

## ANÁLISE DO SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM UM CENÁRIO REALISTA DE TVWS NO BRASIL <sup>1</sup>

André Antônio dos Anjos<sup>2</sup>  
Dayane Cristina Jesus Martins

### RESUMO

Os Rádios Cognitivos (RCs), por meio do sensoriamento espectral, surgem como solução para aumentar a eficiência do uso do espectro eletromagnético. No presente trabalho, o sensoriamento espectral, a partir da técnica de detecção de energia, será simulado e avaliado em cenários de oportunidades de transmissão na faixa de TV no Brasil. Nessa faixa de frequência, os usuários licenciados utilizam um sinal de transmissão com Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM), com características definidas e padronizadas que serão consideradas no desenvolvimento da simulação. Nesta última, é considerado um sinal de usuário primário do Serviço Integrado de Transmissão Digital (*Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial Brazilian Version* – ISDB-TB) e um canal de desvanecimento Rayleigh lento, no qual não há uma visada direta entre o RC e o transmissor primário. O trabalho investigará, por meio da análise das probabilidades de detecção e de falso alarme, o desempenho do sistema de sensoriamento em diversas situações, tais como variação do número de amostras coletadas por RC, variação da relação sinal-ruído média e, por último, um cenário cooperativo, no qual se verifica a influência do número de RCs na qualidade do sensoriamento realizado.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Espectral. TV White Space. Rádio Cognitivo.

## ANALYSIS OF SPECTRAL SENSING IN A REALISTIC TVWS SCENE IN BRAZIL

### ABSTRACT

Cognitive radios (CRs), employing spectral sensing, emerge as a solution to enhance the efficiency of electromagnetic spectrum utilization. In the present study, spectral sensing through energy detection will be simulated and assessed within scenarios of transmission opportunities in the TV frequency band in Brazil. Within this frequency band, licensed users employ an Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) transmission signal with well-defined and standardized characteristics, which will be accounted for in the simulation development. The simulation encompasses a primary user signal of the Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial Brazilian Version (ISDB-TB) and a slow Rayleigh fading channel, where no direct line of sight exists between the CR and the primary transmitter. The research will investigate the sensing system's performance by analyzing detection and false alarm probabilities under various conditions, such as varying the number of samples collected

<sup>1</sup> **Como citar este trabalho:** ANJOS, A. A.; MARTINS, D. C. J. Análise do sensoriamento espectral em um cenário realista de TVWS no Brasil. **ForScience**, Formiga, v. 11, n. 2, e01249, jul./dez. 2023. DOI: [10.29069/forscience.2023v11n2.e1249](https://doi.org/10.29069/forscience.2023v11n2.e1249).

<sup>2</sup> **Autor correspondente:** André Antônio dos Anjos, e-mail: andre.anjos@ufu.br

by each CR, adjusting the mean signal-to-noise ratio, and finally, a cooperative scenario where the influence of the number of CRs on the quality of sensing will be examined.

**Keywords:** Spectrum Sensing. TV White Space. Cognitive Radio.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por altas taxas de dados e por conectividade tem fomentado o desenvolvimento de sistemas de telecomunicações avançados (NEWMAN, 2019). No entanto, o desenvolvimento e a implantação desses novos sistemas esbarram em um grande problema: a escassez do espectro eletromagnético (CHAPIN; LEHR, 2011). Análises de diferentes autores ao redor do mundo demonstram que o atual cenário de escassez espectral não advém apenas de uma limitação física do espectro eletromagnético, mas, também, por sua subutilização (HAYKIN; THOMSON; REED, 2019), devido à atual política de alocação espectral fixa, o que se torna mais evidente nas faixas de *Very High Frequency* (VHF) e *Ultra High Frequency* (UHF), destinadas à alocação dos canais de TV.

Os espaços não utilizados do espectro de TV ficaram conhecidos no mundo como *TV White Space* (TVWS) (CHEN; ZHANG, 2019) e surgem juntamente com uma nova política de alocação dinâmica do espectro, denominada *Dynamic Spectrum Access* (DSA), para contornar o problema de “escassez” espectral, ao deixar sua utilização mais eficiente, por ser um recurso limitado. No Brasil, recentemente, o conselho diretor da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) aprovou uma proposta de regulamentação de uso dinâmico do espectro ocioso de TVWS por usuários secundários (AMARAL, 2021). A proposta de resolução aprovada atribui e destina faixas de VHF e UHF para esse tipo de aplicação, em que considera inicialmente as faixas de 54-72 MHz; 174-216 MHz; 470-608 MHz; e de 614-698 MHz. Vale ressaltar que o regulamento sobre condições de uso ainda está em elaboração, com a expectativa de prever o emprego das bandas ociosas de TV para serviços de telefonia móvel celular e banda larga.

Provedores regionais têm manifestado interesse na utilização de LTE e 5G em caráter secundário do TVWS, embora reconheçam a inexistência da escala de equipamentos apropriados para o emprego oportunista do espectro ocioso. Nesse contexto, tornam-se necessários o estudo e o desenvolvimento de rádios inteligentes e equipados com novas tecnologias que consigam aproveitar eficientemente o recurso disponível. Os rádios inteligentes são denominados Rádios Cognitivos (RC) que, basicamente, são dispositivos de

telecomunicações capazes de tomar decisões dinâmicas em consonância a informações coletadas no ambiente em que estão inseridos (ALVES, 2021). A principal funcionalidade de um RC que promete solucionar o problema da escassez do espectro eletromagnético é o sensoriamento espectral, o que corresponde ao foco deste trabalho.

Existem diversos estudos na área de sensoriamento espectral sobre diferentes cenários e com o uso de técnicas de implementação variadas. Por exemplo, Amrutha e Karthikeyan (2017) indicam uma visão geral sobre as arquiteturas RC e as técnicas de sensoriamento espectral de filtro casado, detecção de energia e detecção cicloestacionária. Enquanto isso, Abdelmohsen e Hamouda (2017) apresentam um trabalho sobre sensoriamento espectral com múltiplas antenas com a detecção por verossimilhança e cancelamento por divisão de densidade espectral de potência. Por seu turno, Zhang *et al.* (2020) verificaram a detecção de espectro baseada em rede neural composta, com o intuito de melhorar o nível de inteligência do RC e o desempenho das técnicas de sensoriamento. Apesar dos diversos trabalhos científicos, há uma carência de investigações que abordam simulações realistas de técnicas de sensoriamento espectral. Nesse contexto, o presente artigo tem o propósito de aprofundar no assunto com base no panorama de TVWS no Brasil, com vistas a uma futura implementação prática.

## 2 SENSORIAMENTO ESPECTRAL EM RÁDIOS COGNITIVOS

### 2.1 Modelamento matemático de um sistema de sensoriamento espectral

O modelo consiste no levantamento de duas hipóteses a serem utilizadas para a tomada de decisão (FISHER, 1973):  $H_0$ , que considera a ausência de sinal primário na banda sensoriada; e  $H_1$ , relativa à presença do sinal de um Usuário Primário (UP) na mesma banda. Ambas podem ser descritas matematicamente por:

$$y(t) = \begin{cases} n(t) & : H_0, \\ h(t)x(t) + n(t) & : H_1, \end{cases} \quad (1)$$

Em que:  $y(t)$  é o sinal capturado e analisado pelo RC;  $n(t)$  corresponde ao ruído térmico no receptor;  $h(t)$  representa o ganho ou a atenuação provocada no sinal transmitido pelo canal de comunicação; e  $x(t)$  é o sinal transmitido pelo UP. Ou seja, quando não houver usuário primário na banda,  $y(t)$  ficará composto apenas pelo ruído; caso contrário, ficará composto pelo sinal transmitido ponderado pelo ganho do canal adicionado do ruído.

Para o RC realizar o processo de decisão sobre a ocupação espectral, é necessário definir um limiar de decisão,  $\gamma$ , e uma variável de decisão,  $T$ , gerada pelo processamento de  $y(t)$  e que irá depender da técnica utilizada para o sensoriamento. Assim, se  $T > \gamma$ , decide-se pela ocupação espectral; caso contrário, o espectro é considerado livre.

## 2.2 Sensoriamento Espectral por Detecção de Energia

Existem diversas técnicas de sensoriamento espectral, como a detecção cicloestacionária (ÖNER; JONDRAL, 2004), por filtro casado (ZENG *et al.*, 2010) e por autovalores (ANJOS, 2012); entretanto, a detecção de energia é a mais difundida atualmente (ARJOUNE; KAABOUCH, 2019; HE; CHAOWEI, 2018), devido à sua baixa complexidade de implementação e por ser uma ótima técnica quando não há conhecimento prévio do sinal de transmissão. Por meio dela, a detecção da presença ou ausência do sinal é realizada com base no monitoramento da energia medida no canal, comparada com um limiar de decisão. Apesar de ser uma técnica de sensoriamento consolidada, ainda atrai a atenção de pesquisadores ao redor do mundo (VLĂDEANU; MARTIAN; POPESCU, 2022; WU *et al.*, 2021).

Na Figura 1 é apresentado o diagrama em blocos para implementação da técnica detecção de energia no domínio do tempo:

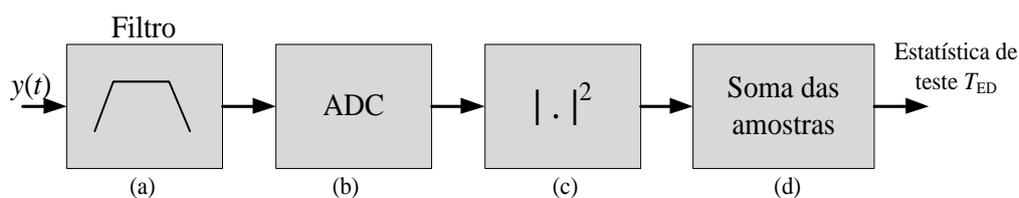


Figura 1 - Diagrama em blocos simplificado da técnica detecção de energia  
Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Diante desse diagrama, inicialmente é utilizado um filtro passa-faixa (a), centralizado na frequência do canal a ser analisado. Na sequência, o sinal filtrado é convertido para baixas frequências e digitalizado por um conversor analógico para digital (ADC) (b), o que gera amostras que passam por um dispositivo de elevação quadrática (c) para, enfim, ser calculada no bloco (d) a variável estatística de decisão  $T_{ED}$ , de acordo com:

$$T_{ED} = \sum_{i=1}^n |y(i)|^2, \quad (2)$$

Em que:  $n$  é o número total de amostras coletadas e  $y(i)$  representa a  $i$ -ésima amostra digitalizada e coletada pelo RC. Após o cálculo de  $T_{ED}$ , é realizada uma comparação do valor com  $\gamma$  para a tomada de decisão sobre qual hipótese ( $H_0$  ou  $H_1$ ) será considerada.

Na presença ou ausência do sinal primário, a variável de decisão possui uma distribuição qui-quadrado (JOHNSON; KOTZ; KEMP, 2005) com  $n$  graus de liberdade (PLATA; REÁTIGA, 2012). Diante de um número de amostras ( $n$ ) suficientemente grande e por meio do Teorema do Limite Central, a variável em questão pode ser aproximada para uma variável aleatória Gaussiana (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2012):  $T_{ED} = N(n\sigma_w^2, n\sigma_w^4)$ , sob hipótese  $H_0$ ; e  $T_{ED} = N(n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2), n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2)$ , sob hipótese  $H_1$ . Assim, as probabilidades de falso alarme e de detecção podem ser resolvidas de modo numérico, dadas respectivamente por:

$$P_{FA} = Q\left(\frac{\gamma - n\sigma_w^2}{\sqrt{n\sigma_w^4}}\right) \quad (3)$$

e

$$P_D = Q\left(\frac{\gamma - n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)}{\sqrt{n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2}}\right). \quad (4)$$

Nas quais:  $Q(*)$  é a função  $Q$ , comumente utilizada para resolução de problemas que envolvem a integral numérica de área em distribuições gaussianas. Se o canal considerado for do tipo Rayleigh com desvanecimento lento, como é o caso abordado na parte de simulação deste trabalho, a Relação Sinal Ruído (SNR) variará de maneira aleatória a cada período de sensoriamento, com comportamento estatístico descrito por uma função densidade de probabilidade exponencial  $f_\delta(\delta) = \frac{1}{\bar{\delta}} e^{-\frac{\delta}{\bar{\delta}}}$ , em que  $\delta$  e  $\bar{\delta}$  se referem à SNR instantânea e média, respectivamente (YACOUB, 1993). Nessa conjuntura, a probabilidade de detecção média fica dada em sua forma integral por:

$$\overline{P_D} = \int_0^\infty \frac{1}{\bar{\delta}} e^{-\frac{\delta}{\bar{\delta}}} Q\left(\frac{\gamma - n(\bar{\delta} + 1)}{\sqrt{n(\bar{\delta} + 1)^2}}\right) d\delta. \quad (5)$$

Para a definição do limiar a ser utilizado, propõe-se o valor constante de falso alarme, a ser calculado com o isolamento de  $\gamma$  na Equação 3, o que leva ao seguinte cálculo:

$$\gamma = \sigma_w^2(Q^{-1}(P_{FA})\sqrt{n} + n). \quad (6)$$

### 2.3 Sinal de usuário primário em TVWS no Brasil

O sinal de usuário primário considerado nas simulações de sensoriamento espectral avaliadas neste trabalho corresponde à transmissão com múltiplas portadoras do tipo OFDM, totalmente em conformidade com o sinal de transmissão do padrão brasileiro de TV digital, o ISDB-TB, cujas características estão detalhadas na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 15601 (ABNT, 2007) e que pode ser descrito matematicamente por:

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} c(n, k) \Psi(n, k, t) \right\}, \quad (7)$$

$$\Psi(n, k, t) = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k-K_c}{T_u} (t-T_g-nT_s)} & nT_s \leq t < (n+1)T_s \\ 0 & t < nT_s, (n+1)T_s \leq t \end{cases},$$

Em que:  $k$  é o índice da portadora e sucessivo para toda a banda, com o número 0 atribuído à portadora 0 do segmento 11;  $n$ , o número do símbolo;  $K$ , as portadoras totais do modo;  $T_s$ , o tempo de duração do símbolo OFDM;  $T_g$ , o tempo de duração do intervalo de guarda;  $T_u$ , o tempo de duração da parte útil do símbolo;  $f_c$ , o centro da frequência do sinal de RF;  $K_c$ , o número da portadora correspondente ao centro da frequência de RF; e  $c(n, k)$ , o símbolo serial complexo correspondente ao símbolo OFDM de índice  $n$  e portadora índice  $k$ .

Com o conhecimento teórico do sinal de transmissão do padrão ISDB-TB é possível implementar, em simulação, o sinal do UP em conformidade com aquele a ser encontrado em um ambiente real de sensoriamento espectral nas bandas de TVWS no Brasil.

## 3 DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentadas as simulações realizadas por meio do *software* MATLAB para viabilizar a implementação e a análise de um sistema de sensoriamento espectral em cenário de TVWS no Brasil.

### 3.1 Geração do sinal de usuário primário em TVWS no Brasil

Antes de iniciar o desenvolvimento das simulações de sensoriamento espectral com foco no uso de TVWS, foi implementado no MATLAB um sinal OFDM em conformidade às características de um típico sinal de transmissão do padrão ISDB-TB. A Tabela 1 apresenta os parâmetros empregados no sinal OFDM, o qual será incorporado nas simulações de sensoriamento espectral:

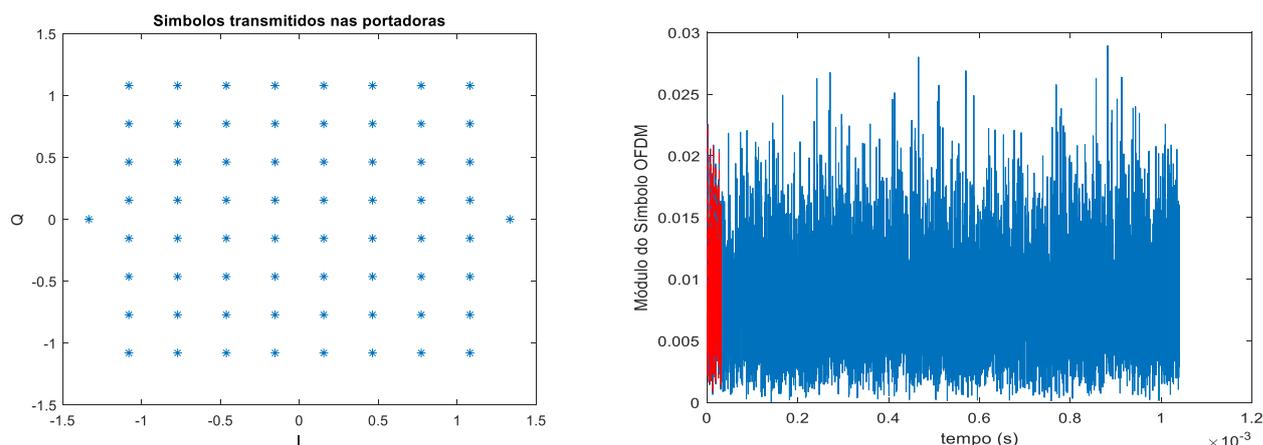
Tabela 1 - Parâmetros utilizados na implementação do sinal OFDM de TV Digital ISDB-TB

<b>Modo de operação</b>	3 (8.192 portadoras totais)
<b>Intervalo de Guarda</b>	$\frac{1}{32}$
<b>Número de Segmentos da Camada A</b>	13
<b>Ordem da modulação da Camada A</b>	64-QAM
<b>Taxa de Codificação da Camada A</b>	$\frac{7}{8}$
<b>Modulação dos símbolos de controle (Pilotos e TMCC)</b>	BPSK / DBPSK
<b>Banda útil</b>	5,57 MHz

Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Para obter o sinal OFDM no modo em questão, no início é gerado aleatoriamente um vetor com 5.617 símbolos complexos organizados em uma estrutura de quadro OFDM, cujas posições são pré-definidas pela norma do padrão ISDB-TB – símbolos de dados (64 QAM), pilotos (BPSK) e TMCC (DBPSK) – que, posteriormente, irão modular cada portadora ativa do sistema. A Figuras 2A ilustra a constelação de transmissão dos símbolos das portadoras ativas do sistema, na qual Q representa a parte imaginária, e I, a parte real de cada símbolo. Em seguida, o vetor de símbolos na estrutura de quadro é paralelizado para multiplexação por divisão de frequências ortogonais por meio da operação matemática Transformada Rápida de Fourier Inversa (*Inverse Fast Fourier Transform* – IFFT), a qual gera um sinal complexo no domínio do tempo com 8.192 amostras (modo 3) na frequência da IFFT para representar o símbolo OFDM útil – por fim, o intervalo de guarda de  $\frac{1}{32}$  é adicionado ao início do símbolo OFDM.

Por sua vez, a Figuras 2B apresenta o módulo do sinal OFDM produzido no tempo, com destaque ao intervalo de guarda – aqui, o símbolo OFDM em questão possui 5.617 símbolos complexos multiplexados em frequência. Conforme previsto pela norma do padrão ISDB-TB, o sinal gerado possui uma banda útil de 5,57 MHz a ser verificada na Figura 3, em que é apresentado o módulo da resposta em frequência do sinal OFDM gerado. Nota-se que, conforme previsto na norma do padrão, o sinal gerado está confinado na banda de -3MHz a 3MHz, com uma pequena banda de guarda nas extremidades.



Figuras 2A e 2B - Símbolos transmitidos nas portadoras e módulo do sinal OFDM de transmissão  
Fonte: Elaboração dos autores (2023).

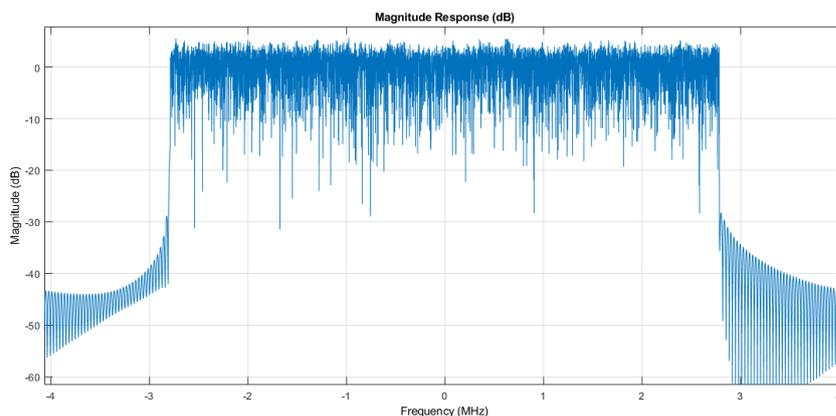


Figura 3 - Espectro do sinal OFDM gerado no MATLAB  
Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Vale ressaltar que a configuração escolhida para geração do sinal OFDM permite a máxima taxa de transmissão do sistema ISDB-TB, de 23,2 Mbps; e a transmissão de vídeos com qualidade *full HD* (RICHARDSON, 2010). A conversão do sinal OFDM para a frequência de canal não foi contemplada na simulação, pois, em uma implementação prática de sensoriamento espectral, a primeira etapa de processamento é exatamente a conversão dos sinais da frequência de canal para a banda base.

### 3.2 Simulação final do sensoriamento espectral em TVWS

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sensoriamento espectral em um cenário realista de TVWS, desenvolveu-se uma simulação no *software* MATLAB, baseada em eventos de Monte Carlo (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964), e os seus códigos-fonte

estão disponíveis para *download* em Simulação TVWS (ANJOS; JESUS, 2023). Nessa simulação, o sinal de transmissão do UP considerado,  $x(t)$ , foi apresentado na seção 3.1; o ganho do canal,  $h(t)$ , é gerado por amostras aleatórias com distribuição Rayleigh, com variância unitária (simula a ausência de visada direta entre transmissor primário e o RC); e se considera o Ruído Branco Gaussiano (*Additive White Gaussian Noise* – AWGN), com média zero e variância unitária. A técnica de sensoriamento utilizada nas simulações foi a detecção de energia, igualmente detalhada na seção 2.3. Sendo assim, a variável de decisão  $T$ , utilizada para definir a ocupação espectral, é calculada conforme a Equação 2.

Como principais parâmetros de entrada, a simulação desenvolvida possui número de RCs ( $m$ ), de amostras coletadas por RC ( $n$ ), de transmissores primários ( $p$ ), de eventos de Monte Carlo ( $Ne$ ) e SNR da simulação, para o levantamento das curvas de desempenho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui são elencados os resultados de desempenho do sensoriamento espectral para vários cenários de análise, cujas curvas foram obtidas pela simulação desenvolvida no *software* MATLAB, considerando 15 mil eventos de Monte Carlo.

### 4.1 Influência da SNR no desempenho do sensoriamento em TVWS

Para verificar como diferentes valores de SNR afetam o desempenho do sistema de sensoriamento, a simulação foi executada com os seguintes parâmetros:  $p = 1$ ,  $m = 1$ ,  $n = 50$  e SNR média = -10, -9, -8, -7 e -6 dB. O desempenho obtido, em termos de curvas da Característica Operacional do Receptor (*Receiver Operating Characteristic* – ROC) (FAWCETT, 2006) para cada valor de SNR, é ilustrado na Figura 4, na qual também constam as curvas teóricas de desempenho obtidas por meio das Equações 3 e 5 deste trabalho. Ao serem analisadas as curvas na Figura 4, verifica-se que o pior desempenho é obtido quando se considera a SNR média de -10 dB. Na comparação curva a curva, nota-se uma melhora significativa no desempenho no momento em que a SNR média é de -6dB e, como esperado, se conclui que o aumento de SNR leva as curvas a uma tendência para o ponto ótimo; logo, a SNR é um dos fatores importantes no desempenho do sistema.

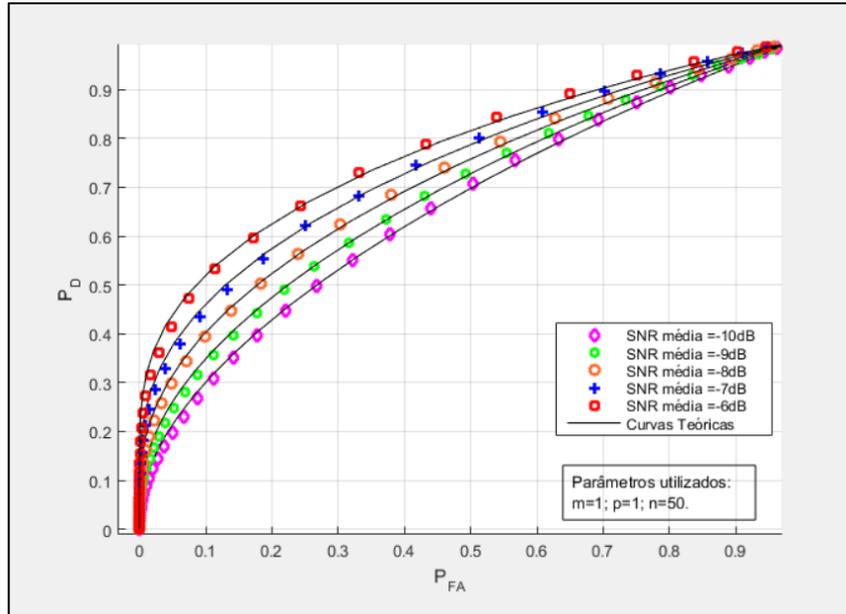


Figura 4 - Curva de desempenho comparando diferentes valores de SNR média  
Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Valores maiores de SNR otimizam a detecção efetiva do sinal de UP ou, em outras palavras, tem-se um aumento da probabilidade de detecção,  $P_D$ , conforme apresentado teoricamente na Equação 5. Outro ponto de destaque na figura é que o desempenho do sistema simulado (marcas coloridas) tem uma grande aderência com a *performance* obtida via expressões teóricas (curvas contínuas na cor preta), o que corrobora a coerência das simulações desenvolvidas.

#### 4.2 Influência do número de amostras coletadas pelo RC no desempenho do sensoriamento espectral em TVWS

A fim de avaliar o impacto no sistema de sensoriamento espectral causado pelo número de amostras,  $n$ , coletadas pelo RC, uma nova simulação foi executada em consonância à seguinte parametrização:  $p = 1$ ,  $m = 1$ , SNR média = -10 dB e  $n = 30, 60, 90, 120$  e  $150$ . O resultado simulado e teórico está apresentado na Figura 5, na qual o número de amostras coletadas por um RC é outro fator importante para viabilizar a melhora do desempenho do sensoriamento; assim, o número maior de amostras resulta em uma curva ROC mais próxima do ponto ótimo:

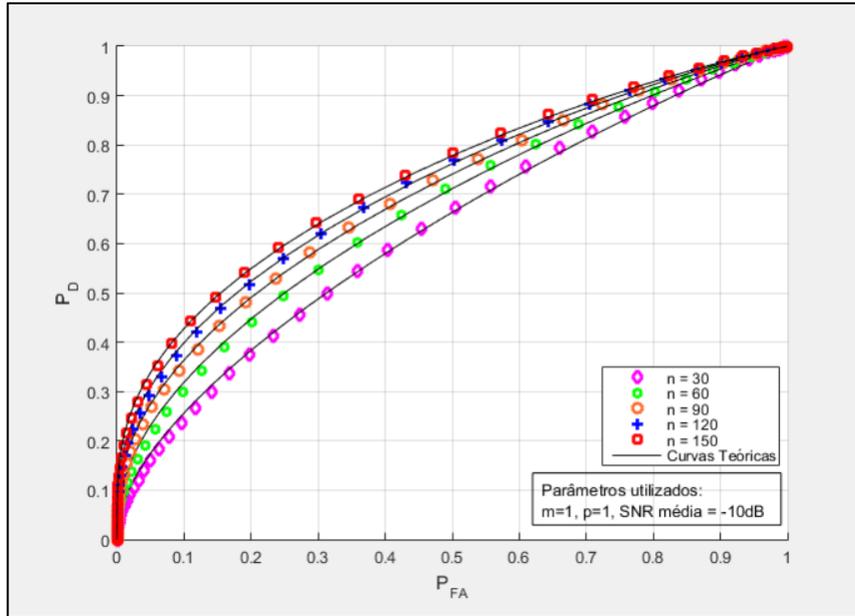


Figura 5 - Curva de desempenho comparando diferentes números de amostras coletadas pelo RC  
 Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Isso ocorre por haver mais informações sobre a banda sensoriada; logo, é possível decidir, com mais confiabilidade, se um UP transmite naquele momento. Por essa análise fica claro que, em um cenário real de sensoriamento, o número de amostras coletadas por um RC deve ser suficientemente grande para as probabilidades de detecção e de falso alarme estarem em conformidade às margens toleradas pelo sistema de sensoriamento desenvolvido. Aqui, mais uma vez, é importante destacar o fato de as curvas de desempenho teóricas e simuladas possuírem grande concordância.

### 4.3 Avaliando $P_D$ em função de uma $P_{FA}$ alvo em TVWS

Em um projeto de sensoriamento espectral prático com detecção de energia, o limiar de decisão, utilizado para comparação com a variável de decisão é calculado de acordo com a Equação 6, conforme uma probabilidade de falso alarme a ser tolerada pelo sistema. Para avaliar o comportamento da  $P_D$ , considerando uma  $P_{FA}$  fixa e vários valores de SNR, uma nova simulação de sensoriamento foi realizada com a seguinte configuração:  $p = 1$ ,  $m = 1$ ,  $n = 1000$ , SNR média variando de -20 até 0 dB;  $\gamma = 1098$  ( $P_{FA} = 0.1\%$ )  $\gamma = 1073$  ( $P_{FA} = 1\%$ ),  $\gamma = 1052$  ( $P_{FA} = 5\%$ ) e  $\gamma = 1040$  ( $P_{FA} = 10\%$ ). Os limiares empregados na simulação foram calculados com base na Equação 6, e o resultado obtido se insere na Figura 6, na qual a probabilidade de falso alarme obtida foi próxima da esperada para cada caso de limiar, o que indica novamente que a simulação está condizente com a parte teórica do estudo. Nessa

imagem se nota que, à medida que se tolera a utilização do sistema com uma probabilidade de falso alarme maior, se aumenta a chance de detectar um usuário primário na banda sensoriada:

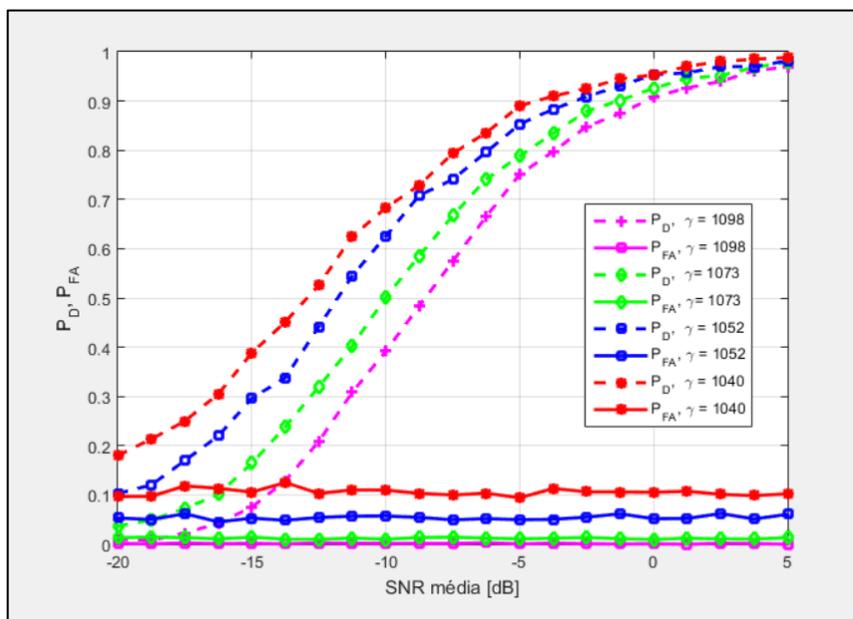


Figura 6 - Curvas de desempenho para valores de PFA fixos  
Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Na Figura 6 também se constata que, mesmo com um número elevado de amostras,  $n = 1000$ , para valores de SNR média menor que 0 dB, nenhuma das curvas avaliadas se aproxima da probabilidade de detecção de 100%, o que acontece apenas para valores próximos de 5 dB. Em um ambiente realista de sensoriamento, no qual o RC pode se encontrar em regiões de sombra ou condições severas de desvanecimento, o número de amostras coletadas deveria ser ainda maior do que aquele utilizado na presente análise. Caso o aumento de amostras não seja viável, técnicas mais robustas ou de sensoriamento cooperativo devem ser levadas em consideração.

#### 4.4 Influência do número de RCs no desempenho do sensoriamento espectral em TVWS

A última análise de desempenho realizada neste trabalho considera um cenário cooperativo de sensoriamento, no qual cada RC da rede cooperativa coleta  $n$  amostras e as envia para um Centro de Fusão (CF), onde a estatística de teste é calculada de acordo com as amostras coletadas por todos os rádios. Para tal, a simulação considerou os seguintes parâmetros:  $p = 1$ ,  $n = 50$ , SNR média = -10 dB e  $m = 1, 2, 3, 4$  e 5. O resultado é apresentado

na Figura 7 e, nessa simulação cooperativa, o gerenciamento de um canal de controle para comunicação entre o CF e os RCs da rede cognitiva não foi contemplado. Além disso, todas as amostras capturadas e transmitidas, por meio dos RCs, para o CF chegam ao destino sem sofrer qualquer degradação, ou seja, não se considerou nenhum erro na transferência de amostras.

Na análise das curvas da Figura 7, conclui-se que, quanto mais rádios coletam amostras, melhor é o sensoriamento espectral realizado. O impacto positivo no desempenho é causado pelo aumento no número total de amostras coletadas, visto que haveria uma quantidade de amostras processadas proporcional à de rádios na rede cooperativa. Ademais, as amostras coletas pelos RCs estariam descorrelacionadas espacialmente, o que reduz a incerteza das informações a respeito do canal analisado:

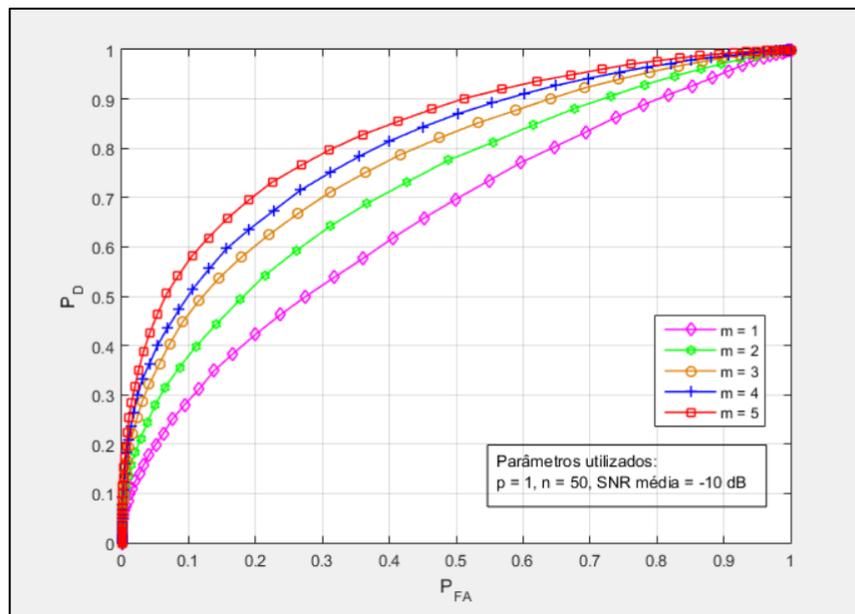


Figura 7 - Curvas de desempenho comparando diferentes quantidades de RCs  
 Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Nesse ponto, apesar de a SNR média da simulação ter sido considerada de -10 dB, a SNR de cada RC, para determinado sensoriamento realizado, será uma variável aleatória com distribuição exponencial, conforme descrito na seção 2.2, por se considerar um canal do tipo Rayleigh, no qual não há uma visada direta entre o transmissor primário e os RCs. Caso a SNR de todos os RCs da rede cooperativa fossem idênticas, um sistema cooperativo com  $m$  RCs com a coleta de  $n$  amostras cada (totalizando  $m \times n$  amostras processadas) teria o mesmo desempenho de um sistema não cooperativo que utilizasse apenas um RC processando o mesmo número de amostras ( $m \times n$ ). Isso não acontece na prática, pois, como os RCs

estão em posições geográficas distintas, haverá um ganho de desempenho por diversidade espacial e cada um deles estaria submetido a um desvanecimento aleatório diferente, mesmo em distâncias similares do transmissor primário. Para comprovar o que foi dito anteriormente, na Figura 8 é apresentado o gráfico de desempenho de sistemas cooperativo (parâmetros:  $p = 1$ ,  $m = 5$ ,  $n = 50$ , SNR média = -10 dB) e não cooperativo ( $p = 1$ ,  $m = 1$ ,  $n = 250$ , SNR média = -10 dB), ambos com o processamento total de 250 amostras; e há um desempenho do sistema cooperativo que supera o do não cooperativo para o mesmo número de amostras processadas, o que evidencia o ganho provocado pela diversidade espacial dos RCs:

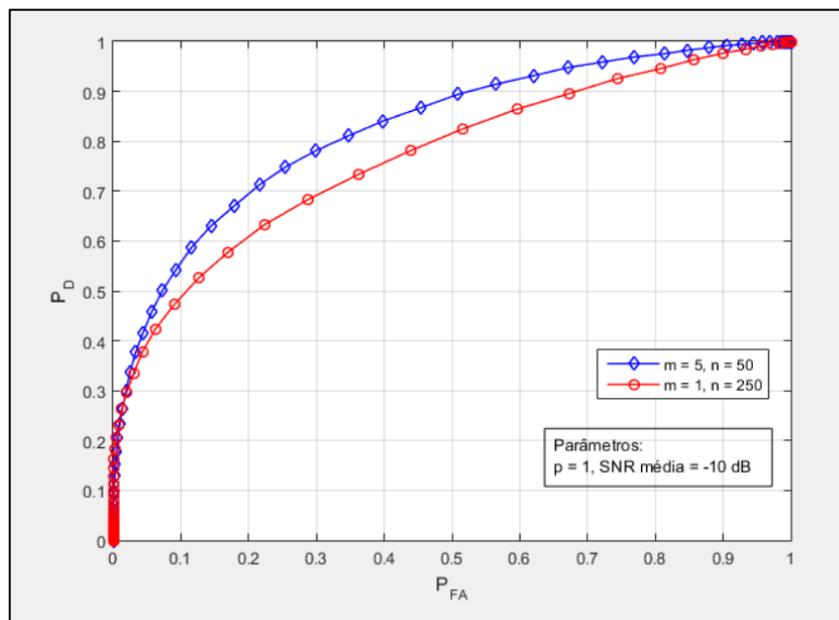


Figura 8 - Comparação de desempenho de um sistema cooperativo com um sistema não cooperativo, ambos com o processamento do mesmo número de amostras para a tomada de decisão

Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Obviamente, a implementação prática desse tipo de sensoriamento cooperativo é mais complexa do que a do tipo não cooperativo, por necessitar de vários RCs e de um CF para se comunicar com todos os RCs da rede, além de gerenciar a alocação espectral dos espaços livres encontrados.

## 5 CONCLUSÃO

Este artigo contribuiu com o estudo do sensoriamento espectral baseado em detecção de energia para um cenário de TVWS no Brasil. Para gerar um sinal de usuário primário similar àquele encontrado em um ambiente real de sensoriamento em TVWS, as simulações

desenvolvidas contemplaram um sinal de transmissão do tipo OFDM em conformidade com a norma do padrão de TV digital brasileiro, o ISDB-TB.

Em consonância às análises apresentadas neste trabalho, diversos parâmetros afetam o desempenho do sensoriamento espectral em TVWS. Portanto, para a otimização de um sistema, deve-se encontrar uma combinação de parâmetros satisfatória e que atenda aos requisitos necessários de  $P_D$  e  $P_{FA}$ . Em cenários de baixa SNR, os RCs precisaram coletar uma grande quantidade de amostra para um sensoriamento espectral robusto.

Destarte, também se notou que, quanto mais RCs forem utilizados em um cenário de sensoriamento cooperativo, melhor será a qualidade da detecção realizada. A diferença de localidade dos RCs agregaria ao sistema uma espécie de diversidade espacial, o que torna as decisões sobre a ocupação espectral do canal mais confiáveis.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por meio do projeto Rede de Pesquisa Mineira em 5G e 6G (RED -00194-23).

## REFERÊNCIAS

ABDELMOHSEN, A.; HAMOUDA, W. Advances on spectrum sensing for cognitive radio networks: theory and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [s.l.], v. 19, n. 2, p. 1277-1304, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7748543>. Acesso em: 1º jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2631080>.

ALVES, F. S. Q. Q. **Sensoriamento espectral cooperativo baseado em Rádios Cognitivos com múltiplas antenas**. 2021. 63f. Dissertação (Mestrado em Telecomunicações) – Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2021. Disponível em: <http://tede.inatel.br:8080/jspui/bitstream/tede/226/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20V.Final%20F%C3%A1tima%20Sayury.pdf>. Acesso em: 1º jul. 2024.

AMARAL, B. Anatel aprova regulamento de uso de White Spaces, **Teletime**, São Paulo, 30 set. 2021, Disponível em: <https://teletime.com.br/30/09/2021/anatel-aprova-regulamento-de-uso-de-white-spaces>. Acesso em: 10 nov. 2022.

AMRUTHA, V.; KARTHIKEYAN, K. V. Spectrum sensing methodologies in cognitive radio networks: a survey. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND MEDIA TECHNOLOGY*, 1., 2017, Coimbatore. **Proceedings...** Coimbatore, 2017, p. 306-310. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8116855>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEEIMT.2017.8116855>.

ANJOS, A. A. dos. **Plataforma de Simulação para Análise de Desempenho do Sensoriamento Espectral baseado em Autovalores para Rádios Cognitivos**. 2012. 116f. Dissertação (Mestrado em Telecomunicações) – Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2012. Disponível em: <https://inatel.br/lambda/documents/DissertacaoV.Final-Andre-dos-Anjos.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2024.

ANJOS, A. A.; JESUS, D. C. **Simulação TVWS**. [s.l.], 2023. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1qRK0757cqRRHPcwsuU2zSM9IPAR5DMNV?usp=sharing>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ARJOUNE, Y.; KAABOUC, N. A Comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: recent advances, new challenges, and future research directions. **Sensors**, [s.l.], v. 19, n. 1, p. 126, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/126>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI <https://doi.org/10.3390/s19010126>.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15601** – televisão digital terrestre – sistema de transmissão. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

CHAPIN, J. M.; LEHR, W. Mobile Broadband growth, spectrum scarcity, and sustainable competition. In: RESEARCH CONFERENCE ON COMMUNICATION, INFORMATION AND INTERNET POLICY, 9., 2011, Arlington, 2011. **Proceedings...** Arlington, 2011, p. 23-25. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228166625\\_Mobile\\_Broadband\\_Growth\\_Spectrum\\_Scarcity\\_and\\_Sustainable\\_Competition](https://www.researchgate.net/publication/228166625_Mobile_Broadband_Growth_Spectrum_Scarcity_and_Sustainable_Competition). Acesso em: 2 jul. 2024.

CHEN, Z.; ZHANG, Y. Providing Spectrum Information Service Using TV White Space via Distributed Detection System. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [s.l.], v. 68, n. 8, p. 7655-7667, ago. 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8732363>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2921383>.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, [s.l.], v. 27, n. 8, p. 861-874, 2006. Disponível em: <https://people.inf.elte.hu/kiss/13dwhdm/roc.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2024.

FISHER, R. A. **Statistical methods for research workers**. 14. ed. New York: Hafner, 1973.

HAMMERSLEY, J.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo methods**. New York: Chapman and Hall, 1964.

HAYKIN, S.; THOMSON, D. J.; REED, J. H. Spectrum Sensing for Cognitive Radio. **Proceedings of the IEEE**, [s.l.], v. 97, n. 5, p. 849, May 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4840525>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015711>.

HE, H.; CHAOWEI, Y. Cooperative spectrum sensing over generalized fading channels based on energy detection, **China Communications**, [s.l.], v. 15, n. 5, p. 128-137, May 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1705.06989>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/CC.2018.8387992>.

JOHNSON, N. L.; KOTZ, S.; KEMP, A. W. **Univariate discrete distributions**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

ÖNER, M.; JONDRAL, F. Cyclostationarity based air interface recognition for software radio systems. *In: IEEE RADIO AND WIRELESS CONFERENCE*, [s.n.], 2004, [s.l.].

**Proceedings...** [s.l.], p. 263-266. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/1389125/authors#authors>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/RAWCON.2004.1389125>.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

NEWMAN, P. How internet of things technology growth is reaching mainstream companies and consumers. **Business Insider**, New York, [n.p.], Jan. 2019. Disponível em:

<https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report>. Acesso em: 2 jul. 2024.

PLATA, D. M. M.; REÁTIGA, Á. G. A. Evaluation of energy detection for spectrum sensing based on the dynamic selection of detection-threshold. **Elsevier**, [s.l.], v. 35, p. 135-143, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812018097>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.174>

RICHARDSON, I. A. **The H.264 Advanced Video Compression Standard**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

VLĂDEANU, C.; MARTIAN, A.; POPESCU, D. C. Spectrum sensing with energy detection in multiple alternating time slots. **IEEE Access**, [s.l.], v. 10, p. 38565-38574, 2022.

Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9751082>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3165556.

YACOUB, M. **Foundations of mobile radio engineering**. New York: CRC, 1993.

WU, W.; WANG, Z.; YUAN, L.; ZHOU, F.; LANG, F.; WANG, B.; WU, Q. IRS-enhanced energy detection for spectrum sensing in cognitive radio networks. **IEEE Wireless Communications Letters**, [s.l.], v. 10, n. 10, p. 2254-2258, Oct. 2021. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9493720>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: 10.1109/LWC.2021.3099121

ZENG, Y.; LIANG, Y.-C.; HOANG, A. T.; RUI, Z. A review on spectrum sensing for cognitive radio: challenges and solutions. **Eurasip**, [s.l.], n. 5, p. 1-15, 2010. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/40892098\\_A\\_Review\\_on\\_Spectrum\\_Sensing\\_for\\_Cognitive\\_Radio\\_Challenges\\_and\\_Solutions](https://www.researchgate.net/publication/40892098_A_Review_on_Spectrum_Sensing_for_Cognitive_Radio_Challenges_and_Solutions). Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/381465>

ZHANG, L.; ZHAO, M.; TAN, C.; LI, G.; LV, C. Research on spectrum sensing system based on composite neural network. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTER TECHNOLOGY, INFORMATION SCIENCE AND COMMUNICATIONS*, 2., 2020, Suzhou. **Proceedings...** Suzhou, 2020, p. 22-26. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9203938?signout=success&signout=success>. Acesso em: 2 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/CTISC49998.2020.00010>

**DADOS DOS AUTORES:****André Antônio dos Anjos****E-mail:** [andre.anjos@ufu.br](mailto:andre.anjos@ufu.br)**Curriculum Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/6367465858959780>

André dos Anjos é professor do curso de graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações na Universidade Federal de Uberlândia - Campus Patos de Minas. Ele possui doutorado em Telecomunicações pela Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP (2021), mestrado em Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (2012) e graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações, também pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (2009). Atuou por mais de 11 anos como Engenheiro Especialista em Sistemas no Inatel Competence Center/Hitachi Kokusai Linear, desenvolvendo projetos nas áreas de telecomunicações, TV digital, Processamento Digital de Sinais, entre outros. Além disso, foi professor de disciplinas nos cursos de graduação e pós-graduação (lato sensu) do Inatel. Suas áreas de interesse incluem comunicações sem fio, modelagem e simulação de canais de desvanecimento, sistemas não lineares, rádios cognitivos, TV White Spaces e sensoriamento espectral.

**Dayane Cristina Jesus Martins****E-mail:** [dayane.martins@ufu.br](mailto:dayane.martins@ufu.br)**Curriculum Lattes:** <https://lattes.cnpq.br/7410983657585132>

Dayane Cristina Jesus Martins é formada em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações pela Universidade Federal de Uberlândia - Campus Patos de Minas, em 2023. Fez estágio na empresa Hero Geek Escola de Programação e Robótica, onde atuou na área de programação e robótica. Suas áreas de interesse em pesquisa incluem rádios cognitivos, TV White Space e sensoriamento espectral.