas diversas tecnologias pode causar interferências danosas, limitando os recursos das aplicações e até mesmo tornando essas redes inoperantes. Para evitar problemas de interferências e coexistência de redes, os nós sensores deveriam monitorar o meio de transmissão e escolher o melhor canal disponível. Em [Akan et al. 2009] é proposto um novo paradigma de RSSF, as Redes de Sensores Sem Fio Cognitivas (RSC), que empregam as técnicas de acesso dinâmico ao espectro usadas nas redes de rádios cognitivos. Dessa forma, as RSC encontrarão os mesmos desafios de pesquisa das redes de rádios cognitivos apresentados por [Akyildiz et al. 2008]. Entretanto, as RSC são mais desafiadoras, pois possuem restrições de recursos e atuam somente nas frequências ISM.

Neste artigo investigamos a incorporação da tecnologia de rádio cognitivo às redes de sensores sem fio. Para realizar esta análise propomos um framework para teste e desenvolvimento de protocolos MAC para RSC. Este framework foi desenvolvido no simulador de redes Castalia [Boulis 2011] e contém as principais funcionalidades das RSC propostas por [Akyildiz et al. 2008] e [Akan et al. 2009].

O framework proposto neste trabalho assume que os nós sensores são equipados com múltiplos rádios multicanais, e um seletor de rádio que possibilita o sensoriamento do espectro. Os métodos de decisão espectral são baseados em alocação dinâmica do canal e em algoritmos distribuídos, e os métodos de compartilhamento e mobilidade do espectro são baseados em troca de mensagens entre os nós. Além disso, adicionamos módulos ao simulador para a geração de tráfego de mensagens e para a modelagem do ruído dinâmico no canal.

Desenvolvemos dois protocolos MAC que analisam os parâmetros do canal e os requisitos da aplicação na escolha do melhor canal. Simulações no framework mostraram que os protocolos MAC cognitivos nas RSC tiveram uma taxa de entrega superior em até 69%, quando comparados com um protocolo MAC convencional das RSSF, ao custo de um aumento moderado da latência e do consumo de energia.

Este trabalho está organizado como descrito a seguir. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. O framework proposto é descrito na Seção 3. O funcionamento do framework para RSC é descrito em detalhes na Seção 4. A Seção 5 apresenta os resultados encontrados na simulação. Finalmente, a Seção 6 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos relacionados

Estudos realizados em 2003 pelo FCC (*Federal Communications Commission*) já identificavam que o espectro eletromagnético é um recurso escasso e que tem sido mal utilizado [FCC 2003]. As técnicas de acesso dinâmico ao espectro têm sido propostas para resolver os problemas de ineficiência espectral e a utilização de rádios cognitivos é considerada a tecnologia mais promissora [Ge et al. 2009]. Akyildiz et al. propuseram um framework para gerenciamento do espectro em rádios cognitivos [Akyildiz et al. 2008]. Este framework é baseado em um modelo *cross-layer* no qual a camada MAC é a principal responsável pela reconfiguração dos rádios diante dos requisitos da aplicação, da rede e do ambiente monitorado. Entretanto, este framework não aborda os problemas de coexistência e interferências, como também não apresenta nenhum mecanismo ou algoritmo para solução dos problemas apresentados.

O espectro de frequências ISM também apresenta um uso intenso. Nestas faixas de frequência, os usuários operam sem qualquer garantia de exclusividade ou não interferência. Devido ao número reduzido de faixas ISM e à sua grande quantidade de aplicações, em algumas regiões o espectro de frequências ISM apresenta-se poluído [Akyildiz et al. 2008, Reed and Bostian 2005]. Tal fato levou à criação das RSC [Akan et al. 2009].

As RSC são RSSF que usam rádios cognitivos para utilizar o espectro ISM ocioso de modo oportunista. As técnicas empregadas nas redes de rádios cognitivos devem ser adaptadas para as RSC, já que são redes com maiores restrições de recursos e que atuam nas faixas de frequências ISM. Em [Akan et al. 2009] os autores apresentam uma arquitetura de nó sensor cognitivo e um framework para RSC. Apesar disso, nenhuma simulação ou experimento foi realizado para avaliar a redução da interferência e a coexistência entre redes.

Em [Zhou et al. 2006] são apresentados experimentos que demonstraram como dispositivos eletrônicos que operam em 2,4 GHz podem causar interferência e até mesmo deixar inoperante uma RSSF baseada no padrão 802.15.4. Para evitar esse problema, os autores propuseram uma abordagem multicanal para as RSSF, já que os nós sensores atuais possuem rádios multi-frequências. Ainda foi proposto um *middleware* entre as camadas física e MAC para as RSSF de forma a suportar uma abordagem multicanal. Apesar disso, esse modelo apresenta somente aspectos de reconfigurabilidade multicanal e nenhum experimento ou simulação foi realizado.

Um método de decisão do espectro desenvolvido para redes sem fio é proposto em [Ge et al. 2009]. O método emprega informações estatísticas da presença de usuários primários na região monitorada, que são alimentadas a um classificador multi-parâmetros baseado em AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [Saaty 2000]. O método considera a probabilidade da chegada de usuários primários durante o monitoramento, os requisitos da aplicação e a influência de múltiplos parâmetros de entrada (capacidade do canal, atraso, perda de pacotes e *jitter*). Além disso, é proposto um mecanismo, baseado em entropia, que automaticamente determina os pesos dos parâmetros de entrada no método de decisão. Apesar de apresentar resultados satisfatórios nas simulações, a falta de caracterização real dos modelos de rádio, da topologia da rede e de cenários realísticos tornaram essa abordagem abstrata. Nenhuma referência aos problemas encontrados na diversidade de antenas, nos protocolos MAC ou na camada física foi localizada.

Recentemente, [Kusy et al. 2011] propuseram uma arquitetura de nós sensores multi-rádio para aumentar a confiabilidade na comunicação. A plataforma IRIS e o padrão IEEE 802.15.4 foram modificados para operarem com dois rádios com frequências de 900 MHz e 2,4 GHz. Experimentos demonstraram a viabilidade da solução proposta, apresentando melhorias da taxa de entrega e da estabilidade do enlace ao custo de um incremento moderado no consumo de energia. Apesar disso, a abordagem restringiu-se a uma implementação monocanal, em que os rádios foram utilizados de forma independente, sem apresentar quaisquer funcionalidades de sensoriamento ou decisão do espectro.

O framework proposto neste artigo apresenta uma abordagem multirádio e multi-canal, que incorpora a tecnologia de rádio cognitivo às redes de sensores sem fio, melhorando a taxa de entrega e promovendo a coexistência de múltiplas RSSF.

3. Framework para RSC

O framework proposto provê funcionalidades cognitivas para evitar interferências e permitir a coexistência de múltiplas redes nas frequências ISM. Ele foi implementado sobre o simulador de redes Castalia [Boulis 2011], desenvolvido exclusivamente para RSSF. Esse simulador foi escolhido por apresentar modelos realísticos das condições do enlace, dos rádios empregados nas RSSF, do modelo de energia e do comportamento dos nós na rede.

O simulador apresenta modelos realísticos dos rádios (CC1000 e CC2420) empregados nas plataformas de RSSF. Também permite leituras de RSSI (*Received Strength Signal Indicator*), SINR (*Signal Interference Noise Rate*) e LQI (*Link Quality Indicator*) e ainda habilita a variação da modulação de sinais e ajuste da potência de transmissão. Os enlaces sem fio possuem um modelo de canal baseado em dados empíricos, no qual a atenuação do sinal varia no tempo. São implementados protocolos MAC clássicos empregados nas RSSF e ainda há o suporte à mobilidade de nós. O modelo de energia considera somente o consumo das operações do rádio de acordo com parâmetros reais.

O Castalia, entretanto, possui deficiências tais como a falta de modelos de tráfego e de aplicações de teste, não há protocolos de roteamento implementados, e o modelo de rádio é monocanal. Desta forma, aprimoramos o simulador para o suporte às RSC ao adicionar suporte a múltiplos rádios multi-canais, e modificamos o modelo de ruído baseado em parâmetros empíricos (dados obtidos em [Correia et al. 2007]). Além disso, adicionamos mecanismos de suporte a rádios cognitivos, tais como algoritmos de monitoramento e decisão do espectro, e adaptamos o protocolo T-MAC para RSC. Finalmente, inserimos módulos para geração de tráfego contínuo e exponencial.

O framework desenvolvido para RSC se baseia nos modelos propostos por [Akyildiz et al. 2008, Akan et al. 2009], sendo apresentado na Figura 1. Os retângulos hachurados em cinza representam os novos módulos e os módulos modificados no Castalia. As novas características são descritas nas subseções a seguir.

3.1. Modelo da camada física

A primeira modificação foi alterar os módulos dos rádios CC1000 e CC2420 para permitir que eles operem em múltiplos canais. Dessa forma, é possível sensoriar todos os canais a partir das frequências base de 900 MHz e 2,4 GHz, por exemplo os 16 canais do rádio CC2420 com separação de 5 MHz. Essa modificação permite que RSSF próximas possam ser detectadas, bem como permite avaliar a ocupação do espectro por outros dispositivos

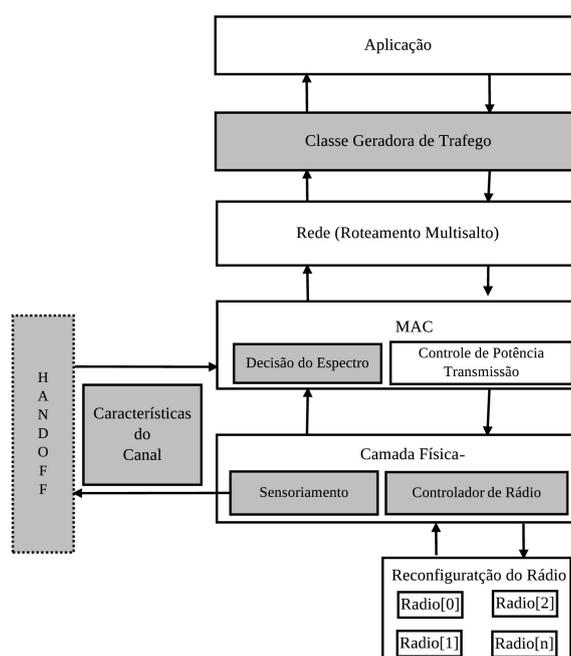


Figura 1. Framework para RSC (adaptado de [Boulis 2011]).

operando na faixa ISM. Em seguida, adicionamos o suporte a múltiplos rádios. Assim, como mostra a Figura 1, podemos inserir rádios de várias tecnologias no Castalia.

Como o sensoriamento do espectro nas RSC é feito pela operação individual de cada rádio, foi necessário inserir um Controlador de Rádios na camada física. Esse controlador ativa temporariamente cada rádio para executar o sensoriamento de frequências. A partir da observação das frequências utilizadas numa determinada região, é possível determinar quais frequências e canais estão livres. Esse sensoriamento deve ser realizado periodicamente para evitar interferências e modificar dinamicamente a escolha do canal.

3.2. Controle de acesso ao meio

A decisão de espectro deve considerar as características do ambiente, que são altamente dinâmicas. Um protocolo de decisão do espectro deve aprender com essas mudanças, descobrir qual o espectro livre, realizar a reconfiguração do rádio, notificar os nós da rede de qual foi o canal escolhido e finalmente migrar para esse canal. Essas tarefas incluem funções multi-camadas, como a coleta dos dados do ambiente por meio da camada física, controle de acesso ao meio e requisitos da aplicação. É necessário que as informações possam ser acessadas de forma *cross-layer* e a camada mais adequada para controlar esses parâmetros é a camada MAC.

O framework tem como característica não usar um canal de controle comum e ainda utilizar algoritmos distribuídos. Para atender a esses requisitos, adaptamos um protocolo já existente no Castalia, o T-MAC [van Dam and Langendoen 2003]. Esse protocolo foi desenvolvido para aplicações dirigidas a eventos que possuem baixa taxa de entrega de mensagens, insensíveis a latência e com transmissão contínua ou periódica de dados, características das RSSF. Além disso, é baseado em contenção, utiliza quadros de controle (RTS/CTS) e utiliza escalonadores para que cada nó saiba quando seu vizinho está pronto para receber dados.

Ao protocolo T-MAC foram adaptados dois métodos para decisão do espectro. No primeiro método, denominado CogTMAC, a decisão do espectro considera apenas a força do sinal recebido (RSSI). O segundo método, denominado AhpTMAC, considera múltiplos parâmetros: RSSI, SNIR, ruído local e atraso fim a fim. Esses parâmetros constituirão a entrada do método de decisão, que é baseado na técnica AHP (*Analytical Hierarchical Process*) [Saaty 2000]. Esses dois métodos serão detalhados na Seção 4.

3.3. Modelos de tráfego

Inserimos no Castalia um novo módulo para geração de tráfego na rede, que implementa três distribuições para o tempo entre envios de pacotes: uniforme, constante e exponencial. Estas distribuições foram implementadas por uma classe que contém várias distribuições contínuas e discretas [Saucier 2000].

4. Funcionamento do framework para RSC

O framework proposto contempla as seguintes funcionalidades do arcabouço proposto por [Akan et al. 2009]: sensoriamento, decisão, compartilhamento e mobilidade do espectro. Apesar da comunicação entre os nós ser dinâmica e baseada no CSMA/CA, foi necessário adicionar um mecanismo para sincronização do canal de transmissão. Para atender a essas funcionalidades foram feitas adaptações no simulador Castalia, cujo fluxo de funcionamento é apresentado na Figura 2.

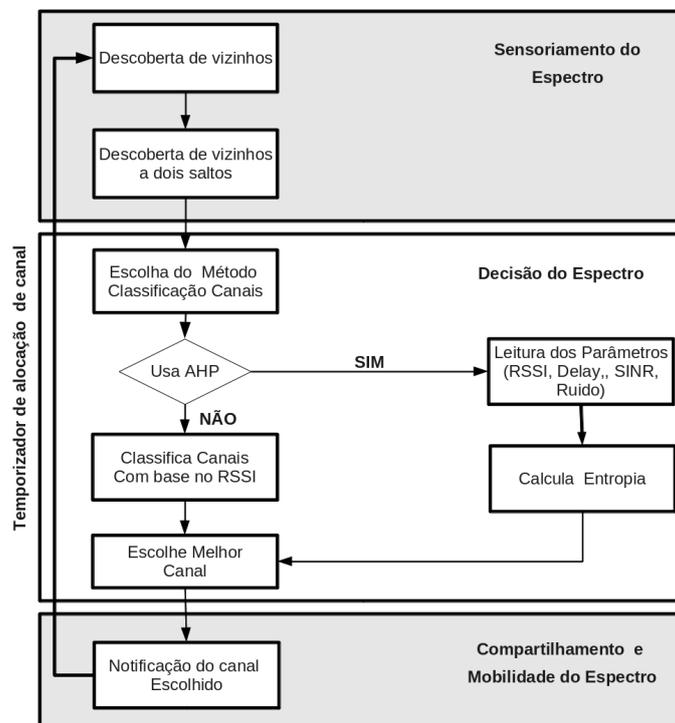


Figura 2. Funcionamento do Framework para RSC.

Os procedimentos acima são realizados pelos nós de uma RSC no momento da sua inicialização e repetidos periodicamente. Quando um nó é ligado, ele deve encontrar

os seus vizinhos imediatos e a dois saltos e armazená-los em listas. A partir dessas listas, cada nó sensoria o espectro e escolhe o melhor canal com base em um dos dois métodos de decisão, CogTMAC ou AhpTMAC. Após a escolha do canal os outros nós da rede devem ser notificados. Por último, é necessário um mecanismo de sincronização dos canais, pois os dois métodos de decisão propostos constituem mecanismos distribuídos que executam em cada nó de forma independente. Descrevemos cada procedimento a seguir.

4.1. Sensoriamento do espectro

Os nós realizam periodicamente os procedimentos de descoberta de vizinhos imediatos e a dois saltos. O método de descoberta de vizinhos imediatos, aqueles dentro do alcance de transmissão, é baseado no algoritmo clássico de *echo/probe* [Andrews 1991]. Na inicialização da rede uma frequência e canal de instalação são conhecidos e o nó envia em *broadcast* um quadro *FN* (*Find Neighbors*) aos seus vizinhos a um salto, que respondem à requisição com um quadro *NF* (*Neighbor Find*). Quando o nó recebe a resposta *NF*, ele adiciona o endereço (ID) do nó remetente à sua lista de vizinhos (LVN_i). O procedimento de descoberta de vizinhos imediatos é realizado periodicamente, mas o *broadcast* do quadro *FN* (*Find Neighbors*) é feito em um canal escolhido e compartilhado pelos nós (descrito na seção 4.3).

O modelo de interferência empregado neste framework considera que dois enlaces interferentes entre si não podem realizar suas transmissões se estiverem utilizando o mesmo canal [Padhye et al. 2005]. Neste framework dois enlaces serão considerados interferentes se estiverem a dois saltos de distância um do outro, ou seja, são alcançáveis a um salto via um nó vizinho. Essa escolha é adequada, já que os rádios só podem se comunicar com um vizinho imediato por vez. Os vizinhos a um salto não são considerados interferentes, uma vez que a interferência entre eles é tratada pelo mecanismo de contenção (RTS/CTS) do protocolo T-MAC modificado.

Para a descoberta de vizinhos a dois saltos é necessário pesquisar a rede e montar uma lista ($LV2HN_i$) para cada nó (N_i) pertencente a essa rede. Esse procedimento é executado periodicamente, e faz com que um nó (N_i), ao receber a lista de vizinhos a um salto (LVN_i), verifique se cada um dos nós (N_j) pertencentes a essa lista é ele mesmo ou um de seus vizinhos imediatos. Os nós que não pertencem à lista de vizinhos de um determinado nó N_i são adicionados à lista de vizinhos a dois saltos ($LV2HN_i$). Tal procedimento é realizado para identificar a lista dos nós potencialmente interferentes, como mostra o Algoritmo 1. Após a descoberta de vizinhos, cada nó realiza o sensoriamento do espectro, aferindo os parâmetros de entrada para os mecanismos de decisão.

```

1 Procedimento ListaVizinhos2Hops( $N_i, LVN_i$ );
  /*  $LVN_i$ : Lista de vizinhos a 1 salto do nó  $i$  */
  /*  $N_i$ : Nó cujos vizinhos são os nós  $N_j$  */
2  $LV2HN_i \leftarrow \emptyset$ ;
3 para cada  $N_j \in LVN_i$  faça
4    $LV2HN_i \leftarrow LV2HN_i \cup (LVN_j - LVN_i) - N_i$ ;
5 retorna  $LV2HN_i$ 

```

Algoritmo 1: Criação da lista de vizinhos a dois saltos de um nó.

4.2. Métodos para decisão do espectro

Os métodos de decisão foram implementados e adaptados no protocolo T-MAC. Os dois métodos de decisão disponíveis no framework são descritos a seguir.

4.2.1. CogTMAC: seleção de canais baseada no RSSI

O método CogTMAC escolhe o melhor canal disponível em função do ruído local observado pelo nó. O ruído local é estimado pelo valor do RSSI do canal. O CogTMAC utiliza o recurso de julgamento de canal livre CCA (*Clear Channel Assessment*), disponível no rádio CC2420 e implementado no Castalia, que permite ao rádio verificar se o canal está livre para transmissões (linha 3 do Algoritmo 2). O canal escolhido será aquele que esteja livre e possua o menor valor de RSSI, e que portanto ofereça a menor interferência (linhas de 3 a 5). Uma vez escolhido o melhor canal, ele deve ser marcado como ocupado (linha 6) e uma notificação é enviada aos vizinhos (linhas 7 e 8). O método de notificação é detalhado na seção 4.3.

```

1 Procedure escolheCanalRSSI(ListaCanais,  $LV N_i$ );
2 para cada  $C_i \in ListaCanais$  faça
3   se  $C_i$  estiver livre então
4     se  $C_i.RSSI \leq melhorCanal.RSSI$  então
5        $melhorCanal \leftarrow C_i$ ;
6   Atualiza ListaCanaisAtribuidos;
7   /* Notifica os vizinhos a um salto */
8   NotificaLV1Hop();
   /* Notifica os vizinhos a dois saltos */
   NotificaLV2Hop();

```

Algoritmo 2: Mecanismo de seleção do canal com base no RSSI.

4.2.2. AhpTMAC: mecanismo de seleção dos canais multi-parâmetros

Um modelo de decisão baseado em apenas um parâmetro do canal pode não ser suficiente para escolher o melhor canal ou frequência disponível. O AHP (*Analytic Hierarchy Process*) é um classificador multi-parâmetros que tem sido usado para decisão de espectro [Ge et al. 2009]. Neste artigo, adaptamos esse método ao protocolo T-MAC, classificando os canais a partir de parâmetros das camadas física e de aplicação. Dessa forma, o protocolo AhPTMAC coleta parâmetros físicos do rádio como RSSI, SNIR e ruído local e considera requisitos da aplicação para classificação de canais, tais como o atraso. Para tanto, é necessário definir os pesos dos diferentes parâmetros. Alguns métodos especificam esses pesos manualmente de acordo com critérios estabelecidos pelo usuário. Porém, a maioria dos usuários não tem conhecimento prévio de quanto cada parâmetro influencia na escolha do melhor canal.

O protocolo AhPTMAC calcula de forma automática os pesos dos diferentes parâmetros, usando o conceito de entropia de *Shannon* e o método proposto por

[Ge et al. 2009]. Para o cálculo dos pesos é utilizada uma Matriz de Parâmetros $M_{C \times P}$, na qual cada linha C é uma leitura referente aos parâmetros de um canal e P são as colunas referentes aos parâmetros (Ruído, RSSI, SINR, Atraso) desses canais.

```

1 Procedimento AhPTMAC com pesos dinâmicos(Canal,  $M_{C \times P}$ );
2  $C_{entr} \leftarrow (-1 * (1 / \log(\text{qtde\_linhas } C)))$ ;
3 para  $i \leftarrow 1$  até  $P$  faça
4   para  $j \leftarrow 1$  até  $C$  faça
5     /* Soma os valores de um parâmetro  $i$  */
6      $F_{ji} \leftarrow B_{ji} / \text{soma\_coluna}_i$ ;
7      $H_i \leftarrow F_{ji} * \log(F_{ji})$ ;
8      $H_i \leftarrow C_{entr} * \text{soma}(H_i)$ ;
9   /* Cálculo dos pesos  $W$  */
10  para  $i \leftarrow 1$  até  $k$  faça
11     $W_i \leftarrow (1 - H_i) / (k - \text{soma}(H))$ ;
12  Escolhe  $\max(W_i)$ 
13 retorna Entropia, Peso, Parâmetro_Maior_Peso

```

Algoritmo 3: Método AHP Com Pesos Dinâmicos.

O primeiro passo, descrito no Algoritmo 3, consiste em calcular uma constante de entropia C_{entr} (linha 2), dada em função da quantidade de leituras dos parâmetros de um canal C . Em seguida é calculada a entropia para cada parâmetro da matriz $M_{C \times P}$. Logo, para cada parâmetro P_k é calculada a entropia por meio de um fator F_{ji} , cujo valor individual de cada parâmetro P_{ki} na coluna k é dividido pelo somatório de todos os valores da coluna (linha 5). Após ter sido calculado o fator F_{ji} , é calculado o vetor de entropia H_i , cujos elementos são somados e multiplicados pela constante C_{entr} (linhas 4–7).

Finalmente, o último passo é calcular o vetor de pesos W_i em função do vetor de entropias H_i e do número de parâmetros k analisados. Então, o peso de cada parâmetro é calculado (linhas 8–10). O valor máximo do peso é escolhido (linha 10). O algoritmo retorna os valores da Entropia, Peso e Parâmetro Maior Peso (linha 11) para que o método de decisão escolha o melhor canal disponível.

```

1 Função AHPTMAC(TabelaDeValores, ListaDeCanais);
2  $\text{pesos} = \text{PesosAhPTMAC}(\text{TabelaDeValores})$ 
3  $\text{normalizaMetricas}(\text{ListaDeCanais})$ 
4 para cada  $\text{Canal}_i \in \text{ListaDeCanais}$  faça
5    $\text{Canal.indiceDeQualidade} \leftarrow$ 
6      $\text{pesos.RSSI} * \text{Canal}_i.\text{RSSI} + \text{pesos.SNIR} * \text{Canal}_i.\text{SNIR} +$ 
7      $\text{pesos.ruídoBase} * \text{Canal}_i.\text{ruídoBase} + \text{pesos.atraso} * \text{Canal}_i.\text{atraso}$ 
8  $\text{melhorCanal} \leftarrow \arg \max_i(\text{Canal}_i.\text{indiceDeQualidade})$ 
9 retorna ( $\text{melhorCanal}$ )

```

Algoritmo 4: Escolha do melhor canal a partir do pesos.

Esses pesos serão usados como entrada do AHP, Algoritmo 4, para a escolha do melhor canal. A tabela de pesos é normalizada de acordo com os canais (linhas 2–3).

Um índice de qualidade é definido para cada canal de acordo com os pesos das métricas (linhas 4–5). O canal com o maior índice de qualidade é selecionado (linha 6) e retornado (linha 7).

4.3. Compartilhamento do canal escolhido

Um nó, ao escolher o melhor canal, deve notificar seus vizinhos imediatos e a dois saltos. A mensagem de notificação é enviada em *broadcast*, mas para evitar que sejam feitas notificações repetidas o nó notificador procura identificar interseções entre as listas de vizinhos. Tal procedimento é descrito no Algoritmo 5.

```

1 Procedimento ReencaminhaBroadcast( $LVN_i, LV2HN_i$ )
2  $ListaNosParaVisitar \leftarrow LV2HN_i$ ;
3  $N \leftarrow ordena(LVN_i)$ ;
4 para cada  $N_j \in N$  faça
5   se  $ListaNosParaVisitar \cap LVN_j \neq \emptyset$  então
6      $ListaNosParaVisitar \leftarrow ListaNosParaVisitar - LVN_j$ ;
7      $envia(N_j)$ ;

```

Algoritmo 5: Procedimento de repasse de broadcast.

O algoritmo apresenta um mecanismo similar ao de *flooding*. Inicialmente é criada uma lista dos nós que irão repassar, via *broadcast*, a informação do canal escolhido a seus vizinhos (linha 2). O remetente encaminha a mensagem para os seus vizinhos com o maior grau de conectividade, a fim de reduzir a quantidade de pacotes repassados. Os nós com a menor quantidade de vizinhos são adicionados a este conjunto a cada iteração (linhas 4-7). O processo é concluído quando todos os nós a dois saltos forem visitados.

4.4. Mobilidade do espectro

A mudança dinâmica de canais pode provocar a ruptura da comunicação entre os nós, que pode ocorrer quando um nó estiver transmitindo em um canal diferente daquele do nó destino. Resolvemos esse problema inserindo um mecanismo de sincronização no protocolo T-MAC. Assim, um nó transmissor, antes de enviar um quadro de RTS, verifica na lista de vizinhos o canal em que o destino está escutando e muda para esse canal ($CH_j \rightarrow CH_k$). Um temporizador também é ativado de forma que o emissor retorne para o canal escolhido antes da chegada do quadro de CTS.

No quadro de RTS é inserido o canal escolhido pelo nó origem, pelo qual será transmitida a mensagem. O nó destino, ao receber o RTS, muda de canal ($CH_k \rightarrow CH_j$) e envia um quadro de CTS. Ao receber o CTS, o nó transmissor já estará no seu canal original (CH_j), e assim transmite o quadro DATA. Ao receber o DATA, o nó destino envia um ACK e retorna ao seu canal de origem (CH_k).

5. Resultados

O framework foi implementado e adaptado para o simulador de redes de sensores Castalia, versão 3.0. Foram realizadas 33 simulações para cada um dos métodos usando os protocolos T-MAC, CogTMAC e AhPTMAC. As métricas avaliadas foram: taxa média

de entrega de pacotes, atraso fim a fim, consumo de energia e quantidade de *handoffs* (trocas de canais). Em cada uma das simulações foi feito o sorteio de quatro nós, de forma que um nó N_i escolha aleatoriamente um nó vizinho N_j ($N_j | N_j \in LVN_i$) para estabelecer um fluxo entre eles. Assim, existirão quatro fluxos simultâneos na rede, simulando a interferência de múltiplas redes.

Apesar da implementação de múltiplos rádios multicanais realizada no Castalia, simulamos cada nó com apenas um rádio multicanal. A justificativa é que sensoriar n -rádios com m -canais seria equivalente a sensoriar $n \times m$ canais do espectro. Foram implementados três modelos de tráfego, mas por simplificação neste artigo apresentamos somente os resultados para tráfego periódico, típico das RSSF.

A configuração das simulações foi a seguinte. Simulamos 18 nós, posicionados em grade (6x3), enviando dados periodicamente com intervalo de envio de 2s. A periodicidade de sensoriamento do canal foi estimada em 30s. Foram simulados 500s de operação da rede, de forma que foram geradas 600 transmissões durante as simulações. A largura de banda utilizada foi a mesma provida pelo rádio CC2420, 250 kbps, com um alcance de transmissão de 250m. Os valores do ruído do canal foram considerados como baixo (-100 dBm), médio (-95 dbm) e alto (-92 dBm). Além disso, simulamos duas densidades diferentes ao variar o tamanho da área simulada: Baixa (75x30m) e Alta (50x20m).

Os gráficos mostrados a seguir representam os valores médios de 33 simulações com sementes diferentes, e consideramos um intervalo de confiança de 99%, para cenários de baixa densidade de nós ($\langle \text{protocolo} \rangle - B$) e para alta densidade de nós ($\langle \text{protocolo} \rangle - A$), com níveis de ruído baixo, médio e alto.

5.1. Taxa de entrega

A Figura 3 apresenta a taxa média de entrega para os três protocolos. Nos cenários de baixa densidade de nós observa-se que o protocolo T-MAC possui uma taxa de entrega superior aos protocolos AhPTMAC e CogTMAC somente quando o ruído local é baixo, cerca de 8% e 9% respectivamente. Para valores de ruído médio os protocolos cognitivos possuem uma taxa de entrega superior ao T-MAC, cerca de 4,6% para o AhP-TMAC e de 7,5% para o CogTMAC. Esses valores são mais acentuados quando o ruído local é alto. O protocolo CogTMAC continuou a apresentar o melhor resultado, cerca de 68,7% em relação ao T-MAC e de 15,3% em relação ao AhPTMAC.

O comportamento da taxa de entrega é semelhante para os cenários de alta e baixa densidade. Quando o ruído local é baixo, os protocolos cognitivos possuem uma taxa de entrega inferior ao T-MAC, cerca de 7,2% e de 8% para os protocolos AhPTMAC e CogTMAC respectivamente. O desempenho inferior dos protocolos cognitivos em relação ao T-MAC em cenários de baixo ruído se justifica devido às mudanças periódicas de canal. Durante a troca de canais, os protocolos cognitivos estão sujeitos à sincronização dos nós e a perdas de pacotes. Nos cenários de médio e alto ruído, observa-se que o protocolo CogTMAC obteve a melhor taxa de entrega. Isso pode ser justificado pela escolha de melhores canais de transmissão em função da variação do ruído.

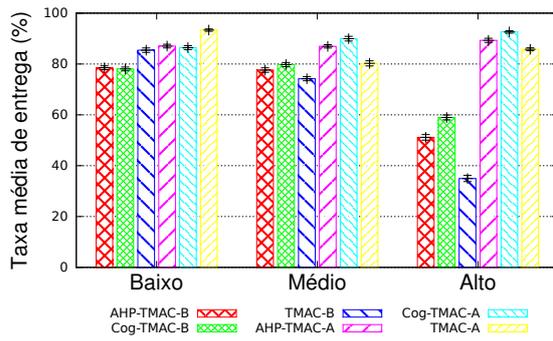


Figura 3. Taxa Média de Entrega.

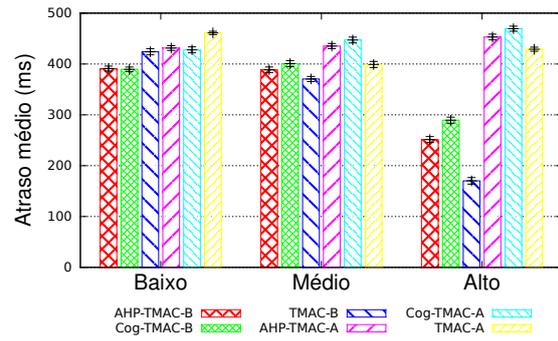


Figura 4. Atraso fim a fim.

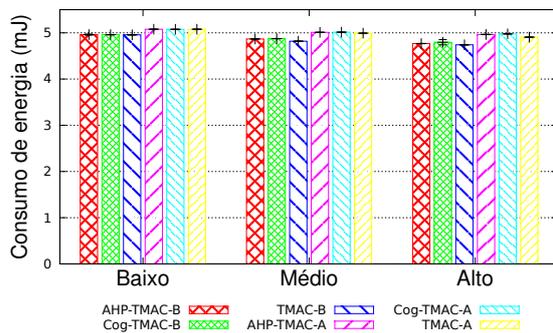


Figura 5. Consumo de Energia.

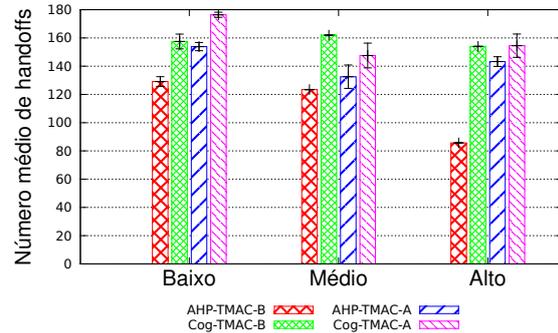


Figura 6. Troca de canais (handoff).

5.2. Atraso fim a fim

A Figura 4 apresenta o atraso fim a fim. O protocolo T-MAC apresentou o maior atraso para ruído baixo, cerca de 8,5% superior aos protocolos cognitivos. Isso pode ser justificado pela maior taxa de entrega do T-MAC. Nos cenários de ruído médio, o CogTMAC obteve o maior atraso, cerca de 3% e 8% para baixa densidade e 2,7% e 12% para alta densidade, em relação aos protocolos AhPTMAC e T-MAC respectivamente. Esse incremento é devido ao maior número de trocas de canal do CogTMAC. No cenário de baixa densidade com ruído alto, o protocolo CogTMAC tem o pior desempenho, com um atraso 15% e 70% superior aos protocolos AhPTMAC e T-MAC, respectivamente. É importante observar que, para esse cenário, a taxa de entrega é reduzida e o número de trocas de canal do CogTMAC é superior ao AhPTMAC. Entretanto, no cenário de ruído alto e alta densidade, o protocolo CogTMAC continua com um atraso maior, mas a diferença é menos acentuada, cerca de 3% e 9% em relação ao AhPTMAC e T-MAC.

5.3. Consumo de energia

O consumo de energia para as operações do rádio é apresentado na Figura 5. Os três protocolos tiveram um consumo de energia muito semelhante para os cenários de baixa e alta densidade. A maior variação ocorreu no cenário de alta densidade com ruído alto, no qual o protocolo T-MAC consumiu cerca de 1% e 1,41% menos energia que os protocolos AhPTMAC e CogTMAC, respectivamente. Esse leve incremento nos protocolos cognitivos se justifica pelas trocas de canais e pela comunicação entre os nós para escolher o melhor canal. Entretanto, a diferença de consumo de energia entre o protocolo T-MAC e os protocolos CogTMAC e AhPTMAC é pouco significativa, considerando-se uma margem de erro máxima de $\pm 0,06$ mJoule, para um intervalo de confiança de 99%.

5.4. Troca de canais - *handoff*

A Figura 6 mostra o número médio de trocas de canais. Nesta figura apresentamos somente os resultados para os protocolos cognitivos, já que o T-MAC não realiza troca de canais. O protocolo CogTMAC efetuou o maior número de trocas para todos os cenários avaliados. Para o cenário de baixa densidade de nós o maior número médio de trocas ocorreu para o caso de ruído alto, sendo que o CogTMAC foi superior em 80% ao protocolo AhPTMAC. Apesar do maior número de trocas de canal, o CogTMAC não sofre um incremento significativo das trocas à medida que o ruído é aumentado.

No cenário de alta densidade o CogTMAC continua a ter o maior número médio de trocas, mas a diferença é menos acentuada. O maior número de trocas ocorreu para ruído baixo, sendo que o CogTMAC efetuou 14% mais trocas que o AhPTMAC. Entretanto, observa-se uma tendência de que o número médio de trocas de canais entre os protocolos seja reduzida à medida que o ruído aumenta.

6. Conclusões e trabalhos futuros

Neste artigo propusemos um framework para a simulação de redes de sensores cognitivas (RSC). Implementamos as principais funcionalidades dos RSC (sensoriamento, decisão, compartilhamento e mobilidade do espectro), bem como dois protocolos MAC para decisão de espectro: o CogTMAC, baseado em leituras de RSSI, e o AhPTMAC, baseado nas métricas de RSSI, latência, SINR e ruído. As métricas de taxa de entrega, atraso fim a fim, consumo de energia e *handoff* foram avaliadas para cenários de alta e baixa densidade de nós, considerando a variação do ruído no canal.

Resultados demonstraram que os protocolos cognitivos obtêm uma maior taxa de entrega em cenários em que o ruído é mais intenso. O protocolo CogTMAC obteve a maior taxa de entrega no cenário de baixa densidade com ruídos médio e alto. Esse incremento na taxa de entrega foi obtido ao custo de um incremento não significativo da latência e do consumo de energia em cerca de 1,5% no pior caso. O protocolo CogTMAC apresentou o maior número médio de trocas de canais para todos os cenários avaliados em relação ao AhPTMAC. Tal característica influencia diretamente o atraso fim a fim e isso justifica uma maior latência do protocolo CogTMAC em cenários de médio e alto ruído.

Como trabalhos futuros iremos implementar métodos cognitivos em outros protocolos MAC para RSSF, investigar novos métodos de decisão baseados em predição e em algoritmos evolucionários, bem como avaliar RSCs em cenários multi-saltos.

Agradecimentos

Este trabalho tem apoio da CAPES no estágio pós-doutoral BEX 6668/10-0. Os autores agradecem o apoio financeiro das agências CAPES, CNPq e FAPEMIG.

Referências

- Akan, O. B., Karli, O. B., and Ergul, O. (2009). Cognitive radio sensor networks. *Network Magazine of Global Internetworking.*, 23:34–40.
- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., and Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *Communications Magazine, IEEE*, 46(4):40–48.

- Andrews, G. R. (1991). Paradigms for process interaction in distributed programs. *ACM Comput. Surv.*, 23:49–90.
- Boulis, A. (2011). Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks. user's manual. <http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/> Accessed in Oct/2011.
- Correia, L. H. A., Macedo, D. F., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A. F., and Nogueira, J. M. S. (2007). Transmission power control techniques for wireless sensor networks. *Comput. Netw.*, 51:4765–4779.
- FCC (2003). Et docket no 03-322 notice of proposed rule making and order. <http://www.cs.ucdavis.edu/liu/289I/Material/FCC-03-322A1.pdf>. Acessado em Novembro, 2011.
- Ge, Y., Sun, Y., Lu, S., and Dutkiewicz, E. (2009). Adsd: An automatic distributed spectrum decision method in cognitive radio networks. In *Future Information Networks, 2009. ICFIN 2009. First International Conference on*, pages 253–258.
- Kusy, B., Richter, C., Hu, W., Afanasyev, M., Jurdak, R., Brunig, M., Abbott, D., Huynh, C., and Ostry, D. (2011). Radio diversity for reliable communication in WSNs. In *Proceedings of the 10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '11*, pages 270–281.
- McHenry, M. A., Tenhula, P. A., McCloskey, D., Roberson, D. A., and Hood, C. S. (2006). Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal. In *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum, TAPAS '06*, New York, NY, USA. ACM.
- Padhye, J., Agarwal, S., Padmanabhan, V. N., Qiu, L., Rao, A., and Zill, B. (2005). Estimation of link interference in static multi-hop wireless networks. In *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement, IMC '05*, pages 28–28, Berkeley, CA, USA. USENIX Association.
- Reed, J. H. and Bostian, C. W. (2005). Understanding the issues in software defined cognitive radio. Tutorial at IEEE DySPAN'05.
- Saaty, T. (2000). *Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15413.
- Saucier, R. (2000). Computer generation of statistical distributions. URL: <http://ftp.arl.mil/random/random.pdf>. Acessada em 01/11/2011.
- van Dam, T. and Langendoen, K. (2003). An Adaptive Energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 171–180. ACM Press.
- Zhou, G., Stankovic, J. A., and Son, S. H. (2006). Crowded spectrum in wireless sensor networks. In *in Proceedings of Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets)*.