

Uma Solução para Gerenciamento de Dispositivos de Rádio Cognitivo Baseada na MIB IEEE 802.22

Lucas Bondan¹, Maicon Kist¹, Rafael Kunst¹,
Cristiano B. Both¹, Juergen Rochol¹, Lisandro Z. Granville¹

¹Instituto de Informática - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre, RS - Brasil

{lbondan, maicon.kist, rkunst, cbboth, juergen, granville}@inf.ufrgs.br

Abstract. *Cognitive Radio technology allows wireless devices to transmit information while the channels are not in use at time. However, it is necessary a system that helps the dynamic configuration process of the cognitive devices for proper operation of cognitive radio networks. In this paper, a management system for cognitive radio devices is proposed based on the IEEE 802.22 MIB. The system's main objective is to manage and to monitor the spectrum sensing process. The results obtained in simulations show that the system enables to maximize the throughput of the devices by setting the sensing window according to the confidence on the state of a channel, i.e., free or busy.*

Resumo. *A tecnologia de Rádio Cognitivo permite que dispositivos sem fio transmitam informações enquanto os canais não estiverem em uso em um determinado instante de tempo. Entretanto, para o correto funcionamento das redes de rádios cognitivos, é necessário um sistema que auxilie no processo de configuração dinâmica dos dispositivos cognitivos. Neste trabalho é proposto um sistema de gerenciamento especializado para dispositivos de rádio cognitivo baseado na MIB IEEE 802.22. O sistema tem como objetivo principal o gerenciamento e a monitoração do processo de sensoriamento espectral. Os resultados, obtidos através de simulações, mostram que o sistema possibilita maximizar a vazão na transmissão de informações dos dispositivos, ajustando a janela de sensoriamento de acordo com os níveis de confiança para percepção de que um determinado canal está ocupado.*

1. Introdução

Técnicas de acesso dinâmico ao espectro de frequências (*Dynamic Spectrum Access - DSA*) estão sendo utilizadas para melhorar a eficiência de modernos dispositivos de redes sem fio [Zhao e Sadler 2007]. Os dispositivos que implementam essas técnicas, possuem a capacidade de acessar dinamicamente uma determinada frequência do espectro que não está em uso em um determinado instante de tempo. Atualmente, a principal tecnologia que provê a implementação de técnicas de acesso dinâmico ao espectro é chamada de Rádio Cognitivo [Wang *et al.* 2011]. Essa tecnologia permite que os dispositivos ajustem o seu funcionamento para maximizar suas taxas de transmissão e minimizar a interferência em relação a outros dispositivos sem fio [Khalid e Anpalagan 2010]. Entretanto, para o correto funcionamento das redes de rádios cognitivos é necessário um sistema de gerenciamento que auxilie no processo de configuração dinâmica dos dispositivos cognitivos.

As características dinâmicas dos dispositivos de rádio cognitivo exigem a configuração de vários parâmetros que devem ser gerenciados e monitorados. Neste sentido,

o primeiro grupo de trabalho IEEE a padronizar a utilização da tecnologia de rádio cognitivo foi o 802.22, através da definição de uma *Management Information Base* (MIB) para gerenciar e monitorar dispositivos de uma rede de rádios cognitivos [IEEE 802.22 2011]. Um exemplo da necessidade de um sistema de gerenciamento em redes de rádios cognitivos está no processo conhecido como sensoriamento espectral. Neste processo, o dispositivo cognitivo deve analisar, durante um intervalo de tempo, se um determinado canal está em uso ou não [Yucek e Arslan 2009]. A confiabilidade do resultado dessa análise está diretamente relacionada à duração do sensoriamento, ou seja, quanto mais tempo de sensoriamento, maior o nível de confiança. Considerando apenas esses dois parâmetros de configuração, tempo e confiabilidade do sensoriamento, já percebe-se a necessidade de um sistema especializado de gerenciamento para a configuração do dispositivo e posterior monitoramento da suas funcionalidades, a fim de garantir o correto funcionamento dos dispositivos.

A comunidade científica em gerenciamento de redes apresenta poucos trabalhos sobre redes de rádios cognitivos. Neste artigo, as poucas propostas encontradas na literatura são classificadas de acordo com dois escopos: Global e Local. No primeiro escopo, encontram-se os trabalhos publicados por Wang *et al.* [Wang *et al.* 2008] e Stavroulaki *et al.* [Stavroulaki *et al.* 2012], nos quais o enfoque é no gerenciamento global de redes de rádios cognitivos. No segundo escopo, os trabalhos publicados por Wang *et al.* [Wang *et al.* 2010] e por Potier e Quian [Potier e Qian 2011] investigam como devem ser gerenciadas as informações e os parâmetros em um dispositivo de rádio cognitivo em específico. Entretanto, não se tem conhecimento de um sistema de gerenciamento especializado para a configuração e monitoração de dispositivos de rádio cognitivo, nem mesmo como esse sistema deve ser projetado, considerando a dinamicidade do sensoriamento espectral.

A principal contribuição deste artigo é propor um sistema de gerenciamento para dispositivos de rádio cognitivo considerando um escopo Local. O sistema especializado baseia-se nas informações definidas na MIB IEEE 802.22, sendo o objetivo principal deste artigo o gerenciamento e a monitoração do processo de sensoriamento espectral. Para atender à dinamicidade dos parâmetros de configuração de dispositivos de rádio cognitivo, o sistema foi modelado considerando um gerenciamento automático. Desta forma, o sistema proposto possibilita a configuração automática dos dispositivos baseada em regras para adequação de parâmetros de configuração. Os resultados obtidos através de simulações mostram que o sistema possibilita maximizar a vazão na transmissão dos dispositivos, ajustando a janela de sensoriamento e garantindo a confiabilidade na detecção de canal ocupado.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre redes de rádios cognitivos, bem como o estado da arte sobre as pesquisas em gerenciamento de redes de rádios cognitivos. Na Seção 3, é descrita a arquitetura da solução proposta e o protótipo desenvolvido como prova de conceito. Os detalhes sobre o modelo do sistema e os resultados obtidos são apresentados na Seção 4. Por fim, a Seção 5 conclui o presente trabalho e apresenta perspectivas para trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

Nesta seção são abordados os elementos que definem os conceitos sobre dispositivos de rádios cognitivos e seu gerenciamento. Na Subseção 2.1, são descritos os principais mecanismos presentes em rádios cognitivos, que tornam possível a comunicação entre estes

dispositivos. Na Subseção 2.2, são abordados os trabalhos relacionados ao gerenciamento de redes compostas por dispositivos de rádio cognitivo.

2.1. Gerência em Rádios Cognitivos

O rádio cognitivo pode ser definido como um dispositivo capaz de mudar seus parâmetros dinamicamente, através da análise do ambiente em que se encontra, sem interferir na operação dos demais dispositivos. As características fundamentais do rádio cognitivo são a capacidade cognitiva e a reconfigurabilidade [Akyildiz *et al.* 2008]. Através da capacidade cognitiva, o dispositivo pode selecionar o melhor canal disponível para transmissão em um determinado instante de tempo. Além disso, a reconfigurabilidade permite que o rádio cognitivo ajuste os parâmetros mais adequados para a utilização do espectro selecionado.

Com a mudança dinâmica dos parâmetros nas redes de rádios cognitivos, os dispositivos dotados da capacidade cognitiva devem ser capazes de modificar suas configurações para se adaptar às mudanças no ambiente em que se encontram, por exemplo ajustando a frequência em que estão trabalhando. Isso gera a necessidade de gerenciar essas configurações, a fim de manter a rede de comunicação operando de maneira satisfatória, sem interferir em transmissões de outros dispositivos que eventualmente utilizem o mesmo canal [Coutinho *et al.* 2012]. Dentre os trabalhos para gerenciamento das informações, encontra-se a MIB IEEE 802.22 [IEEE 802.22 2011]. A organização das informações no formato de uma MIB facilita o acesso e manipulação dessas informações, possibilitando o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento para redes de rádios cognitivos. A MIB IEEE 802.22 é organizada em sete grupos, separados de acordo com a função exercida por cada elemento que compõe a rede: estação radio-base (*Base Station - BS*) ou dispositivo nas dependências do usuário (*Customer Premisse Equipment - CPE*). Esses grupos são descritos a seguir:

- *wranDevMib*: apresenta objetos contendo informações comuns a todos os dispositivos da rede;
- *wranIfBsMib*: apresenta objetos referentes exclusivamente à operação da BS;
- *wranIfBsSfMgmt*: apresenta objetos contendo informações sobre o fluxo de serviços de configuração, instanciação e gerência da BS;
- *wranIfCpeMib*: apresenta objetos referentes à operação móvel ou fixa dos CPEs;
- *wranIfSmMib*: apresenta objetos relacionados ao gerenciamento da utilização do espectro de frequências;
- *wranIfSsaMib*: apresenta objetos relacionados ao processo de sensoriamento espectral;
- *wranIfDatabaseServiceMib*: apresenta objetos relacionados ao serviço de banco de dados com informações gerais da rede.

Alguns dos objetos presentes na MIB IEEE 802.22 fornecem informações relevantes para maximizar o desempenho da rede. Dentre esses objetos, pode-se citar o grupo que provê informações sobre o sensoriamento do espectro (*wranIfSsaMib*), bem como objetos que provêm informações sobre a vazão obtida na transmissão de dados pelos dispositivos (*wranCpeTxThroughput*, por exemplo). A Figura 1 ilustra a estrutura dos sete grupos da MIB IEEE 802.22, apresentando alguns dos objetos que foram analisados no desenvolvimento deste artigo.

Dentro desses sete grupos, pode-se destacar alguns objetos importantes para o desenvolvimento deste artigo, visto que impactam diretamente na configuração e na aplicação do sensoriamento espectral. Por exemplo, os que se referem a configuração da janela

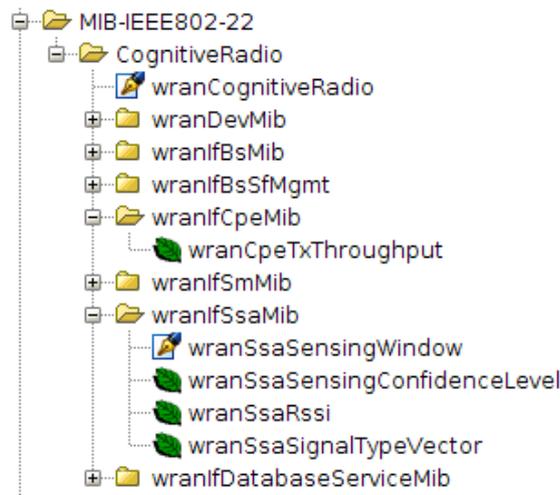


Figura 1. MIB IEEE 802.22

de sensoriamento (*wranSsaSensingWindow*). Esta janela determina por quanto tempo o dispositivo de rádio cognitivo irá analisar o canal, a fim de descobrir se o canal está ocupado. A MIB apresenta também o objeto que provê o resultado da vazão obtida por cada dispositivo na transmissão de dados (*wranCpeTxThroughput*). O nível de confiança na detecção de canais ocupados também está presente (*wranSsaSensingConfidenceLevel*), assim como o objeto que define a intensidade do sinal reconhecido no sensoriamento (*wranSsaRssi*) e o vetor que identifica o tipo de sinal recebido (*wranSsaSignalTypeVector*), como por exemplo *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) ou microfone sem fio.

Além da MIB IEEE 802.22, a literatura sobre gerência de redes apresenta propostas para o gerenciamento de redes de rádios cognitivos. A Subseção 2.2 apresenta os principais trabalhos sobre esse tópico de pesquisa na literatura.

2.2. Trabalhos Relacionados

Neste artigo, o gerenciamento de dispositivos de rádio cognitivo foi classificado em dois escopos. O primeiro, chamado escopo Global, tem como objetivo gerenciar as informações pertinentes às redes de rádios cognitivos. Essas informações precisam ser compartilhadas por todas as redes, por exemplo, as frequências em uso nas redes adjacentes e geolocalização dos dispositivos. O segundo escopo é definido como Local, sendo responsável por gerenciar informações presentes em cada dispositivo que compõe a rede. Este escopo é composto por informações armazenadas localmente em cada dispositivo, como os objetos presentes na MIB IEEE 802.22.

A literatura referente ao escopo Local, foco de investigação deste artigo, apresenta poucos trabalhos publicados. Um desses trabalhos é o artigo de Potier e Qian [Potier e Qian 2011], que apresenta um protocolo para gerência de dispositivos de rádio cognitivo, definindo a atuação do rádio cognitivo nas diferentes camadas de protocolos. O protocolo proposto pelos autores é elaborado de forma que as decisões tomadas não afetem a operação dos demais dispositivos que compõem a rede de rádios cognitivos. Entretanto, a solução não apresenta análises sobre a correlação entre os parâmetros de configuração, como por exemplo o impacto da alteração do tempo de sensoriamento no desempenho da rede.

Outro trabalho sobre gerenciamento local foi publicado por Wang *et al.* [Wang *et al.* 2010], que propõe uma arquitetura para manipulação local das informações dos dispositivos. Essa arquitetura possibilita que o dispositivo de rádio cognitivo configure automaticamente seu acesso à rede. Baseado na arquitetura proposta, os autores elaboraram um sistema multiprocessado em um único chip (*Multiprocessor System-on-Chip - MPSoC*). Embora a arquitetura proposta no trabalho considere que os dispositivos necessitam de gerenciamento, o trabalho não indica como esse gerenciamento deve ser realizado.

Baseado na literatura sobre gerenciamento de rádio cognitivo, pode-se perceber a necessidade de um sistema de gerência Local, que considere a dinamicidade do sensoriamento espectral. Dessa forma, este artigo propõe um sistema de gerenciamento capaz de ajustar automaticamente os parâmetros de configuração necessários para maximizar a vazão na transmissão de dados do dispositivo de rádio cognitivo, enquanto o nível de confiabilidade é mantido. Os detalhes do sistema proposto são descritos na Seção 3.

3. Sistema de Gerenciamento para Dispositivo de Rádio Cognitivo

Nesta seção estão descritos os detalhes do sistema de gerenciamento proposto para dispositivos de rádio cognitivo. Inicialmente, na Subseção 3.1 é apresentada e discutida a arquitetura do sistema. Em seguida, na Subseção 3.2, são descritos detalhes relativos ao desenvolvimento do protótipo utilizado para comprovar o funcionamento da solução proposta.

3.1. Arquitetura

O sistema de gerenciamento proposto neste artigo foi projetado dentro do escopo Local de redes de rádio cognitivos. Uma rede de rádios cognitivos é composta por dois tipos de dispositivos: BS e CPE. Cada CPE possui um conjunto de informações gerenciáveis, isso é, informações que representam a configuração ativa no dispositivo, como por exemplo o tamanho da janela de sensoriamento. Além disso, o dispositivo armazena as informações obtidas após o processo de sensoriamento, como a taxa de acerto na identificação dos canais livres.

A BS caracteriza-se por concentrar todas as informações da rede em um sistema de comunicação sem fio. Essa característica torna a BS o melhor elemento para implantação do sistema de gerenciamento. Dessa forma, o sistema de gerenciamento proposto opera na BS. Assim, o sistema é capaz de gerenciar todos os dispositivos que fazem parte da rede de rádios cognitivos, bem como processar as informações obtidas e realizar os ajustes de configuração necessários.

O sistema de gerenciamento proposto baseia-se nas configurações estabelecidas no início da operação de gerência, realizadas pelo administrador do sistema. Posteriormente, todo o processo de gerência das operações é realizado de maneira automática. A operação automática do sistema de gerenciamento é proposta devido a grande variabilidade dos parâmetros de configuração que os dispositivos cognitivos possuem. Apesar de não necessitar da intervenção do administrador da rede durante sua execução, o sistema de gerenciamento pode ter suas operações paralisadas a qualquer momento, permitindo que o administrador configure os parâmetros do sistema de acordo com a necessidade. A Figura 2 ilustra em detalhes a arquitetura do sistema de gerenciamento proposto.

A operação do sistema de gerenciamento é formada por quatro módulos: (i) Interface, (ii) Regras, (iii) Coleta e (iv) Configuração. O sistema inicia sua operação pelo

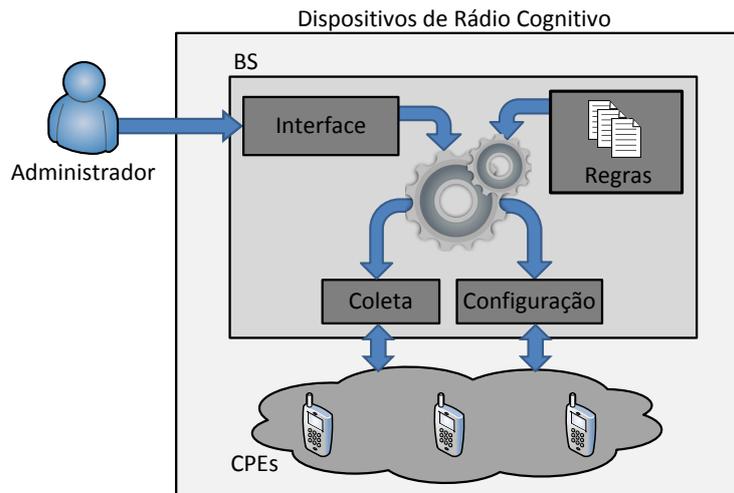


Figura 2. Arquitetura do sistema de gerência proposto

módulo de Interface. Nesse módulo, o administrador configura os valores desejados para os fatores utilizados nas Regras de configuração do rádio cognitivo. Essas regras utilizam limiares para ajustar os valores dos parâmetros de configuração dos dispositivos, podendo ser descritas pelo próprio administrador da rede. Os módulos de Coleta e Configuração têm como objetivo obter informações e aplicar ajustes na configuração dos dispositivos de rádio cognitivo. Baseado na arquitetura proposta, foi desenvolvido um protótipo do sistema de gerenciamento. Os detalhes dos protótipo são descritos na subseção a seguir.

3.2. Protótipo

Para comprovar o funcionamento do sistema de gerenciamento proposto, foi desenvolvido um protótipo em linguagem de programação C baseado na arquitetura descrita na Subseção 3.1. As informações são obtidas por um gerente através de um agente para dispositivos de rádio cognitivo, desenvolvido através do *Simple Network Management Protocol* (SNMP) [IETF 1988]. Este protocolo provê um meio de comunicação simples e eficiente entre os dispositivos gerenciados e o sistema de gerenciamento. As informações no agente são organizadas em uma MIB, que possui objetos baseados na MIB IEEE 802.22, de acordo com a representação da Figura 1. As informações do processo de sensoriamento espectral são obtidas através da simulação de um detector de energia no *software* Matlab.

O sistema de gerenciamento precisa ser configurado apenas durante sua inicialização, onde são informados os valores de ajuste dos parâmetros de configuração. Esses valores são utilizados pelas regras de configuração, respeitando os limiares descritos nestas regras. Para validação do sistema de gerenciamento, o protótipo desenvolvido apresenta atualmente duas regras de configuração, voltadas para o sensoriamento espectral: (i) baseada nos limiares da vazão do dispositivo e (ii) baseada nos limiares do nível de confiança para identificação de ocupação dos canais de rádio frequência. Entretanto, novas regras de configuração podem ser adicionadas facilmente. Após a coleta das informações, o sistema de gerenciamento aciona o módulo das regras de configuração. Esse módulo calcula qual a melhor configuração para os parâmetros do agente de acordo com os limiares previamente definidos.

Os limiares estabelecidos consideram os valores máximos e mínimos para os parâ-

metros analisados. Por exemplo, de acordo com a norma IEEE 802.22, o nível mínimo de confiança no sinal recebido para identificação de canal ocupado é de 67% [IEEE 802.22 2011]. Assim, existe uma relação direta entre a vazão obtida na transmissão e o nível de confiança para a percepção se determinado canal está livre ou não. Esse nível de confiança está relacionado com o tamanho da janela de sensoriamento. Por exemplo, ao diminuir a janela de sensoriamento para maximizar a vazão, deve-se considerar que essa diminuição afetará a confiança do resultado do sensoriamento espectral.

A partir das especificações do protótipo, na próxima seção são descritos os detalhes sobre a modelagem do ambiente de simulação para o sistema de gerenciamento. Além disso, são apresentados e discutidos os resultados obtidos através das simulações realizadas dentro do ambiente definido.

4. Avaliação e Resultados

Esta seção apresenta os detalhes sobre as simulações realizadas para validar o funcionamento do sistema. Além disso, os resultados obtidos são apresentados e discutidos. A Subseção 4.1 apresenta os detalhes da modelagem do sistema de gerenciamento para rádio cognitivo. Na Subseção 4.2 são discutidos os resultados obtidos pela simulação, através da análise de desempenho do sistema.

4.1. Modelagem do Sistema de Gerenciamento

As simulações realizadas neste trabalho têm como objetivo principal avaliar o funcionamento do sistema de gerenciamento proposto, utilizando duas regras de configuração. A primeira regra visa maximizar a vazão, ajustando a janela de sensoriamento em relação ao nível de confiança para detectar canais ocupados. Por outro lado, a segunda regra objetiva maximizar o nível de confiança do sensoriamento espectral. Sendo assim, nesta seção, é apresentada a modelagem do sistema de gerenciamento utilizada para a avaliação de desempenho.

Inicialmente, é necessário modelar um sinal de transmissão sem fio para ser utilizado na simulação como prova de conceito. Dessa forma, é importante ressaltar que qualquer tipo de sinal pode ser utilizado no sistema proposto. A Equação 1 apresenta o sinal modelado $S(t)$, de acordo com a definição de Liang *et al.* [Liang *et al.* 2008].

$$S(t) = \cos \left(2\pi \int_0^t [f_c + f_\Delta s(n)] dn \right) \quad (1)$$

onde, t é um instante de tempo, f_c é a frequência portadora, f_Δ é o desvio de frequência e $s(n)$ é o sinal de origem. A detecção de $S(t)$ pelo receptor é realizada de acordo com uma taxa de amostragem N , definida pela Equação 2.

$$N = \tau \cdot 2 \cdot f_{max} \quad (2)$$

onde, τ representa a duração do sensoriamento espectral, em milissegundos, e f_{max} indica a frequência máxima do sinal amostrado. Considerando a amostragem realizada, a capacidade de transmissão de um determinado canal $C(t)$, em Mbit/s, pode ser obtida através do teorema de Shannon:

$$C(t) = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S(t)}{R(t)} \right) \quad (3)$$

onde B representa a largura de banda do canal e $\frac{S(t)}{R(t)}$ a relação entre o nível do sinal e do ruído, medida em um instante de tempo t , sendo que $R(t) \neq 0$. Essa relação é obtida com base no indicador de potência do sinal recebido (*Received Signal Strength Indication* - RSSI). Entretanto, para a obtenção da taxa efetiva de transmissão da rede de rádios cognitivos, é necessário considerar a duração da janela sensoramento espectral (τ), para identificar se um determinado canal está livre ou ocupado. Durante o tempo de sensoramento, não é possível realizar transmissões, portanto a duração de uma transmissão de dados (T_D), em milissegundos, pode ser definida como:

$$T_D = Q_D - \tau \quad (4)$$

onde Q_D é a duração de um quadro, em milissegundos e $Q_D > \tau$. Dessa forma, a capacidade de transmissão de dados em cada quadro (C_Q) pode ser obtida através da Equação 5.

$$C_Q = C(t) \cdot T_D \quad (5)$$

Assim, a capacidade total de transmissão (C'), em Mbit/s, descontando-se a janela de sensoramento, é definida na Equação 6. Através desta equação, o sistema de gerenciamento proposto neste trabalho analisa a capacidade de transmissão do dispositivo em relação ao tempo da janela de sensoramento.

$$C' = C_Q \cdot \frac{10^3}{Q_D}, \quad (Q_D > 0) \quad (6)$$

Após a definição da capacidade total de transmissão, é necessário relacioná-la com a confiança na detecção do sinal. Essa confiança é baseada no nível de similaridade da energia do sinal antes da transmissão e após a amostragem realizada pelo dispositivo receptor do sinal. O nível de energia médio do sinal amostrado é calculado através da Equação 7.

$$M(y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(n)|^2 \quad (7)$$

onde, $y(n) = s(n) + u(n)$ é o somatório do sinal transmitido ($s(n)$) com os ruídos e interferências que o compõe ($u(n)$). Como o ruído analisado no sinal recebido é do tipo *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), a relação não resultará em um valor de sinal recebido muito acima do transmitido. Dessa forma, considerando-se que $M(y)'$ é a energia medida antes da transmissão e $M(y)''$ é a energia medida após, tem-se o nível de confiança (ς), dado pela Equação 8.

$$\varsigma = 1 - \left| 1 - \frac{M(y)''}{M(y)'} \right|, \quad (M(y)' > 0) \quad (8)$$

No sistema de gerenciamento proposto neste artigo, τ pode ser alterado automaticamente. O valor desta alteração automática é chamado de ajuste da janela de sensoriamento e o intervalo entre cada ajuste é definido como período de *polling*. A relação entre a vazão e o nível de confiança do sensoriamento pode ser obtida pela normalização dos valores obtidos através das regras de configuração. Esses valores são representados pela tupla $v = [C', \varsigma]$, onde $v \in V$ e V é um conjunto de tuplas. A primeira regra prioriza maximizar a vazão, onde o parâmetro secundário é o nível de confiança. Dessa forma, a tupla resultante da regra da vazão (RC') é definida por:

$$RC' = V_k \rightarrow \forall i \neq k, V_{C',k} > V_{C',i} \wedge V_{\varsigma,k} > \varsigma_{\min} \quad (9)$$

onde, ς_{\min} é o menor nível de confiança tolerado pelo sistema de gerenciamento. Por outro lado, a segunda regra prioriza obter o maior nível de confiança, deixando a vazão como parâmetro secundário. Relacionando-se os valores obtidos em RC' , pode-se obter uma taxa relativa à regra da vazão ($R'C'$):

$$R'C' = \frac{RC'_{C'}}{RC'_{\varsigma}} \quad (10)$$

De forma análoga à regra de priorização da vazão, pode-se obter a tupla ótima para a regra de priorização da confiança (R_{ς}). Tem-se que R_{ς} é representada pela Equação 11:

$$R_{\varsigma} = V_k \rightarrow \forall i \neq k, V_{\varsigma,k} > V_{\varsigma,i} \quad (11)$$

Baseando-se novamente na tupla v , pode-se calcular a taxa relativa à regra do nível de confiança (R'_{ς}). Essa taxa é definida pela Equação 12:

$$R'_{\varsigma} = \frac{R_{\varsigma}}{R_{\varsigma C'}} \quad (12)$$

Finalmente, pode-se encontrar a melhor relação entre $R'C'$ e R'_{ς} . Essa relação é obtida pelo valor mínimo da diferença entre o resultado das duas regras de configuração, como pode ser observado na Equação 13. Dessa forma, a menor discrepância entre os valores da tupla v representa a melhor configuração possível entre a vazão e o nível de confiança do sensoriamento.

$$R = \min\{R'C', R'_{\varsigma}\} \quad (13)$$

A modelagem do sistema descrita nesta subseção é validada em um ambiente de simulação. Esse ambiente e a avaliação de desempenho do sistema de gerenciamento são apresentados e discutidos na próxima subseção.

4.2. Avaliação de Desempenho

A avaliação de desempenho do sistema de gerenciamento proposto foi realizada em um ambiente de simulação. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros do sistema, bem como os limiares utilizados nas regras de configuração. Os parâmetros e limiares utilizados neste trabalho são baseados na norma IEEE 802.22, que define o padrão para redes sem fio regionais (*Wireless Regional Networks - WRAN*) [IEEE 802.22 2011]. Estes parâ-

metros e limiares também caracterizam as suposições iniciais para a operação do sistema de gerenciamento. A janela de sensoriamento foi configurada entre $50\mu\text{s}$ e 5ms . O valor mínimo do nível de confiança para a detecção de um canal ocupado foi de 67%, considerando um ruído AWGN de 20dB. A duração do quadro foi definida em 10^{-3}s , o ajuste da janela de sensoriamento variando de 10^{-6} até 10^{-5}s e o período de *polling* foi ajustado entre 10^{-1}s e 1s . Além disso, os experimentos foram repetidos até alcançar um intervalo de confiança de 95%.

Parâmetro	Valor
Janela de sensoriamento	$[5 \cdot 10^{-5} : 5 \cdot 10^{-3}] \text{s}$
Nível de confiança mínimo	67%
Ruído	AWGN
Relação Sinal/Ruído	20dB
Duração do Quadro	10^{-3}s
Ajuste da janela de sensoriamento	$[10^{-6} : 10^{-5}] \text{s}$
Período de <i>Polling</i>	$[10^{-1} : 1] \text{s}$
Intervalo de confiança	95%

Tabela 1. Limiares considerados para simulação

O sistema de gerenciamento foi analisado considerando quatro abordagens: (i) o comportamento da tupla v em função do tamanho da janela de sensoriamento, (ii) regras de configuração em relação ao ajuste da janela de sensoriamento, (iii) sobrecarga do tráfego SNMP para o ajuste da janela de sensoriamento e (iv) o tempo de convergência entre as regras de configuração, considerando o período de *polling*.

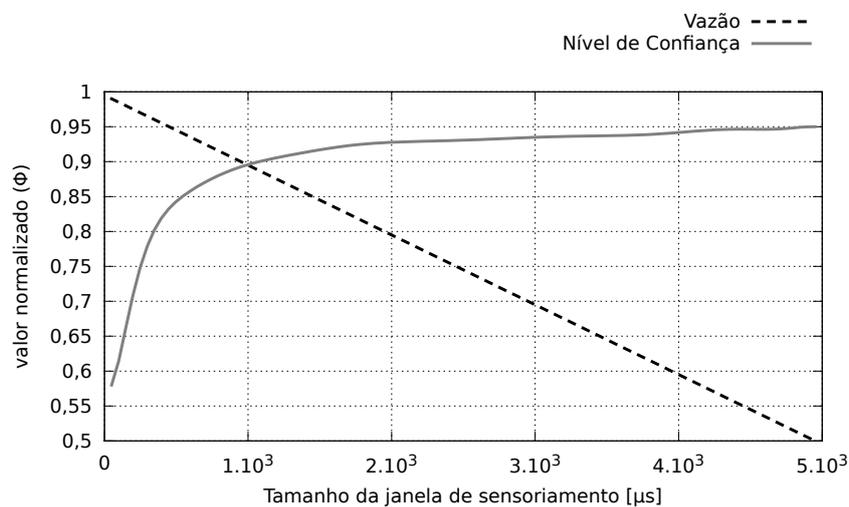


Figura 3. Relação da vazão e do nível de confiança

A primeira análise refere-se ao comportamento da tupla v em função do tamanho da janela de sensoriamento e da relação normalizada entre o percentual da vazão e do nível de confiança. Esta relação normalizada é definida como Φ . Na Figura 3, observa-se a tendência dos valores normalizados da vazão, onde a medida em que o tamanho da janela de sensoriamento aumenta, a vazão máxima obtida é reduzida linearmente e os valores normalizados do nível de confiança apresentam um crescimento logarítmico. De acordo com as tendências do comportamento da tupla v , pode-se encontrar o ponto de

inflexão entre as curvas de vazão e nível de confiança. Esse ponto indica o valor da janela de sensoriamento onde a vazão e o nível de confiança possuem a menor variação entre si. O sistema de gerenciamento proposto para o sensoriamento espectral objetiva configurar automaticamente a janela de sensoriamento, segundo as duas regras de configuração.

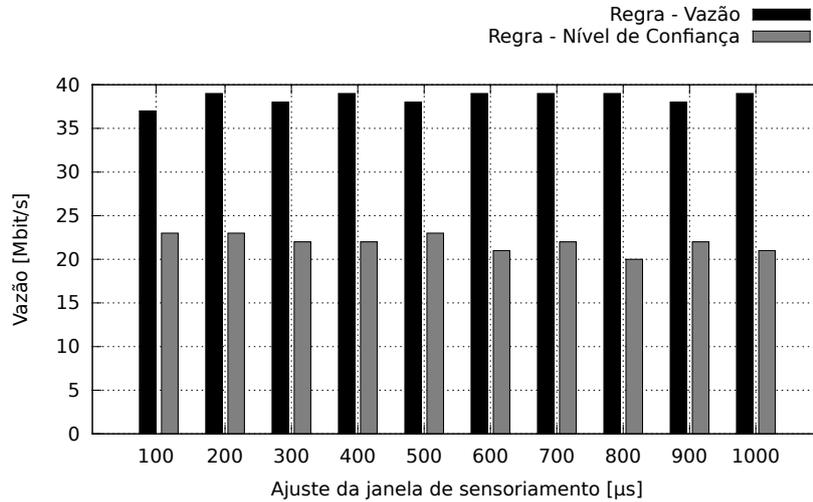


Figura 4. Vazão obtida para regras de confiança

A segunda avaliação de desempenho analisa as regras de configuração em relação ao ajuste da janela de sensoriamento. Essa análise é realizada em duas etapas, primeiramente considerando a vazão e posteriormente o nível de confiança. Na Figura 4 pode-se observar a vazão em detrimento ao ajuste da janela de sensoriamento. Nessa análise, pode-se confirmar que a utilização da regra da vazão aumenta a taxa de transmissão de dados em relação a regra do nível de confiança. No cenário analisado, esse aumento é em média 16 Mbit/s. Outra possível análise está relacionada ao ajuste da janela de sensoriamento. Diferentemente do esperado, esse ajuste não afeta significativamente a vazão do dispositivo gerenciado. Esse comportamento ocorre devido ao tamanho da janela de sensoriamento final ser semelhante para os diversos ajustes. A diferença está na quantidade de mensagens SNMP trocadas para configurar o tamanho a janela de sensoriamento.

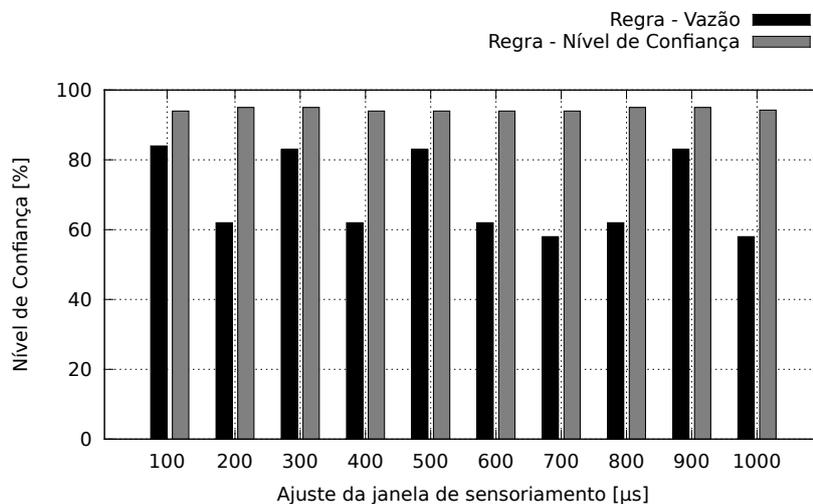


Figura 5. Nível de confiança obtido para regras de confiança

Na Figura 5, pode-se observar o nível de confiança em relação ao ajuste da janela de sensoriamento para as regras de configuração. Percebe-se que o percentual de confiança é de aproximadamente de 95%, quando utiliza-se a regra do nível de confiança. Além disso, ao utilizar essa regra, o percentual de confiança é similar para todos os ajustes da janela de sensoriamento, ou seja, existe uma convergência em torno de uma confiabilidade máxima. Por outro lado, pode-se observar que existe uma variabilidade no percentual do nível de confiança para a regra da vazão. Considerando-se essa regra percebe-se uma variação de aproximadamente 23% no nível de confiança, entre os diversos ajustes da janela de sensoriamento. Essa variabilidade é decorrente do crescimento logarítmico do nível de confiança, como apresentado na Figura 3, onde o nível de confiança para uma janela de sensoriamento inferior a $1.10^3 \mu s$ possui um crescimento acentuado. Isto é, para valores de janela de sensoriamento próximos de $1.10^3 \mu s$, a variação do nível de confiança é maior.

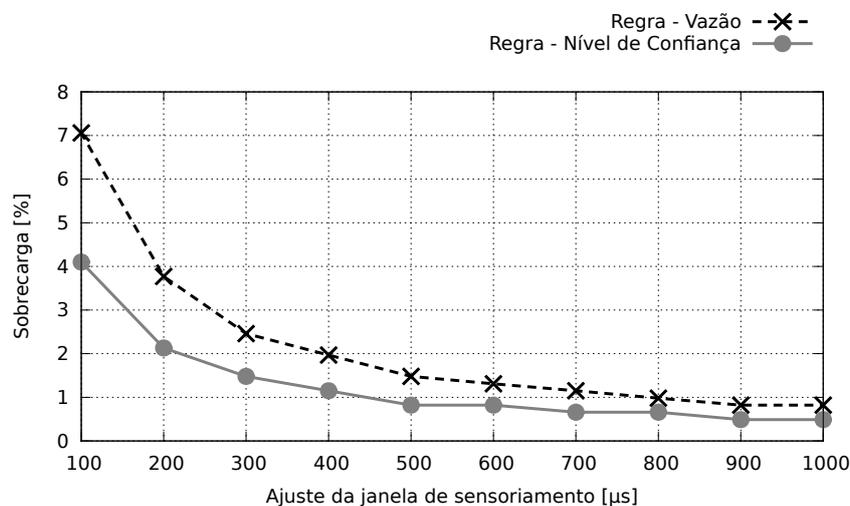


Figura 6. Sobrecarga do tráfego SNMP

A terceira análise deste artigo investiga a sobrecarga do tráfego SNMP gerada pelo sistema de gerenciamento e do dispositivo de rádio cognitivo. O cálculo da sobrecarga baseia-se na quantidade de pacotes SNMP em relação a capacidade máxima no canal de transmissão ($C(t)$), em Mbit/s, definido pela Equação 3. A Figura 6 apresenta o percentual da sobrecarga em função do ajuste da janela de sensoriamento para as regras de configuração. A investigação confirma que a sobrecarga de tráfego SNMP decresce à medida em que o valor do ajuste da janela de sensoriamento aumenta. Esta redução na sobrecarga ocorre pois, quanto maior o valor do ajuste na janela de sensoriamento, menos tráfego SNMP é necessário para alcançar o tamanho final da janela de sensoriamento. Outra análise que pode-se realizar está relacionada as diferenças de sobrecarga em relação as regras de configuração. A sobrecarga para a regra do nível de confiança apresenta-se menor do que a sobrecarga para a regra da vazão. Esse comportamento é justificado devido ao nível de confiança apresentar um crescimento logarítmico, como apresentado na Figura 3. Dessa forma, é necessário um menor ajuste total da janela de sensoriamento para alcançar o tamanho da janela de sensoriamento desejada.

A quarta e última análise realizada neste trabalho tem como objetivo encontrar a relação ideal entre a máxima vazão e o melhor nível de confiança. Nesta análise considera-se o período de *polling*, isto é o intervalo entre cada ajuste da janela de sensoriamento. Essa relação foi definida segundo a formulação descrita na Subseção 4.1,

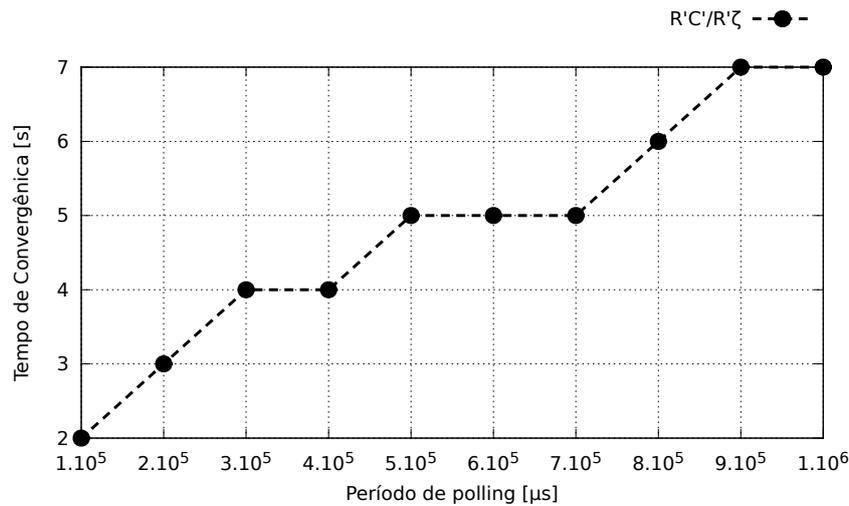


Figura 7. Tempo de convergência em relação as tuplas $R'C'$ e $R'\zeta$

onde matematicamente pode-se chegar ao ajuste ideal para a janela de sensoriamento.

Considerando a relação entre as tuplas RC' e $R\zeta$, o ajuste da janela de sensoriamento calculado para tupla RC' é de $900\mu\text{s}$, já para a tupla $R\zeta$ o ajuste é de $500\mu\text{s}$. A Figura 7 apresenta os tempos de convergência considerando o período de *polling* para a melhor relação entre as tuplas RC' e $R\zeta$. Além disso, pode-se observar o aumento no tempo de convergência quando o período de *polling* também aumenta. Este comportamento ocorre devido ao sistema de gerenciamento esperar o período de *polling* para realizar um novo ajuste na janela de sensoriamento.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

A proposta deste artigo apresenta um sistema de gerenciamento para radio cognitivo capaz de atuar com a dinamicidade das configurações de dispositivos cognitivos. Para tanto, foram estudados os objetos da MIB IEEE 802.22 referentes ao processo de sensoriamento espectral. O sistema proposto mostrou-se capaz de melhorar o desempenho da transmissão de informações, ajustando os valores de configurações dos dispositivos de acordo com regras de configuração. Para prova de conceito, foi elaborado um protótipo, o qual ajusta o tamanho da janela de sensoriamento utilizando regras para maximização da vazão ou do nível de confiança. Acredita-se que o protótipo é capaz de operar de maneira satisfatória também em ambientes reais, uma vez que os resultados obtidos por simulação refletem em parte, as condições obtidas em campo.

Futuramente, pretende-se estender o estudo dos objetos que compõe a MIB IEEE 802.22, analisando como os outros parâmetros de configuração podem ser utilizados para melhorar o desempenho da operação da rede. Com isso, será possível desenvolver novas regras de configuração, baseando-se em um conjunto maior de parâmetros. Além disso, pretende-se aprimorar o sistema proposto para que o mesmo possa atuar no escopo Global de redes de rádios cognitivos. Para tanto, o sistema deverá considerar como as decisões tomadas dentro de uma rede afetam a operação de redes adjacentes. Pode-se ainda aumentar o nível de abstração na descrição das regras de configuração, através da descrição destas regras na forma de políticas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Digitel S.A., Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Referências

- Akyildiz, I., Lee, W.-Y., Vuran, M., e Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, páginas 40–48.
- Coutinho, P. S., da Silva, M. W. R., e de Rezende, J. F. (2012). Mecanismo de Handoff de Espectro para Rádios Cognitivos. *XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, páginas 44–56.
- IEEE 802.22 (2011). IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems Wireless Regional Area Networks (WRAN) - Specific requirements Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands. *IEEE Std 802.22*, páginas 1–680.
- IETF (1988). RFC 1067 - Simple Network Management Protocol. *Disponível em: <http://www.ietf.org/rfc/rfc1067.txt>*. Acesso em dezembro de 2012.
- Khalid, L. e Anpalagan, A. (2010). Emerging cognitive radio technology: Principles, challenges and opportunities. *Computers & Electrical Engineering*, páginas 358–366.
- Liang, Y.-C., Zeng, Y., Peh, E., e Hoang, A. T. (2008). Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, páginas 1326–1337.
- Potier, P. e Qian, L. (2011). Network management of cognitive radio ad hoc networks. *Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management*, páginas 1–5.
- Stavroulaki, V., Bantouna, A., Kritikou, Y., Tsagkaris, K., Demestichas, P., Blasco, P., Bader, F., Dohler, M., Denkovski, D., Atanasovski, V., Gavrilovska, L., e Moessner, K. (2012). Knowledge Management Toolbox: Machine Learning for Cognitive Radio Networks. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, páginas 91–99.
- Wang, C.-X., Chen, H.-H., Hong, X., e Guizani, M. (2008). Cognitive radio network management. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, páginas 28–35.
- Wang, J., Ghosh, M., e Challapali, K. (2011). Emerging cognitive radio applications: A survey. *IEEE Communications Magazine*, páginas 74–81.
- Wang, S., Xie, L., Liu, H., Zhang, B., e Zhao, H. (2010). Acra: An autonomic and expandable architecture for cognitive radio nodes. *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, páginas 1–5.
- Yucek, T. e Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, páginas 116–130.
- Zhao, Q. e Sadler, B. (2007). A Survey of Dynamic Spectrum Access. *IEEE Signal Processing Magazine*, páginas 79–89.