

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**Estudo sobre o reuso do espectro de  
frequência na seleção de canais para redes  
IEEE 802.22 e IEEE 802.19.1**

**Caio Salomão Marocco**

JUIZ DE FORA  
AGOSTO, 2013

# **Estudo sobre o reuso do espectro de frequência na seleção de canais para redes IEEE 802.22 e IEEE 802.19.1**

CAIO SALOMÃO MAROCCO

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação  
Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Eduardo Pagani Julio

JUIZ DE FORA  
AGOSTO, 2013

ESTUDO SOBRE O REUSO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA  
NA SELEÇÃO DE CANAIS PARA REDES IEEE 802.22 E  
IEEE 802.19.1

Caio Salomão Marocco

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS  
EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTE-  
GRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

---

Eduardo Pagani Julio  
Mestre

---

Alex Borges Vieira  
Doutor

---

Francisco Henrique Cerdeira Ferreira  
Mestre

JUIZ DE FORA  
29 DE AGOSTO, 2013

## Resumo

Diversas faixas do espectro de frequência são subutilizadas enquanto outras ficam sobrecarregas. Nesse contexto surgem as Redes e Rádios Cognitivos para aproveitar de forma inteligente as faixas de espectro através de acesso oportunista, sem interferir com os usuários legítimos. O IEEE 802.22 foi o primeiro padrão elaborado para utilizar faixas de espectro de televisão que estão desocupadas. Já o padrão IEEE 802.19.1 está sendo desenvolvido para resolver problemas de coexistência entre redes heterogêneas. O problema tratado neste trabalho é estabelecer coexistência entre redes e rádios cognitivos através de métodos de seleção de canais e controle de potência de transmissão. Levando em conta os padrões citados, é proposto um algoritmo para maximizar a reutilização do espectro de frequência e aumentar a utilidade espectral a partir do método de seleção de canais do projeto SCIFI e, posteriormente, adotar medidas para o controle de potência. O texto mostra os resultados encontrados em simulações do método proposto de seleção de canais realizadas na Universidade Federal de Juiz de Fora e indicam um aumento na reutilização espectral.

**Palavras-chave:** IEEE 802.19.1, IEEE 802.22, Redes Cognitivas, Rádio Cognitivo, SciFi, TV White Space, Controle de Potência de Transmissão, Seleção de Canal.

## Abstract

Many frequency spectrum bands are underused, while others are overloaded. In this context, there is the emergence of the Cognitive Networks and Cognitive Radios, to smartly use the spectrum bands through opportunistic access, without interfering with the legitimate users. The IEEE 802.22 was the first standard made to use the unoccupied television spectrum bands. The IEEE 802.19.1 standard is being developed to solve coexistence problems between heterogeneous networks. The problem studied in this paper is the establishment of coexistence between cognitive networks and cognitive radios through channel selection methods and transmission power control. Considering the standards above, an algorithm is proposed which maximizes frequency spectrum reuse and to increase spectrum utility, through the use of project SCIFI's channel selection method and, subsequently, adopt measures for power control. This study shows the results found in simulations using the proposed channel selection method made at the Federal University of Juiz de Fora and indicate an increase in spectral reuse.

**Keywords:** IEEE 802.19.1, IEEE 802.22, Cognitive Networks, Cognitive Radio , SciFi, TV White Space, Transmission Power Control, Channel Selection.

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, José Wolney e Vera, e toda minha família pelo amor incondicional.

Aos meus amigos pelo apoio e verdadeiro incentivo nas dificuldades.

Aos professores e mestres por mostrar o caminho e, em especial, ao Eduardo Pagani pela orientação e incentivo na confecção deste trabalho.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>5</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>6</b>
<b>Lista de Abreviações</b>	<b>7</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>8</b>
<b>2 Redes e Rádios Cognitivos</b>	<b>11</b>
2.1 Conceitos . . . . .	11
2.2 Sensoriamento Espectral . . . . .	13
2.3 Gerenciamento Espectral . . . . .	13
2.4 Coexistência . . . . .	14
2.4.1 Detecção de Disponibilidade de Espectro . . . . .	14
2.4.2 Compartilhamento de Espectro . . . . .	15
2.4.3 Mitigação de Interferência . . . . .	15
2.5 IEEE 802.22 . . . . .	17
2.6 IEEE 802.19.1 . . . . .	19
<b>3 Trabalhos Relacionados</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Keep-away Region</i> . . . . .	23
3.2 Controle de Potência . . . . .	24
3.3 SCIFI . . . . .	25
3.4 Reaproveitamento do Espectro . . . . .	25
<b>4 Seleção de Canal e Controle de Potência</b>	<b>28</b>
4.1 Algoritmo . . . . .	29
4.2 Simulação . . . . .	30
4.2.1 Utilidade do Espectro . . . . .	33
<b>5 Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>35</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>37</b>

## Lista de Figuras

1.1	Redes Cognitivas e usuários legítimos (Akyildiz et al., 2006) . . . . .	9
1.2	Utilização do espectro (Akyildiz et al., 2006) . . . . .	9
2.1	Exemplo de ocupação no tempo e frequência da banda de TV (Cordeiro et al., 2006) . . . . .	18
2.2	Mecanismo de dois estágios do sensoriamento espectral (Cormio e Chowdhury, 2009) . . . . .	19
2.3	Requisitos do sistema (Baykas et al., 2010) . . . . .	20
2.4	Arquitetura do sistema 802.19.1 (Filin et al., 2011) . . . . .	21
2.5	Possíveis cenários de erro (Filin et al., 2011) . . . . .	22
3.1	Algoritmo <i>keep-away</i> (Wang et al., 2011) . . . . .	23
4.1	Cenário de distribuição dos APs . . . . .	31
4.2	Grafo de interferência dos 7 APs . . . . .	32
4.3	Vazão média dos APs . . . . .	33



## Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros da equação 3.1 . . . . .	24
4.1	Canais e qualidade do sinal . . . . .	32

## Lista de Abreviações

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
AP	Access Point
TVWS	TeleVision White Space
TVBD	TeleVision Band Device
CR	Cognitive Radio
CM	Coexistence Manager
CE	Coexistence Enabler
CDIS	Coexistence Discovery and Information Server
OME	Operator Management Entity
VHF	Very High Frequency
UHF	Ultra-high Frequency
EIRP	Equivalent isotropically radiated power
WSD	White Space Device
SCIFI	Sistema de Controle Inteligente para redes sem fio
WRAN	Wireless Regional Area Network
MAC	Media Access Control
CPE	Consumer Premise Equipments
BS	Base Station
QoS	Quality of Service
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
TDMA	Time-Division Multiple Access
FCC	Federal Communications Commission
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
dBm	Decibel Miliwatt
dBW	Decibel Watt
SU	System Utility

# 1 Introdução

Redes Cognitivas, também chamadas de Redes de Rádio Cognitivo ou Redes sem fio de próxima geração, são redes dotadas de capacidade cognitiva que entendem a situação da rede e estabelecem futuras decisões para transmissão fim-a-fim. De acordo com Sousa et al. (2010) e Akyildiz et al. (2006) diversas faixas do espectro de rádio frequência são subutilizadas, algumas são faixas reservadas para uso exclusivo e outras ficam sobrecarregas. Os Rádios Cognitivos utilizam essas faixas de forma oportunista sensoriando-as e escolhendo a melhor no momento para transmissão. As Redes Cognitivas não podem interferir nos usuários legítimos das faixas do espectro que são reservadas. Dessa forma uma faixa reservada do espectro somente pode ser utilizada quando não existirem usuários legítimos e deve abandonar a faixa quando esses usuários forem detectados. Os Rádios Cognitivos devem possuir um alcance longo para determinar a presença de usuários legítimos e não interferir em seus sinais.

Algumas faixas do espectro possuem usuários ou serviços exclusivos, como redes de celulares e televisão, chamados de usuários primários. Já as Redes Cognitivas ou secundárias não possuem licença para atuar em determinada faixa do espectro, sendo chamadas de usuários secundários (Sousa et al., 2010). A figura 1.1 ilustra o cenário. *xG User* são usuários secundários.

Devido ao surgimento de diversos dispositivos de comunicação e a demanda por alocação junto às agências reguladoras, a tendência é a escassez dos recursos espectrais em diversas regiões. Alocar faixas livres para novos serviços ou melhorar os já existentes tem se tornando tarefa difícil e tende a piorar. Surge, então, a necessidade de desenvolver redes e rádios inteligentes que aproveitam as faixas do espectro mais racionalmente.

A Figura 1.2 ilustra como algumas faixas possuem uso intenso, o que gera fraco desempenho dos serviços que as utilizam, principalmente em grandes centros urbanos.

O padrão IEEE 802.22 possui área de alcance maior que os outros padrões (Cordeiro et al., 2006), o que o torna ideal para lugares remotos e rurais. Pesquisas em Redes Cognitivas são importantes para viabilizar esse padrão. É o primeiro baseado

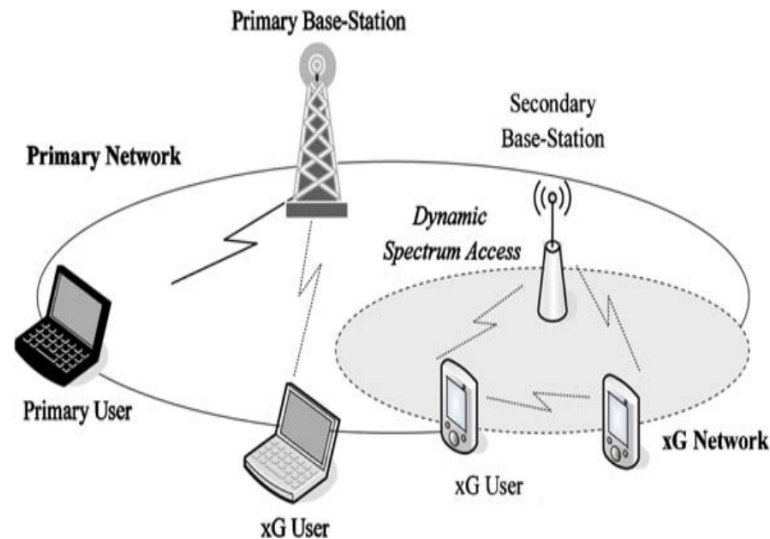


Figura 1.1: Redes Cognitivas e usuários legítimos (Akyildiz et al., 2006)

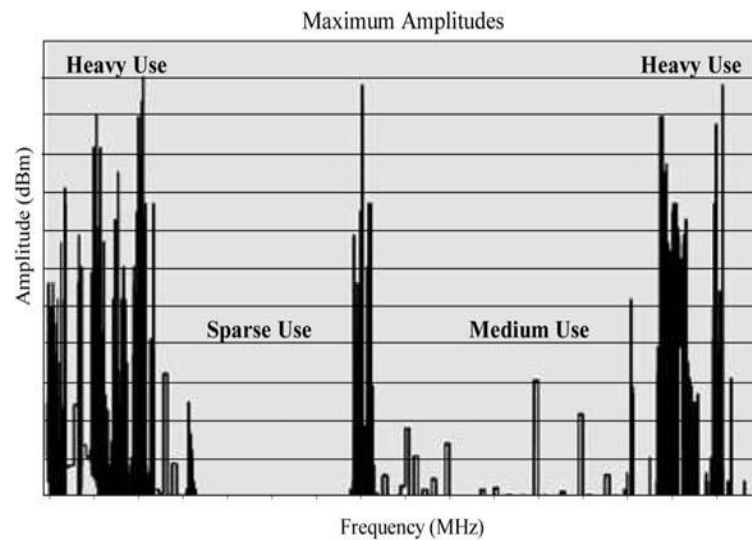


Figura 1.2: Utilização do espectro (Akyildiz et al., 2006)

em Rádios Cognitivos (Cordeiro et al., 2006) visando redes sem fio regionais (WRAN - *Wireless Regional Area Network*). Uma rede IEEE 802.22 propõe o uso não licenciado e oportunista (Cordeiro et al., 2006) de faixas de televisão para a comunicação sem fio. A estação rádiobase coordena os nós dentro de uma célula. Este padrão define também meios para operar em coexistência com outras redes IEEE 802.22. Já o padrão IEEE 802.19.1 estabelece estratégias para coexistência entre de redes heterogêneas que utilizam as faixas de frequência de televisão.

Em 30 de julho de 2013 foi noticiado que o *Federal Communications Commission* autorizou o Google a desenvolver um banco de dados para a utilização de espectros de

frequência não licenciados em transmissões banda larga sem fio. Esta empresa anunciou em março que está lançando um programa para implementar esta tecnologia em 10 escolas rurais na África do Sul (Musil, 2013).

Grandes desafios técnicos surgem: quais faixas reservadas utilizar, como utilizá-las, em que momento deixá-las, cuidados para não interferir com usuários primários e adaptação dos protocolos de comunicação. O foco deste trabalho é estudar a reutilização de espectros de frequência, a partir da seleção de canais de operação, em vista da coexistência entre redes cognitivas que usam as faixas de frequência de televisão.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: o segundo capítulo trata de conceitos de redes e rádios cognitivos e dos padrões IEEE 802.22 e 802.19.1, o terceiro capítulo contém trabalhos relacionados com controle de potência e seleção de canais, o quarto detalha o algoritmo proposto para seleção de canais e o resultado de simulações. Por último estão as conclusões e trabalhos futuros.

## 2 Redes e Rádios Cognitivos

Neste capítulo são detalhados os conceitos e requisitos para a implantação de Redes e Rádios Cognitivos.

### 2.1 Conceitos

A Estação Radiobase Primária (Sousa et al., 2010) é um componente da infraestrutura de rede que possui licença de acesso ao espectro. Esses dois componentes formam a Rede Primária que, diferentemente da Rede Cognitiva, não apresenta capacidade cognitiva para compartilhar o espectro com os usuários secundários.

Redes Cognitivas são redes que possuem a capacidade de detectar as condições da rede e decidir como agir sobre essas condições. As Redes Cognitivas abrangem toda camada ISO/OSI, enquanto que os Rádios Cognitivos atuam nas camadas física e de enlace. Eles são responsáveis por realizar (Akyildiz et al., 2006):

- Sensoriamento espectral: localizar quais faixas do espectro estão disponíveis e detectar a presença de usuários primários;
- Gerenciamento espectral: selecionar o melhor canal para transmitir;
- Compartilhamento espectral: compartilhar o acesso com outros usuários secundários;
- Mobilidade espectral: liberar o canal quando um usuário primário é detectado e manter a comunicação enquanto migra para outra faixa no espectro.

As Redes Cognitivas não possuem licença para atuar em determinada faixa do espectro, realizando um acesso oportunista e liberando a faixa assim que for detectado um usuário primário. Devem também adotar medidas para não interferir no sinal do usuário primário. O Escalonador de Espectro (Sousa et al., 2010) é um dispositivo dentro da rede cognitiva que armazena informações sobre a atividade espectral do local e fornece informações sobre emissores locais, políticas de acesso e a área em que os sinais são

transmitidos. É uma entidade central responsável por permitir a coexistência de múltiplas Redes Cognitivas.

Alguns desafios para abordar a coexistência de múltiplas Redes Cognitivas são: tamanho da banda do canal, tamanho do pacote, métricas para detecção erros no envio de pacotes, abordagens de cooperação, sensibilidade dos receptores, detecção de usuários com baixa potência de transmissão (Sousa et al., 2010) e, sendo o foco deste trabalho, controle da potência de transmissão.

O principal objetivos da tecnologia de rádios cognitivos é usar a melhor faixa de espectro disponível. Para tanto a camada física deve ser capaz de alterar os parâmetros de transmissão e recepção para tornar a comunicação mais eficiente. Haykin (2005) classifica as faixas do espectro de acordo com a potência dos sinais de rádio presentes nela, podendo ser:

- Espaços negros (*black spaces*): faixas com interferências temporárias e de alta potência;
- Espaços cinzas (*grey spaces*): faixas que parcialmente possuem interferências de baixa potência;
- Espaços brancos (*white spaces*): faixas sem interferências, exceto pelo ruído do ambiente.

Como o Rádio Cognitivo faz uso das lacunas de espectro, ou faixas do espectro *white space*, se for detectado um usuário primário ou seja necessário mitigar ou evitar interferência com outro usuário secundário, o rádio cognitivo deve mudar seu canal de operação para outra faixa do espectro ou alterar a potência de transmissão. Torna-se necessário então um método para identificar as faixas do espectro e detectar usuários primários. Dentre eles existem: registro em banco de dados, sinalizadores regionais e sensoriamento espectral. Nos dois primeiros métodos os sistemas primários devem informar aos usuários secundários informações sobre a utilização do espectro, fato que faz necessário modificar os atuais sistemas primários. Com base nisso o método de sensoriamento espectral tem recebido mais atenção e foi incluído no padrão IEEE 802.22, já que possui compatibilidade com os dispositivos primários. As desvantagens destes métodos

são que os dados não estão disponíveis de imediato, devendo manter o sensoriamento continuamente (Sousa et al., 2010).

Nas seções seguintes é detalhado o funcionamento dos mecanismos de sensoriamento espectral, gerenciamento espectral e coexistência. Por último os padrões IEEE 802.22 e IEEE 802.19.1.

## 2.2 Sensoriamento Espectral

O sensoriamento espectral é realizado em conjunto nas camadas físicas e controle de acesso ao meio (MAC - Media Access Control). Na camada física a tecnologia de rádio cognitivo é implementada por *software*, criando flexibilidade e a capacidade de modificar os parâmetros de operação. As responsabilidades básicas são realizar o sensoriamento de rádio, detectar usuários primários e otimizar o uso do espectro. Por outro lado a camada MAC possui a tarefa de combinar medidas de sensoriamento e alocar o espectro (Sousa et al., 2010).

A sensibilidade do sensoriamento pode variar de acordo com o usuário primário de determinada faixa do espectro, já que alguns sinais de difusão são detectados mais dificilmente que outros. Porém, essa sensibilidade deve ser maior que a dos receptores dos usuários primários. É mandatória essa diferença porque o rádio cognitivo baseia sua decisão na medição local do sinal emitido pelo transmissor primário. Um possível problema é quando o rádio cognitivo estiver sombreado por algum obstáculo que dificulte a detecção do sinal de usuários primários, sendo necessário desenvolver técnicas para resolver o problema (Sousa et al., 2010).

## 2.3 Gerenciamento Espectral

O Gerenciamento espectral é responsável pela análise espectral e decisão espectral. São funções exercidas na camada MAC e outras camadas superiores da pilha de protocolos (Sousa et al., 2010).

A análise espectral permite caracterizar os diferentes espaços em branco no espectro de frequência de acordo com os requisitos do sistema, como nível de interferência,



taxas de erro e tempo de espera. A partir das informações coletadas e discriminadas, entra a fase de decisão espectral. De acordo com os parâmetros que formam as regras de decisão é selecionado quais recursos espectrais utilizar, caracterizando a principal função da camada MAC (Sousa et al., 2010).

## 2.4 Coexistência

De acordo com Lu et al. (2013), em sistemas *spectrum overlay* os usuários secundários podem transmitir somente se não existirem usuários primários ou não for gerar interferência com este usuário. Caso seja *spectrum underlay*, os usuários primários e secundários podem coexistir desde que a interferência no usuário primário seja tolerável. Em tais sistemas o controle de potência torna-se uma estratégia para solucionar a questão da coexistência.

Os padrões IEEE 802.22 e 802.19.1 foram criados para fornecerem recomendações e políticas para protocolos de coexistência e alcançar um uso eficiente do espectro de frequência. Desafios surgem em criar estratégias para mitigar a interferência, tratar variações nas características do sinal, definir a sensibilidade dos receptores, usar de abordagens cooperativas, entre outros. Os problemas de coexistência são classificados em três categorias: detecção de disponibilidade de espectro (*spectrum availability detection*), mitigação de interferência (*interference mitigation*) e compartilhamento de espectro (*spectrum sharing*) (Gosh et al., 2011).

Nas próximas subseções são consideradas as faixas de espectro de TV, ou Television White Space (TVWS).

### 2.4.1 Detecção de Disponibilidade de Espectro

A detecção de disponibilidade de espectro tem como objetivo identificar a disponibilidade de canais de TV para uso sem causar interferência com usuários primários. Outra função é detectar usuários secundários que possam permitir coexistência e tomar decisões para otimizar o canal de operação escolhido. A presente categoria é detalhada da seguinte forma (Gosh et al., 2011):

- Detecção de usuários primários: o rádio cognitivo deve utilizar métodos confiáveis

para detectar TVWS disponíveis a partir de um banco de dados de usuários primários;

- Banco de dados *white space*: repositório central para armazenar informações sobre operações do usuário primário, como localização, requisitos de potência de transmissão e canais utilizados. Usuários secundários consultam a base de dados para saber os canais disponíveis e a potência de transmissão permitida.
- Sensoriamento espectral: realiza a varredura de rádio frequência para detectar usuários primários. Possui um nível de sinal mínimo o qual é utilizado para detectar o sinal primário. É calibrado em termos de probabilidade de falsos positivos e falsos negativos.
- Detecção de usuários secundários: os usuários secundários devem detectar outros usuários secundários operando no mesmo ou diferente canal de TV. O padrão IEEE 802.22 lida com coexistência em redes similares, que usam o mesmo conjunto de tecnologias e protocolos, chamado de *self-coexistence*.

### 2.4.2 Compartilhamento de Espectro

Conforme visto anteriormente, diferentes redes cognitivas podem compartilhar o mesmo canal TVWS, embora seja desejável que as redes operem em canais diferentes. As soluções para compartilhamento de espectro podem ser cooperativas ou não cooperativas. Um exemplo não cooperativo é o controle de potência (Gosh et al., 2011).

Estratégias cooperativas tendem a ser mais complexas, no caso de redes 802.22 a implementação é facilitada pelo fato de usarem os mesmo protocolos para a camada física e MAC. Já a comunicação entre redes heterogêneas possuem diferentes pilhas de protocolos. Neste ponto o padrão IEEE 802.19.1 elabora diretrizes para realizar a intercomunicação das redes.

### 2.4.3 Mitigação de Interferência

Os problemas de interferência em TVWS podem se agravar especialmente se a região possuir uma baixa disponibilidade de canais e se as áreas de cobertura das redes se sobrepõem. Outro problema é o sinal de estações de TV de alta potência, agregado à boa

característica de propagação que as faixas de TV apresentam, o que cria um novo cenário a ser tratado. Sistemas de alta potência de transmissão, por exemplo o IEEE 802.22, geram um outro cenário de interferência com dispositivos de baixa potência. Os desafios podem ser classificados em duas categorias: interferência com usuários primários e entre usuários secundários (Gosh et al., 2011).

Como descrito, interferências de sinais primários reduzem o QoS dos sistemas secundários. Podem ainda impedir que dispositivos secundários relatem a detecção de usuários primários, dependendo da localidade dos sistemas e da proximidade dos canais de operação dos sistemas primários e secundários. Medidas foram adotadas no padrão IEEE 802.22 para os dispositivos secundários possam se reconectar com a estação base. Técnicas para trabalhar com interferência são agrupadas em prevenção de interferência (*interference avoidance*), controle de interferência (*interference control*) e mitigação de interferência (*interference mitigation*). No primeiro grupo estão estratégias de dividir o acesso por frequência, *frequency-division multiple access* (FDMA), e por tempo, *time-division multiple access* (TDMA). O segundo e terceiro grupo possuem estratégias de trabalhar o controle de potência de forma que os sistemas possam coexistir dentro dos limites de QoS (Gosh et al., 2011).

A segunda categoria a ser considerada é a interferência entre usuários secundários. Diversos sistemas secundários podem selecionar o mesmo canal de operação por existir uma limitação de canais, por exemplo, ocasionando uma crítica sobreposição de pacotes. Dentro deste tema é discutido o controle de potência de transmissão dos dispositivos secundários e da estação base. Os rádios cognitivos, ou *Cognitive Radio* (CR), integrantes das diversas redes cognitivas em um determinado ambiente devem controlar suas potências de transmissão para não sobrepor os sinais ou minimizar as interferências (Gosh et al., 2011).

Em se tratando de controle de potência devem-se considerar as medidas utilizadas pelo sinal emitido pelas antenas de dispositivos sem fio. *Equivalent Isotropically Radiated Power* (EIRP) é o sinal de rádio-frequência de maior força transmitido por uma antena, expresso em decibel watt (dBW) ou Watt (W). É utilizado para estimar a área de cobertura de um transmissor (Paret, 2009).

Estudos foram elaborados propondo modelos para tratar o controle de potência em redes 802.22, como proposto em Nekovee (2009) e Wang et al. (2011). Posteriormente foi criado o grupo de trabalho IEEE 802.19.1 para resolver o problema de coexistência em redes heterogêneas que utilizam TVWS, surgindo então a necessidade de propostas de controle de potência que utilizem os requisitos deste padrão e suas vantagens.

## 2.5 IEEE 802.22

Devido as faixas de TV apresentarem boas características de propagação, a intenção dessa tecnologia é alcançar áreas rurais e remotas (diferente do padrão IEEE 802.11), já que uma célula cobre uma área que varia entre 33 km a 100 km (Cordeiro et al., 2006).

Diante da necessidade de se aproveitar melhor o espectro de frequência, em novembro de 2004 foi criado o grupo de trabalho do padrão IEEE 802.22 para desenvolver uma interface baseada em Rádios Cognitivos para operar em canais de TV. O sistema 802.22 surge para explorar de forma inteligente faixas do espectro de frequência que estão livres, não interferindo com os usuários licenciados, e aproveitando canais em vacância (figura 2.1). Os principais alvos do padrão são áreas remotas e lugares em que a disponibilidade de acesso à banda larga é menos difundida, propiciando desempenho comparável à conexões com infraestrutura cabeada (Cordeiro et al., 2006).

O padrão trata da camada física e MAC. Em 2012 foi lançado um documento contendo detalhes técnicos para a implantação e operação de sistemas IEEE 802.22 WRANs (IEEE, 2012).

O sistema 802.22 especifica uma estação base, ou *base station* (BS), que é responsável por gerenciar sua célula de cobertura e os dispositivos dos usuários da rede 802.22, chamados de *Consumer Premise Equipments* (CPE). A célula é formada por um único BS e zero ou mais CPEs associados e controlados por este BS. O controle de acesso ao meio é feito pelo BS, que envia instruções aos CPEs de qual canal utilizar a partir do *feedback* destes dispositivos. Devido a criticidade de se trabalhar com coexistência, técnicas de Rádios Cognitivos, ou CR, foram incorporadas ao padrão 802.22. Dentre elas estão: sensoriamento espectral distribuído, gerenciamento de espectro e medições. Além do que cada CPE deve possuir duas antenas: a primeira é usada para comunicar com o

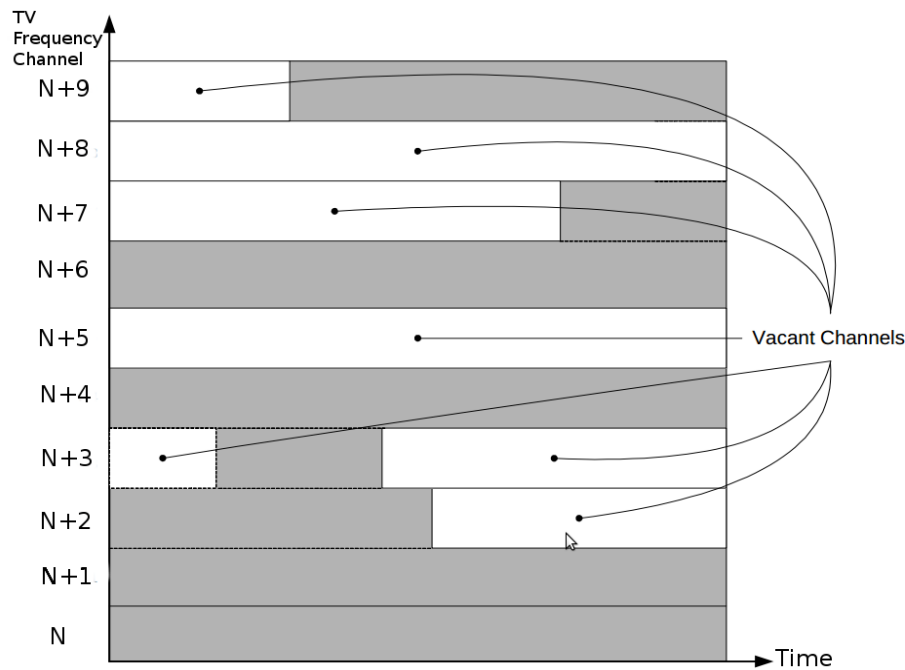


Figura 2.1: Exemplo de ocupação no tempo e frequência da banda de TV (Cordeiro et al., 2006)

BS, sendo direcionada para minimizar interferências. A segunda é omnidirecional e possui a finalidade de realizar o sensoriamento espectral. Caso seja detectado sinal de um usuário licenciado durante o sensoriamento espectral, que pode ser sinal de TV ou microfone sem fio, o BS deve liberar o canal. Dentro do sensoriamento espectral o primeiro objetivo é identificar quais canais de TV estão ocupados e quais estão vagos. Permite também calcular a potência de transmissão de forma que se mantenha uma distância do alcance do sinal secundário em relação aos transmissores primários, formando o *Keep-Out Region*.

O sensoriamento espectral possui um mecanismo de dois estágios que estabelece um período silencioso em que o CR realiza o sensoriamento para a detecção de usuários primários (Cormio e Chowdhury, 2009):

- *Fine sensing*: É realizado por demanda e permite a rede CR atender a qualidade do serviço, ou *quality of service* (QoS), e diminuir a taxa de falso alarme. Melhora a precisão da detecção de um usuário primário à custa do tempo de transmissão perdido;
- *Fast sensing*: É feito no intervalo de 1 ms/canal para determinar se o *fine sensing* é necessário. Esse sensoriamento é realizado de forma mais rápida que o *fine sensing*.

A figura 2.2 ilustra como é distribuído o período em que os dois estágios são feitos.

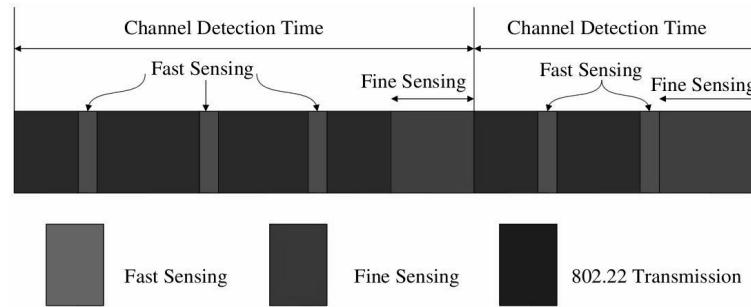


Figura 2.2: Mecanismo de dois estágios do sensoriamento espectral (Cormio e Chowdhury, 2009)

O padrão IEEE 802.22 define a modulação do sinal como *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA), o que gera uma desprezível interferência entre as transmissões (Cordeiro et al., 2006; Hosein, 2008).

## 2.6 IEEE 802.19.1

O grupo de trabalho do padrão IEEE 802.19 foi aprovado pelo IEEE em dezembro de 2009 com data de expiração em dezembro de 2013. O padrão visa fornecer métodos para a coexistência entre redes Wireless utilizando TVWS. Em março de 2010 o grupo publicou o documento com os requisitos e a arquitetura para o sistema 802.19.1. Os 9 requisitos são descritos (Baykas et al., 2010):

- R1 - O sistema deve permitir a descoberta de dispositivos e redes 802.19.1 compatíveis com *TeleVision Band Device* (TVBD), além de identificar potenciais dispositivos ou redes 802.19.1 que precisam coexistir;
- R2: O sistema deve obter e atualizar informações necessárias para a coexistência;
- R3: O sistema deve possuir meios para trocar as informações obtidas;
- R4: O sistema deve ser capaz de fornecer pedidos/comandos de reconfiguração e informações de controle para implementar decisões de coexistência em TVWS;
- R5: O sistema deve ser capaz de analisar as informações obtidas;

- R6: O sistema deve tomar decisões de coexistência;
- R7: O sistema deve suportar diferentes topologias de tomada de decisão. Por exemplo: centralizada, distribuída e autônomas;
- R8: O sistema deve suportar mecanismos de segurança para fornecer autenticação, integridade, confidencialidade e privacidade;
- R9: O sistema deve utilizar um conjunto de mecanismos para assegurar a coexistência das redes e dispositivos TVBD.

Os requisitos são agrupados de acordo com a figura 2.3

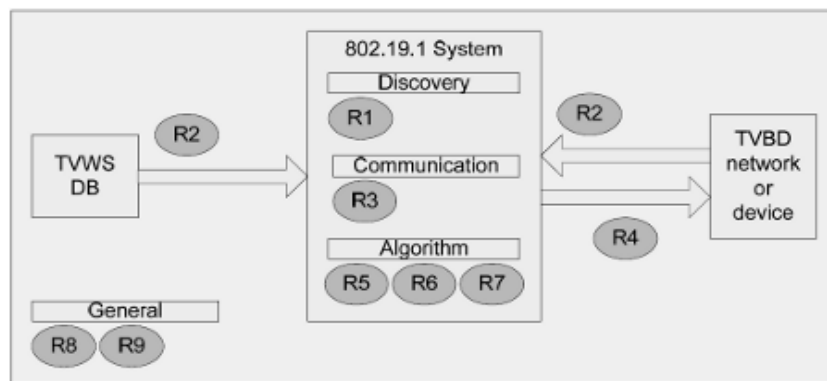


Figura 2.3: Requisitos do sistema (Baykas et al., 2010)

A arquitetura é definida por três entidades lógicas: Gerenciador de Coexistência, ou *Coexistence Manager* (CM), Habilitador de Coexistência, ou *Coexistence Enabler* (CE) e Servidor de Informação e Descoberta de Coexistência, ou *Coexistence Discovery and Information Server* (CDIS). Cada entidade possui interfaces lógicas para comunicação com outras entidades ou elementos externos. No total são seis interfaces lógicas. A função de cada entidade lógica é descrita a seguir (Baykas et al., 2010; Filin et al., 2011):

- Gerenciador de Coexistência: Responsável por tomar decisões de coexistência e fornecer pedidos e comandos de controle a outros CMs. Outra responsabilidade é descobrir outros CMs, além de auxiliar os operadores de rede em gerenciamentos relacionados à coexistência;
- Habilitador de Coexistência: Fornece uma interface entre a rede e o sistema de

coexistência 802.19.1. Além de possuir a função de obter informações da rede ou de dispositivos TVBD e fornecer informações vindas do CM para estes dispositivos;

- Servidor de Informação e Descoberta de Coexistência: Apoia a descoberta de CMs e armazena informações sobre coexistência. Baseados nestas informações, o CDIS pode informar a cada dispositivo TVBD sobre seus vizinhos.

Na figura 2.4 é mostrado o relacionamento das entidades lógicas. *White space radio system* é uma entidade externa, podendo ser uma rede ou dispositivo TVBD. *TVWS database* é responsável por obter a lista de canais disponíveis e proteger os usuários primários (Baykas et al., 2010; Filin et al., 2011).

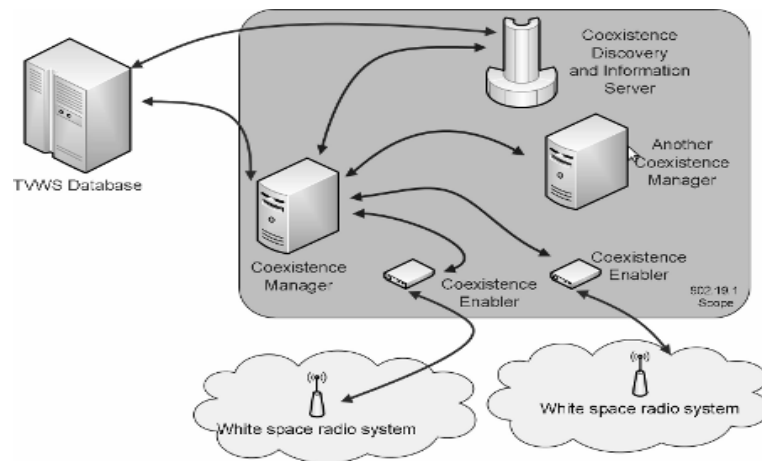


Figura 2.4: Arquitetura do sistema 802.19.1 (Filin et al., 2011)

Em Filin et al. (2011) é analisado os mecanismos de coexistência no padrão IEEE 802.19.1 e é feita uma avaliação da performance através de simulações deste padrão. Na simulação foi definida uma área de 100x100 km possuindo um número aleatório de redes TVWS entre 10 e 200. Para cada rede foi escolhido aleatoriamente um ambiente operacional, podendo ser de três tipos:

- Ambiente operacional bom - A área de cobertura varia entre 1 km e 10 km;
- Ambiente operacional médio - A área de cobertura varia entre 5 km e 25 km;
- Ambiente operacional ruim - A área de cobertura varia entre 10 km e 50 km.

Conforme o número total de redes cresce de 10 para 200, o número médio de vizinho no ambiente bom varia de 0 a 7, no ambiente médio de 1 a 43 e no ambiente ruim de 5 a 120.



O primeiro teste foi relacionado ao serviço de descoberta, que é responsável por descobrir os vizinhos e seus canais de operação. Foi constatado que, comparado ao caso em que não se usa o padrão IEEE 802.19.1, o ganho do número de redes operando foi de 20% a 100%. Outro teste tratou o serviço de gerenciamento de TVWS. Não foram encontrados ganhos significativos em utilizar a abordagem do IEEE 802.19.1, porém foi feita a ressalva de que este serviço é importante para proporcionar um certo nível de justiça entre as redes operantes, já que podem ser feitos agendamentos para o uso de frequência.

Os autores em Filin et al. (2011) detectaram duas situações de erro que podem acontecer no momento do sensoriamento e detecção de outras redes, conforme a figura 2.5. A primeira é não detectar a outra rede quando a área de cobertura estão sobrepostas e o CR vizinho está fora do alcance do sensoriamento. A segunda situação é o sensoriamento detectar a rede vizinha e as áreas de cobertura não estão sobrepostas, ocasionando um alarme falso.

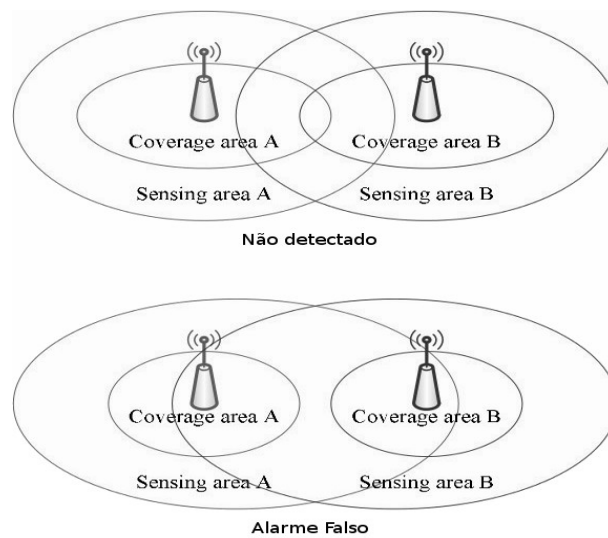


Figura 2.5: Possíveis cenários de erro (Filin et al., 2011)

## 3 Trabalhos Relacionados

O presente capítulo é dedicado a apresentar trabalhos relacionados à coexistência entre redes. O foco principal é analisar as possibilidades de seleção de canal e controle de potência.

### 3.1 *Keep-away Region*

Em Nekovee (2009) é desenvolvido uma metodologia para identificar e analisar a disponibilidade de TVWS após a mudança para TV digital no Reino Unido. A metodologia é em função da geolocalização e da potência de transmissão dos rádios cognitivos. Como o CR não pode causar interferências nos usuários primários, os quais são os receptores do sinal de TV, nem na borda da área de transmissão, é reiterado que o CR mantenha sua área de cobertura com uma distância mínima da área de cobertura dos usuários primários adjacentes. Essa área, chamada de *keep-way region*, normalmente varia entre 5 a 10 km da borda do CR, ocasionando que usuários secundários inseridos nessa área não se beneficiem das vantagens do uso oportunista de TVWS, resultando em baixo aproveitamento do espectro de frequência dependendo da localidade (Wang et al., 2011), conforme a figura 3.1.

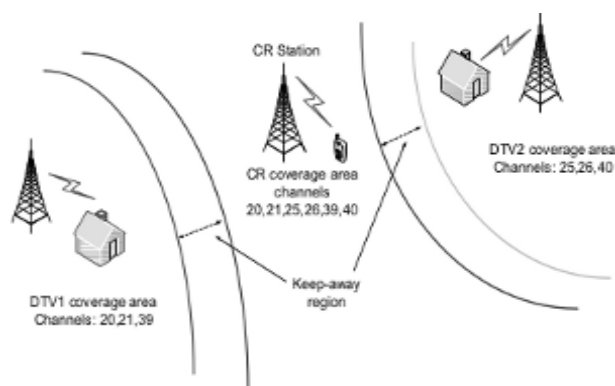


Figura 3.1: Algoritmo *keep-away* (Wang et al., 2011)

## 3.2 Controle de Potência

Contraopondo a proposta anterior, *keep-away region*, Wang et al. (2011) desenvolve um algoritmo para o controle de potência baseado no princípio da potência máxima permitida, já que não existem mecanismos no algoritmo anterior para realizar o controle de potência na estação CR. No cenário em questão é necessário apenas manter uma distância de 100 metros, tipicamente, entre a base CR e o transmissor primário. Portanto é essencial que a base CR saiba como calcular a potência máxima permitida para cada canal. É utilizado o modelo 3.1 e os parâmetros são listados na tabela 3.1. A equação calcula o valor EIRP máximo permitido para cada dispositivo, chamado de *White Space Device* (WSD).

$$\text{EIRP}_{WSD} = \frac{4\pi d^4}{d_{BP}^2} \frac{E_{CR_{max}}^2}{n} \quad (3.1)$$

Tabela 3.1: Parâmetros da equação 3.1

Descrição	Parâmetros
d	Distância entre a estação CR e a borda de cobertura dos transmissores
$d_{BP} = \frac{K H_{TX} H_{RX}}{\gamma}$	K é um valor constante, $H_{TX}$ é a altura da antena do transmissor, $H_{RX}$ é a altura da antena do receptor e $\gamma$ é o comprimento de onda do canal
$E_{CR_{max}}^2$	Força <i>E-field</i> máxima permitida da estação CR para receber transmissões de usuários na borda
$n = 120\pi$	Impedância intrínseca

Com base nas coordenadas da geolocalização de cada estação de TV (transmissor primário), a base CR obtém a distância em relação a borda de cobertura do transmissor primário. Caso a distância seja maior que o limite, normalmente 100 metros, os canais utilizados pelo transmissor são colocados em uma lista branca, senão são descartados. Em seguida para cada canal na lista branca é calculado o valor de EIRP, de forma a gerar a potência máxima permitida para transmissão em cada canal pela estação CR. A partir de simulações para 12 localidades no Reino Unido, os autores constataram um aumento de 30% na taxa de transferência efetiva em comparação ao modelo *keep-away region* (Wang et al., 2011).

### 3.3 SCIFI

Em Balbi et al. (2012) é analisado o crescente problema de escala em redes sem fio IEEE 802.11. A dificuldade surge em gerenciar e coordenar cada AP com os outros APs de forma a minimizar a interferência no uso de canais de operação. APs de baixo custo financeiro são configurados a partir de uma interface web, sem considerar outros APs ou redes no ambiente. Conseqüentemente configurações estáticas ficam obsoletas em um ambiente mutável. Com vista nestes problemas os autores criaram o SCIFI para controlar os APs da rede e tornar suas configurações automáticas e dinâmicas. Foi configurado um controlador central e instalado sistemas abertos nos APs, como o OpenWRT<sup>1</sup>.

Os canais 1, 6, 11 são ditos canais ortogonais porque não existe sobreposição em seus espectros de frequência. Com base nisto, a seleção de canal e o controle de potência estão estreitamente relacionados, já que em um cenário onde não seja possível cada ponto de acesso trabalhar em um canal diferente é necessário realizar o controle de potência para evitar interferência excessiva. No SCIFI cada AP envia informações de varredura espectral para o controlador central e o mecanismo de seleção de canal modela a rede em um grafo de interferências, reduzindo ao problema de coloração de vértices. Neste problema o objetivo é colorir os vértices do grafo de forma que vértices adjacentes possuam cores diferentes. Os vértices representam os APs, os arcos indicam a comunicação entre os APs sendo ponderados de acordo com a qualidade do sinal recebido. Pontos de acesso fora da rede administrada são caracterizados por vértices de cores fixas. Na proposta de algoritmo de seleção de canal é utilizado somente os canais ortogonais e é escolhido, para cada AP, o canal com menor interferência. Os algoritmos 1 e 2 demonstram o processo de seleção de canais.

### 3.4 Reaproveitamento do Espectro

Os autores de Sengupta et al. (2013) fazem um estudo de alocação de espectro em redes IEEE 802.22 para reusar faixas de frequência, ou canais, e maximizar a utilidade do sistema, ou *system utility* (SU), expressado em 3.2, onde U é a utilidade alcançada pela

---

<sup>1</sup>Distribuição Linux para dispositivos embarcados. <https://openwrt.org>

---

**Algoritmo 1:** Pseudocódigo do algoritmo de seleção de canais (Balbi et al., 2012)

---

**Entrada:** SelecionarCanais, (*ListaDeDadosDosAps*[],  
*ListaDePossiveisCanais*[]).

*Grafo* ← *CriarGrafoDeInterferencias*(*ListaDeDadosDosAps*[]);  
*ListaDeVerticesDescoloridos*[] ← *ListarVerticesDescoloridos*(*Grafo*);  
**while** tamanho da *ListaDeVerticesDescoloridos*[] > 0 **do**  
  *ListaDeVerticesOrdenada*[] ←  
  *OrdenarVerticesPorPrioridade*(*ListaDeVerticesDescoloridos*[]);  
  *VerticeSelecionado* ← *ListaDeVerticesOrdenada*[0];  
  *ColorirVertice*(*VerticeSelecionado*, *ListaDePossiveisCanais*[]);  
  *ListaDeVerticesDescoloridos*[] ←  
  *RemoverVertice*(*VerticeSelecionado*, *ListaDeVerticesDescoloridos*[]);  
**end while**  
*AtualizarCanaisDosAps*();

---



---

**Algoritmo 2:** Pseudocódigo do procedimento para colorir um vértice (Balbi et al., 2012)

---

**Entrada:** *ColorirVertice*, (*VerticeSelecionado*,  
*ListaDePossiveisCanais*[]).

*ListaDeArestas*[] ← *ListarArestasDoVertice*(*VerticeSelecionado*);  
*ListaDeCanaisDesocupados*[] ←  
*RemoverCanaisOcupados*(*ListaDeArestas*[], *ListaDePossiveisCanais*[]);  
**if** tamanho da *ListaDeCanaisDesocupados*[] > 0 **then**  
  *CorEscolhida* ← *ListaDeCanaisDesocupados*[0];  
  *DefinirCorDoVertice*(*VerticeSelecionado*, *CorEscolhida*);  
  **return**  
**end if**  
**else**  
  *CorEscolhida* ← *EscolherCanalComMenorSomaDeQualidades*  
  (*ListaDeArestas*[], *ListaDePossiveisCanais*);  
  *DefinirCorDoVertice*(*VerticeSelecionado*, *CorEscolhida*);  
  **return**  
**end if**

---

BS  $i$ .

$$\text{maximizar } \sum_{i=1}^N U_i \quad (3.2)$$

É analisado que a alocação de faixas do espectro devem atender restrições de justiça para maximizar a SU. (Sengupta et al., 2013):

- Justiça mínima: Todos o BSs devem operar, pelo menos, em uma porção mínima do espectro.
- Justiça proporcional: Deve priorizar os BSs que interferem com o menor número de outros BSs.
- Justiça completa: Todos o BSs são tratados igualmente.

A utilidade de cada BS é calculada de acordo com a largura de banda da faixa de espectro em que está operando. Considerando uma porção do espectro de 3000 KHz, três canais de operação e 6 BSs, se o canal 1 está em operação em duas BSs, na justiça proporcional a banda resultante para o canal 1 é 1000 KHz. Se 3 BS operam no canal 2, a banda resultante é 1500 KHz. Se o canal 3 está em operação em uma BS, a banda é 500 KHz. De acordo com a equação 3.3 SU resulta em 7000 unidades (Sengupta et al., 2013).

$$U = 2B(C1) + 3B(C2) + B(C3) \quad (3.3)$$

No próximo capítulo é tratado a proposta de reutilização de espectros de frequência, a partir da seleção de canais de operação, e o controle de potência de transmissão.

## 4 Seleção de Canal e Controle de Potência

No sistema de controle de potência deve-se considerar a proteção dos usuários primários, a escolha do canal de operação e a potência de transmissão (medida em EIRP). No presente trabalho o foco é realizar a seleção de canais e, posteriormente, o controle de potência, visando melhorar a coexistência entre redes cognitivas que utilizam TVWS. É desconsiderada a coexistência com usuários primários. De acordo com Bondan et al. (2013) ainda existem poucos trabalhos sobre redes e rádios cognitivos na literatura, o que inclui propostas sobre controle de potência de transmissão, assim como a inexistência de redes e rádios cognitivos. Diversas propostas existentes não consideram o padrão IEEE 802.19.1, que fornece diversos conceitos para comunicação entre redes heterogêneas.

De acordo com o *Federal Communications Commission* (FCC) os canais permitidos para operação nos Estados Unidos são de 2 a 51, excetuando os canais 3, 4 e 37. No Reino Unido a disponibilidade de canais é diferente. O FCC estipula também um valor máximo EIRP de 4 W (Gosh et al., 2011; Nekovee, 2009). Em vista disto o sistema de controle de potência deve ser parametrizável para se adaptar a cada país ou particularidades de uma região, associado um banco de dados de geolocalização.

Cada canal possui geralmente 6 MHz, podendo ser 7 MHz ou 8 MHz dependendo da localidade. A eficiência do espectro varia de 0,5 bit/seg/Hz a 5 bit/seg/Hz, o que resulta em um *link* médio de 18 Mbps e máximo de 30 Mbps. Considerando o valor médio pode-se agregar 3 canais contínuos para alcançar 54 Mbps, ficando compatível com o padrão IEEE 802.11. Esta técnica é chamada de *channel bonding* (Sengupta et al., 2013; Gosh et al., 2011).

No trabalho de Balbi et al. (2012) existe um controlador central para gerenciar os APs. No padrão IEEE 802.22 não é desenvolvido um controlador central, mas em vista do padrão IEEE 802.19.1 a comunicação entre as entidades viabiliza a construção de um grafo de interferência, podendo ser feita através do CE e CM. É feito o correlacionamento entre o controlador central do SCIFI e a entidade lógica CDIS do IEEE 802.19.1. Baseado nisto o CDIS pode realizar a seleção de canais e controle de potência de forma centralizada,

repassando as informações às redes através das interfaces lógicas. É considerado os canais 1, 6 e 11 do padrão IEEE 802.11 por serem ortogonais.

Na próxima seção é descrito o algoritmo para seleção de canais e controle de potência transmissão.

## 4.1 Algoritmo

A primeira parte do algoritmo é fazer a escolha do canal de operação, ou a faixa TVWS, conforme os algoritmos 1 e 2, desenvolvidos em Balbi (2012), e o algoritmo 3, aqui proposto. Nesta etapa é importante a fase de sensoriamento espectral para detectar redes vizinhas ou redes que estejam causando interferência, além dos canais que estão em uso. Naturalmente são escolhidos os canais vacantes, se existirem, pelo gerenciamento espectral. Caso a BS esteja transmitindo sozinha no canal ela pode utilizar a potência máxima, respeitando as condições para não interferir nos usuários primários e de acordo com as regras impostas pelos órgãos reguladores. Em cenários de compartilhamento de um canal a fase de compartilhamento espectral deve adotar medidas para habilitar a coexistência e a mitigação de interferência através do controle de potência de transmissão. O sistema de geolocalização pode fornecer a distância entre as BS. É importante calcular a distância até a borda de cobertura de cada BS, de forma que a potência de transmissão seja adequada para evitar sobreposição de sinais.

Considerando a modulação OFDMA, os canais TVWS serão tratados como ortogonais, desconsiderando possíveis cenários de interferência entre as transmissões.

O algoritmo 3 mostra o pseudocódigo para reajustar a coloração do grafo. Cada vértice é representado por um AP e as cores, os canais para operação. O algoritmo deve ser aplicado após ser gerado o grafo de interferência e a coloração dos vértices. A complexidade do procedimento é polinomial em função do número de canais disponíveis e do número de vértices. O algoritmo realiza os seguintes passos:

- Como entrada o algoritmo deve receber a lista dos possíveis canais e o grafo de interferência;
- Para cada canal disponível na lista dos possíveis canais é percorrido o grafo de



interferência;

- Tenta-se definir o canal do vértice sem inserir interferência na rede;
- Após terminar os dois laços é selecionado o cenário com o maior número de cores repetidas.

---

**Algoritmo 3:** Pseudocódigo do procedimento para selecionar o canal

---

**Entrada:** SelecionarCanal, (*Grafo*, *ListaDePossiveisCanais*[]).  
*ListaDeGrafos*[];  
**for** cada canal em *ListaDePossiveisCanais*[] **do**  
    **for** cada vertice do *Grafo* **do**  
        *NovoGrafo* ← Tentar definir o canal no vertice sem inserir  
        interferencia na rede;  
        Adicionar *NovoGrafo* em *ListaDeGrafos*[];  
    **end for**  
**end for**  
*Selecionar da ListaDeGrafos*[] o grafo com o maior numero de cores  
repetidas;

---

Em vista dos trabalhos de Wang et al. (2011); Gurney et al. (2008) e a equação 3.1, o calculo do EIRP máximo vai depender da distância entre a BSs e a borda de cobertura de outras BSs, da altura das antenas de transmissão e recepção e o comprimento de onda. Para cada canal que está sendo utilizado pela BS é calculado o EIRP máximo permitido para a rede operar. Considerando o padrão IEEE 802.19.1 esta distância pode ser negociada entre as redes interessadas. Após feito a seleção de canais, as BSs que estão operando no mesmo canal e gerando interferência devem adotar o procedimento de controle de potência de transmissão, através da equação 3.1.

## 4.2 Simulação

Devido ao fato de não existirem implementações de redes IEEE 802.22 nem simuladores com suporte para redes e rádios cognitivos, as simulações foram realizadas utilizando redes IEEE 802.11 para o método de seleção de canais, neste caso, adaptado aos canais ortogonais do padrão IEEE 802.11, 1, 6 e 11. É considerada a largura do canal sendo 40 MHz (Wi-Fi Alliance, 2013). A simulação do algoritmo de seleção de canal foi realizada em parte da rede do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Na rede do instituto é utilizado o SCIFI para gerenciar os APs. A figura 4.1 mostra a distribuição dos sete APs utilizados para realizar as simulações, cada número representa um AP controlado. Os APs 1, 2, 5 e 7 se encontram no segundo andar do instituto, enquanto os outros estão no primeiro andar. Foi utilizado o Iperf para realizar os testes de vazão e o Wavemon para medir o nível do sinal e a qualidade.

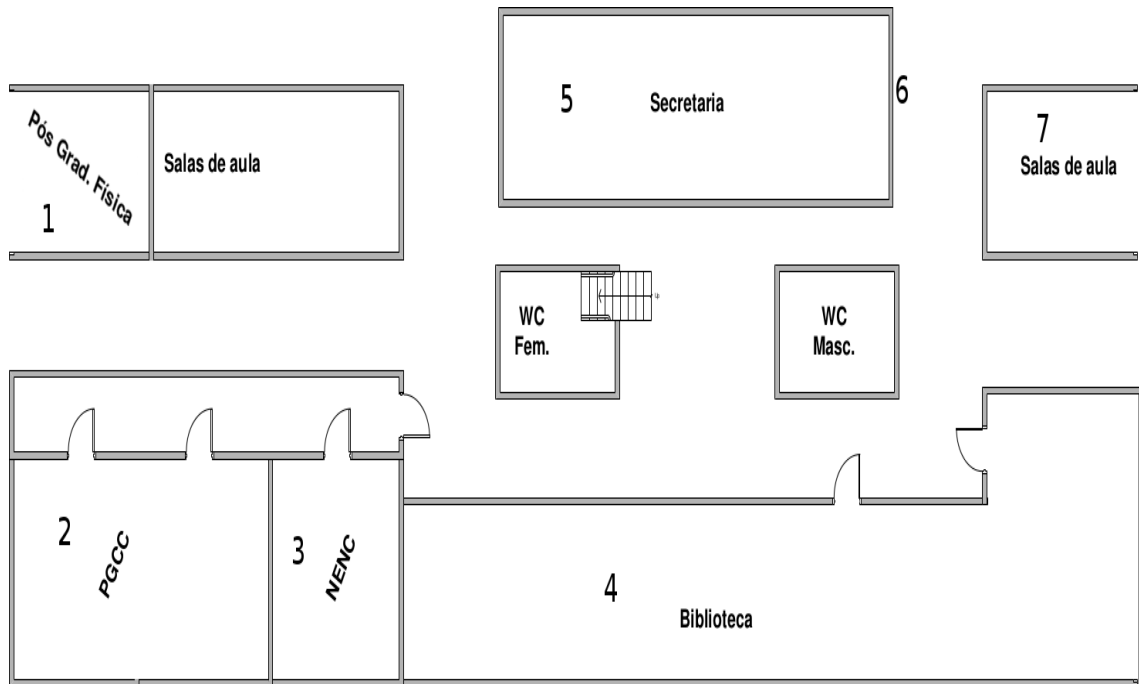


Figura 4.1: Cenário de distribuição dos APs

Na interface do SCIFI foram coletados quais APs enxergam os outros APs, através do sensoriamento espectral, e foi montado o grafo ilustrado na figura 4.2. O número dentro do círculo indica a qual AP se refere. Fora do círculo é o canal antes e depois de aplicar o método proposto neste trabalho.

Sob o controle do SCIFI, o Iperf foi ligado nos APs, em modo servidor, e foi conectado um notebook em cada AP, com o Iperf ligado em modo cliente. Foram gerados tráfegos com pacotes *User Datagram Protocol* (UDP) de 1470 bytes e as amostras de vazão foram coletadas a cada 5 segundos. Foi escolhido o UDP porque o *Transport Control Protocol* (TCP) possui mecanismo de controle de congestionamento que pode causar alterações nos resultados. As primeiras amostras coletadas foram descartadas, considerando algum possível erro que poderia ser causado pela não simultaneidade da ativação do Iperf, já que esta ativação foi manual. Desta forma os dados foram coletados

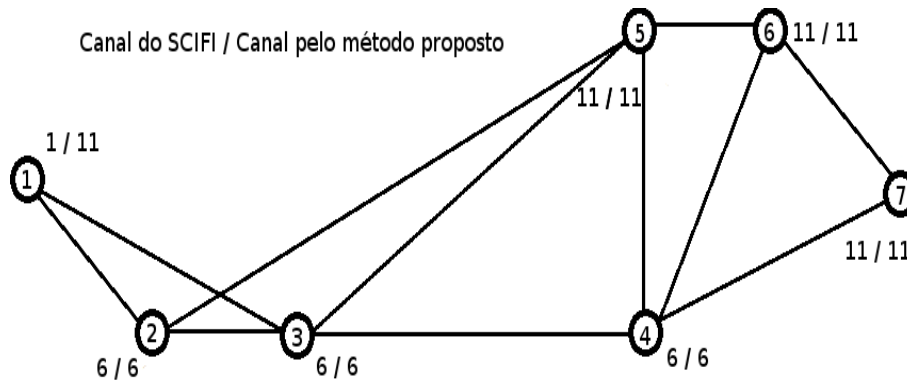


Figura 4.2: Grafo de interferência dos 7 APs

simultaneamente nos sete notebooks. A qualidade do sinal também foi medida neste momento com o Wavemon. A tabela 4.1 mostra o canal de cada AP, o nível do sinal, medido em decibel miliwatt (dbm), e a qualidade. A escala de qualidade adota valores de 0 a 70, medida pelo *driver* da interface sem fio, e representa a qualidade agregada, sendo dependente do *driver* e do *hardware* (RSSI, 2013). O gráfico 4.3 mostra a vazão média (Mbits/s) de cada AP, utilizando os canais da tabela 4.1.

Após o aplicar o método para maximizar a disponibilidade de espectro na rede, o canal do AP 1 foi trocado de 1 para 11, conforme a tabela 4.1, e foi medido o nível do sinal e a qualidade nos APs. O AP 1 aumentou de 40 para 50 sua qualidade, mas não houve grandes diferenças na rede em relação à qualidade e ao nível do sinal. A vazão média dos APs também se manteve estável, conforme o gráfico 4.3. Anteriormente ao método a vazão média da rede foi 17,82 Mbits/s e posteriormente, 18,38 Mbits/s.

Tabela 4.1: Canais e qualidade do sinal

AP	Canal com o SCIFI	Nível do sinal (dBm) com o SCIFI	Qualidade com o SCIFI	Canal com a proposta	Nível do sinal (dBm) com a proposta	Qualidade com a proposta
1	1	-71	40/70	11	-60	50/70
2	6	-80	33/70	6	-73	38/70
3	6	-58	50/70	6	-57	53/70
4	6	-59	52/70	6	-61	48/70
5	11	-47	57/70	11	-57	52/70
6	11	-55	56/70	11	-58	53/70
7	11	-42	65/70	11	-39	68/70

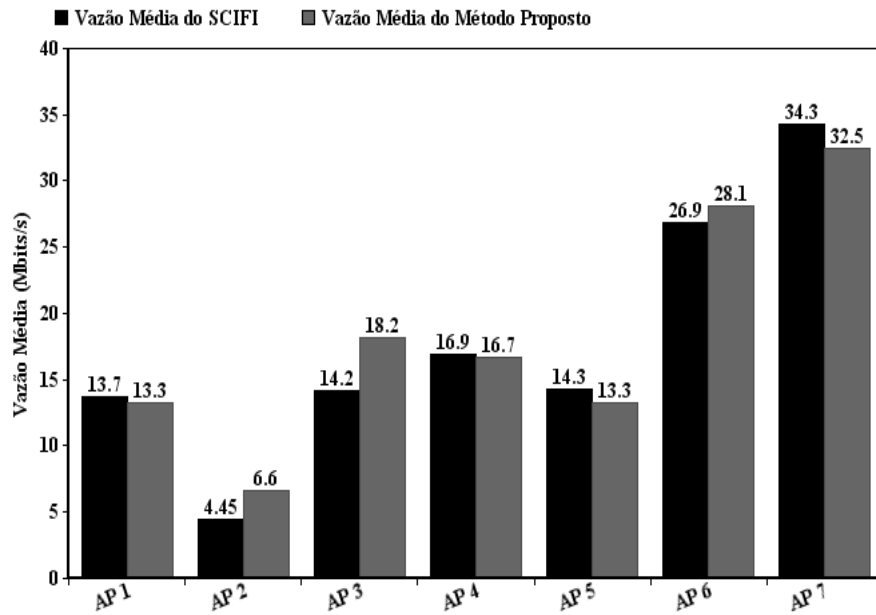


Figura 4.3: Vazão média dos APs

### 4.2.1 Utilidade do Espectro

A partir dos canais utilizados em cada cenário, ilustrados na tabela 4.1, a utilidade do espectro no primeiro cenário foi:

$$U = 1B(C1) + 3B(C6) + 3B(C11) \quad (4.1)$$

Considerando a largura do canal 40 MHz, o canal 1 (C1) corresponde a 40 MHz, o canal 6 (C6) corresponde a 120 MHz e o canal 11 (C11) corresponde a 120 MHz. A utilidade total do espectro resulta em 760 unidades. No segundo cenário a utilidade do espectro foi:

$$U = 0B(C1) + 3B(C6) + 4B(C11) \quad (4.2)$$

Neste caso o C1 corresponde a 0 MHz, C6 corresponde a 120 MHz e C11 corresponde a 160. A utilidade total do espectro resulta em 960 unidades.

O mecanismo mostra que é capaz de aumentar o reuso do espectro de frequência, ou o uso dos canais, e manter a vazão da rede. O método de coloração de grafo utilizado no

---

SCIFI desconsidera o reuso do espectro e trata de redes 802.11. Enquanto que o método aqui proposto visa redes e rádios cognitivos, considerando os padrões IEEE 802.22 e IEEE 802.19.1, e faz o aproveitamento do reuso de espectro, através do cálculo da utilidade do espectro.

## 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Redes e rádios cognitivos oferecem um meio para aproveitar de forma oportunista espectros de frequência subutilizados, enquanto descongestiona espectros sobrecarregados, sem interferir com usuários primários. O IEEE 802.22 é o primeiro documento a padronizar redes e rádios cognitivos para utilizarem espectros de televisão livres, ou TVWS. O padrão IEEE 802.19.1 visa estabelecer mecanismos para coexistência entre redes heterogêneas, especificamente que utilizam TVWS de forma oportunista. A coexistência entre redes é um dos principais problemas a ser tratado. Neste trabalho foi considerado a coexistência entre redes IEEE 802.22 em vista do padrão IEEE 802.19.1, propondo uma abordagem para aumentar a reutilização dos canais de operação.

O método de seleção de canais do projeto SCIFI foi modificado para maximizar a reutilização do espectro de frequência. Como não existem implementações de redes e rádios cognitivos, foi utilizado redes IEEE 802.11 para simular a proposta, correlacionando o controlador central do SCIFI com o CDIS e os APs com o CM e CE, descritos no documento do IEEE 802.19.1. A utilização eficiente e o reuso do espectro de frequência é importante para calcular da distribuição dos canais entre as BSs sem gerar interferências e aplicar parâmetros de QoS e justiça.

Para a simulação foram utilizados sete APs, controlados pelo SCIFI, utilizando o Iperf para gerar tráfegos de dados e posteriormente foram configurados manualmente para adotar os canais do método de maximizar o reuso do espectro de frequência. Os dados contendo a vazão média foram colhidos junto com a medição da qualidade do sinal pelo Wavemon. Os resultados mostraram que a rede continua mantendo uma vazão média similar, 17,82 e 18,38 Mbits/s, e aumentou a reutilização de canais, ou espectros de frequência. O aproveitamento do espectro de frequência foi feito através do cálculo da SU.

Como trabalho futuro considera-se a implementação do algoritmo de reaproveitamento de espectro de frequência no SCIFI, assim como considerar canais não ortogonais na configuração dos APs, levando em consideração a interferência de canais adjacentes.

---

Por exemplo os canais 1 e 5 geram uma pequena interferência entre si, mas a utilização destes canais pode melhorar a vazão da rede.

## Referências Bibliográficas

- Akyildiz, I. F.; Lee, W.-Y.; Vuran, M. C. ; Mohanty, S. **Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey**. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, United States, 2006. Elsevier.
- Balbi, H. D.; Souza, F. R. e.; Albuquerque, C. V. N. d.; Carrano, R. C.; Magalhães, L. C. S. ; Saade, D. C. M. Algoritmo de seleção de canais centralizado para redes ieee 802.11 com controlador. **XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, p. 73–86, 2012.
- BALBI, H. D. **Estudo e implementação de controlador central para pontos de acesso ieee 802.11 de baixo custo**. Niterói, Dezembro 2012. Dissertação de Mestrado - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE.
- Baykas, T.; Kasslin, M. ; Shellhammer, S. **IEEE P802.19 Wireless Coexistence**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, March 2010.
- Bondan, L.; Kist, M.; Kunst, R.; Both, C. B.; Rochol, J. ; Granville, L. Z. **Uma solução para gerenciamento de dispositivos de rádio cognitivo baseada na mib ieee 802.22**. p. 659–672. 31º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2013.
- Cordeiro, C.; Challapali, K.; Birru, D. ; N, S. S. **Ieee 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios**. JOURNAL OF COMMUNICATIONS, 2006.
- Cormio, C.; Chowdhury, K. R. **A survey on mac protocols for cognitive radio networks**. Elsevier, 2009.
- Filin, S.; Baykas, T.; Rahman, M. A. ; Harada, H. **Performance evaluation of ieee 802.19.1 coexistence system**. p. 1–6. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2011.
- Ghosh, C.; Roy, S. ; Cavalcanti, D. **Coexistence challenges for heterogeneous cognitive wireless networks in tv white spaces**. In: Wireless Communications, IEEE, volume 18, p. 22–31. IEEE Communications Society, 2011.
- Gurney, D.; Buchwald, G.; Ecklund, L.; Kuffner, S. ; Grosspietsch, J. **Geo-location database techniques for incumbent protection in the tv white space**. p. 1–9. 3rd IEEE Symposium on new Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008, 2008.
- Haykin, S. **Cognitive radio: brain-empowered wireless communications**. p. 201–220. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005.
- Hosein, P. **Self-optimizing interference management for the ofdma downlink**. volume 20. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.



IEEE. **Installation and Deployment of IEEE 802.22TM Systems**, 2012.

Lu, L.; Li, G. Y. ; Wu, G. Optimal power allocation for cr networks with direct and relay-aided transmissions. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v.12, p. 1373–1377, April 2013.

Musil, S. **Fcc approves google’s white space database operation.** [http://news.cnet.com/8301-1035\\_3-57591699-94/fcc-approves-googles-white-space-database-operation/](http://news.cnet.com/8301-1035_3-57591699-94/fcc-approves-googles-white-space-database-operation/), 2013. Acessado: 02/08/2013.

Nekovee, M. Quantifying the availability of tv white spaces for cognitive radio operation in the uk. 2009.

Paret, D. **RFID at Ultra and Super High Frequencies: Theory and application.** United Kingdom: Wiley, 2009.

Rssi. <http://madwifi-project.org/wiki/UserDocs/RSSI>, 2013. Acessado: 20/08/2013.

Sengupta, S.; Brahma, S.; Chatterjee, M. ; Shankar, N. S. **Self-coexistence among interference-aware ieee 802.22 networks with enhanced air-interface.** volume 9, p. 454–471. Pervasive and Mobile Computing, 2013.

Sousa, M. P.; Lopes, R. F.; Lopes, W. T. A. ; de Alencar, M. S. **Redes cognitivas: Um novo paradigma para as comunicações sem fio.** In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2010), 2010.

Wang, N.; Gao, Y.; Chen, Y.; Bodanese, E. ; Cuthbert, L. A power control algorithm for tv white space cognitive radio system. **IET International Conference on Communication Technology and Application**, v.2011, p. 546–550, October 2011.

Wi-fi alliance. <http://www.wi-fi.org/>, 2013. Acessado: 20/08/2013.