

Implementações de Sensoriamento Espectral como Solução de TVWS para Áreas Remotas e Rurais

Lucas dos Santos Costa, André Antônio dos Anjos, Arismar Cerqueira Sodré Junior e Luciano Leonel Mendes

Resumo— Neste artigo estuda-se os desempenhos das decisões de ocupação no sensoriamento espectral (*spectrum sensing*, SS) não cooperativo via detecção de energia (*energy detection*, ED) a partir de testes com o Transceptor Brasil 6G – uma possível solução para uso oportunista de espaços em branco de televisão (*television white spaces*, TVWSs) em áreas remotas e rurais (*remote and rural areas*, RRAs). Procedimentos adicionais, como a variação do número de amostras, da relação sinal-ruído, e a adição de mobilidade pela implementação do modelo de canal veicular estendido A (*extended vehicular A*, EVA), aumentam ainda mais o apelo prático das análises; e os resultados numéricos, por atenderem à padrões do IEEE 802.22 para redes de área regional sem fio (*wireless regional area networks*, WRANs), mostram a ED como uma opção de SS para aplicações de TVWS em regiões isoladas.

Palavras-Chave— sensoriamento espectral, Transceptor Brasil 6G, TVWS, áreas remotas e rurais, detecção de energia.

Abstract— This paper examines the performance of occupancy decisions in non-cooperative spectrum sensing (SS) via energy detection (ED), based on tests with the Transceptor Brasil 6G – a potential solution for opportunistic use of television white spaces (TVWSs) in remote and rural areas (RRAs). Additional procedures, such as varying the number of samples, the signal-to-noise ratio, and introducing mobility through the implementation of the extended vehicular A (EVA) channel model, further enhance the practical relevance of the analyses. The numerical results, which comply with the IEEE 802.22 standard for wireless regional area networks (WRANs), demonstrate ED as an option for SS for TVWS applications in underserved regions.

Keywords— spectrum sensing, TVWS, Transceptor Brasil 6G, remote and rural areas, energy detection.

I. INTRODUÇÃO

O paradoxo escassez versus subutilização espectral é um desafio para a radiocomunicação. A escassez espectral provém da evolução das telecomunicações, que possibilitou o aumento contínuo dos serviços e atividades de comunicação à distância nas últimas décadas [1], reduzindo, assim, a disponibilidade de recursos espectrais. Sobretudo nos últimos anos, a falta de recursos espectrais agravou-se com os adventos da quinta geração das redes móveis (*fifth-generation mobile networks*, 5G) e da Internet das coisas (*Internet of things*, IoT), pois levaram a um aumento explosivo no número de dispositivos

conectados [1]. Não obstante, as previsões para as próximas gerações das redes móveis; *e.g.*, a sexta geração das redes móveis (*sixth-generation mobile networks*, 6G); indicam que a situação irá se agravar ainda mais, pois vislumbram não apenas conectividade para uma quantidade massiva de dispositivos, mas um mundo totalmente conectado e com conectividade sem fio para todos [2]. Já a subutilização espectral é consequência i) da política de alocação fixa de banda adotada até então pelas agências reguladoras de acesso ao espectro radioelétrico – que dão concessão de uso exclusivo a uma faixa espectral ao usuário incumbente, ou usuário primário (*primary user*, PU), durante o período de outorga – e ii) da reduzida taxa de acesso à faixa contratada por certos PUs – que, devido aos distintos padrões de uso [3], com frequência deixam faixas ociosas em certos locais e períodos específicos.

Em busca de meios para mitigar a escassez e a subutilização espectral, a substituição da política de alocação fixa por uma nova política de alocação dinâmica de banda passou a ser considerada pelas agências reguladoras, visto que é uma opção viável ao melhor uso das faixas primárias por meio de seu compartilhamento com usuários não incumbentes, ou usuários secundários (*secondary users*, SUs). O sensoriamento espectral (*spectrum sensing*, SS) surgiu dessa nova política de acesso como uma solução para um uso mais eficiente do espectro, ainda provendo convivência harmoniosa entre PUs e SUs. A ideia é que através do SS SUs tenham a cognição necessária para a detecção de faixas ociosas e seu uso oportunista, e, nessa conjuntura, SUs também são referidos na literatura como rádios cognitivos (*cognitive radios*, CRs) [4].

O SS via CR pode ser feito por um SU no sensoriamento espectral não cooperativo (*non-cooperative spectrum sensing*, nCSS), ou por um conjunto de SUs no sensoriamento espectral cooperativo (*cooperative spectrum sensing*, CSS) [5], o que leva a uma relação de compromisso entre desempenho de detecção e complexidade. Por exemplo, comparado ao CSS, a complexidade do nCSS é menor, uma vez que, dentre outros pré-requisitos exclusivos do CSS, também não requer compartilhamento de dados entre SUs, tampouco arquiteturas para esse fim [5]. Por outro lado, é esperado que o desempenho do nCSS seja inferior ao do CSS em um mesmo período de sensoriamento. Isso justamente por causa do compartilhamento de dados no CSS, que explora a diversidade espacial oferecida por SUs em diferentes posições geográficas e condições de operação. Um meio termo entre esses extremos, entretanto, é o uso de SUs com múltiplas antenas [6] no nCSS, pois dispensa os pré-requisitos do CSS ao mesmo tempo em que explora a diversidade espacial e o aumento do número de dados coletados pelos múltiplos pontos de captação.

L. S. Costa, A. C. S. Junior e L. L. Mendes, Dep. de Telecomunicações, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: {lucass;arismar;luciano}@inatel.br; A. A. dos Anjos, Dep. de Telecomunicações, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Patos de Minas-MG, e-mail: andre.anjos@ufu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelos projetos FAPEMIG (PPE-00124-23 e RED-00194-23); Brasil 6G (01245.010604/2020-14); CNPq (313139/2021-0 e 303282/2021-5); e XGM-AFCCT-2024-2-15-1, suportado pelo xGMobile – Centro de Competência EMBRAPAII-Inatel em Redes 5G e 6G, com recursos financeiros oriundos do PPI IoT/Manufatura 4.0 do MCTI, através do Termo de Cooperação 052/2023, firmado com a EMBRAPAII.

Prevê-se maior subutilização espectral nas áreas remotas e rurais (*remote and rural areas*, RRAs) [7] que em centros urbanos devido à menor demanda nessas localidades. Nelas, é mandatório o uso de bancos de dados georreferenciados (*geolocation databases*, GDBs) como medida de prevenção de interferências de SUs nos canais de televisão (*television*, TV) nas faixas das frequências muito altas (*very-high frequencies*, VHF) e frequências ultra altas (*ultra-high frequencies*, UHF) do espectro, mas o uso auxiliar sob demanda de SS vem convencendo as agências reguladoras de sua utilidade para a convivência harmoniosa entre os sistemas [8].

Canais de TV ociosos são chamados espaços em branco de televisão (*television white spaces*, TVWSs) [8] e são valiosos para as radiocomunicações, especialmente no campo. Esse fato disparou pesquisas sobre SS como parte das soluções de TVWS visando a seleção das melhores técnicas para RRAs. O resultado foi o aumento dos experimentos em complementação às simulações computacionais, que naturalmente não podem reproduzir todas as condições de propagação [9]. No entanto, não raramente até os experimentos falham em emular cenários realistas, podendo alguns, *e.g.*, admitir persistente linha de visada (*line-of-sight*, LoS) entre transmissor e receptor, bem como captura ideal de dados, significando que o ruído aditivo Gaussiano branco (*additive white Gaussian noise*, AWGN) pode ter sido totalmente adicionado de forma artificial por programas de computador [10].

A busca por técnicas robustas em RRAs, especialmente as já testadas em cenários práticos, levou à implementações de SS no Transceptor Brasil 6G. Esse transceptor é uma possível solução de TVWS (baseada em rádio definido por *software* (*software-defined radio*, SDR) e implementada no ambiente de programação GNU Radio Companion) em desenvolvimento para suprir demandas das RRAs dentro do projeto Brasil 6G [11]. Este artigo apresenta os resultados de uma dessas implementações: a saber, os desempenhos de detecção do nCSS via detecção de energia (*energy detection*, ED) [12] em duas configurações para o SU: uma considerando antena única; a outra, dupla. Destaca-se que se trata de um experimento com captura de dados reais, no qual o SS é realizado com amostras não sintéticas; demais processamentos e procedimentos são executados em *software* externo.

Os textos a seguir organizam o conteúdo restante do artigo de tal forma que a Seção II apresente o modelo do sistema; a Seção III descreva o experimento, incluindo configurações de *software*, *hardware* e cenário de captura, além das execuções de *software* externo; a Seção IV relate os resultados obtidos e, finalmente; a Seção V as conclusões sobre a pesquisa.

II. MODELO DO SISTEMA

O SS consiste em observar dado canal a fim de detectar oportunidades de ocupação secundária. Ele envolve a coleta de N amostras do sinal recebido em um período de observação, o cômputo de uma estatística de teste T , a partir das N amostras, a comparação de T com um limiar de decisão τ predefinido, e a tomada de uma decisão de ocupação. A ocupação ou não desse canal dependerá dessa decisão, que pode ser a favor de uma entre duas hipóteses: a hipótese nula, de canal livre, dada por \mathcal{H}_0 , indicando que não foi detectada a presença de

um sinal, e a hipótese alternativa de canal ocupado, dada por \mathcal{H}_1 , indicando que a presença de um sinal foi detectada no canal observado. Uma decisão é tomada em favor de \mathcal{H}_1 se $T > \tau$; ou em favor de \mathcal{H}_0 caso contrário. Essa descrição remete ao teste binário de hipóteses, comumente usado para sintetizar o SS. Logo, tendo ele em mente, considere uma rede primária com um PU e uma rede secundária com um SU de J antenas. A n -ésima amostra recebida na j -ésima antena, com $n = 0, 1, \dots, N - 1$ e $j = 0, 1, \dots, J - 1$, pode ser dada por

$$y_j(n) = \begin{cases} v_j(n) & , \text{ sob } \mathcal{H}_0, \\ h_j s(n) + v_j(n) & , \text{ sob } \mathcal{H}_1, \end{cases} \quad (1)$$

sendo v , h e s , respectivamente, variáveis representativas de amostras AWGN, ganho de canal e sinal no canal sob SS.

As métricas de desempenho de detecção do SS mais usadas são a probabilidade de falso alarme, P_{fa} , e a probabilidade de detecção, P_d . $P_{fa} = \Pr(\text{decisão} = \mathcal{H}_1 | \mathcal{H}_0) = \Pr(T > \tau | \mathcal{H}_0)$ é a probabilidade de haver uma decisão de ocupação em favor da hipótese do canal sob observação estar ocupado (hipótese \mathcal{H}_1) quando na verdade ele está ocioso (sob a hipótese \mathcal{H}_0), o que é equivalente à possibilidade de se ter $T > \tau$ sob a hipótese \mathcal{H}_0 . Já $P_d = \Pr(\text{decisão} = \mathcal{H}_1 | \mathcal{H}_1) = \Pr(T > \tau | \mathcal{H}_1)$ é a probabilidade de haver uma decisão de ocupação em favor de \mathcal{H}_1 quando o canal em questão está de fato sob \mathcal{H}_1 , o que equivale à probabilidade de se ter $T > \tau$ sob \mathcal{H}_1 . A análise de desempenho em SS geralmente é feita de forma gráfica por meio da curva característica de operação do receptor (*receiver operating characteristic curve*, ROC), as vezes seguida pela medida da área localizada abaixo dessa curva, aqui chamada apenas de área sob a curva (*area under the curve*, AUC).

São várias as técnicas de SS, uma constatação que pode ter início a partir de [5], [6], [10] e [12], *e.g.*, mas a ED [12] é uma das mais conhecidas devido à baixa complexidade de implementação. Neste artigo, a estatística de teste da ED é computada de duas formas distintas a fim de partir da detecção elementar, considerando as N amostras recebidas por apenas uma das J antenas do SU, para uma detecção mais abrangente, combinando as JN amostras recebidas pelas J antenas. Como o último caso explora a diversidade espacial promovida pelas J antenas e a captura de um número de amostras J vezes maior, obviamente espera-se que resulte em melhores desempenhos que no caso elementar, e a diferença entre os desempenhos é objeto de análise neste artigo. A estatística em cada caso pode ser escrita, a partir de (1), como

$$T_j = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |y_j(n)|^2, \quad (2)$$

ou como

$$T = \frac{1}{JN} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{n=0}^{N-1} |y_j(n)|^2, \quad (3)$$

respectivamente, em que $|x|$ denota o valor absoluto de x .

III. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi feito no laboratório Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR), nas dependências do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). O objetivo foi avaliar desempenhos de detecção alcançados por implementações de nCSS com captura de amostras reais. Este artigo traz o que foi obtido via ED com as abordagens em (2) e (3).

A. SDR-Hardware

A rede secundária dispõe do Transceptor Brasil 6G, que usa rádios periféricos de *software* universal (*universal software radio peripherals*, USRPs)-2954, da *National Instruments* (NI). O dispositivo USRP-2954 oferece alto desempenho para os sistemas de comunicação sem fio, sendo úteis para as soluções de TVWS. Sua frequência de operação varia de 10 MHz a 6 GHz, com sensibilidade de ajuste de 1 kHz e largura de banda (*bandwidth*, BW) de até 160 MHz. Seu ganho de recepção é configurável de 0 dB a 37,5 dB, com sensibilidade de ajuste de 0,5 dB, e sua figura de ruído é de 5 dB a 7 dB. O equipamento possui quatro canais, dois de entrada (de 14 bits cada) e dois de saída (de 16 bits cada). Pela Figura 1, no painel frontal há duas repartições de rádio frequência (*radio frequency*, RF), a RF 0 e a RF 1, com duas conexões cada. A conexão TX1 RX1 pode ser usada para transmissão ou recepção; já a RX2, só para recepção. A flexibilidade de ajuste da BW e a larga faixa de operação faz desse um dispositivo apropriado para o SS em RRAs, pois permite varrer os canais de TV de VHF a UHF inclusive sensoriando múltiplos canais simultaneamente.

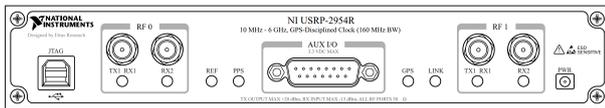


Fig. 1: Painel frontal do dispositivo USRP-2954 [13].

B. SDR-Software

Existem diferentes *softwares* para o trabalho com SDRs. Os mais conhecidos são provavelmente o LabVIEW/NI, o Simulink/Matlab, e o GNU Radio. Dentre esses, o GNU Radio é uma opção de código aberto (*open-source*) que se traduz em soluções de baixo custo e flexibilidade para implementações de soluções específicas. Por isso foi o *software* usado como interface para o dispositivo USRP-2954. A solução de TVWS é implementada lançando mão da construção de fluxogramas (*flowgraphs*) na interface gráfica do GNU Radio Companion.

As implementações podem ser sintetizadas em três blocos principais: **USRP Source**, **PreProcessing** e **Spectrum Sensing**.

O **USRP Source** faz a interface entre o SDR USRP-2954 e o GNU Radio. Esse bloco está configurado para recepção de dois canais (canais 0 e 1), ambos sintonizados dinamicamente por meio da porta de entrada de acordo com as frequências em VHF e UHF desejadas para o SS. Ambos os canais são ajustados com ganho de recepção padrão de 22 dB. O USRP-2954 está configurado com uma taxa de *clock* mestre de 184,32 MHz – fornecida pelo oscilador interno da placa – e um fator de decimação de 6 que resulta em uma taxa de amostragem de 30,72 MHz; uma configuração comum em aplicações de ‘evolução a longo prazo’ (*long term evolution*, LTE). A saída do **USRP Source** entrega dois fluxos de amostras complexas a 30,72 MS/s que são encaminhados ao bloco **PreProcessing**.

O **PreProcessing** é um bloco implementado em Python. Nele, as amostras capturadas de ambos os canais passam por uma redução fracionária da taxa de amostragem (*fractional downsampling*) e extração de sub-bandas para a seleção do conteúdo espectral de interesse. Embora a BW de 30,72 MHz seja suficiente para monitorar simultaneamente cinco canais de TV de 6 MHz, a frequência central é estrategicamente

ajustada entre quatro canais (dois acima e dois abaixo), inutilizando 3,36 MHz em cada extremidade a fim de mitigar distorções de intermodulação nas bordas do espectro. O fluxo de processamento começa com a transformação das amostras para o domínio da frequência usando uma transformada rápida de Fourier (*fast Fourier transform*, FFT), após o que se extrai a sub-banda de cada um dos quatro canais de TV. Em seguida aplica-se um fator de decimação de 5,12 antes da conversão das amostras de volta para o domínio do tempo por meio de uma transformada rápida de Fourier inversa (*inverse fast Fourier transform*, IFFT), resultando em quatro fluxos de amostras separados, a 6 MS/s. Ao processar múltiplos canais simultaneamente, o sistema de SS otimiza o tempo de processamento geral, acelerando a varredura em toda a banda.

Por fim, o bloco **Spectrum Sensing**, também em Python, recebe as amostras pré-processadas, agora a 6 MS/s. É neste bloco que a estatística da ED, em (2) ou em (3), é computada. Cada cômputo é comparado com um limiar de decisão τ configurável, por meio do que se obtém uma decisão de ocupação. A saída do bloco é uma informação binária que indica em tempo real a qual estado de ocupação se encontra cada canal observado: se ocioso (\mathcal{H}_0) ou ocupado (\mathcal{H}_1).

C. Transmissor primário

O sistema de SS conta com a detecção de sinais primários na versão brasileira do padrão japonês de televisão digital (*digital television*, DTV) ‘serviços integrados de radiodifusão digital - terrestre’ (*integrated services digital broadcasting - terrestrial*, ISDB-T), ISDB-Tb, que utiliza multiplexação por divisão de frequências ortogonais (*orthogonal frequency division multiplexing*, OFDM). O excitador de TV ISDB-Tb *Digital Exciter IS8001*, da *Kokusai Denki Electric Inc.*, foi usado como transmissor primário. Ele recebe um fluxo de transporte de transmissão (*broadcast transport stream*, BTS) de um gerador com entrada pseudoaleatória PN23 e modula os dados conforme os parâmetros ISDB-Tb da Tabela I.

TABELA I: Parâmetros do sistema de transmissão OFDM ISDB-Tb.

Parâmetro	Especificação
Número total de portadoras	8192 (Modo 3)
Número ativo de portadoras	5617
Intervalo de guarda	1/16
Número de seguimentos da Camada A	13
Modulação de portadora de dados da Camada A	64-QAM ¹
Taxa de codificação da Camada A	7/8
Portadoras piloto e modulação TMCC ²	BPSK ³ / DBPSK ⁴
Duração de símbolo OFDM	1,071 ms
Fator de entrelaçamento de tempo	2
Clock da IFFT	512/63 MHz
BW	5,572 MHz

¹Quadrature amplitude modulation (QAM). ²Transfer command control (TMCC). ³Binary phase shift keying (BPSK). ⁴Differential binary phase shift keying (DBPSK).

D. Cenário de captura

A Figura 2 mostra o cenário de captura montado no CRR. O CRR é adequado para testes de RF por sua diversidade de instalações, que possibilitam a ocorrência de adversidades típicas da propagação que afetam a acurácia de detecção. Alguns exemplos são desvanecimentos de pequena e larga escala, sinais interferentes e sinais espúrios que podem afetar o sinal de interesse da rede secundária. A saber, o CRR dispõe

de instalações padrão de pesquisa em engenharia, incluindo bancadas de trabalho, prateleiras metálicas, computadores de mesa e diversos equipamentos de telecomunicações.

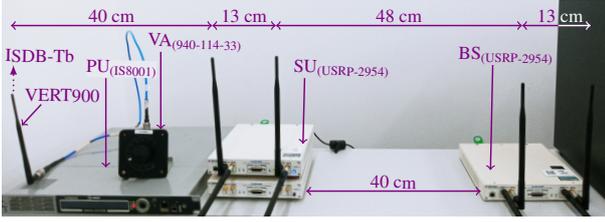


Fig. 2: Cenário de captura de amostras de SS.

Observando a Figura 2, o experimento conta com uma rede primária configurada com um transmissor primário *ISDB-Tb Digital Exciter IS8001*, “ $PU_{(IS8001)}$ ”, um atenuador variável (*variable attenuator*, VA), *Aeroflex/Weinsched 940-114-33*, “ $VA_{(940-114-33)}$ ”, e uma antena *VERT900*, da *Ettus Research*, para a transmissão do sinal *ISDB-Tb*. Já a configuração para a rede secundária é estabelecida com dispositivos transceptores *USRPs-2954*, cujo painel frontal está mostrado na Figura 1, e antenas *VERT900*, e conta com dois *SUs* ativos. Um dos *SUs*, o “ $SU_{(USRP-2954)}$ ”, exerce apenas o papel de CR para sensoriar os canais de TV; o outro, “ $BS_{(USRP-2954)}$ ”, exerce os papéis do Transceptor Brasil 6G, atuando como estação base (*base station*, BS) e transmissor secundário. Para sensoriar os canais de TV, o $SU_{(USRP-2954)}$ utiliza a conexão RX1 de ambos os canais com as antenas polarizadas verticalmente. Por outro lado, para a transmissão, o $SU_{BS_{(USRP-2954)}}$ utiliza a conexão TX1 do mesmo terminal de ambos os canais, no entanto com antenas polarizadas horizontalmente. O isolamento das entradas RX2 de ambos os *SUs* é feito por meio das antenas *VERT900* conectadas a atenuadores fixos de 30 dB (VAT-30+).

Quando ativo, o excitador *ISDB-Tb Digital Exciter IS8001* opera com potência de saída fixa em 0 dBm no canal 59 da faixa UHF, centralizada em 743,143 MHz. Portanto, visto que a rede secundária executa o SS em 4 canais de TV de 6 MHz simultaneamente, e que as análises são sobre a detecção do $PU_{(IS8001)}$, o canal 59 deve fazer parte da lista de canais a serem sensoriados. Especificamente, essa lista conta com os canais 57, 58, 59, e 60, resultando na varredura de uma BW de 24 MHz em um único período de sensoriamento. Em termos de transmissão secundária, o Transceptor Brasil 6G é capaz de ocupar esses 24 MHz utilizando multiplexação por divisão de frequência generalizada (*generalized frequency division multiplexing*, GFDM) para aplicações de TVWS. Após pré-processamento das amostras coletadas a partir do SS aplicado a esses quatro canais em um período de observação, o $SU_{(USRP-2954)}$, para cada canal, computa T_j , em (2), ou T , em (3), conforme a escolha, compara-a com o devido limiar de decisão τ predefinido, toma uma decisão de ocupação, e compartilha essa decisão com o $SU_{BS_{(USRP-2954)}}$. Se as quatro decisões de ocupação recebidas forem a favor da hipótese \mathcal{H}_0 , indicando que o $PU_{(IS8001)}$ está possivelmente inativo, o $SU_{BS_{(USRP-2954)}}$ é ativado para exercer o papel de transmissor secundário, ocupando a banda total observada. Se não, apenas os canais de TV cujas respectivas decisões recebidas forem a favor de \mathcal{H}_0 são ocupados. Canais cuja respectiva decisão recebida for a favor de \mathcal{H}_1 são prontamente desocupados.

E. Demais Processamentos e Procedimentos

Nos experimentos de SS, as amostras são coletadas com a potência do sinal do PU ajustada por meio do $VA_{(940-114-33)}$. As medições são realizadas em dois cenários: (i) $PU_{(IS8001)}$ inativo, caracterizando a hipótese \mathcal{H}_0 , e (ii) $PU_{(IS8001)}$ ativo, caracterizando a hipótese \mathcal{H}_1 . Pós-captura, os dados gravados são processados via Matlab para a geração de métricas de desempenhos. Para enriquecer as análises, no entanto, alguns procedimentos adicionais são aplicados a esses dados. Eles são: a variação de N , o controle da relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) pela adição de ruído térmico, e a adição de mobilidade pela aplicação do modelo de canal veicular estendido A (*extended vehicular A*, EVA). O modelo é padronizado pelo ‘Projeto de Parceria de 3^o Geração’ (*3rd Generation Partnership Project*, 3GPP) para aplicações LTE e 5G. Ele emula um ambiente de propagação multipercurso típico em cenários veiculares de alta mobilidade, considerando desvios Doppler induzidos pela mobilidade e desvanecimento Rayleigh. A Tabela II mostra seus principais parâmetros: atraso e ganho médio de cada percurso.

TABELA II: Perfil de atraso e ganhos de percurso do canal EVA.

Percurso	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Atraso (ns)	0	30	150	310	370	710	1090	1730	2510
Ganho (dB)	0	-1,5	-1,4	-3,6	-0,6	-9,1	-7	-12	-16,9

O desvio Doppler (f_d) de cada percurso é calculado com base na velocidade relativa do móvel (v) e no ângulo de chegada (*angle of arrival*, AoA) do sinal de entrada como $f_d = (v/\lambda) \cos(\text{AoA})$, sendo $\lambda = c/f = 3 \times 10^8/f$, c e f , respectivamente, o comprimento, a velocidade e a frequência da onda ($c = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo). O AoA de cada percurso é uma variável aleatória uniformemente distribuída entre $-\pi$ e π . Nos testes, como as amostras capturadas de ambos os canais foram centralizadas na frequência de 740,143 MHz (cobrindo uma BW de 30,72 MHz), $\lambda = 3 \times 10^8/740,143 \times 10^6 = 0,4053$ metros.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Esta seção mostra os desempenhos de detecção do nCSS via ED em (2) ou (3) com as amostras pré e pós procedimentos adicionais (vide Seção III-E). O $VA_{(940-114-33)}$ foi ajustado para se ter uma SNR média de 8 dB com as amostras pré-processadas; o pós-processamento reduziu-a para -14 dB. Os resultados são avaliados via curvas ROC (com pelo menos 1000 eventos de Monte Carlo sob \mathcal{H}_0 ou \mathcal{H}_1 para se computar P_{fa} ou P_d) e respectivas AUCs, como mostra a Figura 3. Os limiares de decisão foram computados das estatísticas empíricas armazenadas (a partir do cômputo de (2) ou (3)) sob \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 de tal forma que permitissem a excussão de cada ROC em todo o seu intervalo, *i.e.*, $0 \leq \{P_{fa}, P_d\} \leq 1$.

A Figura 3 mostra os resultados com $N = \{10.000; 30.000\}$ e $\text{SNR} = \{8; -14\}$ dB no Gráfico (a), bem como com a adição de mobilidade, com $v = \{20; 100\}$ km/h, $N = 30.000$ e $\text{SNR} = -14$ dB, no Gráfico (b). Pelo Gráfico (a), veja que para $\text{SNR} = 8$ dB, ambas, T_j e T , atingiram os pontos de desempenho ideal, isto é, um par de $P_{fa} = 0$ versus $P_d = 1$, cuja ROC resulta em $\text{AUC} = 1$. A redução da SNR para -14 dB penalizou os desempenhos. Como era de se esperar, o desempenho com T_j , com $\text{AUC} = 0,8977$, ficou inferior ao

obtido com T , cuja $AUC = 0,9376$. É notável a importância do aumento de N para superar a redução da SNR. Pelo Gráfico (b), pode-se dizer que a ED provê detecção robusta em cenários com mobilidade, mesmo com alta mobilidade, como é o caso com $v = 100$ km/h. Uma comparação entre as AUCs do Gráfico (b), com $v = 20$ km/h, e as correspondentes AUCs do Gráfico (a), com $N = 30.000$ e $SNR = -14$ dB, mostra que de alguma forma o canal EVA produziu um sutil ganho de desempenho. Com $v = 100$ km/h apenas T_j produziu certo ganho de desempenho em termos de AUC em relação à AUC da respectiva estatística T_j no Gráfico (a). Sob alta mobilidade, $v = 100$ km/h, de alguma forma o canal penalizou apenas o desempenho da estatística T ; basta comparar esse resultado com o correspondente resultado do Gráfico (a) para ver. Conjectura-se que esses ganhos ou penalizações decorram da diversidade temporal criada pelas rápidas variações Doppler, que suaviza desvanecimentos e pode ter favorecido a ED de antena única, ao passo que o desbalanceamento de potência e a correlação de fase entre ramos em alta mobilidade podem ter degradado a soma espacial do arranjo com duas antenas. Além de robustez à mobilidade, com $N = 30.000$, a ED atingiu $P_d \geq 0,9$ e $P_{fa} \leq 0,1$ com $SNR < -10$ dB, atendendo, portanto, às normas do padrão IEEE 802.22 para a operação das redes de área regional sem fio (*wireless regional area networks*, WRANs) [14]. Esses motivos a colocam como opção de SS como parte das soluções de TVWS para RRAs.

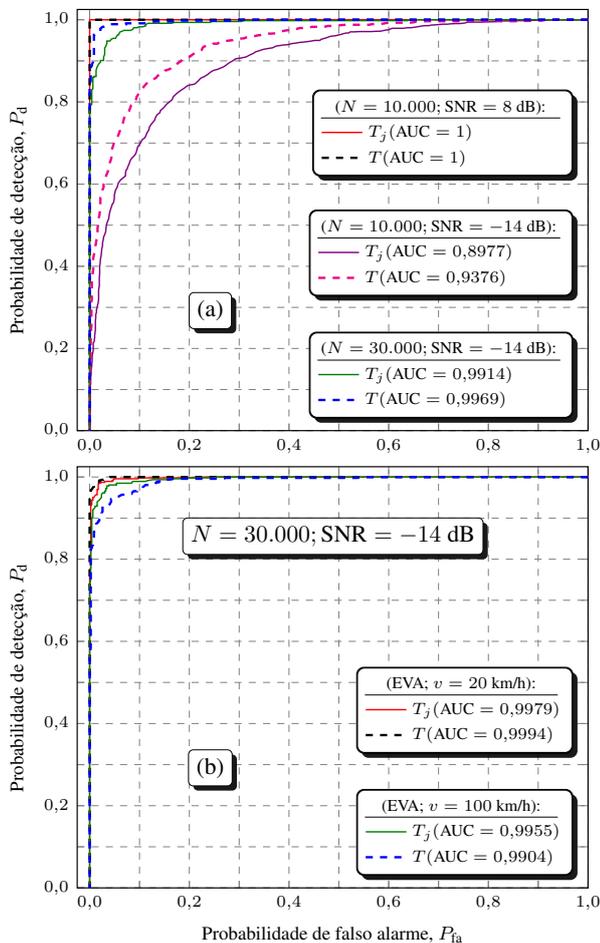


Fig. 3: ROCs ED via estatística de teste T_j ou T .

V. CONCLUSÕES

Este artigo avaliou os desempenhos do nCSS via ED com múltiplas antenas a partir de experimentos com o Transceptor Brasil 6G: uma possível solução de TVWS para RRAs. A variação do número de amostras, N , da SNR, e a aplicação de mobilidade, conferiram maior apelo prático às análises. A desvantagem do uso de antena única frente ao uso de múltiplas antenas foi evidenciada sob mobilidade baixa ou nula. Porém, sob alta mobilidade, nota-se que, de forma geral, usar múltiplas antenas pode ser desvantajoso devido à degradação de desempenho, o que, conforme conjectura, pode ser uma causa dos efeitos de desbalanceamento de potência e correlação de fase gerados pelas rápidas variações do canal móvel. Nota-se ainda a importância do ajuste de N para superar a redução da SNR. A robustez frente à mobilidade e a conformidade com o padrão IEEE 802.22 para WRAN em termos de P_{fa} , P_d e SNR colocam a ED como uma opção viável para essa possível solução de TVWS para RRAs. Por fim, a investigação minuciosa dos efeitos causados por modelos de canais com mobilidade constitui uma oportunidade para pesquisas futuras, já que estava fora dos objetivos da presente investigação.

REFERÊNCIAS

- [1] A. F. M. Shahen Shah, "A survey from 1G to 5G including the advent of 6G: Architectures, multiple access techniques, and emerging technologies," in *2022 IEEE 12th Annu. Comput. and Commun. Workshop and Conf. (CCWC)*, 2022, pp. 1117–1123.
- [2] I. F. Akyildiz, A. Kak, and S. Nie, "6G and beyond: The future of wireless communications systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133 995–134 030, 2020.
- [3] T. Alqahatani, S. Ansari *et al.*, "Blockchain based decentralized spectrum trading using smart contracts," in *2024 7th Int. Conf. on Advanced Commun. Technol. and Netw. (CommNet)*, 2024, pp. 1–5.
- [4] H. T. Madan and P. I. Basarkod, "A survey on efficient spectrum utilization for future wireless networks using cognitive radio approach," in *2018 4th Int. Conf. on Appl. and Theoretical Comput. and Commun. Technol. (iCATccT)*, 2018, pp. 47–53.
- [5] S. Jain, I. K. Shah *et al.*, "Spectrum sensing techniques in cognitive radio based wireless regional area network: A review," in *2025 Int. Conf. on Comput., Commun. and Inform. Technol. (ICCCIT)*, 2025, pp. 942–948.
- [6] C. Çiflikli and F. Y. Ilgin, "Multiple antenna spectrum sensing based on GLR detector in cognitive radios," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 110, no. 4, pp. 1915–1927, 2020.
- [7] A. Chaoub, M. Giordani *et al.*, "6G for bridging the digital divide: Wireless connectivity to remote areas," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, no. 1, pp. 160–168, 2022.
- [8] A. Fanan, N. Riley *et al.*, "Implementation of combined geolocation database and infrastructure sensing in TV bands using different spectrum devices," in *2017 25th Telecommun. Forum (TELFOR)*, 2017, pp. 1–4.
- [9] M. V. Lipski, S. Kompella, and R. M. Narayanan, "Practical implementation of adaptive threshold energy detection using software defined radio," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 57, no. 2, pp. 1227–1241, 2021.
- [10] A. Sabra and M. Berbineau, "Experimental assessment of eigenvalue-based spectrum sensing using USRP-based MIMO testbed for cognitive radio applications," *IEEE Sens. Lett.*, vol. 6, no. 10, pp. 1–4, 2022.
- [11] J. M. C. Brito, L. L. Mendes, and J. G. S. Gontijo, "Brazil 6G project - an approach to build a national-wise framework for 6G networks," in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [12] P. Semba Yawada, A. J. Wei, and M. Mbyamm Kiki, "Performance evaluation of energy detection based on non-cooperative spectrum sensing in cognitive radio network," in *2015 4th Int. Conf. on Comput. Sci. and Netw. Technol. (ICCSNT)*, vol. 01, 2015, pp. 1036–1040.
- [13] N. Instruments, "USRP-2954 Specifications," Jun. 2025. [Online]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2954-specs/page/specs.html>
- [14] *IEEE Standard for information technology— Local and metropolitan area networks— Specific requirements— Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands*, IEEE Std., 2011.