

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA TÉCNICA DE DETECÇÃO DE ENERGIA PARA SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM REDES DE RÁDIO COGNITIVO

Franciele de Vasconcellos Chaves
franciellevc@gmail.com

Rafael Kunst
rkunst@unilasalle.edu.br

Centro Universitário La Salle – Unilasalle – Canoas/RS

RESUMO

Este trabalho trata do estudo das redes de rádio cognitivo, mais especificamente da técnica de detecção de energia existente na função de sensoriamento do espectro. Essa função consiste em obter um melhor aproveitamento das áreas livres do espectro de frequência, buscando solucionar o problema de limitação do espectro. No trabalho em questão será feita uma análise do desempenho da técnica de detecção de energia utilizando diversas métricas, dentre elas, falsos positivos, falsos negativos e variação do limite de detecção de energia.

Palavras-chave: Detecção de Energia, Redes de Rádio Cognitivo, Sensoriamento Espectral

ABSTRACT

This work deals the study of cognitive radio networks, more specifically the technique of energy detection existing in the spectrum sensing function. This function is to obtain a better use of the free areas of the frequency spectrum, seeking to solve the problem of limited spectrum. At work in question is an analysis of the performance of energy detection technique using various metrics, among them, false positives, false negatives and variation of the detection limit of energy.

Keywords: *Cognitive Radio Networks, Energy Detection, Spectral Sensing*

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias, principalmente se tratando de mobilidade, as redes sem fio vem ganhando importância. A necessidade de comunicação e acesso as informações com maior rapidez faz com que determinados recursos, como por exemplo, transmissões de banda larga em ambientes metropolitanos, tornem-se essenciais. Atender a essa demanda com qualidade de serviço, ou seja, garantir o desempenho necessário em termos de transmissão de

dados para cada aplicação utilizada requer recursos de rede, e o principal recurso no ambiente de redes sem fio é o espectro de frequências. (STERLE et. al. 2011).

Existem dois tipos de acesso ao espectro: o licenciado e o não licenciado (STERLE et. al. 2011). No espectro licenciado, as autoridades governamentais reservam as faixas de frequência para diferentes atividades e tecnologias. No espectro não licenciado o uso das frequências é livre.

A alocação do espectro atualmente é realizada de forma estática, ou seja, no espectro licenciado existem usuários primários, como por exemplo, operadoras de telefonia móvel, que possuem a concessão na faixa de frequência. Quando estes usuários não estão realizando transmissão de dados, porções do espectro ficam subutilizadas, o que pode ocasionar o problema da escassez de frequências. Uma forma de trabalhar o problema de escassez de frequências é utilizar a tecnologia do Radio Cognitivo.

As redes de rádios cognitivos são capazes de fornecer acesso de banda larga com suporte a mobilidade para os usuários. Essa capacidade é garantida através de técnicas que permitem o gerenciamento do acesso dinâmico (ou oportunista) ao espectro de frequências (PAWELCZAK et. al. 2008). Esse acesso é caracterizado pela utilização das áreas livres do espectro por usuários secundários, ou seja, usuários que não possuem prioridade sobre a faixa de frequência. No momento em que um usuário primário solicitar a faixa para transmissão, esta deve ser liberada pelo usuário secundário e o usuário primário deve ser realocado. O rádio cognitivo possui quatro principais funções para o gerenciamento do acesso dinâmico que são o Sensoriamento de Espectro, Compartilhamento de Espectro, Mobilidade de Espectro e Decisão de Espectro.

A proposta do trabalho em questão é estudar o comportamento e analisar o desempenho da função de Sensoriamento do Espectro, que possui cinco principais técnicas de sensoriamento, que são a Detecção de Energia, o Formato de Onda, o Cicloestacionário, a Identificação de Rádio e a Filtragem (STERLE et. al. 2011). A análise de desempenho será realizada na técnica de detecção de energia utilizando as métricas de falsos positivos, falsos negativos, variação do número de usuários, variação do número de frequências, variação da relação sinal ruído e variação do limite de detecção de energia.

O restante deste trabalho está organizado da forma que segue. Na Seção 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre rádios cognitivos, bem como trabalhos relacionados ao problema tratado neste trabalho. A Seção 3 apresenta detalhes da modelagem

da simulação. Na Seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos através de simulações. Esta proposta encerra-se na Seção 5 através da conclusão obtida e da sugestão de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A crescente demanda por acesso sem fio e mobilidade por parte dos usuários de redes de informação gera uma sobrecarga no espectro de frequências. Aplicações com abrangência local, como pontos de acesso em aeroportos e outras áreas públicas demandam grandes quantidades de largura de banda para fornecer acesso às redes de informação. A sobrecarga do espectro de frequências é agravada pela crescente utilização das redes sem fio para transmissão de dados em ambientes de longa distância, como é o caso das redes com abrangência metropolitana, WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*) e as redes com alcance às regiões rurais, WRAN (*Wireless Regional Area Networks*). Neste contexto, duas importantes tecnologias são as redes WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), definidas pelo padrão IEEE 802.16 e a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), definida pelo projeto 3GPP. Essas duas tecnologias são consideradas precursoras das futuras redes de quarta geração (4G) (MOSYAGIN, 2010) e podem acessar as frequências do espectro de frequência de forma compartilhada, utilizando redes de rádios cognitivos.

Existem dois tipos de acesso ao espectro de frequências: licenciado e não licenciado. No espectro licenciado, as faixas de frequência são reservadas pelas autoridades governamentais para diferentes atividades e tecnologias. Cada tecnologia que utiliza comunicação de rádio frequência em canais licenciados só pode operar nas frequências alocadas para ela. Essa alocação é definida pelos órgãos reguladores de cada país, como a FCC (*Federal Communications Commission*) nos Estados Unidos, ou a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) no Brasil. Por outro lado, no acesso ao espectro não licenciado há liberdade para o uso comum das frequências. Essas faixas de frequência são chamadas de ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) (AKYILDIZ et. al. 2006).

Atualmente, a política de alocação do espectro de frequências é estática. As autoridades governamentais concedem uma faixa de frequência para um determinado usuário, sem a possibilidade de compartilhamento dessa área com outros usuários. Entretanto, essa política, somada à crescente demanda por faixas do espectro de frequências, está causando a escassez de recursos. Embora essas faixas do espectro estejam alocadas, na prática muitas

delas são utilizadas esporadicamente, o que resulta na subutilização de grande parte do espectro de frequências. Uma das possíveis abordagens para solucionar o problema de subutilização do espectro é o emprego de técnicas de acesso dinâmico ao espectro, também conhecidas como DSA (*Dynamic Spectrum Access*) (FCC, 2003), que consiste em abrir o espectro licenciado aos usuários secundários, limitando a interferência percebida por usuários primários (licenciados), ou seja, permitir que usuários secundários transmitam nas porções subutilizadas do espectro sem causar interferência na transmissão do usuário primário.

A tecnologia que permite a implementação de DSA é o rádio cognitivo, uma vez que provê o compartilhamento do canal de RF entre diversos usuários, tanto licenciados, quanto não licenciados. As redes de rádios cognitivos são capazes de fornecer acesso de banda larga com suporte a mobilidade para os usuários. Essa capacidade é garantida através de técnicas que permitam o gerenciamento eficiente e dinâmico do acesso ao espectro de frequências. Entretanto, as redes de rádio cognitivo apresentam diversos desafios, devido à variabilidade da utilização das faixas de frequência e aos requisitos de QoS (*Quality of Service*) das aplicações. Segundo AKYLDIZ et. al. (2008), os usuários de rádio cognitivo devem implementar quatro técnicas principais a fim de enfrentar esses desafios:

- a) determinar quais faixas de frequência estão disponíveis para transmissão;
- b) selecionar, dentre as faixas de frequência disponíveis a que apresenta melhores condições de transmissão;
- c) coordenar o acesso à faixa de frequência escolhida, evitando colisões com outros usuários da rede de rádio cognitivo;
- d) liberar a faixa de frequência sempre que um usuário licenciado iniciar uma transmissão.

A implementação dessas técnicas viabiliza a implantação de redes de rádios cognitivos. A principal função cognitiva que permite a implementação dessas técnicas é conhecida como Sensoriamento Espectral, sendo detalhada na próxima seção.

2.1 Sensoriamento Espectral

O rádio cognitivo possui funções cognitivas que permitem o gerenciamento eficiente e dinâmico do acesso ao espectro de frequências. O acesso dinâmico ou oportunista nas frequências subutilizadas do espectro é um fator chave que permite prover QoS para

aplicações de redes de rádio cognitivo. A implementação do acesso dinâmico exige que várias técnicas sejam consideradas, especialmente as relacionadas com inteligência artificial. Tais técnicas são aplicadas para selecionar a área mais adequada do espectro que está disponível para a transmissão. Esta seleção envolve a aplicação do rádio cognitivo e da inteligência artificial em conjunto através do uso de funções cognitivas (AKYILDIZ, VURAN, MOHANTY, 2008).

As funções cognitivas permitem disponibilizar informações atualizadas sobre o estado de uma rede de rádio cognitivo. Um dispositivo que utiliza uma rede de rádios cognitivos deve ser capaz de realizar quatro funções principais. Essas funções, chamadas de Sensoriamento Espectral, Compartilhamento Espectral, Mobilidade Espectral e Decisão Espectral são empregadas nas camadas Física e de Enlace do modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*), a fim de permitir o gerenciamento eficiente do acesso ao espectro de frequências. Além disso, uma série de informações é trocada entre essas funções, visando o compartilhamento otimizado do espectro entre os diversos usuários das redes de rádios cognitivos. A principal função cognitiva é a de sensoriamento espectral, visto que permite identificar partes subutilizadas do espectro de frequências.

Essa função consiste em analisar o espectro de frequências, a fim de obter suas características de utilização. A técnica de detecção de energia é a forma mais comum de sensoriamento espectral, uma vez que exige baixo poder computacional e possui implementação simples. Outra característica que aumenta o uso da detecção de energia é que não é necessário conhecimento sobre o sinal dos usuários primários. Nessa técnica, o nível de energia detectado pelo usuário cognitivo é comparado com um limite, a fim de definir se existe transmissão de um usuário primário na faixa de frequência analisada (SRINIVASA et al. 2010).

No entanto, algumas deficiências precisam ser abordadas, como a seleção do limite para detecção de usuários primários, incapacidade de diferenciar a interferência de usuários primários e ruídos e desempenho fraco em cenários com baixa relação sinal ruído (SNR) (BEAULIEU, 2009). Esse desempenho abaixo do esperado ocorre devido a deficiências em canais e devido ao problema do terminal escondido, portanto, o desempenho do algoritmo de detecção pode ser resumido considerando duas probabilidades: a probabilidade de detecção (P_D) e a probabilidade de alarme falso (P_F) (YUCEK, ARSLAN, 2009). P_D é a probabilidade de detectar um sinal na frequência considerada quando está

realmente presente. Por outro lado, P_F é a probabilidade do teste decidir incorretamente que a frequência considerada está ocupada quando na verdade ela não está sendo usada. P_F deve ser pequeno para evitar subutilização de oportunidades de transmissão.

Na análise do método os autores YUCEK e ARSLAN (2009) concluem que como principal vantagem dessa técnica está a baixa complexidade computacional e de implementação. Em contrapartida, o principal problema é a ocorrência de falsos positivos, pois nem sempre é possível distinguir corretamente se uma frequência está de fato ocupada ou livre. Detalhes da detecção de energia estão presentes na seção 3 deste trabalho, que trata da modelagem da simulação e explica fórmulas e conceitos presentes na literatura para a implementação e simulação desta técnica.

2.2 Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos são encontrados na literatura quando se trata de rádios cognitivos. A alternativa mais simples para a detecção de um sinal de ruído é o emprego de detecção de energia. (YUCEK, ARSLAN, 2009). A detecção de energia é considerada a forma mais comum de sensoriamento porque tem baixa complexidade computacional e de implementação. No método de detecção de energia, a energia do recurso de rádio disponível é medida e comparada com um limite pré-definido. Se o nível de energia medido ficar abaixo do limite definido, a faixa de transmissão é marcada como disponível. Quando o nível de energia medida está acima do nível limite do espectro, a frequência de transmissão é considerada ocupada.

O método de detecção de energia não requer qualquer informação prévia do sinal, ou seja, não se preocupa com o tipo de modulação usada para a transmissão de sinal, ou qualquer outro parâmetro de sinal. Ele simplesmente verifica se o recurso de rádio está ou não disponível em determinado instante de tempo. Hipoteticamente, a detecção de energia pode ser considerada como um método baseado em decisão binária. O desempenho do algoritmo de detecção de energia pode ser avaliado de duas formas: pela probabilidade de detecção, ou pela probabilidade de falsos positivos.

Probabilidade de detecção é a probabilidade de detectar um sinal na frequência considerada quando ele realmente está presente, ou seja, identificar este sinal livre na frequência. Probabilidade de falsos positivos é a probabilidade que o teste identifique de forma incorreta quando a frequência está ocupada, ou seja, a probabilidade de que a

frequência seja identificada como ocupada quando ela não está. Essa probabilidade deve ser um valor pequeno para que o algoritmo previna a subutilização das oportunidades de transmissão.

Para determinar as probabilidades de falsos positivos e falsos negativos, é necessário estabelecer o limite de detecção de energia. Na literatura este limite é estabelecido através de uma distribuição chi-quadrado com $2u$ graus de liberdade (DIGHAM et. al. 2003), que será detalhada na seção 3.

O problema dos falsos positivos ocorre porque o limite pré-definido que é utilizado nos algoritmos baseados na detecção de energia depende da variação do ruído. Um pequeno erro na determinação do valor do nível de ruído pode causar uma significativa perda de desempenho, pois uma frequência livre no espectro que seja considerada como ocupada, resulta numa perda de oportunidade de transmissão. Para solucionar este problema, o nível de ruído é estimado dinamicamente separando o ruído e o sinal em subespaços, utilizando o algoritmo de múltipla classificação do sinal (MUSIC). Entretanto, esse algoritmo não é considerado neste trabalho, pois considera-se somente analisar a métrica de falsos positivos.

3. MODELAGEM DA SIMULAÇÃO

O trabalho em questão foi desenvolvido com o objetivo de modelar e simular a técnica de sensoriamento do espectro conhecida como detecção de energia presente na função de sensoriamento espectral em redes de rádio cognitivo.

A figura 1 apresenta a modelagem da simulação, composta por cada elemento presente em uma rede de rádio cognitivo. O primeiro item a se observar é que o rádio cognitivo possui quatro principais funções que são o Sensoriamento de Espectro, o Compartilhamento de Espectro, a Mobilidade de Espectro e a Decisão de Espectro.

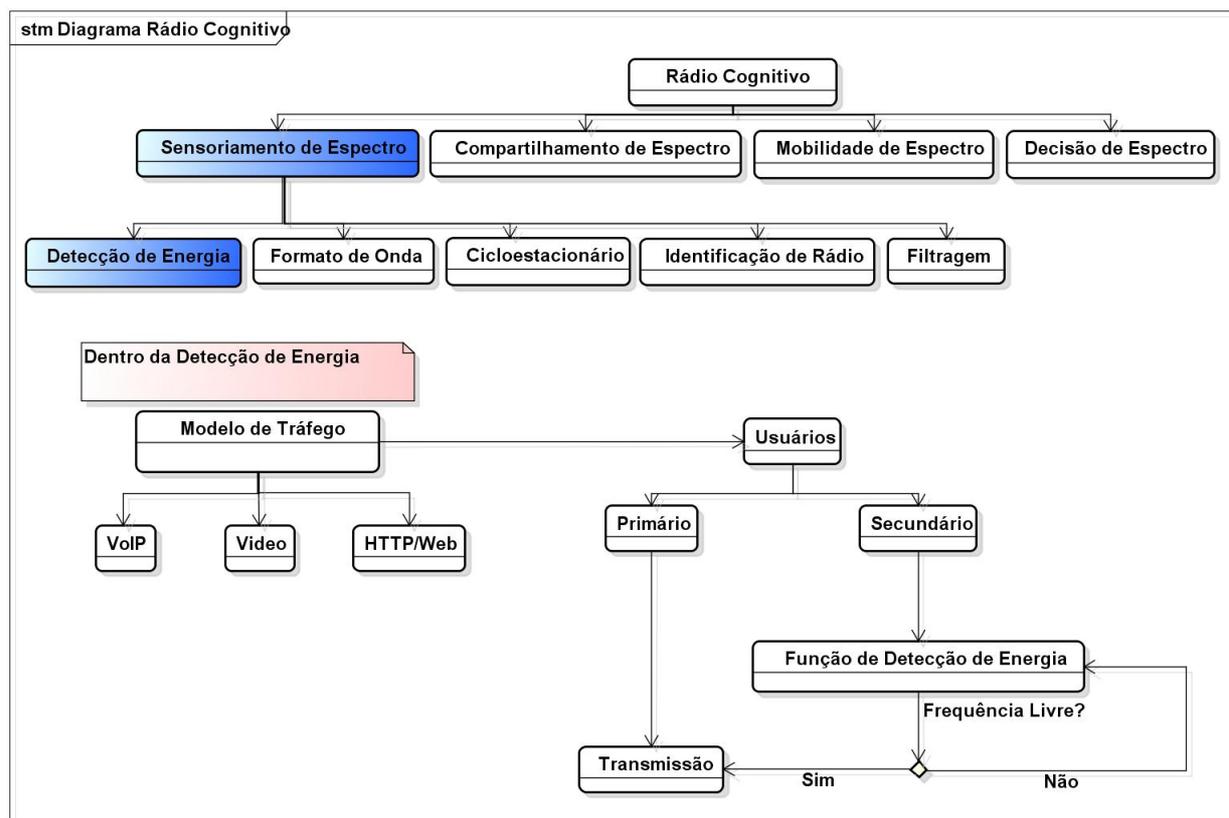
O Sensoriamento de Espectro pode ser de dois tipos: não cooperativo ou cooperativo. Neste trabalho o tipo utilizado é o não cooperativo, pois é o mais empregado atualmente, e este é dividido em cinco principais técnicas que são a Detecção de Energia, o Formato de Onda, o Cicloestacionário, a Identificação de Rádio e a Filtragem, sendo a análise de desempenho realizada na técnica de Detecção de Energia.

O funcionamento do espectro em redes de rádio cognitivo consiste na idéia de que cada usuário primário tem o direito sobre a frequência e, portanto, tem prioridade. Entretanto,

quando há espaços em branco, os usuários secundários podem utilizar temporariamente a frequência do usuário primário. Por exemplo, pode-se ter um usuário com rádio cognitivo (usuário secundário) transmitindo. Quando ele percebe a presença do usuário primário ele passa para outra frequência e continua transmitindo. Novamente, quando ele percebe a presença de outro usuário primário, ele passa para outra faixa de frequência livre.

A técnica de Detecção de Energia é considerada de implementação simples e de baixa complexidade computacional. Na implementação foram utilizados modelos de tráfego para simular a transmissão de usuários nas aplicações VoIP, Video e HTTP. Na simulação realizada, dentre os parâmetros de entrada estão o número de usuários realizando transmissão e disputando frequências, e deste número de usuários, quantos estarão transmitindo nas aplicações VoIP, Video e HTTP. Esses modelos de tráfego serão detalhados na seção seguinte, bem como detalhes da implementação da técnica de Detecção de Energia.

Figura 1 – Diagrama da modelagem



Fonte: Autoria própria.

3.1 Modelos de Tráfego

Três modelos de tráfego são desenvolvidos para associar as características de ertPS, rtPS, BE e classes de serviço com, respectivamente, VoIP, vídeo e aplicações HTTP.

Essa associação entre as classes de serviço e os aplicativos é baseada sobre os trabalhos propostos por SO-IN et. al. (2009). Além disso, o tráfego e o modelo de requisição de conexão usados para descrever o comportamento dessas aplicações são baseados no documento *System Evaluation Methodology*, publicado pelo Fórum WiMAX (WiMAX Fórum, 2008). Os modelos de tráfego para cada aplicação são descritos nos próximos três tópicos.

3.1.1 Modelo de Tráfego VoIP

Os parâmetros do codec amr (*adaptive multi rate*) são usados para modelar o tráfego voip, ou seja, considera-se um tráfego de voz com supressão de silêncio. Os parâmetros do modelo de tráfego voip são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do codec AMR

Parâmetros	Valores
Tamanho da rajada de voz (ON)	Exponencial, $\mu = 1026\text{ms}$
Tamanho do silêncio (OFF)	Exponencial, $\mu = 1171\text{ms}$
Intervalo de tempo de transmissão	20ms

Fonte: Adaptada de WiMAX Forum, 2008.

A aplicação VoIP se comporta como um modelo de fonte ON/OFF. Em outras palavras, são PDUs transmitidos durante o período ON e somente o ruído de conforto é enviado durante o período OFF. Períodos ON e OFF do codec AMR seguem uma distribuição de probabilidade exponencial, com valores médios de 1026ms para o período ON e 1171ms para o período OFF. Além disso, o modelo de tráfego VoIP considera o intervalo de tempo de transmissão de 20ms e os cabeçalhos dos protocolos de transporte, como *Real-time Transport Protocol* (RTP), *User Datagram Protocol* (UDP) e IP, são compactados.

3.1.2 Modelo de Tráfego Vídeo

Uma aplicação de Vídeo é caracterizada como um vídeo curto, geralmente musical ou de natureza publicitária. Nesse tráfego, aspectos como codec de vídeo e tamanho de exibição influenciam no tamanho do arquivo de vídeo transmitido entre BS e MSs. Os parâmetros considerados para o modelo de tráfego Vídeo são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do modelo de tráfego Vídeo

Parâmetros	Valores
Tamanho do vídeo	Exponencial truncado Média 15s, Max = 60s
Codec de vídeo	MPEG-4
Tamanho da exibição	176 x 144
Tamanho médio de frame compactado	2.725 Kbytes

Fonte: Adaptada de WiMAX Forum, 2008.

Os valores dos parâmetros utilizados no modelo de tráfego podem mudar de um traço de vídeo para outro. Neste contexto, os valores sugeridos pelo WiMAX Forum (WiMAX Fórum, 2008) são considerados. A duração de um vídeo é determinada pela distribuição exponencial truncada, com duração média de 15s e período máximo de 60s. O codec MPEG-4 é escolhido devido ao seu largo uso e capacidade de compressão. Além disso, considera a geração de 25 frames por segundo e tamanho da visualização de 176 x 144 pixels. O tráfego de vídeo é modelado com a transmissão de arquivos, encapsulados dentro do protocolo FTP. Neste caso, o período entre a transmissão de dois vídeos diferentes se comporta como uma distribuição exponencial, com média igual a 180s.

3.1.3 Modelo de tráfego HTTP

O tráfego HTTP é modelado usando sessões típicas de navegação na web. Neste contexto, cada página web consiste em uma série de objetos, como uma página principal e objetos incorporados.

A sessão está dividida em períodos de ON/OFF representando downloads de páginas web e o tempo de leitura. O download da página web e cada um dos objetos constituintes é

representado pelo período ON, enquanto os tempos de análise e sobrecarga de protocolo são representados pelos períodos OFF. O tempo de leitura é o período entre o acesso de duas páginas web e inclui o tempo para o usuário ler a totalidade ou parte da página web.

Os parâmetros de tráfego HTTP são apresentados na tabela 3, onde "SD" significa o valor do desvio padrão, "Min" representa o valor mínimo, e "Max" é o valor máximo. Além disso, os valores das Funções Densidade de Probabilidade (PDF) são mostrados, considerando as recomendações do WiMAX Fórum (WiMAX Fórum, 2008).

Tabela 3 - Parâmetros do tráfego HTTP

Componente	Distribuição	Parâmetros	PDF
Tamanho da página principal	Lognormal truncado	Média = 10710 bytes SD = 25032 bytes Min = 100 bytes Max = 2 Mbytes	$\delta = 1.37$ $\mu = 8.37$
Tamanho do objeto embutido	Lognormal truncado	Média = 7758 bytes SD = 126168 bytes Min = 50 bytes Max = 2 Mbytes	$\delta = 2.36$ $\mu = 6.17$
Número de objetos embutidos na página	Pareto truncado	Média = 5.64 Max = 53	$\delta = 1.1$ $\mu = 55$
Tempo de leitura	Exponencial	Média = 30s	$\mu = 0.033$
Tempo de parse	Exponencial	Média = 0.13s	$\mu = 7.69$

Fonte: Adaptada de WiMAX Forum, 2008.

3. 2 Implementação da Detecção de Energia

Visando cumprir os objetivos propostos, foi realizada a implementação da técnica de Detecção de Energia para analisar e determinar a eficiência para o sensoriamento do espectro nas redes de rádios cognitivos.

A implementação do algoritmo foi realizada no software GNU Octave, rodando no sistema operacional Windows. O software GNU Octave originalmente roda somente por

linha de comando, mas para Windows existe uma IDE de desenvolvimento chamada GUI Octave, tornando-o bastante semelhante ao MATLAB.

Para a simulação foi adotado como padrão a parte física do WiMAX (WiMAX Fórum, 2008). Além disso, outros parâmetros foram utilizados na simulação, tais como limite de detecção de energia, número de usuários, valores de SNR e tempo de simulação são descritos na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros da simulação

Parâmetros	Valores
Largura de banda	10MHz
Duração do quadro	5ms
Tamanho total da FFT	1024 subportadoras
FFT para dados	720 portadoras
Prefixo cíclico	1/8
Limite de Detecção	20.09V
Trafego (VoIP, HTTP e Video)	1/3 de cada classe de serviço
Número de usuários	10, 20, 30, 40 e 50
SNR	1, 5, 10, 15 e 20 dB
Tempo de simulação	10s
Ruído	AWGN
Modulação	BPSK
Frequência	Variável de 5 a 35 (aleatoriamente)

Fonte: Autoria própria, 2011.

A detecção de energia é uma maneira otimizada de detectar sinais transmitidos, quando a informação do sinal primário é desconhecido para os usuários secundários. A técnica mede a energia do sinal recebido ao longo de um tempo de observação especificado (DIGHAM et. al. 2003). Na literatura, encontra-se vários algoritmos indicando que a detecção de energia pode ser implementada tanto no domínio do tempo como também no domínio da frequência usando a transformada de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*).

Para determinar o sinal transmitido, é utilizada a seguinte fórmula (YUCEK, ARSLAN, 2009):

$$y(n) = s(n) + w(n) \quad (1)$$

Onde $s(n)$ é o sinal a ser transmitido e $w(n)$ é o ruído, sendo que $s(n)$ é sempre zero quando não tem transmissão ativa no canal. No caso específico deste trabalho, o ruído é modelado através do modelo AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) ou ruído branco aditivo Gaussiano. A informação transmitida considera a utilização de modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). A detecção de energia ou decisão estatística pode ser escrita como segue:

$$M = \sum_{n=0}^N |y(n)|^2 \quad (2)$$

A fórmula define a energia do sinal detectado em volts ao quadrado – devido a transformação em energia - onde N é o tamanho do vetor de observação. A detecção de energia em redes de rádio cognitivo segue um método baseado em decisão binária, testando duas hipóteses possíveis: hipótese H_0 (sinal ausente) e hipótese H_1 (sinal presente). O sinal recebido para a hipótese binária pode ser dado como:

$$y(n) = \begin{cases} w(n) & : H_0 \\ s(n) + w(n) & : H_1 \end{cases} \quad (3)$$

No sensoriamento de espectro, o rádio cognitivo visa atingir um certo nível de probabilidade de falsos positivos (P_F), que indica a eficiência do uso do espectro. Uma elevada probabilidade de falsos positivos leva ao uso ineficiente do espectro, pois isso significa que muitas bandas de espectro ocioso são detectadas como utilizadas pelo usuário principal, e dessa forma, o rádio cognitivo não pode usar essas faixas do espectro, ocasionando assim a diminuição da eficiência do uso do espectro. Por essa razão, é importante analisar o desempenho de detecção de um sistema. A fórmula que representa a probabilidade de falsos positivos pode ser definida como:

$$P_F = \Pr(M > \lambda | H_0) \quad (4)$$

A probabilidade de detecção (P_D) é a probabilidade do algoritmo detectar um sinal na frequência quando ela realmente estiver ocupada, ou seja, detectar uma banda como utilizada pelo usuário principal, quando este realmente estiver transmitindo. A fórmula que representa essa probabilidade é definida como:

$$P_D = \Pr(M > \lambda | H_1) \quad (5)$$

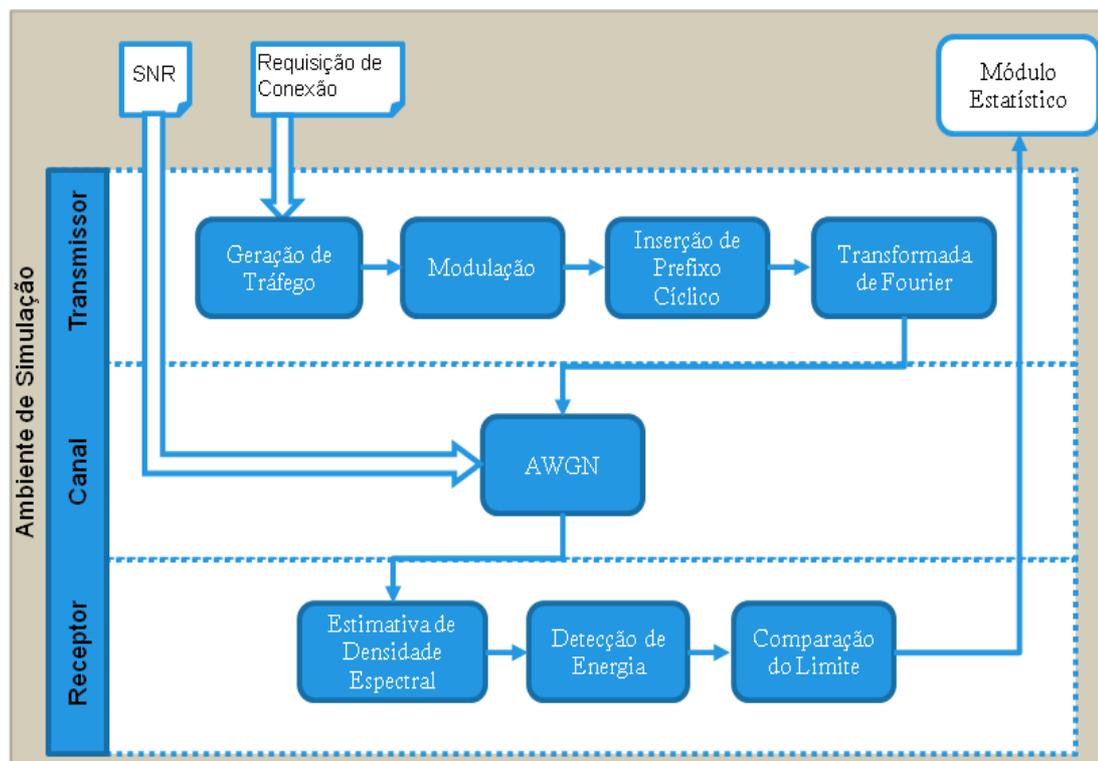
Nas fórmulas de probabilidade de detecção e probabilidade de falsos positivos, o λ se refere ao limite de detecção de energia que pode ser definido como uma distribuição qui-quadrado com $2u$ graus de liberdade, que pode ser representada da seguinte forma (DIGHAM et. al. 2003):

$$u = \frac{B}{2} - 1 \quad (6)$$

Onde B representa a largura de banda do canal de transmissão. Na simulação realizada, o valor utilizado para B foi 10 MHz, pois este é o padrão da tecnologia *WiMAX* (*WiMAX* Fórum, 2008). Para a probabilidade de alarmes falsos, foi utilizado o valor de $P_F = 0.01$. Como limite de detecção de energia foi obtido o valor de $20.09V^2$.

Na figura 2 podemos visualizar o ambiente de simulação como um todo, aplicando as fórmulas detalhadas anteriormente para a implementação do algoritmo de detecção de energia.

Figura 2 – Ambiente de simulação



Fonte: Autoria própria.

A figura 2 descreve o ambiente de simulação utilizado nesse trabalho. O ambiente foi projetado de forma modulada, sendo a divisão feita em três módulos: módulo do transmissor, módulo do canal e módulo do receptor. A simulação inicia no módulo do transmissor, no qual ocorre a geração de tráfego que é obtida a partir dos modelos de tráfegos presentes na implementação. Esses modelos geram tráfego para aplicações http, voip e video, tendo as informações de tráfego, que consistem em número de bits transmitidos e tempo em que esses bits foram transmitidos, os usuários secundários que disputam as frequências solicitam requisições de conexão. Em seguida é feita a modulação do sinal recebido, sendo utilizada para isso a modulação bpsk. Essa modulação utiliza um sinal senoidal, e varia a sua frequência para transmitir a informação. Cada símbolo é sinalizado pela mudança da fase do sinal senoidal, sendo que a fase pode assumir dois valores.

tendo o sinal modulado, o próximo passo é a inserção do prefixo cíclico, que busca solucionar o problema do multipercurso. Para entender como o prefixo cíclico pode ser usado para solucionar o problema do multipercurso, deve-se lembrar que quando o símbolo enviado sofre a ação do canal, o resultado tem duração maior que o símbolo original. Esse aumento de duração provocaria interferência num símbolo seguinte se este fosse enviado imediatamente após o anterior. Um prefixo cíclico é uma cópia da parte final de um símbolo ofdm que é concatenada a ele em sua parte inicial. Com a inclusão do prefixo cíclico, esse acréscimo que o canal causa nos símbolos transmitidos influenciará apenas a posição ocupada por esse prefixo e o símbolo seguinte não sofrerá influência alguma.

a próxima etapa após a inserção do prefixo cíclico é aplicar a transformada de fourier, o que consiste em decompor o sinal nas suas componentes em frequência e amplitudes, finalizando o processo no módulo do transmissor. No módulo do canal é aplicado o ruído awgn sobre o sinal transmitido, sendo que o awgn depende da relação sinal ruído do canal. Após essa etapa, a simulação passa pelo módulo do receptor onde é realizada a estimativa de densidade espectral. Realizada a estimativa, a função de detecção de energia é chamada, sendo a função responsável por fazer a comparação do limite de detecção de energia. Estando acima do limite de detecção, existe transmissão, estando abaixo do limite, não existe transmissão. Por fim, com as informações obtidas, temos o módulo estatístico, que consiste nos logs e informações obtidas na simulação, que serão detalhadas na próxima seção.

3.2.1 Ferramenta de Simulação

O GNU Octave é um programa que utiliza linguagem computacional e é aplicado em computação matemática. Ele utiliza uma interface de linhas de comando, onde é realizada a solução de problemas numéricos, lineares e não lineares e também aplicadas à experimentos numéricos. Foi desenvolvido por John W. Eaton, e possui ampla compatibilidade com o MATLAB, visto que possui várias funções semelhantes. O Octave é escrito em C++ e utiliza bibliotecas STL, o que o torna extensível, através da utilização de módulos carregáveis. O programa trabalha em conjunto com o Gnuplot e Grace, que são softwares responsáveis por gerar / plotar gráficos

A ferramenta foi escolhida pelo fato de não necessitar licença para uso e pela portabilidade, já que o executável é bastante leve. Isso se deve ao fato de que, diferentemente de ferramentas semelhantes, como por exemplo, MATLAB, os pacotes de funcionalidades mais específicas são instalados a parte. Para a simulação realizada neste trabalho, foi necessário instalar o pacote *communications*, porém, alguns pacotes dependem de funcionalidades fornecidas por outros pacotes para funcionar corretamente. Portanto, é necessário instalar as dependências do pacote. No caso do *communications* as dependências são: (I) *struct-1.0.9.tar.gz*, (II) *miscellaneous-1.0.11.tar.gz*, (III) *specfun-1.0.9.tar.gz*, (IV) *optim-1.0.16.tar.gz* e (V) *signal-1.0.11.tar.gz*. Ao final da instalação destes pacotes, é possível instalar o *communications-1.0.10.tar.gz*. Esses pacotes são compatíveis com o GNU Octave na versão 3.2.4.

Juntamente com o GNU Octave, foi utilizada a interface gráfica GUI Octave. Essa interface utiliza linguagem de alto nível e lida com a principal desvantagem do GNU Octave, que é o fato de rodar apenas por linha de comando. A GUI Octave permite trabalhar facilmente com GNU Octave em uma interface de usuário familiar, sem se preocupar com a interface de linha de comando. Uma desvantagem dessa interface é o fato de rodar somente em Windows (nas versões Windows 2000/XP/Vista/7).

Para a geração dos gráficos foi utilizado o Gnuplot, que é um programa que permite plotar os gráficos de funções matemáticas em duas ou três dimensões, e outros conjuntos de dados. Originalmente, também é um programa de linha de comando, mas na versão utilizada pela GUI Octave (WGnuplot), possui interface gráfica.

O Gnuplot pode gerar saídas diretamente na tela, ou em diversos formatos de arquivos gráficos, incluindo PNG, EPS, SVG, JPEG e outros. Ele também é capaz de produzir código

LaTeX que pode ser incluído diretamente nos documentos, fazendo uso de fontes LaTeX e poderosas habilidades com fórmulas. O programa pode ser usado tanto interativamente quanto através de *scripts* em lote (*batch mode*). É um software bem documentado e possui muitos fóruns na web que discutem sua utilização.

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através da implementação, simulação e análise da técnica de detecção de energia para sensoriamento do espectro em redes de rádio cognitivo.

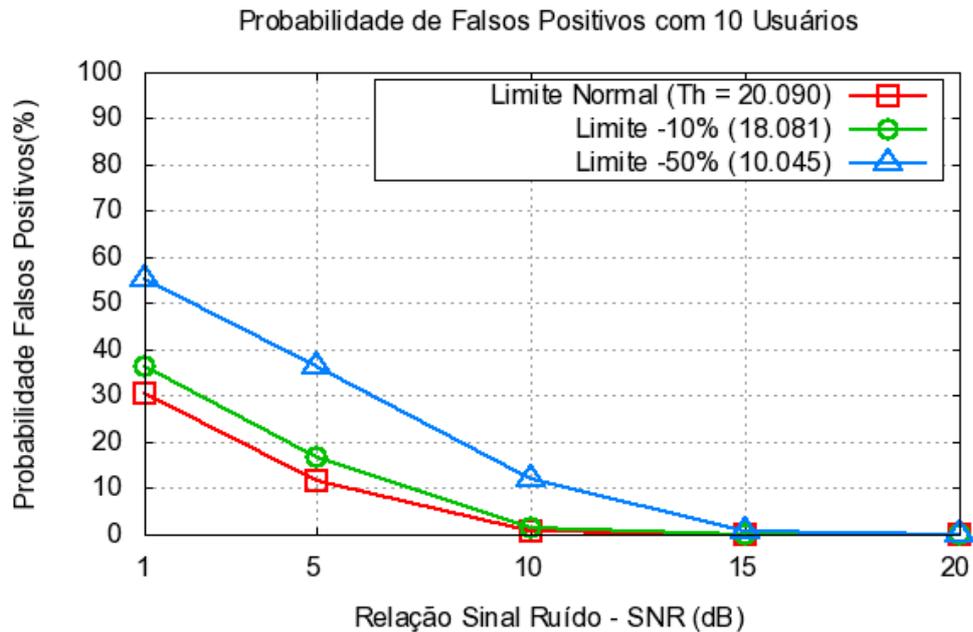
As métricas utilizadas para análise do desempenho da técnica foram as seguintes:

- a) falsos negativos;
- b) falsos positivos;
- c) variação do número de usuários;
- d) variação da relação sinal ruído;
- e) variação do limite de detecção de energia;
- f) variação de frequências.

Para a métrica de falsos negativos foi obtido como resultado a probabilidade zero de ocorrência. Isso mostra que o limite de detecção de energia está adequado. Outro aspecto que colabora para esse fato é que o AWGN é um ruído aditivo, ou seja, ele sempre incrementa a energia. A ocorrência de falsos negativos somente seria causada por um ruído destrutivo, como por exemplo, ruído em rajada. Neste trabalho, o modelo definido não considerava utilizar um ruído destrutivo, somente o AWGN e por isso, não foi possível demonstrar a ocorrência de falsos negativos.

No gráfico 1 pode-se visualizar a probabilidade de falsos positivos utilizando 10 usuários, sendo 5 usuários da classe de serviço VoIP, 3 usuários HTTP e 2 usuários de Video. A variação da probabilidade ocorre de acordo com a variação da relação sinal ruído. Também é feita uma variação do limite de detecção de energia. O limite original é de $20.09V^2$, e no gráfico também é possível visualizar o valor do limite original menos 10% ($18.081V^2$) e o valor do limite original menos 50% ($10.045V^2$).

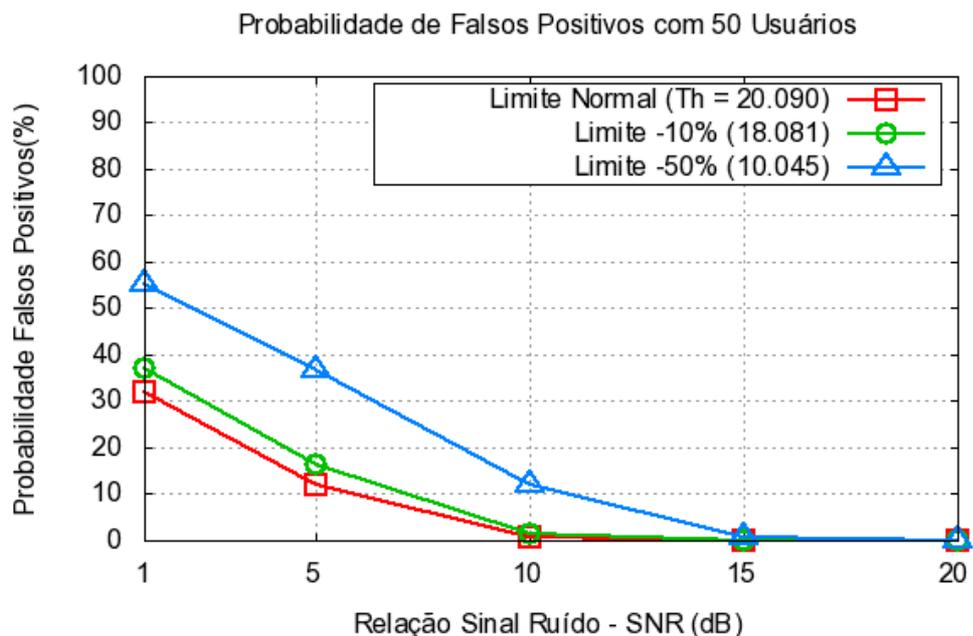
Gráfico 1 - Probabilidade de Falsos positivos com 10 usuários



Fonte: Autoria própria.

O gráfico 2 é apresentado na sequência mantendo as mesmas características descritas no gráfico 1, porém a probabilidade de falsos positivos é analisada para 50 usuários, sendo 20 usuários da classe de serviço VoIP, 20 usuários HTTP e 10 usuários de Vídeo.

Gráfico 2 - Probabilidade de Falsos positivos com 50 usuários

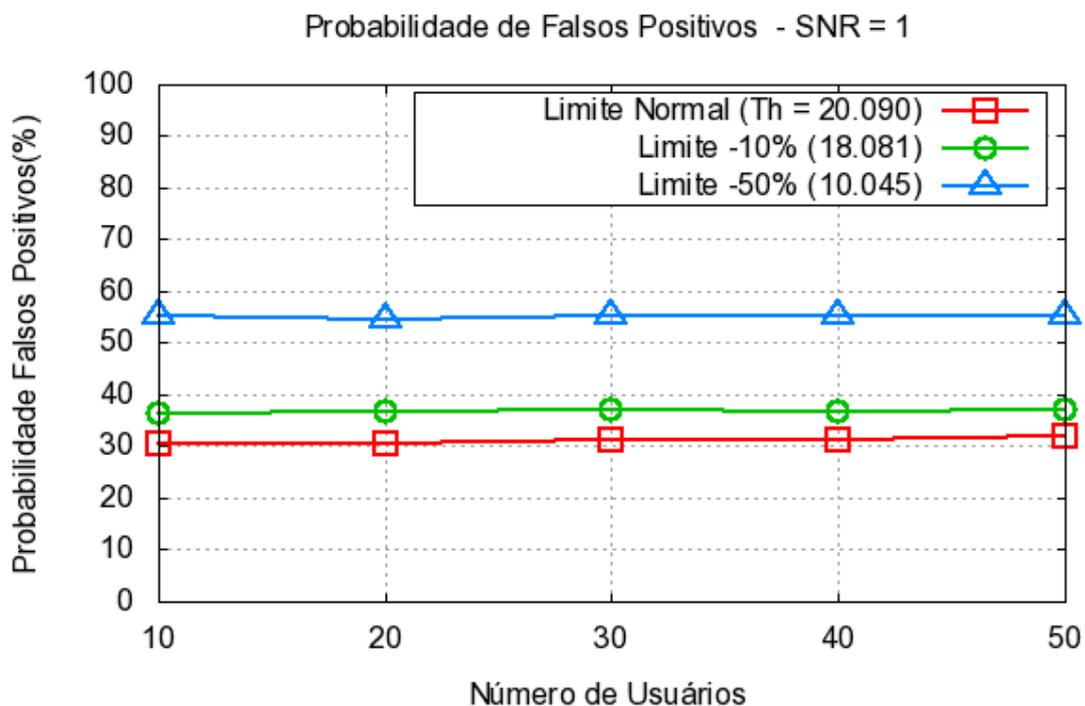


Fonte: Autoria própria.

É possível observar tanto no gráfico 1 quanto no gráfico 2 que com o aumento da qualidade do canal, ou seja, um maior valor de relação sinal ruído, a probabilidade de falsos positivos diminui. Também é possível observar que conforme o limite de detecção de energia varia, a probabilidade de falsos positivos aumenta. No caso do gráfico 1, entre o limite original ($20.09V^2$) e o limite original menos 10% ($18.081V^2$) tem-se um aumento de 6% na ocorrência de falsos positivos. Já na comparação entre o limite original menos 10% e o limite normal original 50% ($10.045V^2$) tem-se um aumento de 18% na ocorrência de falsos positivos.

Avaliando o gráfico 2, entre o limite original ($20.09V^2$) e o limite original menos 10% ($18.081V^2$) tem-se um aumento de 5%, enquanto na comparação do limite original 10% e o limite original menos 50% ($10.045V^2$) o aumento na ocorrência de falsos positivos se mantém em 18%.

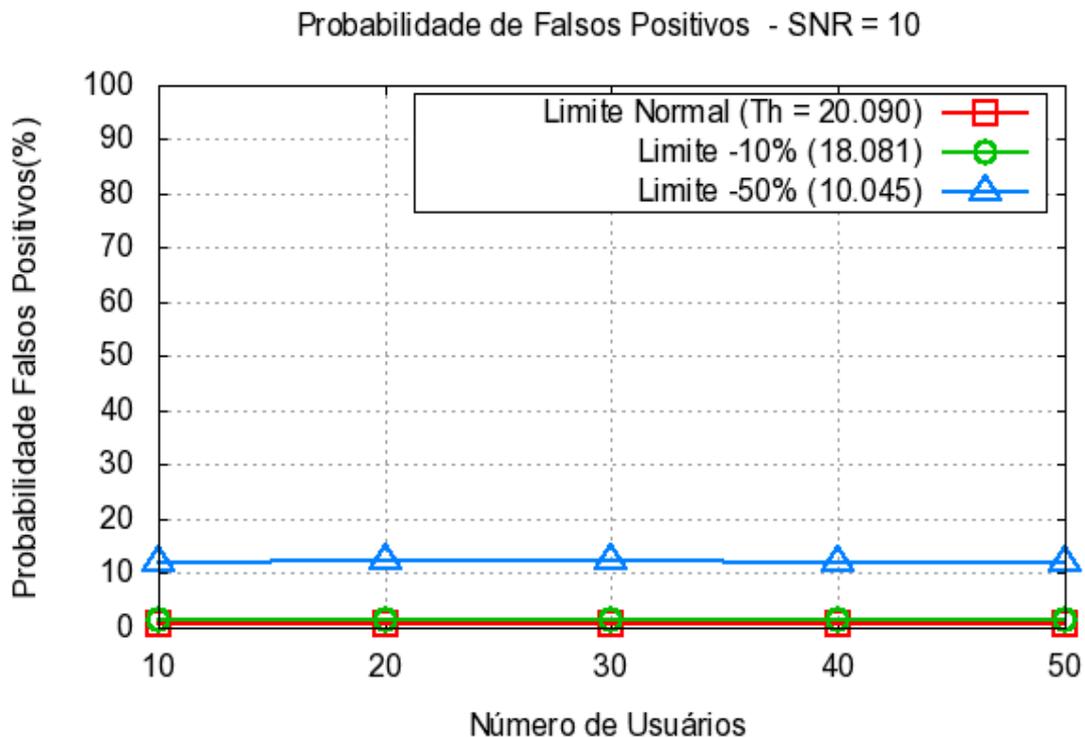
Gráfico 3 - Probabilidade de Falsos positivos – SNR = 1 dB



Fonte: Autoria própria.

No gráfico 3 pode-se visualizar a probabilidade de falsos positivos considerando o número de usuários transmitindo num canal com relação sinal ruído igual a 1 dB, enquanto no gráfico 4 o canal possui relação sinal ruído igual a 10 dB.

Gráfico 4 - Probabilidade de Falsos positivos – SNR = 10 dB



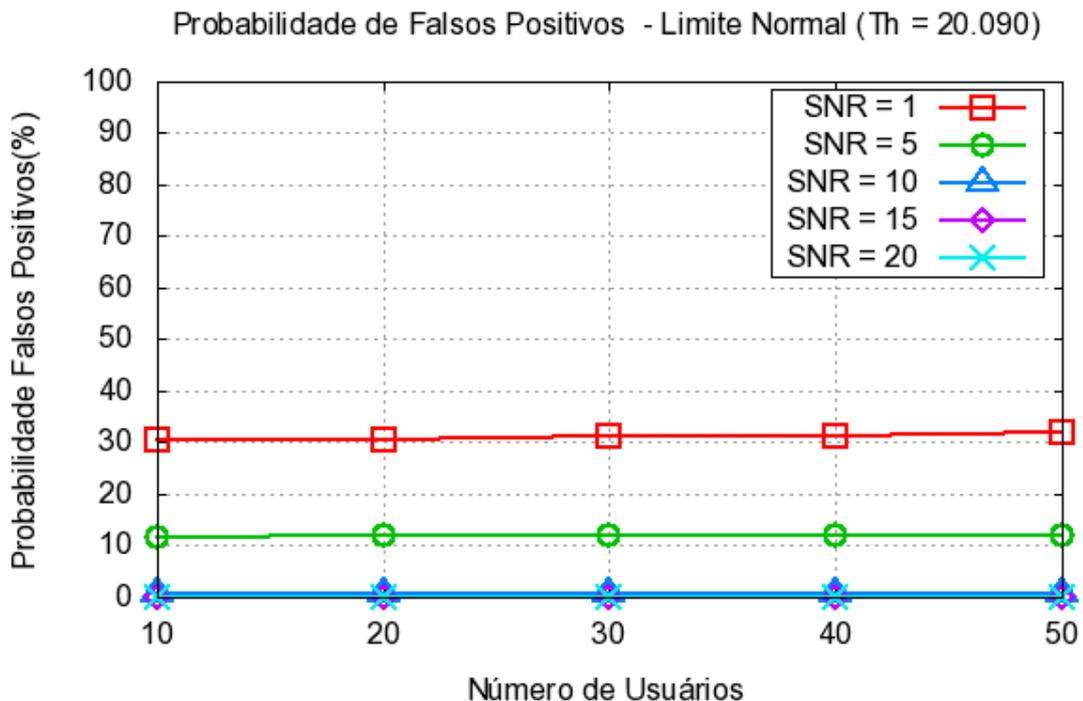
Fonte: Autoria própria.

Analisando os gráficos 3 e 4 pode-se observar que não há impacto na probabilidade de falsos positivos quando o número de usuários é modificado, mas sim, quando o valor da relação sinal ruído é alterada. No gráfico 3, em que a relação sinal ruído é igual a 1 dB, o aumento da probabilidade de falsos positivos entre o limite original ($20.09V^2$) e o limite original menos 10% ($18.081V^2$) é de 7%, enquanto na comparação entre o limite original menos 10% e o limite original menos 50% ($10.045V^2$) o aumento na ocorrência de falsos positivos se mantém em 18%.

No gráfico 4, em que a relação sinal ruído é igual a 10 dB, entre o limite original ($20.09V^2$) e o limite original menos 10% ($18.081V^2$) tem-se um aumento de 0,91% na

ocorrência de falsos positivos, enquanto na comparação entre o limite original menos 10% e o limite normal original menos 50% ($10.045V^2$) o aumento vai para 11%.

Gráfico 5 - Probabilidade de Falsos positivos – SNR e Número de Usuários



Fonte: Autoria própria.

No gráfico 5 é possível visualizar a probabilidade de falsos positivos variando de acordo com o número de usuários e relação sinal ruído utilizada. Neste gráfico apenas o limite de detecção de energia original ($20.09V^2$) é considerado.

A análise realizada demonstra que quanto menor o SNR maior a ocorrência de falsos positivos. Isso pode ser observado entre o SNR igual a 10 dB e o SNR igual a 5 dB, onde há um aumento de 9% na ocorrência de falsos positivos. Já entre o SNR igual a 5 dB e o SNR igual a 1 dB o aumento é de 19%.

A partir dos gráficos gerados na simulação, é possível chegar aos seguintes conceitos:

- cenários com uma relação sinal ruído alta podem evitar a ocorrência de falsos positivos;
- o limite de detecção de energia está bastante adequado pelos resultados apresentados;

- c) considerando o limite encontrado na literatura, pode-se dizer que a técnica de detecção de energia trabalha melhor em cenários no qual a relação ruído seja superior a 15 dB;
- d) o número de usuários não tem influencia sobre o resultado, pois não afeta o comportamento da relação ruído;
- e) reduzindo o valor do limite ou da relação sinal ruído, tem-se uma maior ocorrência de falsos positivos;
- f) os resultados obtidos não são válidos para análise de qualidade de serviço (QoS – *Quality Of Service*), pois um maior número de usuários pode levar a *starvation*.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A proposta de redes de rádios cognitivos é relativamente recente no Brasil, mas bastante evoluída no exterior. Muitas pesquisas estão sendo feitas para que seja definida uma implementação viável, mas para isso, muitas regras governamentais precisarão ser revistas.

Apesar disso, não há dúvidas quanto às vantagens dessa tecnologia, como minimizar o problema da limitação da frequência do espectro e potencializar o desempenho das comunicações sem fio em geral. Isso pode ser observado no trabalho em questão, no qual foi realizada a implementação, simulação e análise da técnica de detecção de energia para sensoriamento espectral.

Baseado nos resultados, é possível afirmar que a técnica de detecção de energia trabalha melhor em cenários com relação sinal ruído maior que 15 dB e que considerando a literatura, foi possível chegar num valor adequado para o limite de detecção de energia na simulação. Além disso, pode-se concluir que quanto menor a relação sinal ruído do canal, maior a probabilidade de ocorrência de falsos positivos e também que o número de usuários não influencia esta probabilidade.

Para trabalhos futuros, são apresentadas algumas possibilidades baseadas no estudo realizado sobre o sensoriamento espectral:

- a) implementar e simular outras técnicas de sensoriamento espectral, como por exemplo, o sensoriamento cicloestacionário;

- b) na implementação da técnica de detecção de energia, utilizar também um ruído destrutivo para que seja possível identificar um valor maior que zero para a probabilidade de falsos negativos;
- c) propor um novo modelo de detecção combinando técnicas existentes, como por exemplo, detecção de energia e cicloestacionário para evitar a probabilidade de alarmes falsos.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, I.; VURAN, M.; MOHANTY, S. A survey on spectrum management in cognitive radio networks, **IEEE Communications Magazine**, v. 46, n. 4, p. 40–48, 2008.

AKYILDIZ, I.F.; W. Lee; VURAN, M. and MOHANTY, S. NeXt Generation/ Dynamic Spectrum Access / Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey, **Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking**, v. 50, p. 2127–2159, 2006.

BEAULIEU, N. Performance of collaborative spectrum sensing for cognitive radio in the presence of gaussian channel estimation errors, **IEEE Transactions on Communications**, [S.l.], v.57, n.7, p.1944–1947, 2009.

DIGHAM, F. F. et al. On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels, **IEEE International Conference on Communications 2003 ICC 03**, v. 55, p. 3575-3579, 2003.

FCC, Docket. No 03-322, **Notice of Proposed Rule Making and Order**, 2003.

MOSYAGIN, J. Using 4G wireless technology in the car, **12th International Conference on Transparent Optical Networks**, p. 1, 2010.

PAWELCZAK, P. et al. Quality of service assessment of opportunistic spectrum access: a medium access control approach, **IEEE Wireless Communications**, v. 15, n. 5, p. 20–29, 2008.

SO-IN, C.; JAIN, R. and TAMINI, A. K. Scheduling in IEEE 802.16e mobile WiMAX networks: Key issues and a survey, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 27, n. 2, p. 156-171, 2009.

SRINIVASA, S.; JAFAR, S. A. Soft Sensing and Optimal Power Control for Cognitive Radio, **IEEE Transactions on Wireless Communications**, [S.I], v. 9, n. 12, p. 3638–3649, 2010.

STERLE, J. et al. Application-Based NGN QoE Controller, **IEEE Communications Magazine**, v. 49, n. 1, p. 92-101, 2011.

WiMAX Forum. **WiMAX system evaluation methodology version 2.1**. 2008. Disponível em: <[http://www.cse.wustl.edu/vjain/wimax/ftp/wimax system evaluation methodology v2 1.pdf](http://www.cse.wustl.edu/vjain/wimax/ftp/wimax_system_evaluation_methodology_v2_1.pdf)> Acesso em: Agosto de 2011.

YUCEK, T.; ARSLAN, H. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications, **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 11, n. 1, p. 116–130, 2009.