

# Detecção de Energia para Rádios Cognitivos usando GNU Radio e USRP2 \*

Pedro Smith Coutinho<sup>1</sup> e José Ferreira de Rezende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) – COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

{coutinho, rezende}@gta.ufrj.br

**Abstract.** *In order for the new spectrum access model proposed by Cognitive Radio technology to work well, spectrum sensing is an extremely important task carried out by the Secondary Users in order to detect the presence of Primary Users. This article presents an implementation spectrum sensing through energy detection made using the GNU Radio Software Defined Radio platform and the Universal Software Radio Peripheral 2 (USRP2) programmable radio device. Software simulations and practical wired and wireless experiments using USRP2 devices have been developed and run. Comparing the obtained results with the Cognitive Radio requirements presented by the IEEE 802.22 standard, it is shown that the implementation is successful, fulfilling the standard's performance requirements in terms of correct detection and false alarm probabilities ( $P_D$  and  $P_{FA}$ ) in as low signal-noise ratios (SNRs) as specified.*

**Resumo.** *Para o bom funcionamento do novo modelo de acesso ao espectro proposto pela tecnologia de Rádios Cognitivos, o sensoriamento do espectro, realizado pelos Usuários Secundários para detectar a presença de Usuários Primários, é uma tarefa de extrema importância. Esse trabalho apresenta uma implementação de um método de sensoriamento de espectro por detecção de energia usando a plataforma de Rádios Definidos por Software GNU Radio e o rádio programável Universal Software Radio Peripheral 2 (USRP2). Foram realizadas simulações por software e experimentos práticos, cabeados e sem-fio, utilizando dispositivos USRP2. Comparando-se os resultados obtidos nos experimentos com os requisitos de Rádios Cognitivos apresentados pelo padrão IEEE 802.22, comprova-se que o desempenho da implementação realizada é satisfatório com relação às probabilidades de detecção correta  $P_D$  e de alarmes falsos  $P_{FA}$  obtidas para relações sinal-ruído (SNR) tão baixas quanto especificado.*

## 1. Introdução

O espectro eletromagnético é um recurso natural essencial para comunicações sem-fio e é considerado escasso por ser alocado de forma estática para diferentes aplicações [Hamdaoui 2009]. No entanto, o problema de acesso ao espectro é mais significativo do que a escassez física desse recurso e muitas porções do espectro não são utilizadas em grande parte do tempo em certas áreas geográficas [Federal Communications Commission (FCC) 2002].

---

\*Este trabalho recebeu recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, FINEP e RNP.

O conhecimento desse fato motiva o surgimento de um novo modelo de uso do espectro: Usuários Primários (UPs) possuem direitos de uso exclusivos sobre as frequências a eles atribuídas, além de proteção com relação a interferências de rádio em sua operação e Usuários Secundários (USs), ou usuários não licenciados, têm permissão de compartilhar o espectro de maneira não exclusiva e oportunística, utilizando-se de oportunidades de espectro que podem ser exploradas por dispositivos que sejam capazes de acessar o espectro de forma adaptativa e dinâmica [Kolodzy 2001]. Rádios Cognitivos são dispositivos de comunicação sem-fio com inteligência e reconfigurabilidade para realizar essa comunicação oportunística [Haykin 2005, Mitola and Maguire 1999, Akyildiz et al. 2006].

A principal função dos Rádios Cognitivos é realizar a sua comunicação compartilhando o espectro com os Usuários Primários sem causar interferência na comunicação destes. Para isso, é necessário ser capaz de identificar a presença ou não de Usuários Primários em uma certa faixa de frequências. Essa tarefa, o sensoriamento de espectro, é essencial ao funcionamento dos Rádios Cognitivos. Além disso, o sensoriamento deve satisfazer requisitos de desempenho ao ser realizado para que se torne possível a comunicação eficiente utilizando esses dispositivos. Claramente, pode-se observar que a detecção de UPs e de oportunidades de uso do espectro são tarefas equivalentes, desde que a não detecção de UPs realmente implique em sua ausência.

Embora seja possível encontrar na literatura trabalhos sobre sensoriamento de espectro, ainda existem poucos trabalhos com uma abordagem prática de implementação e experimentos reais. O objetivo desse trabalho é apresentar a implementação de um método de sensoriamento de espectro através de detecção de energia utilizando o *software* GNU Radio e o dispositivo de Rádio Definido por *Software* USRP2, comprovar a factibilidade do método em plataformas reais e avaliar o seu desempenho. Foram realizadas simulações, experimentos cabeados e sem-fio com diferentes distâncias entre transmissor e detector usando a implementação realizada.

O restante desse artigo está organizado da seguinte maneira: na Seção 2 são apresentados trabalhos relacionados. A Seção 3 descreve o sensoriamento de espectro por detecção de energia. A Seção 4 detalha a implementação do sensoriamento de espectro por detecção de energia realizada tanto em simulações no *software* GNU Radio quanto nos dispositivos USRP2 e apresenta os resultados das simulações e dos experimentos reais executados. Por fim a Seção 5 apresenta as conclusões sobre o trabalho, com considerações sobre o desempenho do método implementado e trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

A detecção de Usuários Primários é tratada teoricamente em [Ghozzi et al. 2006, Yucek and Arslan 2009], onde se encontram estudos sobre a detecção de energia e outros métodos de detecção. Em [Sahai et al. 2004, Tandra and Sahai 2008] há mais detalhes sobre a detecção de energia e sua principal limitação, conhecida como barreira de SNR ou  $SNR_{wall}$ , que será apresentada na Subseção 3.3. O sensoriamento de espectro é estudado através de simulações em [Kimtho and Jun-ichi 2006, Datla et al. 2007], com a detecção de energia sendo um dos métodos utilizados.

Em [Cabric et al. 2006a, Cabric et al. 2006b], há experimentos sobre detecção de energia usando a plataforma *Berkeley Emulation Engine 2* (BEE2). [O'Shea et al. 2007]

usa o USRP (predecessor do USRP2) e o *software* GNU Radio, mas aborda a classificação de sinais com redes neurais e para isso usa SNRs bem mais altos que os utilizados nesse trabalho, mencionando o valor de 30 dB. [Xu and Alam 2009] usa dispositivos USRP em conjunto com analisadores de sinal, osciloscópios, geradores de sinal e o *software* LabVIEW. [Rahman et al. 2009] usa USRP e o *software* GNU Radio em conjunto com um gerador de sinal mas só realiza experimentos usando cabos coaxiais.

### 3. Sensoriamento de Espectro

Sensoriamento de Espectro é a obtenção de conhecimento sobre o uso do espectro eletromagnético e a existência de Usuários Primários (UPs) em uma determinada localização geográfica [Yucek and Arslan 2009], com o objetivo de se encontrar oportunidades de espectro para fazer uso das mesmas para comunicação. Pode-se ver que a detecção de UPs e a detecção de oportunidades de espectro podem ser consideradas tarefas equivalentes, desde que a não detecção de um UP realmente implique na sua ausência, além é claro, de que a sua detecção também implique em sua presença. Estimar que o espectro está livre quando de fato há UPs é conhecido como uma falha na detecção e estimar a presença de UPs quando na verdade o espectro está disponível é chamado alarme falso.

Em geral há um compromisso na detecção de UPs: mecanismos agressivos resultam em mais falhas na detecção enquanto mecanismos conservadores apresentam mais alarmes falsos. Uma ocorrência elevada de alarmes falsos significa que muitas oportunidades de espectro serão perdidas, enquanto muitas falhas na detecção significam que muitas vezes os Usuários Secundários (USs) causarão interferência nos UPs.

#### 3.1. Formulação do Problema

Para o problema de sensoriamento de espectro analisado nesse trabalho, supõe-se que o Usuário Primário, quando ocupa o espectro, transmite um sinal discreto  $X[n]$  por um canal AWGN (*additive white gaussian noise*, ruído branco gaussiano aditivo)  $W[n]$  com variância  $\sigma_w^2$ . Num dado momento, o Usuário Secundário que realiza o sensoriamento detecta um sinal discreto  $Y[n]$ , que pode ou não conter o sinal  $X[n]$  enviado pelo Usuário Primário. O Usuário Secundário deve então, após sensoriar o canal por uma duração equivalente a  $N$  amostras, decidir por duas hipóteses [Cabric et al. 2006a, Quan et al. 2008]:

$$\mathcal{H}_0 : Y[n] = W[n], \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (1)$$

$$\mathcal{H}_1 : Y[n] = X[n] + W[n], \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2)$$

Sob a hipótese  $\mathcal{H}_0$ , representada pela Equação (1), o sinal não está presente e o sinal detectado  $Y[n]$  é apenas o ruído branco gaussiano  $W[n]$ . Sob a hipótese  $\mathcal{H}_1$  representada pela Equação (2), o sinal detectado  $Y[n]$  é igual ao sinal transmitido  $X[n]$  mais o ruído branco gaussiano  $W[n]$ .

#### 3.2. Detecção de Energia

A detecção de energia, também chamada de radiometria ou periodograma, é o método de detecção que possui as menores complexidades de implementação e execução [Cabric et al. 2004]. Esse é o método de detecção mais genérico, pois não é

necessário conhecimento *a priori* a respeito do sinal  $X[n]$  sendo detectado. O método funciona comparando a energia do sinal com um limiar, que em geral depende do ruído do canal [Urkowitz 1967, Quan et al. 2008]. A métrica  $T$  a ser utilizada é dada pela Equação (3), em que  $N$  é o tamanho da janela de observação, em número de amostras. A decisão entre as hipóteses  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$  é realizada comparando a métrica  $T$  com um limiar  $\gamma$ . Caso a energia do sinal seja maior que o limiar, decide-se pela hipótese  $\mathcal{H}_1$ , isto é, que o sinal transmitido está presente. Caso contrário, a hipótese escolhida é  $\mathcal{H}_0$ , e assume-se que há somente ruído gaussiano no canal:

$$T = \sum_{n=0}^{N-1} |Y[n]|^2 \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} \gamma \quad (3)$$

Como não há nenhum conhecimento *a priori* sobre o sinal  $X[n]$ , este pode também ser considerado um processo gaussiano com variância  $\sigma_x^2$  [Cabric et al. 2006a]. Sob a hipótese  $\mathcal{H}_0$ , isto é, quando o sinal  $X[n]$  está ausente,  $T$  é a soma dos quadrados de  $N$  variáveis aleatórias gaussianas e portanto segue uma distribuição chi-quadrado central com  $N$  graus de liberdade, representada por  $\chi_N^2$ . Quando o sinal  $X[n]$  está presente, ou seja, sob a hipótese  $\mathcal{H}_1$ ,  $T$  segue uma distribuição chi-quadrado não central com  $N$  graus de liberdade e um parâmetro de não centralidade  $\lambda$  dado pela relação sinal-ruído (SNR, ou *signal-noise ratio*), ou seja  $\lambda = \sigma_x^2/\sigma_w^2$ , representada por  $\chi_N^2(\lambda)$  [Urkowitz 1967].

Pode-se usar o Teorema do Limite Central para aproximar as distribuições chi-quadrado para distribuições gaussianas  $\mathcal{N}$  com média  $N\sigma_w^2$  e variância  $2N\sigma_w^4$  sob  $\mathcal{H}_0$  e média  $N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)$  e variância  $2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2$  sob  $\mathcal{H}_1$ , para o número de amostras  $N > 250$  [Urkowitz 1967, Cabric et al. 2006a], obtendo então as seguintes distribuições para  $T$ :

$$T \sim \begin{cases} \mathcal{N}(N\sigma_w^2, 2N\sigma_w^4) & \text{sob } \mathcal{H}_0 \\ \mathcal{N}(N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2), 2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2) & \text{sob } \mathcal{H}_1 \end{cases} \quad (4)$$

Segundo o critério de Neyman-Pearson para o desempenho da detecção, um método de detecção pode ser avaliado com respeito às probabilidades de detecção correta  $P_D$  e de alarmes falsos  $P_{FA}$  [Kay 1998]. A partir da Equação (4), essas probabilidades são dadas por<sup>1</sup>:

$$P_{FA} = P(T > \gamma | \mathcal{H}_0) = Q\left(\frac{\gamma - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) \quad (5)$$

$$P_D = P(T > \gamma | \mathcal{H}_1) = Q\left(\frac{\gamma - N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2}}\right) \quad (6)$$

<sup>1</sup>A função  $Q$  é considerada da seguinte maneira: se  $T \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ , então a probabilidade  $P(T > \gamma) = Q\left(\frac{\gamma - \mu}{\sigma}\right)$  [Kay 1998].

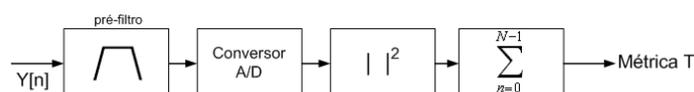
Para uma dada probabilidade de alarmes falsos  $P_{FA}$  fixa na Equação (5), a definição do limiar  $\gamma$  depende apenas do número de amostras  $N$ , que é conhecido, e da variância do ruído  $\sigma_w^2$ , que pode ser estimada. A probabilidade de detecção  $P_D$  da Equação (6) então depende da variância  $\sigma_x^2$ , que pode ser obtida através de estimativas da SNR  $\sigma_x^2/\sigma_w^2$ . Essa técnica é chamada de CFAR (*constant false alarm rate*, taxa de alarmes falsos constante) [Lehtomaki et al. 2005]. A probabilidade de detecção  $P_D$  pode ser melhorada aumentando-se o valor  $N$  de amostras utilizadas na observação da métrica  $T$ , efetivamente aumentando o tempo de sensoriamento.

Em teoria, se o número de amostras puder ser variado, um detector de energia pode satisfazer a quaisquer valores de  $P_{FA}$  e  $P_D$  simultaneamente. O número mínimo de amostras é uma função da relação sinal-ruído  $\sigma_x^2/\sigma_w^2$ , e é obtido a partir das equações (5) e (6) [Kay 1998]:

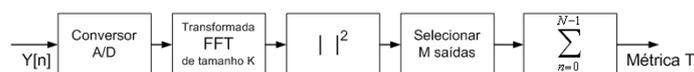
$$N = 2 \left[ \frac{Q^{-1}(P_{FA}) - Q^{-1}(P_D)}{SNR} - Q^{-1}(P_D) \right]^2 \quad (7)$$

Da Equação (7), percebe-se que, para SNRs pequenas, o número de amostras necessário cresce de acordo com  $O(1/SNR^2)$  [Cabric et al. 2006a, Quan et al. 2008].

Existem duas formas de se implementar um detector de energia: no domínio do tempo e no domínio da frequência. O detector implementado no domínio do tempo, ilustrado na Figura 1(a), também é conhecido como radiômetro, e realiza diretamente o cálculo da métrica  $T$  como na Equação (3), e a seleção da faixa de frequência com a utilização de um pré-filtro. No domínio da frequência, o detector utiliza a transformada de Fourier do sinal  $Y[n]$ , em geral sua implementação rápida conhecida como FFT (*Fast Fourier Transform*), e pode calcular a energia de determinadas frequências realizando a seleção de certas saídas da transformada, conforme mostrado na Figura 1(b).



(a) Domínio do tempo. A faixa de frequências é selecionada através do uso de um pré-filtro.



(b) Domínio da frequência. A faixa de frequências é selecionada pela seleção de algumas saídas da transformada FFT.

**Figura 1. Diagramas de blocos para implementações de Detecção de Energia para os domínios do tempo e da frequência.**

### 3.3. Limitações da Detecção de Energia

Por ser o método de detecção mais simples e que não requer conhecimento *a priori* dos sinais detectados, a detecção de energia é um método que apresenta muitas limitações e

desafios. Técnicas de espalhamento de espectro como DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), que espalham o sinal em uma faixa de frequências mais larga, dificultam a detecção de energia [Cabric et al. 2004]. Essas técnicas reduzem o nível de energia do sinal transmitido, tornando mais difícil diferenciá-lo do ruído utilizando o método implementado. Além disso, o problema do terminal escondido em Rádios Cognitivos ocorre devido ao fato de que um Usuário Primário não pode ser detectado se não realizar transmissões. Um UP receptor não afeta a energia recebida pelo detector, logo não é possível detectá-lo utilizando o método de sensoria-mento implementado.

Um outro fator bastante limitante na detecção de energia é a incerteza na estimativa  $\hat{\sigma}_w^2$  da variância verdadeira  $\sigma_w^2$  do ruído. Se há uma incerteza de  $x$  dB na estimativa da variância do ruído, essa estimativa  $\hat{\sigma}_w^2$  estará no intervalo  $\left[\frac{1}{\rho}\sigma_w^2, \rho\sigma_w^2\right]$ , em que  $\rho = 10^{\frac{x}{10}}$ . Desta forma, para uma incerteza de  $x$  dB na estimativa  $\hat{\sigma}_w^2$ , existe um nível mínimo para a relação sinal-ruído (SNR), abaixo do qual a detecção de energia se torna impossível, já que o valor da janela de observação utilizada tende a infinito quando a SNR se aproxima desse valor. Esse nível mínimo é chamado de  $SNR_{wall}$ , ou barreira de SNR, e é dado por  $SNR_{wall} = 10 \log_{10}[10^{\frac{x}{10}} - 1]$ . Para um dado requisito de probabilidade de detecção  $P_D$ , quando há incerteza na estimativa da variância do ruído, tem-se que  $N \rightarrow \infty$  quando  $SNR \rightarrow SNR_{wall}$  [Sahai et al. 2004, Tandra and Sahai 2008].

Além disso, a detecção de energia, por se basear unicamente nas informações sobre a energia recebida, é capaz apenas de diferenciar as hipóteses  $\mathcal{H}_0$ , isto é, sinal ausente e  $\mathcal{H}_1$ , ou seja, sinal presente, com dadas probabilidades de detecção  $P_D$  e de alarmes falsos  $P_{FA}$ . Em um cenário real, os Usuários Secundários, além da detecção, também fariam transmissões para realizar a comunicação. Ao detectar uma faixa de frequências como ocupada, o Rádio Cognitivo adotaria comportamentos diferentes caso isso fosse causado por um Usuário Primário ou por um Usuário Secundário, já que ele não pode interferir na comunicação de um UP, mas possui a mesma prioridade de utilização do espectro que um US. O detector de energia, ao decidir pela hipótese  $\mathcal{H}_1$ , não possui recursos para diferenciar a origem desse sinal, isto é, se ele foi transmitido por um UP ou por um US.

#### 4. Implementação e Resultados

A pesquisa na área de Rádios Cognitivos é em grande parte apoiada no conceito de Rádio Definido por *Software* (*Software Defined Radio*, ou SDR), um dispositivo de comunicação sem-fio que possui parte de suas funções implementadas por *software* em um computador, em vez de usar componentes fixos de *hardware* [Mitola 1995]. Esses dispositivos têm capacidade de interoperar com outros dispositivos utilizando diferentes parâmetros e mecanismos, reconfigurando-se dinamicamente através de sua programação. SDRs oferecem a flexibilidade necessária aos Rádios Cognitivos, além da possibilidade de utilizar sua capacidade computacional também para a cognição do dispositivo.

Embora o conceito de SDR tenha surgido nos anos 90, devido aos elevados recursos computacionais necessários para se implementar as funcionalidades dos rádios em *software*, apenas mais recentemente surgiram dispositivos concretos baseados no conceito. A empresa Ettus Research LLC [Ettus] desenvolve e produz dispositivos que, conjuntamente com um computador pessoal e o *software* GNU Radio, formam um Rádio

Definido por *Software*. O USRP2 (*Universal Software Radio Peripheral 2*) é uma plataforma de SDR flexível e de baixo custo desenvolvido pela Ettus Research. Seus circuitos são formados por dois componentes principais: a placa-mãe (*motherboard*), responsável pelas funções programáveis mais complexas, implementadas em uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*), e uma *daughterboard* (ou placa-filha), que contém o módulo de radiofrequência e é responsável pela sintonia da frequência central utilizada pelo dispositivo. O USRP2 é o sucessor do USRP, dispositivo de SDR que também é produzido pela Ettus Research, e oferece melhor desempenho e mais flexibilidade que sua versão anterior [Ettus]. Neste trabalho, o USRP2 foi utilizado em conjunto com a *daughterboard* RFX2400, que opera nas frequências de 2.3 a 2.9 GHz, e com o *software* GNU Radio.

O GNU Radio é uma plataforma de código aberto de desenvolvimento de *software* que permite o desenvolvimento dos componentes de processamento de sinais e blocos de processamento necessários para implementar SDRs. Aplicações de GNU Radio são desenvolvidas utilizando a linguagem de programação Python, enquanto o processamento de sinais, mais crítico em relação ao desempenho, é implementado na linguagem C++, que é mais rápida e eficiente. Desta forma, é possível implementar sistemas de rádio de alta capacidade e desempenho que utilizam a eficiência e rapidez da linguagem C++, com a simplicidade de um ambiente de desenvolvimento de aplicações com a linguagem Python [GNU Radio, Blossom 2004].

Para realizar a implementação apresentada nesse trabalho, o *software* GNU Radio, obtido de seu repositório de código-fonte Git, foi utilizado em computadores com o sistema operacional Linux. Foram realizadas simulações por *software*, usando apenas o GNU Radio, com implementações do detector nos domínios do tempo e da frequência. Para os experimentos reais com os dispositivos USRP2, foi utilizado apenas o detector no domínio do tempo.

O Usuário Primário a ser detectado transmite uma sequência aleatória de *bytes* modulada em D-BPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*), que é a modulação PSK binária da codificação diferencial dos dados. A escolha dessa modulação se deu pela sua maior simplicidade de implementação uma vez que o detector de energia apresenta o mesmo comportamento para qualquer esquema de modulação que possua uma constelação de símbolos com média zero [Sahai et al. 2004], como por exemplo qualquer modulação PSK M-ária ou QAM M-ária (sem perda de generalidade).

O limiar  $\gamma$  a ser comparado com a métrica  $T$  para realizar a decisão entre as hipóteses  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$  (Equação (3)) foi escolhido de acordo com a técnica CFAR (*Constant False Alarm Rate*) [Lehtomaki et al. 2005]. Para essa escolha, as informações necessárias são a variância do ruído e o tamanho  $N$ , em número de amostras, da janela de observação utilizada. Então, a partir da Equação (5), para se obter uma determinada probabilidade  $P_{FA}$ , o limiar é calculado da seguinte forma:

$$\gamma = N\sigma_w^2 \left( \sqrt{\frac{2}{N}} Q^{-1}(P_{FA}) + 1 \right) \quad (8)$$

De acordo com o padrão IEEE 802.22, que prevê o uso das faixas de frequência de transmissões de televisão analógica e digital por Rádios Cognitivos, a probabilidade

de detecção  $P_D$  deve ser, no mínimo, igual a 0.9 e a probabilidade de alarmes falsos  $P_{FA}$  deve ser, no máximo, igual a 0.1. Esse padrão também estipula que o sensoriamento de espectro deve ocorrer com as probabilidades  $P_D$  e  $P_{FA}$  mencionadas acima para sinais de até  $-116$  dBm, o que equivale a uma relação sinal-ruído (SNR) de aproximadamente  $-21$  dB [Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 2005]. Os valores de  $N$  utilizados pelo detector implementado foram  $250^2$ , 1000, 5000, 10000, 50000, 100000 e 500000.

#### 4.1. Simulações

Antes de realizar experimentos com os dispositivos USRP2, foram realizadas simulações que envolviam a geração do sinal do Usuário Primário e do ruído branco gaussiano utilizando apenas o *software* GNU Radio. A saída desse canal simulado (o sinal somado ao ruído) foi então conectada à entrada de duas diferentes implementações do detector: uma no domínio do tempo e uma no domínio da frequência, conforme a Figura 1. Em ambas as implementações, para valores de SNR de 0 a  $-30$  dB, em intervalos de 3 em 3 dB, foram realizados testes em que eram tomados 1000 valores para a métrica  $T$ , que é comparada aos limiares  $\gamma$  calculados para se observar o desempenho do detector em relação à probabilidade de detecção  $P_D$  obtida. Foram calculadas, então, as as probabilidades de detecção  $P_D$  e de alarmes falsos  $P_{FA}$ , com intervalos de confiança de 95%.

O detector de energia no domínio da frequência utiliza a transformada de Fourier  $Y[k]$  do sinal  $Y[n]$  recebido para obter sua energia. Aumentar o tamanho  $K$  da transformada de Fourier do sinal recebido tem o efeito de melhorar a resolução da faixa de frequências analisada e aumentar o tempo de observação do canal. Em geral, utiliza-se um tamanho  $K$  fixo para a transformada de Fourier, e aplica-se uma média móvel para as saídas da transformada com tamanho  $N$ , em número de amostras, que pode ser ajustado para melhorar o desempenho do detector [Cabric et al. 2006a].

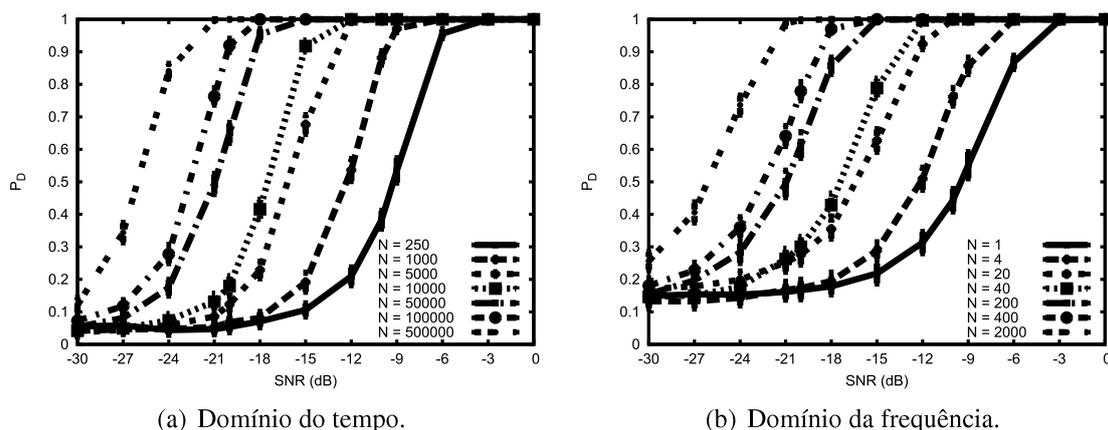
O tamanho da transformada FFT utilizada foi fixado em  $K = 256$ , a potência de 2 mais próxima de 250, e foram utilizados valores  $N$  da soma móvel de forma a possibilitar uma comparação com a implementação no domínio do tempo. Os valores de  $N$  usados foram 1, 4, 20, 40, 200, 400 e 2000, de forma que o valor  $K \times N$  ficasse próximo dos valores de  $N$  usados no domínio do tempo, exceto por uma diferença proporcional à diferença entre 250 e 256.

Os gráficos apresentados na Figura 2 mostram o desempenho da probabilidade de detecção  $P_D$  em função da variação de SNR, nas simulações realizadas. Pode-se ver que os valores de  $P_D$ , em função de  $N$  se comportam de acordo com a Equação (7).

Na Tabela 1 se encontram as taxas de alarmes falsos  $P_{FA}$  medidas sob a hipótese  $\mathcal{H}_0$ , isto é, com o sinal ausente, para os valores de  $N$  utilizados, para os domínios do tempo e da frequência. A implementação no domínio do tempo foi escolhida para os experimentos reais porque, além de sua maior simplicidade, a implementação no domínio da frequência violou o valor máximo estipulado  $P_{FA} = 0.1$ .

---

<sup>2</sup>O valor mínimo para aproximação da distribuição da métrica  $T$  de uma distribuição Gaussiana [Urkowitz 1967, Cabric et al. 2006a]



**Figura 2.** Probabilidades de detecção ( $P_D$ ) em função da SNR obtidas nas simulações.

**Tabela 1.** Taxas de alarmes falsos obtidas nas simulações.

(a) Domínio do Tempo.

$N$	$P_{FA}$	Intervalo de confiança
250	0.042	0.012
1000	0.046	0.016
5000	0.032	0.011
10000	0.037	0.013
50000	0.035	0.016
100000	0.032	0.012
500000	0.025	0.011

(b) Domínio da frequência.

$N$	$K \times N$	$P_{FA}$	Intervalo de confiança
1	256	0.142	0.022
4	1024	0.126	0.021
20	5120	0.160	0.022
40	10240	0.122	0.025
200	51200	0.126	0.020
400	102400	0.132	0.021
2000	512000	0.159	0.024

## 4.2. Experimentos Reais

A implementação escolhida para ser aplicada nos experimentos reais utilizando os dispositivos USRP2 foi a do domínio do tempo, devido à sua maior simplicidade. Os experimentos foram realizados utilizando dois dispositivos USRP2, um gerando o sinal do Usuário Primário a ser detectado, implementado conforme já descrito anteriormente, e outro implementando o detector de energia.

Nos experimentos realizados com os dispositivos USRP2, o transmissor foi utilizado com uma taxa de amostragem de 3125000 amostras por segundo, ou 3.125 MS/s, resultando em um sinal com uma largura de banda de aproximadamente 1.5 MHz, em torno de uma dada frequência central.

Primeiramente, com a finalidade de se realizar um experimento menos sujeito a interferências, o USRP2 transmissor foi ligado diretamente ao dispositivo receptor, utilizando um atenuador de sinal de 40 dB e um cabo coaxial RG-58C de aproximadamente 0.7 metro de comprimento. A Figura 3 mostra os dispositivos USRP2 conectados através do cabo durante a realização do experimento. Tanto o transmissor quanto o receptor foram sintonizados na frequência central de 2.4 GHz. A Tabela 2(a) resume as principais informações sobre o experimento cabeado.



**Figura 3. Fotografia dos dispositivos USRP2 conectados através do cabo coaxial RG-58C.**

**Tabela 2. Descrição dos experimentos realizados com os dispositivos USRP2.**

(a) Experimento cabeado.

Frequência central $F_c$ :	2.4 GHz
Interpolação/Decimação:	32
Taxa de amostragem:	3.125 MS/s
Largura de banda:	1.5625 MHz
Comprimento do cabo coaxial:	$\sim 0.7$ m
Ganho no Detector:	35 dB

(b) Experimentos sem-fio.

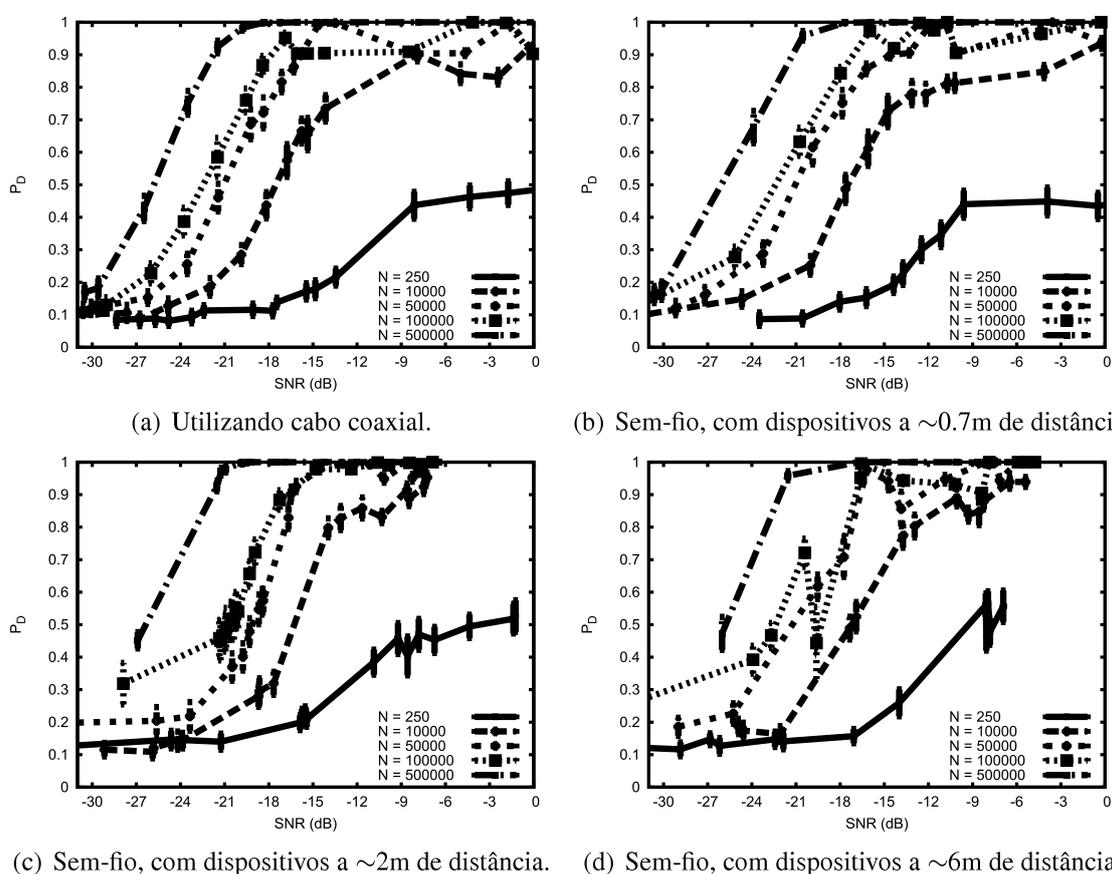
Frequência central $F_c$ :	2.6 GHz
Interpolação/Decimação:	32
Taxa de amostragem:	3.125 MS/s
Largura de banda:	1.5625 MHz
Distâncias entre as antenas:	$\sim 0.7$ m, $\sim 2$ m e $\sim 6$ m
Ganho no Detector:	35 dB e 65 dB

Para os experimentos sem-fio, os dispositivos USRP2 foram sintonizados na frequência central de 2.6 GHz, fora das frequências utilizadas pelas redes IEEE 802.11, de forma a tentar evitar interferências. Foram realizados experimentos em ambientes fechados (*indoor*), com transmissor e receptor na mesma sala (a uma distância de aproximadamente 0.7 metro), a uma sala de distância (aproximadamente 2 metros) e a duas salas de distância (aproximadamente 6 metros), no laboratório do Grupo de Teleinformática e Automação (GTA/UFRJ). Com os dispositivos no mesmo ambiente, o ganho utilizado no receptor foi de 35 dB, bem abaixo do ganho máximo dos dispositivos (70 dB) de forma a evitar distorções. Para os experimentos em outras salas, devido às maiores distâncias e obstáculos, o ganho utilizado foi de 65 dB e as taxas de alarmes falsos obtidas foram afetadas pela distorção conforme será visto nos resultados do trabalho (Tabelas 3(c) e 3(d)). A Tabela 2(b) resume as principais informações sobre os experimentos sem-fio.

Assim como nas simulações, os experimentos reais foram realizados variando a

amplitude do sinal transmitido para se obter SNRs estimadas de aproximadamente 0 a  $-30$  dB, sendo tomados 1000 valores para a métrica  $T$ , que é comparada aos limiares  $\gamma$  calculados para se observar o desempenho do detector em relação às probabilidades de detecção  $P_D$  e de alarmes falsos  $P_{FA}$ , com intervalos de confiança de 95%.

Examinando os gráficos de  $P_D \times$  SNR para os experimentos com os dispositivos USRP2 apresentados na Figura 4, pode-se ver que os resultados estão bem distantes dos obtidos nas simulações. Isso ocorre porque, além das incertezas em que um experimento real implica e que não existem em simulações, as relações sinal-ruído (SNR) do sinal detectado são estimadas no receptor e apresentam variações consideráveis. Pode-se observar que, para valores pequenos de  $N$ , as probabilidades de detecção  $P_D$  nem mesmo chegam ao valor mínimo necessário 0.9, mesmo com relações sinal-ruído em que se obtinha probabilidades  $P_D = 1.0$  nas simulações. Porém, para os valores mais altos de  $N$ , as probabilidades de detecção satisfazem esse valor mesmo para relações sinal-ruído baixas.



**Figura 4. Probabilidades de detecção ( $P_D$ ) em função da SNR obtidas nos experimentos reais com dispositivos USRP2. Foram omitidas as curvas para alguns valores de  $N$  para melhorar a legibilidade dos gráficos.**

As taxas de alarmes falsos  $P_{FA}$  obtidas, como pode ser visto na Tabela 3 também são mais altas do que as obtidas nas simulações, conforme esperado. Nos experimentos em que o ganho usado foi de 35 dB, os valores de  $P_{FA}$  se mantiveram abaixo do máximo aceitável 0.1, satisfazendo as especificações do padrão IEEE 802.22. Para maiores distâncias, com ganho de 65 dB, as taxas  $P_{FA}$  violam o valor estipulado. Experimentos posteriores constataram que nos dispositivos USRP2, com ganhos acima de 40 dB,

a energia do sinal detectado aumenta subitamente com o aumento de  $N$ , sinalizando um comportamento estranho quando os dispositivos operam com ganhos nessa faixa.

**Tabela 3. Taxas de alarmes falsos obtidas nos experimentos reais com dispositivos USRP2.**

(a) Utilizando cabo coaxial.

$N$	$P_{FA}$	Intervalo de confiança
250	0.083	0.020
1000	0.077	0.016
5000	0.073	0.018
10000	0.075	0.016
50000	0.081	0.020
100000	0.072	0.018
500000	0.082	0.020

(b) Sem-fio, com dispositivos a  $\sim 0.7$ m de distância.

$N$	$P_{FA}$	Intervalo de confiança
250	0.076	0.017
1000	0.061	0.015
5000	0.080	0.016
10000	0.082	0.017
50000	0.075	0.015
100000	0.076	0.019
500000	0.072	0.017

(c) Sem-fio, com dispositivos a  $\sim 2$ m de distância.

$N$	$P_{FA}$	Intervalo de confiança
250	0.143	0.023
1000	0.119	0.021
5000	0.100	0.020
10000	0.095	0.021
50000	0.183	0.044
100000	0.300	0.065
500000	0.200	0.022

(d) Sem-fio, com dispositivos a  $\sim 6$ m de distância.

$N$	$P_{FA}$	Intervalo de confiança
250	0.132	0.024
1000	0.132	0.022
5000	0.135	0.025
10000	0.142	0.023
50000	0.145	0.024
100000	0.154	0.030
500000	0.118	0.020

O detector implementado foi capaz de satisfazer os requisitos de desempenho do padrão IEEE 802.22 para relações sinal-ruído de aproximadamente  $-21$  dB apenas para o maior tamanho utilizado para a janela de observação, de  $N = 500000$  amostras. Para a taxa de amostragem de  $3.125$  MS/s usada no detector, essa janela de observação equivale a uma duração do sensoriamento de  $160$  milissegundos, um tempo considerável que pode limitar severamente a eficiência da comunicação de um Rádio Cognitivo utilizando esses parâmetros. Como o sensoriamento deve ocorrer de forma periódica e com uma frequência razoável, além de ser, muitas vezes, realizado em vários canais distintos para encontrar um número maior de oportunidades de utilização do espectro, a duração do sensoriamento para a qual a detecção de energia apresenta bom desempenho pode tornar esse método inviável. Além disso, conforme já mencionado, incertezas na estimativa da variância do ruído podem tornar a detecção impossível, não importando o quão grande for o tempo de sensoriamento.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma implementação de um método de sensoriamento de espectro para Rádios Cognitivos através de detecção de energia utilizando a plataforma de Rádios Definidos por *Software* GNU Radio e o dispositivo de rádio programável *Universal Software Radio Peripheral 2* (USRP2). Foram realizadas simulações por *software* das

implementações do detector nos domínios do tempo e da frequência. Após a obtenção dos resultados das simulações, o detector no domínio do tempo foi implementado nos dispositivos USRP2 e foram realizados experimentos cabeados, utilizando um atenuador de sinal de 40 dB e um cabo coaxial RG-58C, e sem-fio.

Considerando os requisitos de desempenho do detector estipulados pelo padrão IEEE 802.22 [Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 2005], que são: probabilidade de detecção  $P_D$  de no mínimo 0.9, probabilidade de alarmes falsos  $P_{FA}$  de no máximo 0.1 para sinais com potência que chega a um mínimo de  $-116$  dBm, ou seja, relações sinal-ruído de até  $-21$  dB, a implementação do detector realizada nesse trabalho pode ser considerada bem sucedida. O detector implementado foi capaz de satisfazer os requisitos de desempenho mencionados para relações sinal-ruído tão baixas quanto  $-21$  dB, para o tamanho da janela de observação  $N = 500000$  amostras, para experimentos sem-fio utilizando dispositivos USRP2, conforme apresentado na Seção 4.

Frente às limitações encontradas no sensoriamento de espectro por detecção de energia apresentadas nesse artigo, possíveis trabalhos futuros na área de detecção de Usuários Primários são a implementação e o estudo dos efeitos do sensoriamento cooperativo, no qual um grupo de dispositivos utilizariam o método de detecção de energia implementado compartilhando informações individuais sobre a detecção, com o objetivo de obter um desempenho melhor na detecção e reduzir os efeitos de algumas das limitações mencionadas (como por exemplo, o problema do terminal escondido)[Akyildiz et al. 2011].

## Referências

- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., and Mohanty, S. (2006). Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, 50(13):2127 – 2159.
- Akyildiz, I. F., Lo, B. F., and Balakrishnan, R. (2011). Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey. *Physical Communication*, 4(1):40 – 62.
- Blossom, E. (2004). Exploring GNU Radio. <http://www.gnu.org/software/gnuradio/doc/exploring-gnuradio.html>. Acessado em dez. 2010.
- Cabric, D., Mishra, S., and Brodersen, R. (2004). Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. In *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on*, volume 1, pages 772 – 776 Vol.1.
- Cabric, D., Tkachenko, A., and Brodersen, R. W. (2006a). Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation. In *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum*, TAPAS '06. ACM.
- Cabric, D., Tkachenko, A., and Brodersen, R. W. (2006b). Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection. In *Proceedings of the 2006 IEEE conference on Military communications*, MILCOM'06, pages 2342–2348. IEEE Press.
- Datla, D., Rajbanshi, R., Wyglinski, A., and Minden, G. (2007). Parametric adaptive spectrum sensing framework for dynamic spectrum access networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, pages 482 –485.
- Ettus. Ettus Research LLC. <http://www.ettus.com/>. Acessado em dez. 2010.

- Federal Communications Commission (FCC) (2002). Spectrum policy task force report et docket no. 02-135. Technical report.
- Ghazzi, M., Dohler, M., Marx, F., and Palicot, J. (2006). Cognitive radio: methods for the detection of free bands. *Comptes Rendus Physique*, 7(7):794 – 804.
- GNU Radio. GNU Radio. <http://gnuradio.org/>. Acessado em dez. 2010.
- Hamdaoui, B. (2009). Adaptive spectrum assessment for opportunistic access in cognitive radio networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 8(2):922 –930.
- Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 23(2):201 – 220.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2005). Functional Requirements for IEEE 802.22 WRAN Standard, 802.22/05-0007r46.
- Kay, S. M. (1998). *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume 2: Detection Theory*. Prentice Hall PTR.
- Kimtho, P. and Jun-ichi, T. (2006). Signal detection for analog and digital tv signals for cognitive radio. *IEICE technical report*, 106(395):91–95.
- Kolodzy, P. (2001). Next generation communications: Kickoff meeting. In *Proceedings of the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*.
- Lehtomaki, J. J., Juntti, M., Saarnisaari, H., and Koivu, S. (2005). Threshold setting strategies for a quantized total power radiometer. *IEEE Signal Processing Letters*, 12:796–799.
- Mitola, J. (1995). The software radio architecture. *Communications Magazine, IEEE*, 33(5):26 –38.
- Mitola, J. and Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4):13–18.
- O’Shea, T., Clancy, T., and Ebeid, H. (2007). Practical signal detection and classification in gnu radio. *SDR Forum Technical Conference*.
- Quan, Z., Cui, S., Poor, H., and Sayed, A. (2008). Collaborative wideband sensing for cognitive radios. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 25(6):60 –73.
- Rahman, M. A., Khadka, S., Iswandi, Gahadza, M., Haniz, A., Kim, M., and ichi Takada, J. (2009). Development of spectrum sensing system with gnu radio and usrp to detect emergency radios. *IEICE Technical Report*.
- Sahai, A., Hoven, N., and Tandra, R. (2004). Some fundamental limits on cognitive radio. In *Forty-second Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*.
- Tandra, R. and Sahai, A. (2008). Snr walls for signal detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2:4–17.
- Urkowitz, H. (1967). Energy detection of unknown deterministic signals. *Proceedings of the IEEE*, 55(4):523 – 531.
- Xu, J. and Alam, F. (2009). Adaptive energy detection for cognitive radio: An experimental study. In *Computers and Information Technology, 2009. ICCIT '09. 12th International Conference on*, pages 547 –551.
- Yucek, T. and Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 11(1):116 –130.