



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FRANCISCO SAMUEL DE SOUSA SILVA

Uma Metodologia e Sistema para Teste de Conformidade de Rádios Cognitivos

Recife

2021

FRANCISCO SAMUEL DE SOUSA SILVA

Uma Metodologia e Sistema para Teste de Conformidade de Rádios Cognitivos

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Redes e Sistemas Distribuídos

Orientador (a): Kelvin Lopes Dias

Coorientador (a): Andson Marreiros Balieiro

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

S586m Silva, Francisco Samuel de Sousa
Uma metodologia e sistema para teste de conformidade de rádios cognitivos
/ Francisco Samuel de Sousa Silva. – 2021.
97 f.: il., fig., tab.

Orientador: Kelvin Lopes Dias.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn,
Ciência da Computação, Recife, 2021.
Inclui referências e apêndice.

1. Redes de computadores. 2. Sistemas distribuídos. I. Dias, Kelvin Lopes
(orientador). II. Título.

004.6 CDD (23. ed.) UFPE - CCEN 2021 – 102

Francisco Samuel de Sousa Silva

“Uma Metodologia e Sistema para Teste de Conformidade de Rádios Cognitivos”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovado em: 10/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Cabral Mora
Centro de Informática/ UFPE

Prof. Dr. Tássio Costa de Carvalho
Faculdade de Computação / UFPA

Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias
Centro de Informática / UFPE
(Orientador)

Dedico este trabalho a mim mesmo e a todos que acreditam em mim.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, pois sem eles eu não seria nada.

A todos que acreditam em mim.

Ao meu orientador, professor Dr. Kelvin Lopes Dias e ao meu Co-orientador, o também professor Dr. Andson Marreiros Balieiro, pela dedicação e troca de experiência, que foram de suma importância para meu crescimento acadêmico e para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

A quinta geração (5G) de redes móveis iniciou sua operação em alguns países visando atender as demandas que estão além das capacidades sistemas atuais, como a enorme quantidade de dispositivos de internet das coisas (do inglês, *Internet of Things, IoT*) conectados (por exemplo, cidades inteligentes), o crescimento explosivo do tráfego de dados móveis de alta velocidade (ex., *streaming* de vídeo de alta definição), além de comunicações que requerem confiabilidade muito alta e latência muito baixa (ex., veículos autônomos). Para atender a essas necessidades, o espectro eletromagnético deve ser disponibilizado para uso, porém, a política de alocação estática de espectro tem causado uma escassez de espectro, prejudicando a expansão dos sistemas *wireless*. Para contornar esse problema, o acesso dinâmico ao espectro (do inglês, *Dynamic Spectrum Access, DSA*) tem sido fomentado em redes 5G/6G, onde é habilitado pela tecnologia de Rádio Cognitivo (do inglês, *Cognitive Radio, CR*). Embora diversos mecanismos tenham sido desenvolvidos para enfrentar os desafios que surgem em diferentes camadas e funcionalidades de CR, há uma escassez de metodologias e sistemas de testes padronizados para esse tipo de dispositivo. Os padrões ou metodologias e sistemas existentes para RC focam apenas na definição de tecnologias de rede (por exemplo, *IEEE 802.22* e *IEEE 802.11af*), na avaliação de desempenho de algoritmos e mecanismos de CR ou na definição do nível de cognição do dispositivo por meio de resultados de desempenho ou abordagens psicométricas, não cobrindo sistemas e metodologias para verificar se o dispositivo atende as capacidades e políticas regulatórias para CR, negligenciando os testes de conformidade. Nesse sentido, este trabalho propõe uma metodologia e um sistema flexível para testes de conformidade de CR sob duas perspectivas, funcionalidades e limites. O sistema foi instanciado usando uma plataforma de rádio definida por software (do inglês, *Universal Software Radio Peripheral, USRP*), e ao final, é apresentada uma prova de conceito com uma métrica de conformidade. Os resultados mostram a viabilidade da proposta.

Palavras-chaves: Rádio Cognitivo. Sistema de Teste de Conformidade para Rádios Cognitivos. Metodologia de Testes para Rádios Cognitivos.

ABSTRACT

The fifth generation (5G) of mobile networks has started its operation in some countries and aims at meeting demands beyond the current system capabilities such as the huge amount of connected devices from IoT applications (e.g. smart cities), explosive growth of high speed mobile data traffic (e.g. ultra-high definition video streaming), and ultra-reliable and low latency communication (e.g. autonomous vehicle). To attend these needs, the electromagnetic spectrum must be made available, but the static spectrum allocation policy has caused a spectrum shortage and impaired the employment/expansion of the wireless systems. To overcome this issue, the Dynamic spectrum access (DSA) has been promoted in 5G/6G networks, which is enabled by the Cognitive Radio (CR) technology. Although, diverse mechanisms have been developed to tackle the challenges that emerge in different CR layers/functionalities, a standardized testing methodology and system for CR is still immature. Existing standards or methodologies and systems for CR only focus on the definition of network technologies (e.g. IEEE 802.22 and IEEE 802.11af), performance evaluation of CR algorithms/mechanisms or definition of the device cognition level via performance results or psychometric approaches, not covering systems/methodologies to verify if the device meets the CR capabilities and regulatory policies, neglecting the conformance testing. In this sense, this work proposes a flexible methodology and system for CR conformance testing under two perspectives, functionalities and limits. The system was instantiated using a Universal Software Radio Peripheral (USRP) software defined radio platform and present a proof-of-concept with a conformance metric. The results show the feasibility of the proposal.

Keywords: Cognitive Radio. Cognitive Radio Conformance Testing System. Cognitive Radio Testing Methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo Cognitivo	19
Figura 2 – Funcionalidades de comunicação em rede (AKYILDIZ et al., 2006)	20
Figura 3 – <i>Processo de avaliação de conformidade ISO IS-9646</i>	26
Figura 4 – <i>Arquitetura do sistema proposto para teste de conformidade em rádios cognitivos</i>	33
Figura 5 – <i>Interações entre os componentes da arquitetura quando um teste é executado</i>	36
Figura 6 – <i>Banco de testes para rádios cognitivos</i>	37
Figura 7 – <i>Testbed baseado em USRP para instanciar a arquitetura proposta.</i>	45
Figura 8 – <i>Interações entre os controladores quando o caso de teste de sensoriamento/transmissão é realizado.</i>	47
Figura 9 – <i>Diagrama de blocos do GNU Radio para a funcionalidade de detecção de espectro.</i>	48
Figura 10 – <i>Visão do DUT e do dispositivo de referência em relação aos tempos de detecção e transmissão.</i>	51
Figura 11 – <i>Média PoM para diferentes instâncias do caso de teste de detecção de espectro.</i>	52
Figura 12 – <i>Diferença entre a duração de cada sensoriamento realizada pelo DUT e pelo dispositivo de referência em uma execução de teste.</i>	53
Figura 13 – <i>Diferença entre a duração de cada transmissão realizada pelo DUT e pelo dispositivo de referência em uma execução de teste.</i>	54
Figura 14 – <i>Resultados em termos de PoM para 10 instâncias de execução do caso de teste, considerando os tempos de detecção e transmissão iguais a 0,5s e 0,1s, respectivamente.</i>	55
Figura 15 – <i>Resultados em termos de PoM_{α} para 10 instâncias de execução do caso de teste, considerando os tempos de detecção e transmissão iguais a 0,5s e 0,1s, e $\alpha = 0, 1$.</i>	56
Figura 16 – <i>Resultados em termos de PoM para o segundo teste sob diferentes tempos de detecção de canal, com largura de banda do canal igual a 1,4 MHz</i> . . .	57
Figura 17 – <i>Resultados de PoM para o segundo teste com diferentes larguras de banda de canal e com tempo de detecção de canal igual a 2s.</i>	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de testes para ambientes cognitivos	23
Tabela 2 – Abordagens para testes de RC.	31
Tabela 3 – Descrição de hardware e software do testbed proposto.	45
Tabela 4 – Instâncias para o primeiro caso de teste.	52

LISTA DE SÍMBOLOS

γ Letra grega Gama

$\in$ Pertence

δ Delta

θ Teta

σ Sigma

μ Mi

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	RÁDIO COGNITIVO	17
2.2	RÁDIOS COGNITIVOS EM 5G	20
2.3	PADRÕES PARA RÁDIOS COGNITIVOS	21
2.3.1	<i>IEEE 802.11ah</i>	22
2.3.2	<i>IEEE 802.11af</i>	22
2.3.3	<i>IEEE 802.22 (WRAN com TVWS)</i>	22
2.3.4	<i>IEEE 802.16 (WiMAX)</i>	23
2.4	TESTES PARA RÁDIOS COGNITIVOS	23
2.5	TESTE DE CONFORMIDADE E ISO IS-9646	24
3	TRABALHOS RELACIONADOS	27
4	METODOLOGIA E SISTEMA PROPOSTO PARA TESTES DE CONFORMIDADE DE RÁDIOS COGNITIVOS	32
4.1	ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO	32
4.2	INTERAÇÃO ENTRE COMPONENTES	35
4.3	BANCO DE TESTES DE RÁDIO COGNITIVO	36
4.3.1	Testes de Sensoriamento de Espectro	38
4.3.2	Testes de Controle de Potência	39
4.3.3	Testes de Mobilidade Espectral	39
4.3.4	Testes de Consciência de Localização Geográfica	40
4.3.5	Testes de Modulação adaptativa	40
4.3.6	Acesso Dinâmico e Descoberta de Rede	40
4.3.7	Testes de Limites	41
5	IMPLEMENTAÇÃO E PROVA DE CONCEITO	43
6	RESULTADO DE DISCUSSÕES	50
7	CONCLUSÃO	59

7.1	CONTRIBUIÇÕES	59
7.2	TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – DOCUMENTO DE TESTES	65

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas celulares evoluíram de uma rede analógica com apenas o serviço de voz na primeira geração (1G) de sistemas de comunicação móvel para uma rede digital baseada em LTE (do inglês, *Long Term Evolution*) totalmente *IP*, que oferece uma gama de serviços, dentre eles: voz, dados, multimídia de alta definição e *roaming* global com um menor custo, na quarta geração (4G). A quinta geração (5G) iniciou sua operação em alguns países visando atender às demandas além das capacidades dos sistemas atuais, como a enorme quantidade de dispositivos *IoT* conectados (por exemplo, nas cidades inteligentes), a comunicação dispositivo para dispositivo (por exemplo, automação de fábricas), o crescimento explosivo do tráfego de dados móveis de alta velocidade (por exemplo, *streaming* de vídeo de alta definição e aplicativos de realidade virtual), além de comunicação com confiabilidade alta e baixa latência (por exemplo, telecirurgia e veículos autônomos) (Parvez et al., 2018). Porém, para atender a essas necessidades, o espectro eletromagnético deve ser disponibilizado para uso (BALIEIRO; FALCÃO; DIAS, 2019).

Uma solução para essa problemática, abordada no *Release 15* do 3GPP (Projeto de Parceria de 3ª Geração, ou em inglês, *3rd Generation Partnership Project*) sobre a nova tecnologia de acesso por rádio (*New Radio - NR*), é adotar os setores de espectro mais alto (acima de 6 GHz) por meio de comunicações de onda milimétrica (do inglês, *Milimeter Wave, mmWave*) (LI et al., 2020) ou novas bandas de ultra-alta frequência (THz e luz visível), que são esperadas nas redes 6G (CHEN et al., 2020). No entanto, devido à alta perda de percurso nessas frequências, os sinais podem ser severamente reduzidos/atenuados quando enfrentam obstruções em cenários sem visada direta (KHAWAJA et al., 2020), o que limita as aplicações suportadas, podendo aumentar o gasto de capital (CAPEX) para obter uma cobertura de sinal razoável.

Outra forma é aproveitar as bandas subutilizadas de até 6GHz (CHEN et al., 2020), ou seja, bandas que não estão sendo utilizadas o tempo todo, principalmente em áreas rurais que carecem de infraestrutura ou interesse econômico por parte das operadoras. Entretanto, a política de alocação estática de espectro, que atribui espectro de uso exclusivo para os usuários primários (em inglês, *Primary Users - PUs*), como os espectros cedidos a operadoras de transmissão de celular e TV, tem causado uma escassez de espectro e prejudicado a expansão dos sistemas sem fio. Para contornar esse problema, o acesso dinâmico ao espectro (em inglês, *dynamic spectrum access - DSA*) e o Rádio Cognitivo (do inglês, *Cognitive Radio*

- CR) têm sido fomentados nas redes 5G e 6G, pois permitem que os sistemas sem fio, chamados de usuários secundários (*Secondary Users - SUs*), acessem as bandas licenciadas de forma oportunista, ou seja, quando os *PU*s não as estão usando, sem causar interferência aos usuários primários (HONG; WANG; SHI, 2014). Nesse sentido, empresas como *Ericsson* e *Nokia* lançaram produtos de infraestrutura de rede para permitir que bandas 4G sejam compartilhadas dinamicamente com sistemas 5G, acelerando a implantação das redes 5G (ERICSSON, 2019) (NOKIA, 2020).

Para isso, o CR requer duas capacidades principais: cognição e reconfigurabilidade. A primeira aborda a capacidade de detecção do espectro (ex., detecção de bandas disponíveis), analisando as informações coletadas (como a estimativa de capacidade da banda) e a demanda do usuário, a fim de definir os protocolos, parâmetros e a banda do espectro de transmissão a serem adotadas na comunicação. Essa última se refere à capacidade de ajustar os parâmetros de transmissão (potência de transmissão, esquema de modulação e frequência da portadora) e protocolos via software, sem a necessidade de modificação no hardware dos dispositivos (WANG; LIU, 2011).

Embora diversos mecanismos tenham abordado os desafios que surgem nas diferentes camadas e funcionalidades dos CR, como a detecção de espectro (AMRUTHA; KARTHIKEYAN, 2017), mobilidade de espectro (THOMAS; MENON, 2017), roteamento de pacotes (KULKARNI; MARKANDE, 2015), segurança (LIN et al., 2011) e controle de acesso ao meio, há uma escassez de metodologias e sistemas de testes padronizados para esse tipo de dispositivo. Os padrões existentes para CR focam apenas na definição de tecnologias de rede (por exemplo, *IEEE 802.11af* e *IEEE 802.22*), não cobrindo o sistema/metodologia para assegurar se um determinado dispositivo atende ou não as capacidades e políticas regulatórias para CR, o que é essencial para o lançamento desses dispositivos no mercado.

Além disso, as metodologias e sistemas de testes atuais visam apenas a avaliação de desempenho de algoritmos e mecanismos para CR (por exemplo, em termos de métricas usuais, como vazão, perda de pacotes, utilização de espectro e interferência), ou mesmo a definição do nível de cognição do dispositivo, mapeando os resultados de desempenho em níveis de cognição (DIETRICH; WOLFE; VANHOY, 2012) ou via abordagem psicométrica, como o modelo de inteligência Cattell-Horn-Carroll (CHC) (DABAGHCHIAN et al., 2017), negligenciando os testes de conformidade de dispositivos.

Neste aspecto, esta dissertação, concebida e desenvolvida dentro do escopo do projeto CIn/Motorola que versa sobre padronização de testes para CR e desenvolvimento de uma

plataforma de teste de CR, propõe uma metodologia e um sistema flexível para testes de conformidade em CR que analisa a conformidade do dispositivo sob duas perspectivas. Primeiro, verifica se o dispositivo sob teste (do inglês, *Device Under Test* - DUT) é capaz de executar uma determinada funcionalidade (ex., detecção de espectro ou mobilidade de espectro) ou ação desejada. Segundo, verifica se o DUT opera (executa a funcionalidade/ação alvo) dentro dos limites definidos. O sistema é instanciado usando a plataforma de rádio definida por software USRP (*Universal Software Radio Peripheral*), um conjunto de testes para CR é elaborado e uma prova de conceito com uma métrica de conformidade é realizada. Os resultados obtidos mostram a viabilidade do sistema proposto.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia e um sistema flexível para testes de conformidade em CR, visando analisar a conformidade do dispositivo sob duas perspectivas, funcionalidade e limites de operação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Conceber uma arquitetura para análise de conformidade para rádios cognitivos.
- Analisar se o dispositivo sob teste (do inglês, *Device Under Test* - DUT) é capaz de executar uma determinada funcionalidade ou ação (ex., detecção de espectro ou mobilidade de espectro) desejada.
- Analisar se o DUT opera (executa a funcionalidade/ação alvo) dentro dos limites definidos, instanciado usando uma plataforma de rádio definida por software denominada USRP (do inglês, *Universal Software Radio Peripheral*).
- Propor um conjunto de testes para CR organizados em funcionalidades.
- Elaborar uma prova de conceito com uma métrica de conformidade e testar a viabilidade do sistema proposto.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 retrata os conceitos básicos sobre CR, bem como seus padrões, funcionalidades e aplicações. Além disso, ainda aborda a classificação de testes para CR, com foco principal em testes de conformidade. O Capítulo 3 apresenta trabalhos relacionados sobre metodologias e sistemas para teste de CR. Já o Capítulo 4 descreve o sistema e metodologia de teste de conformidade proposto, como foi instanciado e dois casos de teste usados como prova de conceito para demonstrar sua viabilidade. O Capítulo 5 descreve como foi feita toda a implementação do sistema proposto. O Capítulo 6 apresenta a métrica e os resultados obtidos nos testes. Por fim, o Capítulo 7 conclui este trabalho, apresentando as contribuições e orientações futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo serão abordados temas que servem de base teórica para os demais Capítulos. Na Seção 2.1 será explicado o conceito básico de CR, suas principais funcionalidades e aplicações. A Seção 2.2 mostra como o CR pode atuar para sanar o problema da política de regulamentação estática do espectro em redes 5G. A Seção 2.3 detalha os principais padrões voltados para rádios cognitivos. Na Seção 2.4 são abordadas as três categorias classificadas para testes de desempenho em CR. Por fim, a Seção 2.5 descreve a subdivisão de testes em software e aponta as padronizações definidas por órgãos de controle internacionais para testes de conformidade em CR.

2.1 RÁDIO COGNITIVO

Um dos principais motivos para o crescimento acelerado do volume de dados trafegado na internet é a popularização dos dispositivos móveis sem fio. Esse tipo de adoção influencia diretamente na demanda por largura de banda, causando um estrangulamento nas redes atuais. A implantação de novos sistemas ou expansão dos já existentes requer a disponibilização de um recurso natural, o espectro eletromagnético. Entretanto, a política de alocação estática do espectro, que o segmenta e o aloca para uso através de licença aos chamados usuários primários (ex. operadoras celulares, de TV, etc) tem causado uma escassez virtual deste recurso (ZHANG et al., 2012). Uma solução para essa problemática é explorar se há bandas de espectro licenciadas ociosas temporariamente para permitir o uso oportunista delas pelos chamados usuários secundários (não licenciados), sem interromper as comunicações dos usuários primários (licenciados) do espectro, proporcionando a coexistência de diversos sistemas sem fio (SRINIVASA; JAFAR, 2007) no mesmo setor espectral.

Dessa forma, pode-se melhorar a utilização do espectro de rádio permitindo que um usuário secundário utilize o espectro temporariamente desocupado pelo usuário primário no local e período apropriado. O rádio cognitivo é a tecnologia habilitada a promover esse uso oportunista do espectro.

O conceito de rádio cognitivo foi introduzido por Joseph Mitola (Mitola, 1999) com a ideia de ser um dispositivo inteligente capaz de acessar o espectro alocado aos usuários licenciados de maneira oportunista, utilizando tecnologias avançadas de sensoriamento e processamento de

sinais, e com impacto mínimo nas transmissões dos usuários licenciados. Outro conceito é dado pela agência reguladora dos Estados Unidos da América, a Comissão Federal de Comunicações em inglês, *Federal Communications Commission, FCC*, que indica que CR é

"Um rádio que pode alterar seus parâmetros de transmissão com base na interação com o ambiente em que opera. Essa interação pode envolver negociação ou comunicação ativa com outros usuários do espectro e/ou detecção e tomada de decisão passivas no rádio." (Cordeiro et al., 2005).

De acordo com essas definições, duas características principais do rádio cognitivo podem ser destacadas (Haykin, 2005), (THOMAS et al., 2007):

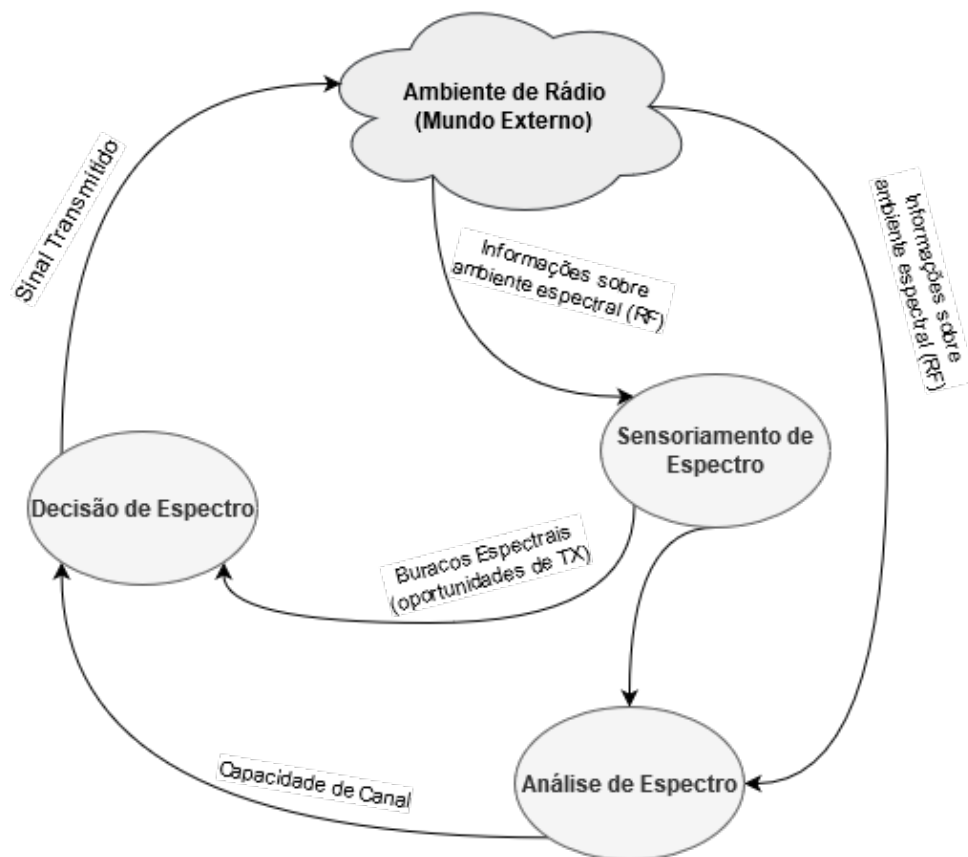
- **Capacidade cognitiva:** é a capacidade da tecnologia de rádio de capturar ou detectar as informações de seu ambiente. Esse mecanismo engloba não apenas o monitoramento da potência em alguma faixa de frequência de interesse, mas também técnicas mais sofisticadas para capturar outras informações, como as variações temporais e espaciais no ambiente de rádio, a fim de evitar interferências em outros usuários.
- **Reconfigurabilidade:** o recurso anterior fornece reconhecimento do espectro. Já a reconfigurabilidade permite que o rádio seja programado dinamicamente para transmitir e receber em uma variedade de frequências e usar diferentes tecnologias de acesso, transmissão e protocolos, de acordo com o ambiente em que se encontra.

Como indicado, o rádio cognitivo permite o uso de espectro temporariamente não utilizado. Caso o canal volte a ser utilizado pelo usuário licenciado (usuário primário), o rádio cognitivo deve vagar o canal, ou, permanecendo nele, alterar seus parâmetros de transmissão (ex. nível de potência de transmissão, esquema de modulação) para não causar interferência na comunicação primária (AKYILDIZ et al., 2006). Para realizar esta tarefa, os rádios cognitivos seguem o chamado ciclo cognitivo, ilustrado na Figura 1 (AKYILDIZ et al., 2006). As etapas do ciclo cognitivo são (AKYILDIZ et al., 2006):

- **Sensoriamento de espectro:** tarefa de encontrar espaços vagos (propícios para a transmissão) no espectro eletromagnético, escaneando o ambiente ao redor.
- **Análise de espectro:** após encontrar os espaços vagos do espectro, os CRs caracterizam esses espaços, estimando os estados dos canais e suas capacidades (ex. nível de ocupação, largura de banda, nível de ruído e taxa de dados alcançada).

- **Decisão sobre o espectro:** com base nas informações obtidas na etapa anterior, o CR irá determinar a taxa de transmissão de dados e a potência da transmissão a serem empregadas. Nessa fase, requisitos da aplicação/usuário podem ser considerados.

Figura 1 – Ciclo Cognitivo



Fonte: Adaptada de (Haykin, 2005)

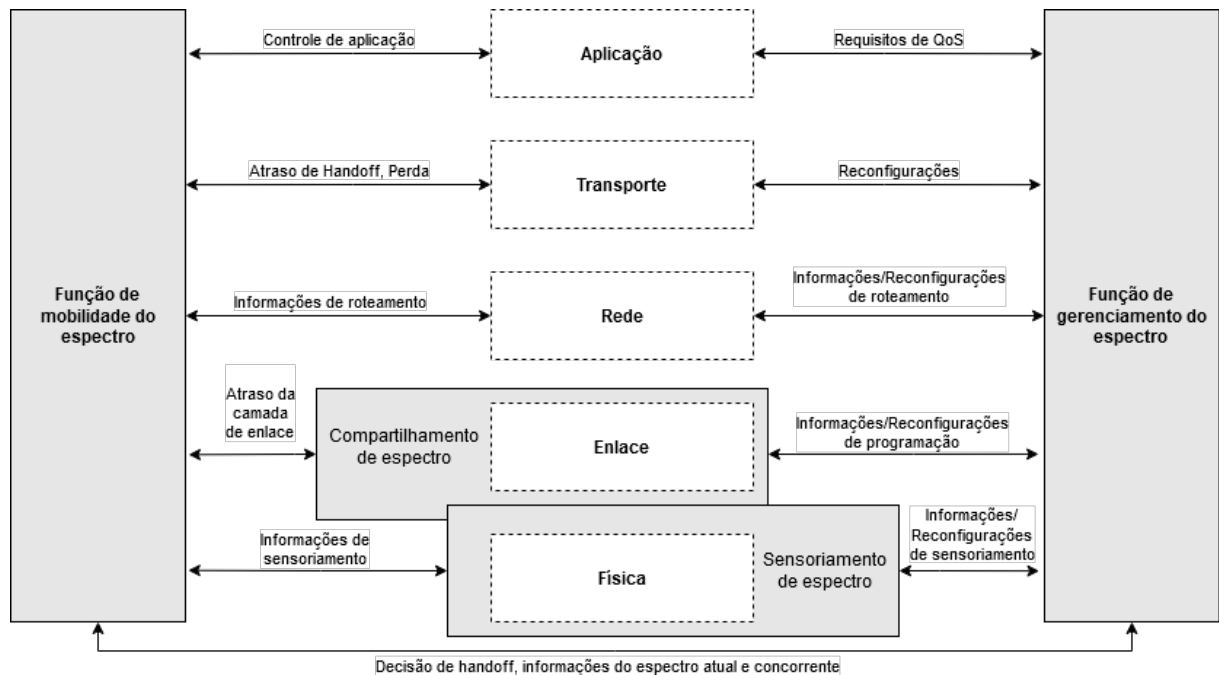
Assim, a tecnologia de CR permitirá que os usuários (AKYILDIZ et al., 2006):

- Determinem quais partes do espectro estão disponíveis e detectem a presença de usuários licenciados quando um usuário opera em uma banda licenciada (detecção de espectro).
- Seleccionem o melhor canal disponível (gerenciamento de espectro).
- Coordenem o acesso a este canal com outros usuários (compartilhamento de espectro).
- Deixem o canal quando um usuário licenciado for detectado (mobilidade do espectro).

Tendo em vista o número significativo de interações que as funcionalidades de CRs demandam, é necessário uma abordagem em várias camadas. Nas funções de acesso ao meio,

gerenciamento do espectro e mobilidade do espectro, as funcionalidades de aplicação, roteamento, transporte, e camada física são realizadas de maneira cooperativa, considerando a natureza dinâmica do espectro subjacente (AKYILDIZ et al., 2006). Essas funcionalidades primárias de CR são mostradas na Figura 2.

Figura 2 – Funcionalidades de comunicação em rede (AKYILDIZ et al., 2006)



Fonte: Adaptada de (AKYILDIZ et al., 2006)

Tendo em vista as explicações anteriores, componentes importantes do conceito de rádio cognitivo podem ser entendidos como: a capacidade de se adaptar a variações estatísticas no ambiente de radiofrequência usando reconfigurabilidade, detectar e aprender sobre o espectro, fornecer comunicação confiável e utilização eficiente do espectro eletromagnético, mantendo uma alta qualidade de serviço (*QoS*), tanto para usuários primários quanto secundários (Ramani; Sharma, 2017).

2.2 RÁDIOS COGNITIVOS EM 5G

A tecnologia de rádio cognitivo (CR) se estabeleceu como uma solução para atender a crescente necessidade de utilização do espectro ao mesmo tempo em que a quinta geração de redes móveis (5G) está sendo implantada (BADOI et al., 2011).

Com a política de regulamentação estática do espectro, um nó móvel pode operar apenas na sua banda licenciada e com a largura de banda limitada fixa. Embora as bandas celulares sejam

fortemente capitalizadas e exploradas, medições revelaram que algumas bandas de frequência licenciadas estão subutilizadas.

Essa problemática pode ser resolvida através da utilização de outra importante característica de CRs, a interoperabilidade de sistemas, que é a capacidade do dispositivo de se adaptar e cooperar com todas as outras tecnologias do meio. Assim, o CR traz o paradigma de integração para o ambiente sem fio em um alto nível de desempenho: o terminal de CR pode baixar o software adequado, adaptar seus parâmetros de configuração, alterar dinamicamente seus protocolos, se conectar a todos os tipos de redes sem fio e escolher a melhor maneira de atender aos requisitos de suas aplicações/usuário (BADOI et al., 2011).

Outro benefício dessa aplicabilidade que devemos frisar é o baixo custo, pois, como o espectro é usado de forma oportunista e isento de garantia, espera-se que a precificação da locação do espectro seja muito menor do que o custo da compra de uma banda licenciada.

Portanto, o CR pode permitir a expansão de espectro de uma rede celular a um custo relativamente baixo, oferecendo uma solução natural para lidar com o crescente tráfego de dados móveis (Hong et al., 2014)

2.3 PADRÕES PARA RÁDIOS COGNITIVOS

Um dos principais desafios para o desenvolvimento na área de rádios cognitivos é a ausência de padrões amplamente aceitos. Isso acaba por impedir a integração de aplicações/dispositivos, além de limitar a interoperabilidade entre eles (GUNGOR et al., 2011).

Geralmente, redes de CR consistem em um grupo de sistemas diversos em um meio de várias redes de comunicações. Portanto, sua padronização torna-se uma tarefa bastante complexa, pois é de extrema importância que a integração de todos os seus componentes aconteça de maneira uniforme. Um pré-requisito crítico para a padronização de sistemas baseados em CR é a adoção de padrões de interoperabilidade para o sistema geral, além de uma segurança robusta das informações, segurança aprimorada dos produtos e sistemas e um conjunto de protocolos de comunicação (Nghia Le; Chin; Chen, 2017). A seguir, os principais padrões baseados em rádios cognitivos são sumarizados:

2.3.1 *IEEE 802.11ah*

Com o intuito de tornar possível redes locais sem fio com maior alcance, o *IEEE* desenvolveu o padrão *IEEE 802.11ah* baseado em ondas de baixa frequência. Ele opera em diferentes canais, em bandas não licenciadas de 900 MHz (denominadas rede sub-1GHz), que prometem baixa potência e alcance de até 1 km, variando de 1 a 16 MHz de largura de banda com um mínimo de 100Kb/s de vazão (ALAM et al., 2017).

2.3.2 *IEEE 802.11af*

O padrão *IEEE 802.11af* ou *White-Fi*, foi aprovado em fevereiro de 2014 para fazer uso dos chamados espaços disponíveis (em branco) do espectro alocado às operadoras de TV(TVWS) nas bandas UHF (em inglês, *Ultra High Frequency*) e VHF (em inglês, *Very High Frequency*), entre 54 e 750 MHz. Diferente do 802.11ah, ele prevê que o alcance seja superior a 1 km, com uma taxa máxima de dados aproximada de 40 Mbps, adequadas para redes de área próxima (do inglês, *Near-me area networks, NANs*) baseadas em rádio cognitivo e redes residenciais(do inglês, *Home network, HANs*) (TOWHIDLOU; SHIKH-BAHAEI, 2017) (Nghia Le; Chin; Chen, 2017).

2.3.3 *IEEE 802.22 (WRAN com TVWS)*

Com a mudança de transmissão da TV analógica para a digital, grande parte do espectro de rádio alocado a TV analógica ficou subutilizado, o que gerou oportunidades para a utilização deste espectro por serviços sem fio secundários (não licenciados). Assim, em 2010, o *IEEE* lançou o seu primeiro padrão para a utilização dos chamados *Whites Spaces* em áreas rurais, o *IEEE 802.22*. Sem causar interferência nos usuários primários, o *IEEE 802.22* opera nas bandas VHF e UHF de 54 MHz a 862 MHz. Também possui recursos exclusivos, por exemplo: localização geográfica, detecção de espectro e coexistência intra-sistema para operações baseadas em CR (Nghia Le; Chin; Chen, 2017) (ALAM et al., 2017) (TOWHIDLOU; SHIKH-BAHAEI, 2017).

2.3.4 IEEE 802.16 (WiMAX)

O IEEE 802.16, também conhecido por WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), introduziu alguns mecanismos cognitivos para a operação em redes com frequências abaixo de 11GHz. Ele suporta transmissões em longa distância (até 50km) e uma alta taxa de transmissão (70Mb/s) em áreas rurais e suburbanas. Além disso, uma rede WiMAX permite a coexistência entre usuários não licenciados e usuários primários (licenciados) em qualquer tipo de sistema licenciado. (TOWHIDLOU; SHIKH-BAHA EI, 2017) (ALAM et al., 2017).

2.4 TESTES PARA RÁDIOS COGNITIVOS

Em (DIETRICH; WOLFE; VANHOY, 2012), os autores classificam os testes de CR em três categorias: pesquisa e desenvolvimento (P&D), regulamentação/conformidade e consumidor/usuário final. Na primeira categoria estão os testes realizados na academia nos estágios iniciais, em que se tenta definir os melhores parâmetros e otimizar o processo de desenvolvimento. A segunda etapa compreende o teste de conformidade de rádio com padrões estabelecidos por agências reguladoras, indústria ou até mesmo outras pesquisas científicas. Os resultados desta etapa envolvem tanto a conformidade com as tecnologias de comunicação licenciadas existentes, e nas quais o rádio será inserido, como também nos ambientes não licenciados, principalmente para que o Rádio Cognitivo não interfira em outros tipos de comunicação. A terceira etapa envolve testes que permitem ao usuário final decidir se deve ou não usar um produto. A tabela 1 resume estas categorias.

Embora as três categorias envolvam testes de desempenho do sistema, elas apresentam algumas diferenças. A primeira categoria requer que os testes de desempenho sejam usados para

Tabela 1 – Tipos de testes para ambientes cognitivos

Contexto de Teste	Função	Multiplicidade
P&D	Avaliar e desenvolver a tecnologia	Interações múltiplas para otimizar parâmetros para cada tipo de CR considerado
Regulamentação	Garantir o comportamento correto	Vários dispositivos/produtos
Usuário Final	Avaliar e selecionar	Vários dispositivos/produtos

Fonte: Adaptada de (DIETRICH; WOLFE; VANHOY, 2012)

otimizar a estrutura, os algoritmos e os parâmetros do motor cognitivo (do inglês, *Cognitive engineering, CE*). Na segunda, avaliações semelhantes às da primeira são levadas em conta, mas outras avaliações que abordam o produto final são adicionadas. Estes podem incluir avaliações do consumo de energia e interação com outros componentes do sistema, ou até mesmo outros sistemas. Finalmente, na terceira categoria, os testes de desempenho, orientados para o usuário, devem ser rápidos e precisos e devem ser focados principalmente no pior dos casos.

Embora a categoria de P&D tenha recebido grande atenção da academia e da indústria, as outras duas foram negligenciadas. Este trabalho difere de estudos anteriores, pois aborda essa lacuna na segunda categoria, ao propor um sistema e metodologia para testes de desempenho de CR. Com a realização de um estudo detalhado, através de um levantamento bibliográfico sobre os diversos tipos de teste para ambientes de CR, observou-se a ausência de uma pesquisa que atendesse o processo de testes de conformidade para CR, de acordo com as normas técnicas dadas pelos órgãos responsáveis por padronizar essa tecnologia. Dessa forma. Este trabalho tem o intuito de criar a base para um ambiente de teste de conformidade para CR.

2.5 TESTE DE CONFORMIDADE E ISO IS-9646

Rádios definidos por *software* e CR são exemplos de tecnologias que proporcionam flexibilidade ao desenvolvimento de dispositivos de comunicação via rádio, pois permitem a reconfiguração e programabilidade do hardware via software. Tais tecnologias trazem um maior desacoplamento entre hardware e software. Para que estas tecnologias se tornem um produto final é necessário que as pesquisas na área sejam conduzidas de uma maneira seriamente coordenada, garantindo a adequação das tecnologias aos padrões determinados e verificando os impactos da inserção dessa tecnologia em ambientes reais. Para isso, o processo de teste é essencial.

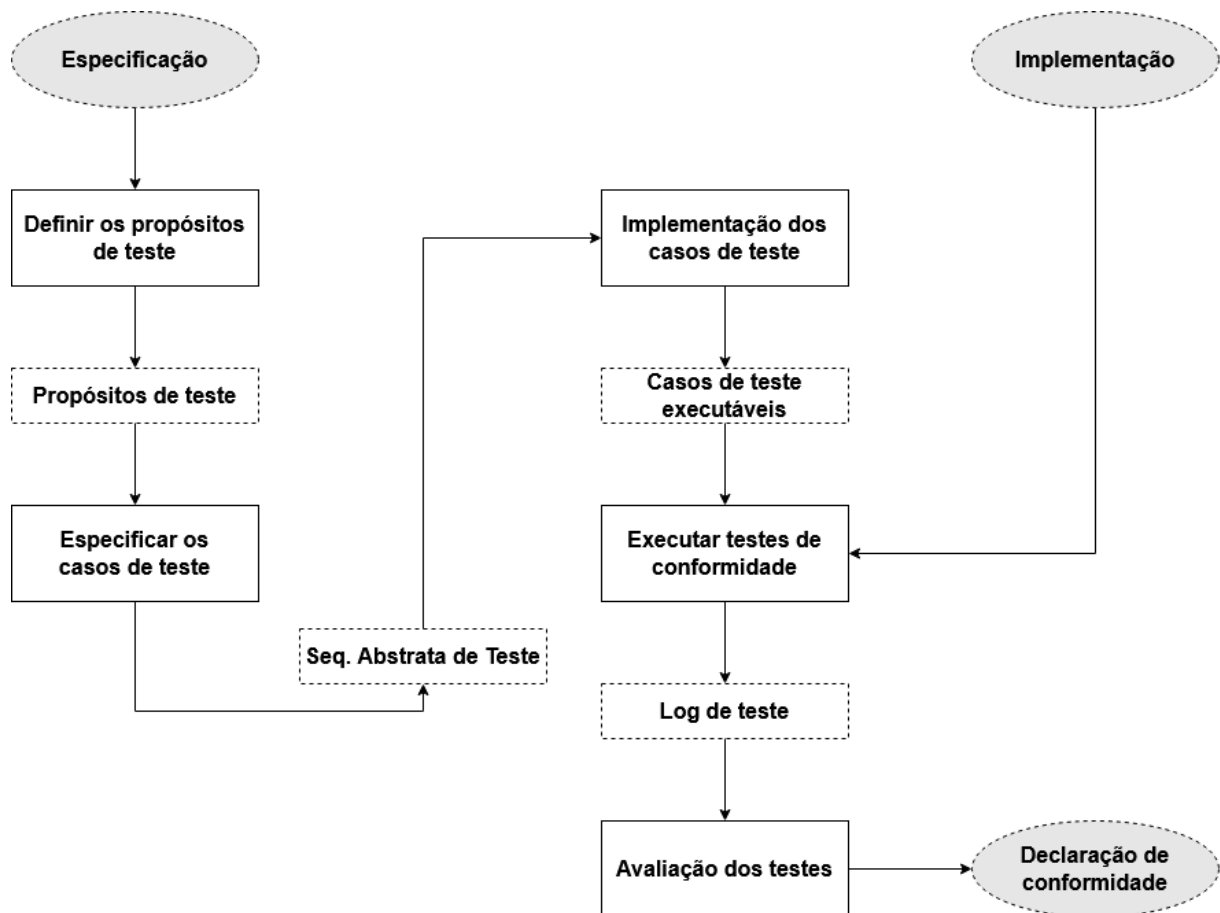
Em software, os testes podem ser divididos em dois grupos básicos, testes funcionais e testes estruturais. No teste estrutural, também conhecido como teste de caixa branca, o analista tem acesso ao código fonte e conhece a estrutura interna do produto que está sendo analisado, o que possibilita que sejam escolhidas partes específicas de um componente para serem avaliadas. O objetivo é testar o software usando o conhecimento sobre o código em si, por exemplo, executando cada instrução ao menos uma vez, ou tentando executar todos os caminhos através do código do programa levando em conta decisões, ramificações, *loops*,

etc. Nos testes funcionais, a ênfase está em testar a funcionalidade observada externamente de um programa com base em sua especificação. Ele também é chamado de teste de caixa preta, ou teste de conformidade, onde o sistema testado é tratado como uma caixa preta, pois o analista não tem acesso ao código fonte e desconhece a estrutura interna do sistema. Neste aspecto, pares de entradas e saídas são utilizados com o objetivo de determinar se o produto está correto, satisfazendo os padrões e políticas regulatórias fornecidos em sua especificação. Por essa razão, é de suma importância que neste tipo de teste a especificação do produto seja completa, precisa e clara (TRETMAANS, 2001).

À vista de padronizar os testes de conformidade de sistemas abertos, a Organização Internacional de Padronização (do inglês: *International Organization for Standardization, ISO*), juntamente com o Setor de Normatização das Telecomunicações (em inglês: *Telecommunication Standardization Sector, ITU-T*), desenvolveu um padrão para testes de conformidade, a norma ISO IS-9646. Ela define uma metodologia para a especificação dos conjuntos de testes de conformidade, bem como os procedimentos a serem seguidos (ISO, 1991).

Existem três fases principais no teste de conformidade (ISO, 1991). A primeira fase, denotada de geração de teste ou derivação de teste, compreende a especificação de um conjunto de testes abstratos para um protocolo específico. Este conjunto de testes é abstrato no sentido de que os testes são desenvolvidos independentemente de qualquer implementação. A segunda fase, referida como implementação de teste, consiste na definição dos meios de execução de conjuntos de testes específicos. Os testes abstratos são transformados em executáveis, que podem ser executados ou interpretados em um dispositivo de teste real ou sistema de teste. A última fase é a de execução do testes, onde os casos de teste implementados são executados em uma implementação em teste (do inglês: *implementation under test, IUT*) e o comportamento resultante do IUT é observado. Isso leva à atribuição de um veredicto sobre a conformidade do IUT com relação à especificação. Os resultados da execução do teste são documentados no relatório de teste de conformidade do protocolo (do inglês, *Protocol Conformance Test Report, PCTR*) (TRETMAANS, 2001). A Figura 3 ilustra o processo de avaliação da conformidade, de acordo com a norma ISO IS-9646:

Figura 3 – Processo de avaliação de conformidade ISO IS-9646



Fonte: Adaptada de (ISO, 1991).

3 TRABALHOS RELACIONADOS

A avaliação de mecanismos e dispositivos para rádio cognitivo compreende aspectos diferentes, tais como: métricas, tipo de ambiente de teste e finalidade do teste, os quais têm recebido atenção da comunidade científica. Por exemplo, em (ZHAO et al., 2009), os autores apresentam relações entre métricas, funções utilidade, motores cognitivos (*cognitive engines* - *CEs*) e desempenho alcançado e casos de teste para RC. Eles classificam as métricas em três níveis: nó, rede e aplicação e propõem testes orientados a cenários baseados em mapas do ambiente de rádio (*Radio Environment Map-Based Scenario-Driven Testing* - *REM-SDT*) para avaliar o desempenho do RC. O REM é um banco de dados com informações de vários domínios, como serviços disponíveis, regulamentações espectrais, experiências anteriores, locais e atividades de dispositivos de rádio. O artigo utiliza simulação e concentra-se na avaliação de desempenho dos mecanismos propostos para RC.

Uma plataforma de RC baseada em um rádio de software periférico universal, ou *Universal Software Radio Peripheral (USRP)* é apresentada em (MARTIAN; PETRICA; RADU, 2013). Ela fornece suporte para vários casos de teste, permitindo que diferentes características do RC sejam medidas (ex. tempo de transição de canais, tempo de transmissão e sensoramento e limites de detecção de interferência). Os autores abordam um estudo de caso de um dispositivo disponível comercialmente e concentram-se na detecção de sinais de teste de radar por dispositivos 802.11h, mostrando os problemas encontrados no dispositivo testado.

Combinando emulação e testes *over-the-air (OTA)* em uma *shield box*, (SHARMA et al., 2013) propõe um ambiente eletromagnético virtual que permite testar dispositivos em cenários multidimensionais (uso simultâneo de múltiplas frequências, vários usuários e diferentes características de canais de rádio). Os autores lidam com a complexidade do ambiente adotando uma abordagem multinível. Alguns exemplos de cenários são apresentados, mas nenhuma prova de conceito é realizada.

Um *testbed* para *smart grid* que adota tecnologias de rádio definido por software e um simulador digital em tempo real, além de suportar sistema de energia e sistema de comunicação baseado em RC é proposto em (You; Liu; Sun, 2018). Para mostrar sua viabilidade, um sistema de energia com um parque eólico e comunicação baseada em RC que usa um algoritmo de aprendizado de máquina para detecção de espectro é instanciado e avaliado em termos de latência da comunicação e estabilidade de tensão. A proposta foca na avaliação de desempenho

e é capaz de abordar outras funcionalidades de RC e recursos de *smart grid*.

Em (BABU; VEMUR, 2018) e (DASILVA et al., 2018), dois *testbeds* de baixo custo baseados em SDR são propostos. O primeiro se concentra nos testes de CR para redes LTE e LTE-A e lida com o problema de gerenciamento de espectro, avaliando a taxa de transferência de links da rede de rádios cognitivos quando o algoritmo de alocação de banda de espectro proposto é empregado. O segundo aborda o potencial da adoção do SDR na comunicação multimídia. Para fazer isso, as transmissões de arquivos de vídeo e áudio são realizadas usando os kits GNU Radio e USRP. Embora a afirmação dos autores de que o teste proposto é projetado para redes de RC, nenhuma funcionalidade de RC foi considerada na comunicação, e avaliação de desempenho, conformidade ou cognição é negligenciada.

Metodologias de teste e avaliação para RC são estudadas em (SOLLENBERGER; ROMANO; DIETRICH, 2015). Os autores propõem o Sistema de Teste de Rádio Cognitivo (di inglês, *Cognitive Radio Test System, CRTS*), que avalia o desempenho do CR em diferentes cenários e adota o CORNET (*Cognitive Radio Network Testbed*) (INSTITUTE, 2015) para instanciar o CRTS.

Lidando com a falta de uma abordagem comum para avaliar métodos de detecção de sinal no processo de sensoriamento de espectro, (T. ŠOLC; MOHORČIČ; FORTUNA, 2018) propõe uma metodologia de sete etapas (da identificação do método de detecção à análise de resultados) para avaliar esses métodos quantitativamente em simulações ou experimentos práticos. A metodologia é aplicada a uma avaliação de desempenho experimental com nove métodos de detecção de sinais e métricas como complexidade, sensibilidade ao nível de ruído e mínimo detectável são analisadas. Sua aplicabilidade é centrada na detecção de espectro e análise de desempenho, não abrangendo outras funcionalidades, como mobilidade do espectro, controle de potência ou teste de conformidade.

Para desenvolver protótipos de CR de forma mais rápida, fácil e com menor custo, (SAGDUYU et al., 2017) propõe uma ferramenta de programação visual que engloba protocolos, mecanismos de segurança e módulos individuais para funcionalidades de CR. A ferramenta gera códigos de software de forma automática para ambientes de simulação e emulação. Da mesma forma que os trabalhos anteriores, os autores se concentram na avaliação de desempenho do CR enquanto lidam com o compromisso de desempenho versus a sobrecarga de rede.

Uma Metodologia de Teste de Rádio Cognitivo que infere a cognição do dispositivo com base nos desempenhos de PU e SU é apresentada em (THOMPSON; HOPKINSON; SILVIUS, 2015).

A cognição é definida de acordo com a capacidade do SU de melhorar sua taxa de transmissão e reduzir a interferência no PU (inferida a partir da taxa de transferência do PU). Para isso, os usuários (SU e PU) são implementados usando uma plataforma de pesquisa de acesso aberto sem fio (*Wireless Open-Access Research Platform*).

Ao considerar as cognições do RC e a cognição humana como análogas, (DIETRICH; WOLFE; VANHOY, 2012) e (DABAGHCHIAN et al., 2017) medem a inteligência do dispositivo de CR por meio de abordagens psicométricas. O primeiro usa Modelos de Resposta ao Item para avaliar o desempenho do RC e investiga as propriedades cognitivas de cada item do motor cognitivo (CE). O segundo avalia um CE com base no modelo de inteligência Cattell-Horn-Carroll (MCGREW, 2009). Por meio da análise de desempenho, o modelo identifica e quantifica os fatores de inteligência e habilidades cognitivas do dispositivo em teste e, assim, aponta os aspectos que estão de acordo com a natureza do RC. Embora interessantes, as propostas psicométricas atuais apenas avaliam subconjuntos de um EC e não cobrem todo o sistema integrado.

Os testes de RC podem ser classificados em três categorias (DIETRICH; WOLFE; VANHOY, 2012): pesquisa e desenvolvimento (P&D), regulamentação (conformidade) e consumidor (usuário final). O primeiro compreende os testes realizados pela academia nos estágios iniciais e tem como objetivo avaliar os projetos de RC e otimizar suas arquiteturas, parâmetros e algoritmos. O segundo abrange os testes de conformidade que verificam se o CR apresenta as funcionalidades/comportamentos exigidos e não viola as políticas e padrões regulatórios definidos pelas agências (por exemplo, a Comissão de Comunicação Federal (*Federal Commission Communications*), nos EUA), indústrias ou mesmo pesquisas científicas. A última categoria envolve testes que permitem ao usuário final decidir sobre o uso do produto.

Embora essas categorias usem a avaliação de desempenho do sistema, elas apresentam algumas diferenças. A P&D utiliza testes de desempenho para otimizar a estrutura, algoritmos e parâmetros do mecanismo cognitivo. O segundo realiza avaliações para abordar recursos adicionais do produto final, como consumo de energia e interações com outros componentes ou sistemas. Finalmente, na terceira classe, os testes de desempenho são orientados ao usuário e devem ser rápidos e precisos, com foco nos piores casos.

Enquanto a categoria de P&D tem recebido grande atenção da academia e da indústria, as demais têm sido menos exploradas. Nosso artigo difere de estudos anteriores, pois enderça a lacuna na segunda categoria, propondo um sistema e uma metodologia para testes de conformidade em RC, com o objetivo de responder se o comportamento da implementação em teste

(*IUT*, do inglês, *implementation under test*) corresponde ao produto especificado pelos padrões de mercado, para atestar a conformidade da implementação com relação à especificação.

Como observado, vários trabalhos abordaram testes de RC na literatura. A tabela 3 resume as características dos trabalhos apresentados. Em geral, eles diferem em termos de finalidade (por exemplo, avaliação de desempenho de mecanismos para CR (ZHAO et al., 2009) ou determinação do nível de cognição (DABAGHCHIAN et al., 2017) (MCGREW, 2009)), técnica adotada para representar o ambiente de rádio (por exemplo, simulação/emulação (ZHAO et al., 2009), experimentação (MARTIAN; PETRICA; RADU, 2013) ou abordagem híbrida (SHARMA et al., 2013)), além de análise de métricas. No entanto, sistemas de testes de conformidade para RC ainda são pouco explorado, sem estudo maduro disponível, mesmo sendo fundamental para afirmar se os dispositivos de CR atendem as políticas regulatórias e possuem as funcionalidades/habilidades necessárias para operar sem causar interferências prejudiciais a um UP. A este respeito, a próxima seção apresenta a fundamentação teórica, contendo conceitos chaves para o entendimento dessa proposta.

Tabela 2 – Abordagens para testes de RC.

Artigo	Descrição	Ambiente	Finalidade	Funcionalidades Testadas	Softwares	Métricas
(ZHAO et al., 2009)	São apresentadas relações entre métricas, funções de utilidade, CE e desempenho, bem como um sistema para avaliação de desempenho de RC.	Simulação	Avaliação de desempenho	Sensoriamento de espectro, Controle de potência, Modulação adaptativa	Gerador de ambiente de rádio e XML	Tempo de adaptação e média de uso total
(MARTIAN; PETRICA; RADU, 2013)	Descreve uma plataforma para medir diferentes características de RC	Experimentação	Avaliação de desempenho	Sensoriamento de espectro	GNU Radio e Matlab	Tempo de transmissão de fechamento do canal
(SHARMA et al., 2013)	Fornece uma testbed para testar o dispositivo holisticamente	Emulação e Experimentação	Avaliação de desempenho	Nenhuma	Não definido	Nenhuma
(SOLLENBERGER; ROMANO; DIETRICH, 2015)	Apresenta um sistema de teste de RC	Experimentação	Avaliação de desempenho	Modulação adaptativa	C++	Magnitude do vetor de erro (MVE)
(SAGDUYU et al., 2017)	Propõe uma ferramenta de programação visual para projetar protótipos de RC	Simulação e Experimentação	Avaliação de desempenho	Acesso dinâmico ao espectro, sensoriamento de espectro, roteamento cognitivo de rede, contra-medidas de ataque, exemplos de ataques	EZPro, CORE e EMANE	Nenhuma
(THOMPSON; HOPKINSON; SILVIUS, 2015)	Apresenta uma metodologia para definir a cognição do dispositivo	Experimentação	Nível de cognição do dispositivo	Sensoriamento de espectro, Modulação adaptativa	Matlab e WARP Lab	Taxa de erro de bits e taxa de transferência
(DIETRICH; WOLFE; VANHOY, 2012)	Adota os modelos de resposta ao item (IRMs) para medir a inteligência do dispositivo RC Usa o modelo de inteligência	Simulação	Nível de cognição do dispositivo	Sensoriamento de espectro, Seleção /Reconfiguração de parâmetros de transmissão	Matlab	Diferença entre a solução de RC e a ideal.
(DABAGHCHIAN et al., 2017)	Cattell-Horn-Carroll (CHC) e resultados de desempenho para quantificar e qualificar o dispositivo cognitivo	Simulação	Nível de cognição do dispositivo	Sensoriamento de espectro, Reconfiguração de Parâmetros	Matlab	Taxa de transferência, atraso e relação de interferência
(T. ŠOLC; MOHORČIČ; FORTUNA, 2018)	Metodologia para avaliar métodos de detecção de sinal na detecção de espectro	Experimentação	Avaliação de desempenho	Sensoriamento de espectro	GNU Radio, Python e bibliotecas VESNA	Nível de sensibilidade de ruído, complexidade computacional e sinal mínimo detectável
(You; Liu; Sun, 2018)	Fornece um testbed para Smart Grids utilizando Rádios Cognitivos e Sistema de Comunicação	Simulação e Experimentação	Avaliação de desempenho	Sensoriamento de espectro	Simulador Digital em Tempo Real e GNU Radio	Controle de estabilidade de tensão e latência de comunicação
(BABU; VEMUR, 2018)	Propõe um testbed de baixo custo de Rádio Cognitivo (RC) para redes LTE e LTE-Advanced	Experimentação	Avaliação de desempenho	Sensoriamento de espectro, Spectrum Handoff	WaveGuru SDR	Taxa de transferência
(DASILVA et al., 2018)	Proposta de um Testbed utilizando rádios definidos por software (SDRs) para comunicações multimídia	Experimentação	Avaliação de desempenho	Nenhuma	GNU Radio	Nenhuma
Este Trabalho	Propõe um sistema e uma metodologia para testes de conformidade de RC	Experimentação	Teste de conformidade	Sensoriamento de espectro, Spectrum Handoff	GNU Radio, linguagens R e Python, ZeroMQ Middleware.	Porcentagem de Matching (PoM) e sua variante

4 METODOLOGIA E SISTEMA PROPOSTO PARA TESTES DE CONFORMIDADE DE RÁDIOS COGNITIVOS

O Rádio Cognitivo fornece flexibilidade, inteligência e rápida reconfiguração aos dispositivos, via softwarização, permitindo que funcionalidades sejam atualizadas e instaladas em qualquer local da rede. A sua inserção nos produtos requer uma verificação sistemática da conformidade com as normas definidas pelo mercado, além de uma verificação dos seus impactos em ambientes reais, tornando essencial o processo de teste.

A metodologia/sistema apresentada neste trabalho se baseia na norma ISO IS-9646, estruturando o teste de conformidade em três estágios. No primeiro deles, um conjunto de testes abstratos (por serem independente da implementação, possibilitam também a implementação de todos os tipos de testes descritos em 2.4) para CR é definido. Informações como requisitos mínimos, definição e aplicabilidade, objetivo do teste, condições iniciais, procedimento e requisitos de saída de teste constituem cada descrição de teste.

A Seção 4.3 apresenta um conjunto de testes abstratos para CR categorizados em funcionalidades. A segunda etapa compreende a implementação dos testes, ou seja, a transformação dos testes abstratos em testes executáveis que podem ser executados em dispositivos reais ou sistemas de testes. Os detalhes desta etapa são apresentados na Seção 5, juntamente com a descrição da implementação do sistema de teste para CR proposto e dois casos de testes adotados como prova de conceito do sistema .

A última etapa é a execução do teste em que o comportamento do sistema sob teste (do inglês, *System Under Test*, *SUT*) é observado e sua conformidade é verificada (TRETMAANS, 2001). Os resultados desta etapa para os casos de testes adotados como prova de conceito são apresentados no Capítulo 6.

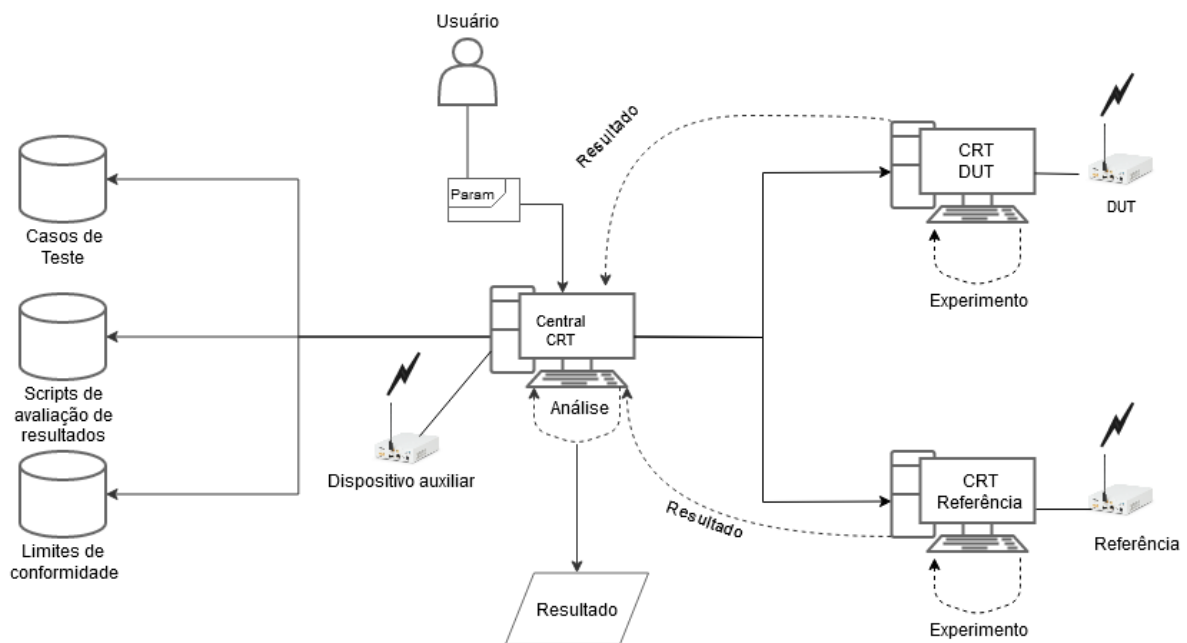
4.1 ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO

A arquitetura do sistema de teste de conformidade proposto é mostrada na Fig. 4, onde o ambiente de rádio (comunicações primárias e/ou secundárias) necessário para a realização dos testes é criado utilizando-se de rádios definidos por softwares (SDR). Para se construir o teste de conformidade sob a perspectiva da funcionalidade, em geral, dois dispositivos são considerados: o dispositivo sob teste (*Device Under Test* - *DUT*) e o dispositivo de referência. O primeiro, como o próprio nome já diz, refere-se ao dispositivo sob teste, que passará

pelo mesmo experimento (incluindo métricas, funcionalidades e ambiente) que o último, o dispositivo adotado como referência, já calibrado e possuindo o comportamento de um CR alvo/desejado.

Para ser aprovado no teste, o DUT deve seguir o comportamento do dispositivo de referência, ou seja, executar a funcionalidade/ação de forma correta. Sob a visão do limite de operação, o DUT passa no teste se operar dentro dos limites definidos. Diferentemente de outros sistemas que se concentram na avaliação de desempenho do dispositivo, esta proposta inspeciona a consistência do DUT comparando-o a um dispositivo de referência (que atenda aos padrões de mercado) e seus valores de operação aos limites definidos (por exemplo, dados por regulamento e políticas de negócios). Vale ressaltar que mesmo que não haja nenhum dispositivo de referência (rádio cognitivo) no mercado, o sistema proposto é viável porque admite que um dispositivo lógico (que compreende o comportamento desejado e os limites de operação) possa ser considerado.

Figura 4 – Arquitetura do sistema proposto para teste de conformidade em rádios cognitivos



Fonte: O Autor.

A arquitetura apresenta três bancos de dados (BDs). O primeiro ("Casos de Teste") contém os casos de teste, que são organizados em áreas macro, funcionalidades do CR, tais como detecção de espectro, mobilidade de espectro, reconhecimento de localização e controle de potência. Seus parâmetros de entrada podem ser definidos pelo usuário levando em consideração as políticas de regulação e os parâmetros de transmissão locais (por exemplo, largura de

banda, frequência da portadora, potência de transmissão e tipo de sinal primário). Os casos de teste se complementam e abordam aspectos específicos das funcionalidades dos CR, fornecendo uma maneira refinada de verificar em quais aspectos de uma determinada funcionalidade o DUT foi aprovado/reprovado. Eles são descritos na Seção 4.3.

O segundo banco de dados (“*Scripts de Avaliação de Resultados*”) armazena os *scripts* usados para avaliar os resultados dos casos de testes. Testes diferentes podem exigir *scripts* de avaliação diferentes. Limites e políticas regulatórias que precisam ser atendidas pelo dispositivo em teste para verificar sua conformidade são encontrados no último banco de dados (“Limites de conformidade”). Esses valores de operação refletem a regulamentação (como as definida por órgãos governamentais) e as políticas de negócios da operadora.

Os Controladores de Teste de Rádio Cognitivo (CRTs) gerenciam todas as etapas do processo de teste (desde a criação do experimento até a análise dos resultados). A arquitetura proposta possui três controladores denominados CRT Central, CRT DUT e CRT Disp. de Referência. O primeiro, além de fornecer a interface com o usuário, também gerencia a sincronização e troca de mensagens entre os elementos da arquitetura. Ele é responsável por fornecer as entradas para os demais controladores, definindo suas ações locais; acesso aos bancos de dados para obter o caso de teste selecionado pelo usuário, o *script* de avaliação de resultados adequado e os limites de conformidade a serem usados no teste definido; analisa os resultados dos testes enviados pelos controladores locais e verifica a conformidade do DUT, resumindo-os para o usuário.

Os dois últimos controladores realizam o controle local (sobre o DUT e o dispositivo de referência), reconfiguram os parâmetros de transmissão (por exemplo, potência de transmissão, frequência da portadora e tempo de detecção) de acordo com o caso de teste e registram os eventos (log) que acontecem nos dispositivos (DUT e Referência), enviando o log para o CRT central.

O sistema proposto também segue os padrões de teste definidos pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) e pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), que apresentam dois macroelementos: o SUT (*System Under Test*) e o sistema de teste de conformidade (*conformance test system - CTS*).

O primeiro é o nosso DUT e o último é representado pelos CRTs. O CTS define os limites, os testes que podem ser realizados e as interfaces abertas para testes. Além disso, possui controle total sobre o SUT e sobre as mensagens trocadas entre os dispositivos.

4.2 INTERAÇÃO ENTRE COMPONENTES

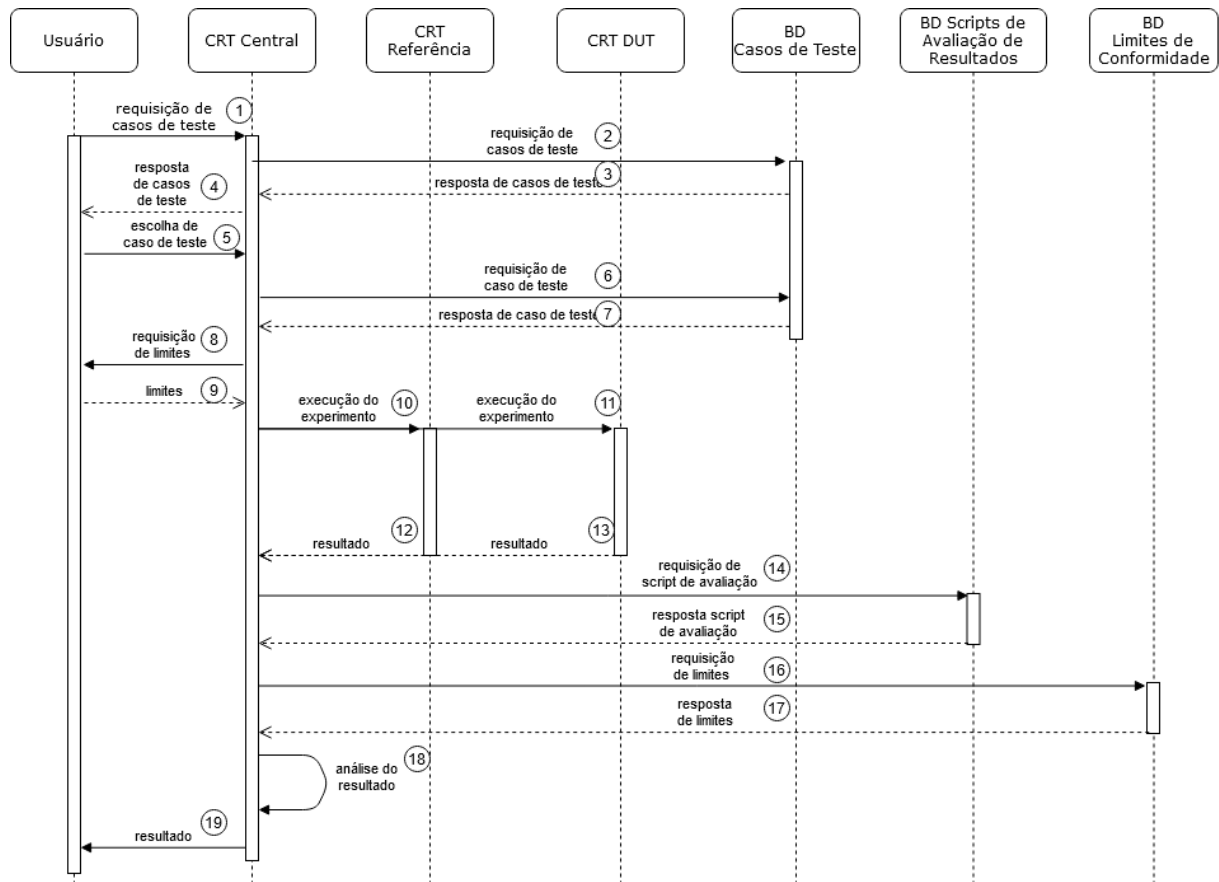
A Fig. 5 mostra as interações entre os componentes da arquitetura durante a execução de um teste. Primeiro, o usuário solicita a lista de casos de teste ao CRT central (1), que consulta o banco de dados de casos de teste para obter essa lista (2). Assim que a lista estiver pronta (3), o CRT central a mostra ao usuário (4). Após a seleção do caso de teste (5), o CRT central acessa novamente o banco de dados de casos de teste (6) e retorna o caso de teste selecionado (7).

Em seguida, a central CRT solicita ao usuário os parâmetros e limites de entrada para a execução do teste (8). Uma vez recebidos (9), o CRT envia o comando de execução do teste aos CRTs locais (DUT e Referência) (10) (11).

Neste ponto, as interações entre os componentes (por exemplo, sequência de mensagem e dispositivos envolvidos) podem ser diferentes, refletindo a dinâmica de cada caso de teste.

Ao término da execução do teste, os CRTs locais enviam os resultados para o CRT central (12) (13). O CRT central obtém a avaliação do *script* acessando o banco de dados de avaliação de resultados (14) (15), os limites de conformidade do banco de dados de limites de conformidade (16) (17) e realiza a avaliação dos resultados (18). Por fim, apresenta os resultados da conformidade ao usuário (19).

Figura 5 – Interações entre os componentes da arquitetura quando um teste é executado



Fonte: O Autor.

4.3 BANCO DE TESTES DE RÁDIO COGNITIVO

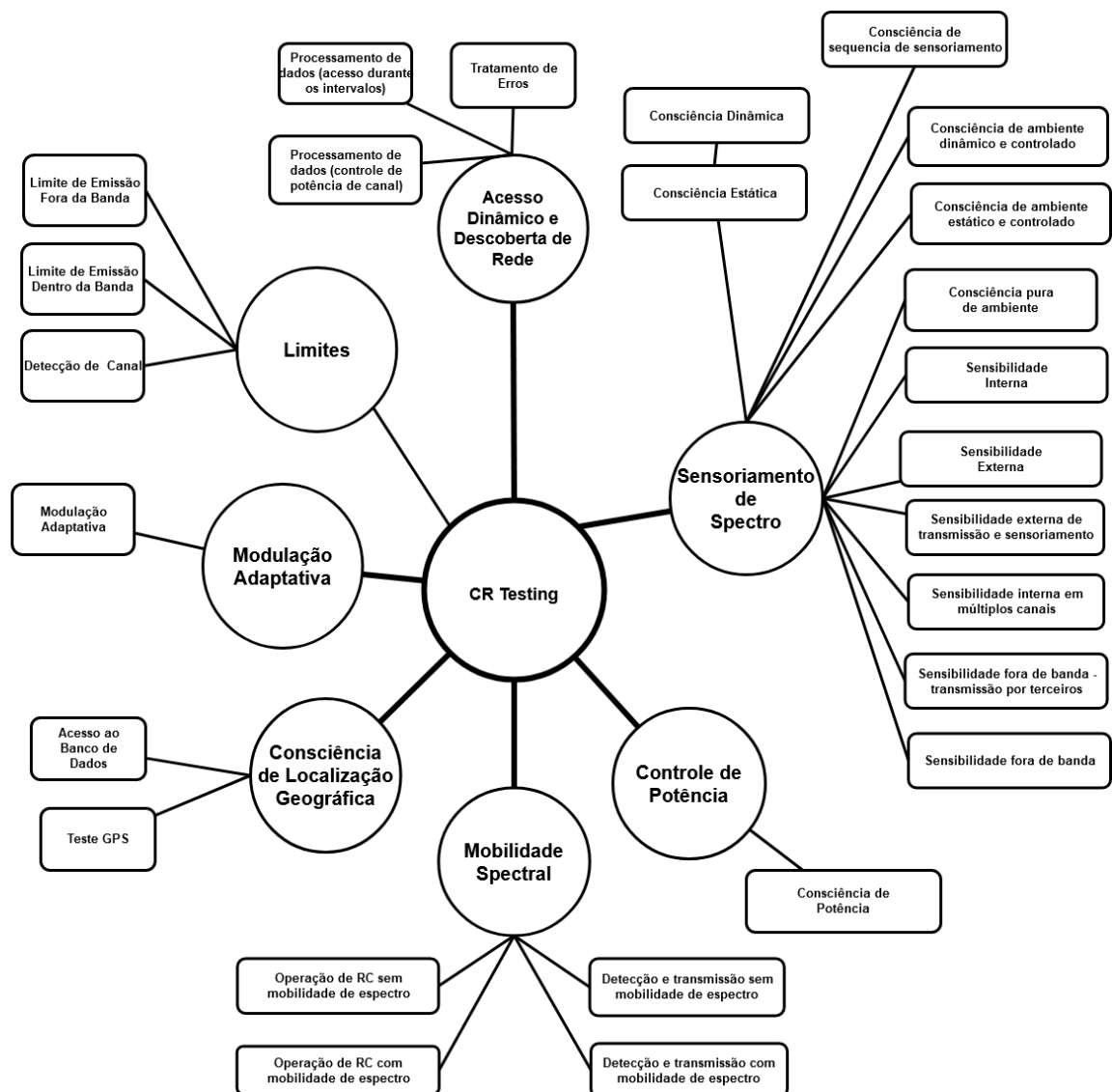
Espera-se que os rádios cognitivos (CRs) tenham múltiplas capacidades. Algumas delas são essenciais para a operação básica de CR, como detecção de espectro, controle de potência de transmissão, mobilidade espectral, acesso dinâmico e descoberta de rede, modulação adaptativa e reconhecimento de localização. A maioria dessas capacidades operam cooperativamente, ou seja, a operação de uma depende dos resultados de outras (MUECK et al., 2010).

Como dito na Seção 1, a pesquisa anterior desse projeto, realizada pelo agora doutorando em Ciência da Computação Francisco Júnior, deu início ao desenvolvimento de um documento com orientações e métodos para testes de conformidade em rádios cognitivos, ampliado (com novos casos) no desenvolver dessa pesquisa. O documento fora elaborado com o intuito de preencher a lacuna na metodologia de testes existentes para RC, apresentando uma composição e ordenação com regras claras para a testagem dos padrões de funcionamento previamente definidos pelo mercado. Os testes se complementam e abordam aspectos específicos das fun-

cionalidades dos CR, fornecendo uma maneira refinada (automatizada) de verificar em quais aspectos de uma determinada funcionalidade o DUT foi aprovado ou reprovado.

A Fig 6 apresenta esse novo conjunto de testes de conformidade, elaborados a partir de uma pesquisa das normativas existentes no mercado relacionadas a RC, divididos basicamente em duas perspectivas. Em primeiro lugar, apresentam-se testes que visam verificar se o dispositivo em teste é capaz de realizar uma determinada funcionalidade (por exemplo, detecção de espectro) ou ação desejada. Em segundo lugar, engloba testes que verificam se o DUT é capaz de realizar a funcionalidade/ação alvo dentro de limites definidos.

Figura 6 – Banco de testes para rádios cognitivos



Fonte: O Autor.

4.3.1 Testes de Sensoriamento de Espectro

- **Consciência estática:** este teste avalia a capacidade do CR de adaptar seus intervalos de transmissão e detecção, que podem estar sujeitos às camadas de gerenciamento e a regulação. A consciência garante que o rádio esteja funcionando corretamente e, o mais importante, que esteja ciente de seu estado. Quanto mais intervalos de transmissão/-sensoriamento o CR suportar, melhor flexibilidade ele pode fornecer à aplicação.
- **Consciência dinâmica:** avalia a capacidade do Rádio Cognitivo de adaptar seus intervalos de transmissão e detecção durante a operação do CR, ou seja, dinamicamente. Ele verifica a capacidade do CR de adaptar seus parâmetros de operação aos diferentes padrões de uso dos canais que podem variar ao longo do tempo.
- **Consciência de ambiente estático e controlado:** verifica a sensibilidade de potência do DU em um ambiente estático e controlado, com o intuito de garantir a precisão da sensibilidade do receptor do CR em uma determinada faixa de potência.
- **Consciência de ambiente dinâmico e controlado:** garante a sensibilidade de energia do DUT considerando níveis de potência dinâmicos. O receptor do CR deve ser capaz de detectar as mudanças de potência na transmissão durante o teste.
- **Consciência pura de ambiente:** garante a precisão da sensibilidade de potência do DUT em um ambiente real onde o espectro eletromagnético pode ser imprevisível.
- **Sensibilidade externa:** o CR deve ser capaz de detectar os sinais primários transmitidos em diferentes larguras de banda. Este teste garante a sensibilidade correta para trabalhar em campo com sinais primários que adotam larguras de banda diferentes. Neste caso de teste, um canal é adotado em cada instância.
- **Sensibilidade externa de transmissão e sensoriamento:** refere-se à capacidade do DUT de registrar o momento data/hora de quando o sinal primário está presente ou ausente no canal. Envolve detecção de canais, fornecendo suporte para tomada de decisão do CR.
- **Sensibilidade interna:** garante a correta sensibilidade do CR em diferentes limites de detecção internos (em dB). Portanto, ele deve ser capaz de detectar os sinais de PU que possuem limites de detecção diferentes.

- **Sensibilidade interna em múltiplos canais:** garante a correta sensibilidade do CR em vários canais com diferentes limites de detecção.
- **Sensibilidade fora da banda - Transmissão por terceiros:** verifica se o DUT é capaz de medir o nível de potência nos canais adjacentes de um canal predefinido, usado por terceiros. A emissão fora de banda deve ser verificada e controlada para não interferir nas transmissões realizadas em canais adjacentes a um determinado canal.
- **Sensibilidade fora da banda:** este teste se refere à capacidade do DUT de detectar canais adjacentes ao adotado em sua comunicação, a fim de controlar a emissão de fora da banda (interferência).
- **Consciência de sequência de sensoriamento:** verifica a capacidade do DUT de detectar os canais em uma ordem predefinida. O CR deve detectar os canais antes de realizar sua comunicação. Mesmo de forma aleatória, uma sequência de detecção de canais precisa ser seguida pelo CR.

4.3.2 Testes de Controle de Potência

- **Consciência de potência:** certifica que o CR pode transmitir em um determinado nível de potência de saída para não interferir na transmissão de outros rádios

4.3.3 Testes de Mobilidade Espectral

- **Operação de CR sem mobilidade de espectro:** avalia a capacidade do DUT de transmitir dados (sinal) e desocupar o canal de acordo com os tempos de transmissão e silêncio predefinidos. Este teste considera o sensoriamento perfeito e não adota a mobilidade do espectro, ou seja, troca de canal.
- **Operação de CR com mobilidade de espectro:** neste teste, o DUT deve ser capaz de realizar a mobilidade do espectro para retomar sua comunicação. Ambos os CRs usam uma sequência predefinida de canais para realizar sua comunicação, o que significa que a funcionalidade de detecção de espectro não é um alvo neste teste.
- **Detecção e transmissão sem mobilidade de espectro:** verifica a capacidade do DUT de combinar detecção de espectro e transmissão de dados (sinal) durante sua operação.

O CR é necessário para detectar o espectro e determinar a presença do PU, decidindo quando transmitir e qual canal adotar. Este teste não considera a mobilidade do espectro, portanto, o DUT deve desocupar o canal quando o PU reaparecer, interrompendo sua transmissão, e retomá-lo quando o PU deixar o canal.

- **Detecção e transmissão com mobilidade de espectro:** verifica a capacidade do DUT de manter sua transmissão em andamento, mesmo quando ele tem que mudar o canal de comunicação. Para isso, ele deve sensoriar o espectro para determinar a presença do PU e decidir quando e qual canal adotar para realizar sua transmissão. O CR deve desocupar o canal quando o PU reaparecer e escolher outro canal para retomar sua comunicação (mobilidade do espectro).

4.3.4 Testes de Consciência de Localização Geográfica

- **Teste GPS:** garante que o CR tenha acesso correto à sua localização geográfica. Isso permite que o dispositivo atenda aos requisitos de contexto e políticas regulatórias da região.
- **Acesso ao banco de dados:** garante que o CR tenha acesso correto a um banco de dados com informações regulatórias de uma região. Este teste é necessário para CR que precisam acessar TVWS (*TV White Space*), por isso, necessitam de uma conexão alternativa com acesso à Internet.

4.3.5 Testes de Modulação adaptativa

- **Modulação adaptativa:** certifique-se de que o CR está adaptando sua modulação de acordo com os requisitos do espectro de comunicação. Este teste se aplica a qualquer CR que requeira adaptabilidade de modulação para sua operação.

4.3.6 Acesso Dinâmico e Descoberta de Rede

- **Processamento de dados (controle de potência e de canal):** Garantir que o rádio pode usar a informação fornecida pelo TVWSDB e aplicá-la corretamente à sua

potência de transmissão, ajudando assim a controlar o compartilhamento e reutilização do espectro entre CR e o PU.

- **Processamento de dados (acesso durante os intervalos):** avalia como o CR pode aplicar informações fornecidas por bases de informações para controlar os intervalos de acesso a alguns canais.
- **Tratamento de erros:** Dispositivos que usam informações de banco de dados devem tratar as exceções corretamente. Fornece orientações sobre como o dispositivo deve lidar com erros.

4.3.7 Testes de Limites

- **Detecção de Canal:** Testes anteriores verificaram a capacidade do DUT de sensorar o espectro e detectar a presença de PU. Porém, não verificaram se o DUT faz isso em tempo hábil. Os órgãos reguladores (ex., FCC) definem o tempo que o PU pode tolerar interferência antes que o SU detecte e deixe o canal, que é denominado tempo de detecção do canal. Este teste verifica se o DUT é capaz de verificar a presença de PU e deixar o canal dentro do tempo de detecção de canal estipulado.
- **Limite para emissão fora da banda:** Os testes anteriores verificaram a capacidade do DUT de detectar a emissão fora da banda (canais adjacentes). Mas, eles não verificaram se o DUT não ultrapassou o limite de emissão fora da banda. Se forem negligenciadas, as transmissões em canais adjacentes podem ser prejudiciais. O limite de emissão fora da banda depende da quantidade de interferência que as transmissões adjacentes podem tolerar. Este teste verifica se o DUT é capaz de manter a emissão fora de banda dentro do limite proposto.
- **Limite para emissão dentro da banda:** Os testes anteriores verificaram a capacidade do DUT de detectar a emissão dentro da banda. Mas, também é importante verificar se o DUT não ultrapassou o limite de emissão dentro da banda. Se for negligenciado, as transmissões que compartilham o mesmo canal podem ser prejudicadas (além do limite de cobertura ou na comunicação subjacente). O limite dentro da banda pode ser definido pelos órgãos reguladores. Este teste verifica se o DUT é capaz de manter a emissão dentro da banda de acordo com o limite definido.

A descrição detalhada de cada teste é apresentada no Apêndice A.

5 IMPLEMENTAÇÃO E PROVA DE CONCEITO

O sistema proposto contém um conjunto de testes, exigindo apenas a entrada dos parâmetros e limites pelo usuário. Dadas essas entradas, o sistema cria o cenário, realiza os testes e analisa a conformidade automaticamente, reduzindo o tempo gasto na configuração do caso de teste e não exigindo do usuário um conhecimento profundo em programação.

Para instanciar o sistema proposto, adotou-se a plataforma SDR denominada *Universal Software Radio Peripheral*, ou USRP (RESEARCH™, 2019). Ela permite a execução de funcionalidades de rádio cognitivo, prototipagem de camadas PHY/MAC e acesso ao espectro dinâmico. Foram usados dois kits USRP N210 com antenas LP0410, capazes de fornecer transmissão e recepção de sinais na faixa de 400 a 1000 MHz, e placas-filha USRP SBX. As antenas foram colocadas em caixas de proteção, possibilitando testes tanto em cenários isolados quanto em abertos. Cada USRP foi conectado via interface *Ethernet* a um computador Intel Core i5-4460 3,20GHz com 8GB de memória, executando um sistema operacional Linux-Ubuntu de 64 bits. O GNU Radio (FOUNDATION, 2019), juntamente com a linguagem de programação *Python* (TEAM, 2015) foram usados para codificar as funcionalidades do rádio cognitivo e os casos de teste. Os *scripts* de análise dos resultados foram codificados usando a linguagem R (TEAM, 2013).

Embora o DUT e o dispositivo de referência sejam instanciados no sistema proposto usando os mesmos kits USRP, o segundo é definido para ter o comportamento, habilidades e limites de operação desejados. O conjunto de funcionalidades, habilidades e limites de operação que compõe um dispositivo de referência pode ser visto como um dispositivo de referência lógico. Neste aspecto, pretende-se mostrar a viabilidade do sistema proposto, mesmo quando nenhum dispositivo de CR (físico) de referência esteja disponível no mercado, através da adoção de dispositivo lógico, com limites e limiares de operação definidos. Assim, o uso dos mesmos kits USRPs para representar os dois dispositivos não é o ponto principal que se deseja levantar, foi apenas uma forma de instanciar o sistema proposto.

As funcionalidades para CR foram projetadas no GNU Radio usando diagrama de blocos. Eles contém os recursos de processamento de sinais para construir rádios definidos por software e sistemas de processamento de sinais. Para tornar a execução do teste automática (entradas de parâmetros, seleção do tipo de teste, execuções múltiplas, etc.), um programa gerenciador escrito em *Python* lida com os códigos *Python* gerados pelo GNU Radio. Durante a execução

do teste, os eventos são registrados em arquivos de log, que são entradas para *scripts* R. O gerenciador utiliza chamadas de sistema (*system calls*) para integrar todas essas partes (códigos GNU Radio, programas *Python* e *scripts* R).

A sincronização e troca de mensagens entre os componentes da arquitetura foram gerenciadas pelo *middleware ZeroMQ* (ZEROMQ, 2019), uma biblioteca de trocas de mensagens assíncronas de alto desempenho usada em aplicações. Adotou-se o modo de comunicação *publish-subscribe*, no qual uma árvore de distribuição de dados é definida e os eventos fluem dos *publishers* para os *subscribers*, endereçados indiretamente através do conteúdo do evento. A arquitetura proposta tira proveito do ZeroMQ para fornecer as seguintes funções:

- **Anexação de dispositivos:** no estágio de inicialização do teste, o CRT central inicia um processo de *publisher*, aguardando a anexação de um número determinado de *subscribers*. A quantidade de assinaturas é definida de acordo com o caso de teste escolhido.
- **Controle de processos:** após a conexão dos dispositivos, o *publisher* define as tarefas (ex. inicialização e finalização de teste) a serem realizadas pelos dispositivos.
- **Troca de arquivos:** durante o teste, os dispositivos registram os eventos localmente. O ZeroMQ obtém os arquivos de log dos dispositivos e os armazena no CRT central para serem analisados.
- **Sincronização:** o ZeroMQ sincroniza os dispositivos via troca de mensagens, garantindo que os eventos ocorram na ordem certa, definida no caso de teste.

A Fig. 7 ilustra a instância da arquitetura proposta usando dois kits USRP N210. Mais dispositivos podem ser facilmente adicionados para permitir casos de teste com mais usuários. A Tabela 3 resume a descrição do hardware e software do sistema.

Figura 7 – Testbed baseado em USRP para instanciar a arquitetura proposta.



Fonte: O Autor.

Tabela 3 – Descrição de hardware e software do testbed proposto.

Hardware	Software
N210 USRP	Ubuntu 64-bit
LP0410 Antennas (400 - 1000 MHz)	GNU Radio
SBX Daughterboard	Python and R
Computer Intel Core i5-4460-3.20GHz, 8GB (RAM)	ZeroMQ Middleware
Shield Box TC-5922A	

Fonte: O Autor.

Como prova de conceito da arquitetura, dois casos de teste foram selecionados no documento apresentado na Seção 4.3, que seguem os três estágios principais de teste de conformidade descritos na norma ISO IS-9646 (Seção 2.5).

O primeiro é o caso de teste foi o de “Consciência Dinâmica”, que está relacionado à funcionalidade de detecção de espectro. O segundo é o “Detecção de Canal”, que verifica se o CR opera dentro dos limites definidos, envolvendo detecção de espectro e *handoff*.

A detecção de espectro é uma capacidade essencial para a operação de um CR usando abordagem de sobreposição de espectro em DSA, pois o usuário oportunista deve descobrir os canais disponíveis para sua transmissão, detectar PUs e liberar o canal (*handoff*) quando esses usuários primários retornarem (BALIEIRO et al., 2014). Para isso, o CR alterna continuamente

entre os períodos de transmissão e detecção, nos quais o tempo definido para cada estágio pode depender de fatores como políticas regulatórias, padrão de uso primário e tipos de SUs.

Isso significa que canais diferentes podem exigir tempos de transmissão e detecção heterogêneos, assim como um mesmo canal pode exigir valores diferentes para períodos de detecção e transmissão ao longo do tempo, a fim de satisfazer a aplicação do SU atuante. Para atender a essas demandas, o CR deve ser capaz de detectar o espectro (e realizar sua transmissão) usando diferentes tempos definidos por software.

Neste aspecto, o primeiro caso de teste projetado verifica a capacidade do CR de adaptar seus intervalos de transmissão e detecção, além de verificar se o dispositivo está funcionando corretamente, tendo conhecimento de seu estado atual (tempos de transmissão/detecção). Quanto mais intervalos de transmissão e detecção o CR suportar, melhor flexibilidade ele pode fornecer à aplicação. Como indicado na Seção 4.3, este caso de teste básico não tem requisitos mínimos e compreende as seguintes etapas:

- Define os tempos de detecção e transmissão no DUT e no dispositivo de referência. Os valores de parâmetro correspondentes em ambos os dispositivos devem ser os mesmos.
- Executa o teste.
- Verifique os *logs* dos CRTs de referência e DUT.

A Fig. 8 apresenta as interações na arquitetura quando o sensoriamento (e transmissão) é realizado.

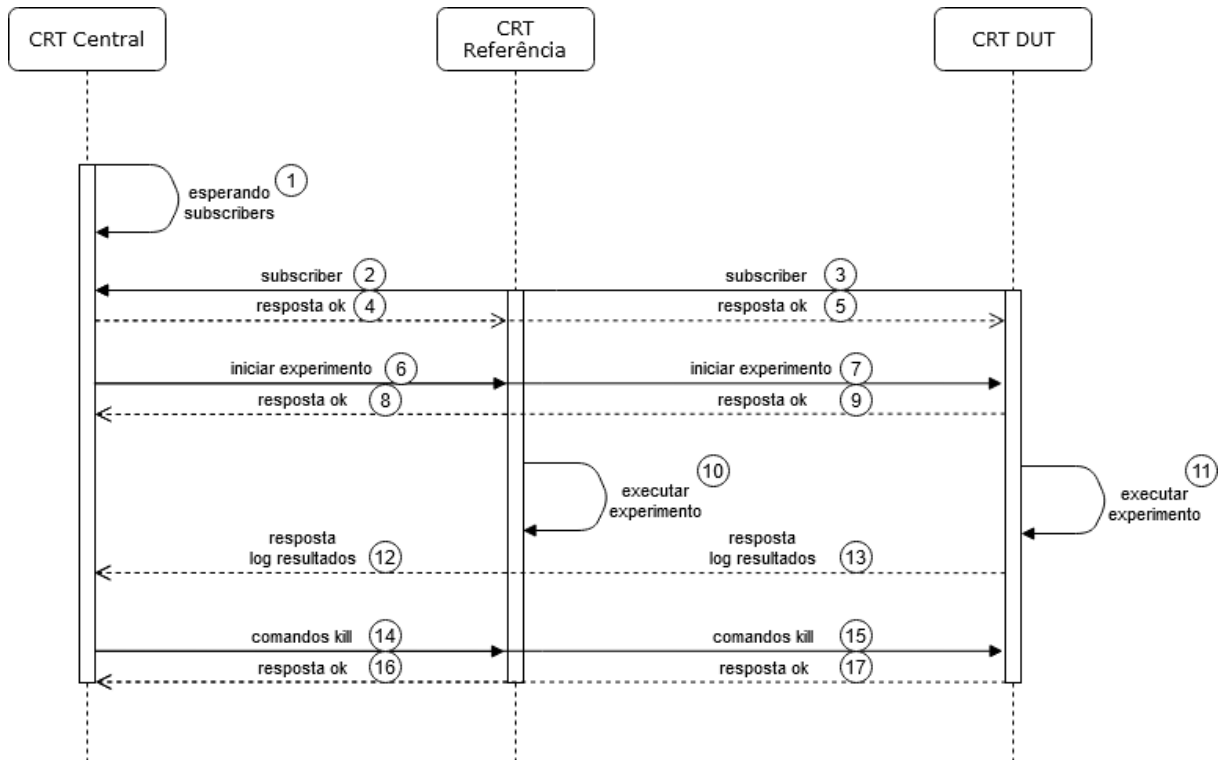
Em primeiro lugar, o CRT Central espera pelas assinaturas dos dispositivos (CRTs de referência e de DUT) para delegar funções a eles. Os CRTs de referência e DUT enviam os pedidos de inscrição (2) (3) para a CRT Central, que os responde aceitando as inscrições (4) (5). Essas cinco primeiras interações abrangem o processo de anexação fornecido pela *middleware* ZeroMQ.

Em seguida, o CRT Central envia para os CRTs locais o caso de teste e o comando para iniciar a execução do teste (6) (7). Eles respondem confirmando o início da execução (8) (9). Depois disso, os CRTs de Referência e DUT executam o caso de teste (10) (11) e enviam os logs de resultados para o CRT Central (12) (13). Esta interação refere-se à função de troca de arquivos gerenciada via ZeroMQ.

Ao receber os resultados, o CRT Central envia uma mensagem/comando para encerrar os processos que estão em execução nos CRTs locais (14) (15). Os CRTs locais encerram os

processos e enviam uma mensagem de confirmação ao CRT Central (16) (17). Esses comandos/mensagens de solicitação e resposta exemplificam o controle de processo e a sincronização obtidos com o ZeroMQ.

Figura 8 – Interações entre os controladores quando o caso de teste de sensoriamento/transmissão é realizado.

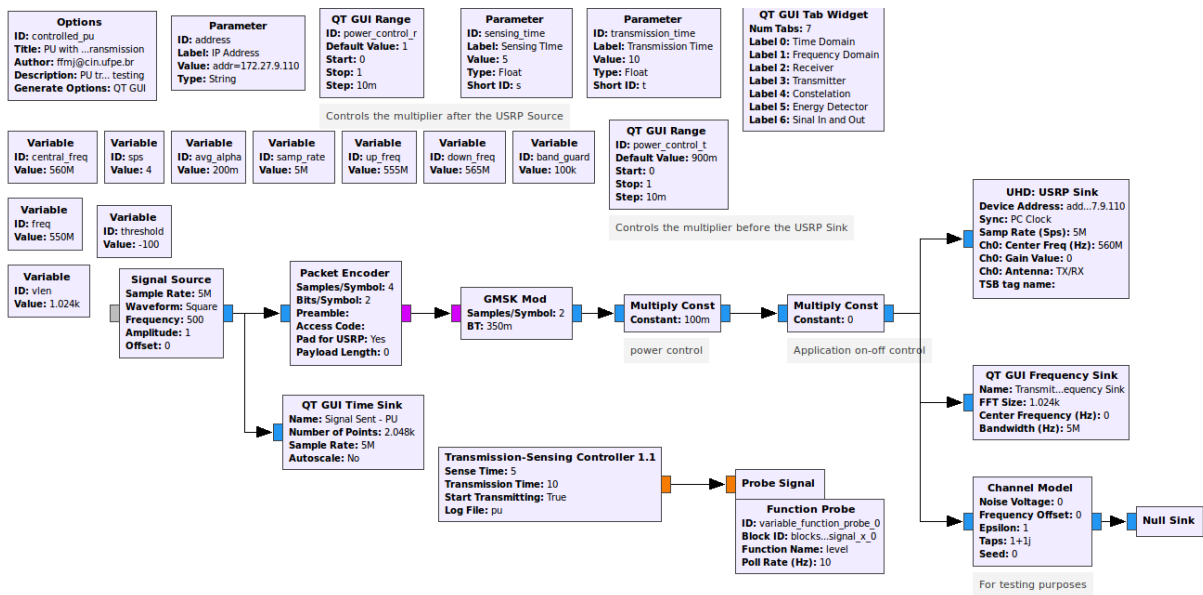


Fonte: O Autor.

É importante notar que as interações apresentadas na Fig. Ref seq-exp-spe ocorrem entre os eventos (10) e (13) mostrados na Fig. Ref seq-exp, e são específicas para este caso de teste.

A Fig. 9 mostra o diagrama de blocos do GNU Radio para a funcionalidade de detecção de espectro. Dentre os blocos utilizados, destacam-se quatro: os dois blocos denominados “*Parameter*”, que recebem os valores de entrada para os tempos de transmissão e detecção; o bloco que fornece a interface entre o GNU Radio e o dispositivo USRP, denominado “*UHD: USRP Sink*”; e o bloco “*Transmission-Sensing Controller 1.1*”, que gerencia os estágios de detecção e transmissão de acordo com os valores definidos nos blocos de “*Parameter*”.

Figura 9 – Diagrama de blocos do GNU Radio para a funcionalidade de detecção de espectro.



Fonte: O Autor.

O teste anterior se concentra na capacidade do DUT de realizar ações de transmissão e detecção, com períodos definidos. Porém, é importante não apenas verificar se o dispositivo é capaz de fazer algo, mas também verificar se ele executa essa ação dentro dos limites definidos. Por exemplo, os órgãos reguladores (ex., FCC) definem a quantidade de tempo que o PU pode tolerar a interferência antes que o SU detecte e deixe o canal, denominado tempo de detecção do canal.

Nesse aspecto, o segundo teste adotado na prova de conceito é o teste “Detecção de Canal”, apresenta na Seção 4.3, que verifica se o DUT é capaz de detectar a presença do PU e deixar o canal dentro do tempo de detecção do canal. Ele requer que o DUT tenha passado no conjunto de testes de detecção de espectro e de mobilidade de espectro, descritos na seção 4.3. Relembrando, este caso de teste apresenta o seguinte procedimento:

- Define o padrão de uso e os diferentes horários de início para a transmissão do PU (considerando o início do teste como ponto de referência);
- Define um dispositivo auxiliar para transmitir o sinal primário de acordo com o padrão as condições definidas (ex, diferentes BWs - 1,4 MHz, 3 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz, 20 K Hz, 6 MHz e relações sinal-ruído);
- Define o DUT para iniciar sua transmissão no início do teste;
- Define o tempo de detecção de canal para cada cenário (por exemplo, 2s).

Como o diagrama de blocos do GNU Radio e a sinalização de mensagem deste caso de teste são semelhantes ao primeiro, a descrição deles foi suprimida.

6 RESULTADO DE DISCUSSÕES

Para verificar a conformidade do DUT quando submetido ao primeiro caso de teste, uma métrica foi definida, onde busca indicar a semelhança entre os comportamentos do DUT e do Dispositivo de Referência.

Considerando a Fig. 10, que ilustra os comportamentos do DUT e do Dispositivo de Referência, a métrica define a porcentagem de correspondência entre a duração de cada transmissão (e sensoriamento) do DUT e a transmissão (e sensoriamento) do Dispositivo de Referência e é denominada como Porcentagem de Casamento Perfeito, ou *Percentage of Matching (PoM)*, calculada via Eq.6.1, onde t_i significa o instante de tempo em que ocorre uma transição de estado do canal (i-th) (de ON - transmissão para OFF - sensoriamento ou de OFF para ON) na perspectiva do Dispositivo de Referência. t'_i tem o mesmo significado, mas sob a perspectiva do DUT.

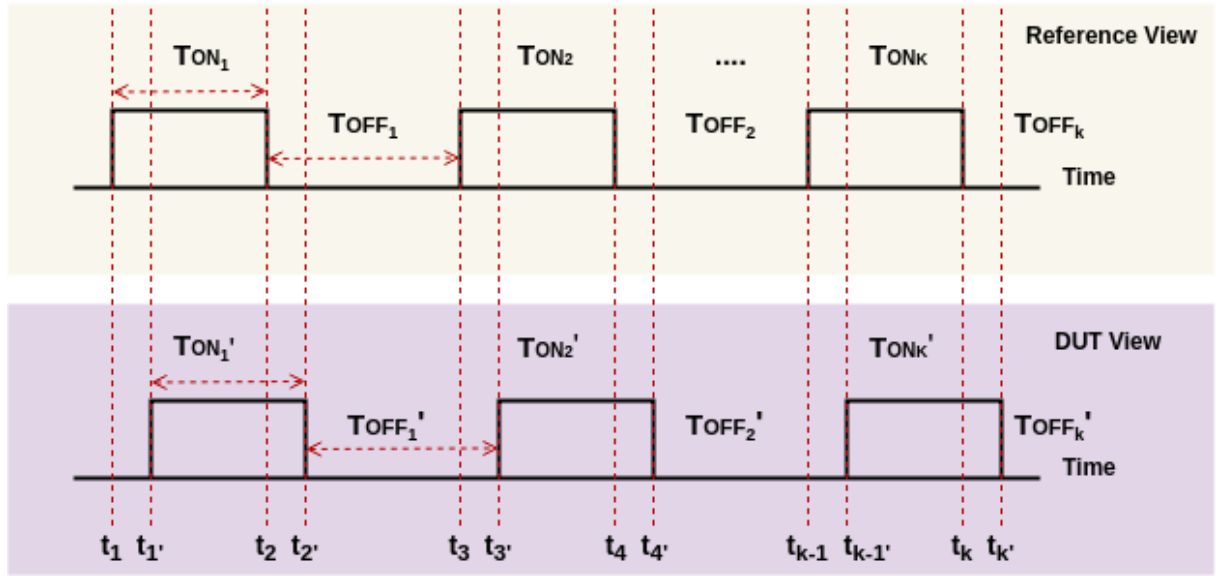
$$PoM = \frac{\sum_{i=1}^k h(i)}{k} 100,$$

where,

$$h(i) = \begin{cases} 1, if |t_i - t_{i+1}| = |t'_i - t'_{i+1}| \\ 0, otherwise \end{cases}$$

(6.1)

Figura 10 – Visão do DUT e do dispositivo de referência em relação aos tempos de detecção e transmissão.



Fonte: O Autor.

Uma variação de PoM é dada na Eq. 6.2 e denominado PoM_α . É semelhante ao PoM , mas adota uma margem de erro para definir a correspondência. Esta variação admite que a perspectiva do DUT pode ser ligeiramente diferente da do Dispositivo de Referência. O parâmetro α define a diferença máxima admissível entre $|t_i - t_{i+1}|$ and $|t'_i - t'_{i+1}|$ para indicar uma correspondência. O valor α pode ser definido para compensar os possíveis erros de medição (ex: calibração do dispositivo ou sincronização de tempo) ou admitir uma diferença operacional leve que não implique em violação das políticas regulatórias e do operador (ex: nível de interferência admissível no sinal primário).

$$PoM_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^k g(i)}{k} \times 100$$

where,

$$g(i) = \begin{cases} 1, & \text{if } |t_i - t_{i+1}| - |t'_i - t'_{i+1}| \leq \alpha \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

(6.2)

Da mesma forma, PoM e sua variante podem ser usadas na análise do segundo caso de teste, mas substituindo a perspectiva do Dispositivo de Referência pelos limites/limiares definidos. Assim, pode-se verificar se um dispositivo em teste passou ou falhou no segundo teste ou a que distância ele está dos limites definidos.

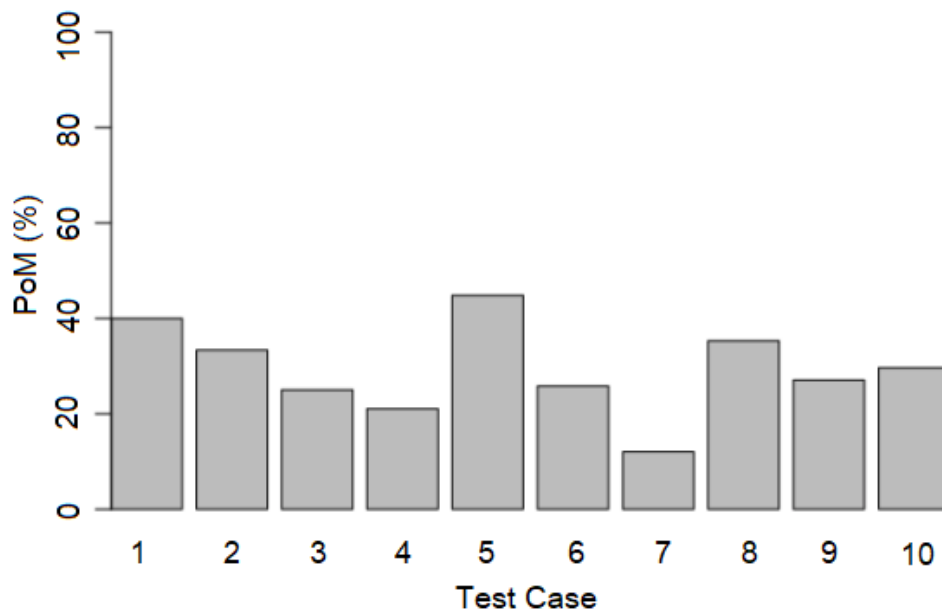
Para a análise do primeiro caso de teste, 10 instâncias (valores de tempo de detecção e transmissão) foram definidas e aplicadas tanto para o DUT quanto para o Dispositivo de Referência. Elas estão apresentadas na Tabela 4 e visam verificar a capacidade do DUT de realizar detecção e transmissão sob diferentes valores de parâmetros. Para cada instância do caso de teste, 10 execuções foram realizadas.

Tabela 4 – Instâncias para o primeiro caso de teste.

Instância	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo de Sensoriamento	0.5	0.7	0.25	1	0.5	0.2	1	0.4	0.8	0.4
Tempo de Trnamissão	1	0.7	0.6	1	0.8	0.4	0.5	0.7	0.2	1

A Fig. 11 apresenta a porcentagem de correspondência entre o DUT e o Disp. Referência para cada instância do primeiro caso de teste. Podemos observar que em média a PoM foi de 20 - 30%, atingindo seu maior valor (cerca de 45%) na instância número 5. Isto mostra que o comportamento do DUT está longe do Dispositivo de Referência, não sendo aprovado no teste se a nota exigida fosse superior a 80%, por exemplo, e, por consequência, exigindo melhorias no DUT.

Figura 11 – Média PoM para diferentes instâncias do caso de teste de detecção de espectro.



Fonte: O Autor.

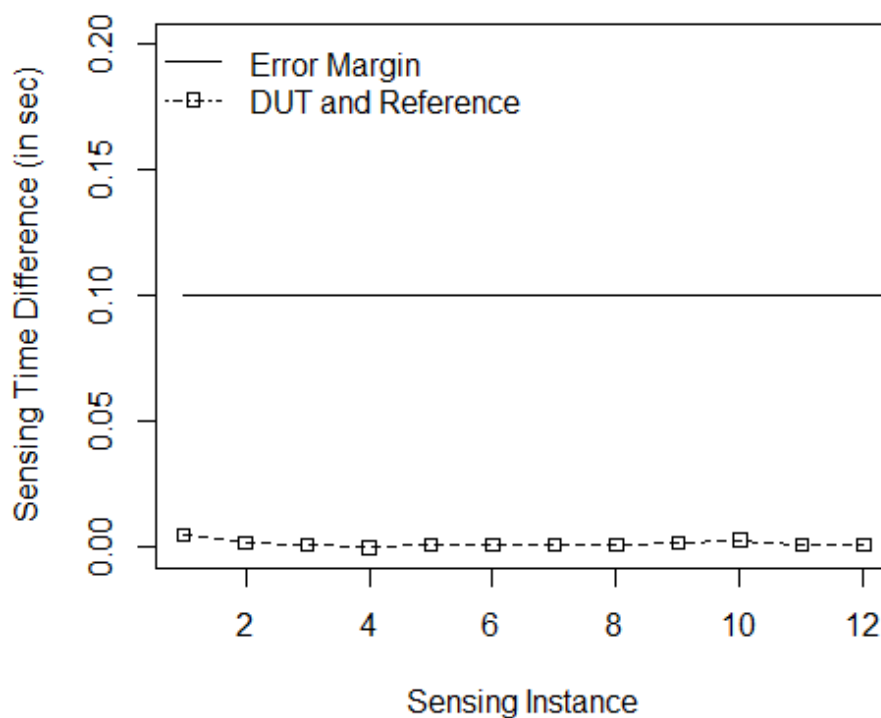
Colocando a primeira instância do caso de teste em perspectiva (0,5s e 1s) e considerando uma margem de erro (α) igual a 0,1s, a Fig. 12 (Fig.13) apresenta a diferença (em linha tra-

cejada com marcador quadrado) entre a duração de cada instância de detecção (transmissão) realizada pelo DUT e pelo Disp. Referência em uma execução de teste.

Nota-se que a detecção (comunicação) ocorreu 12 vezes e nenhuma apresentou valor de diferença maior que a margem de erro (linha contínua). Com relação a esta margem de erro, o DUT atinge 100% de $PoM_{0,1}$.

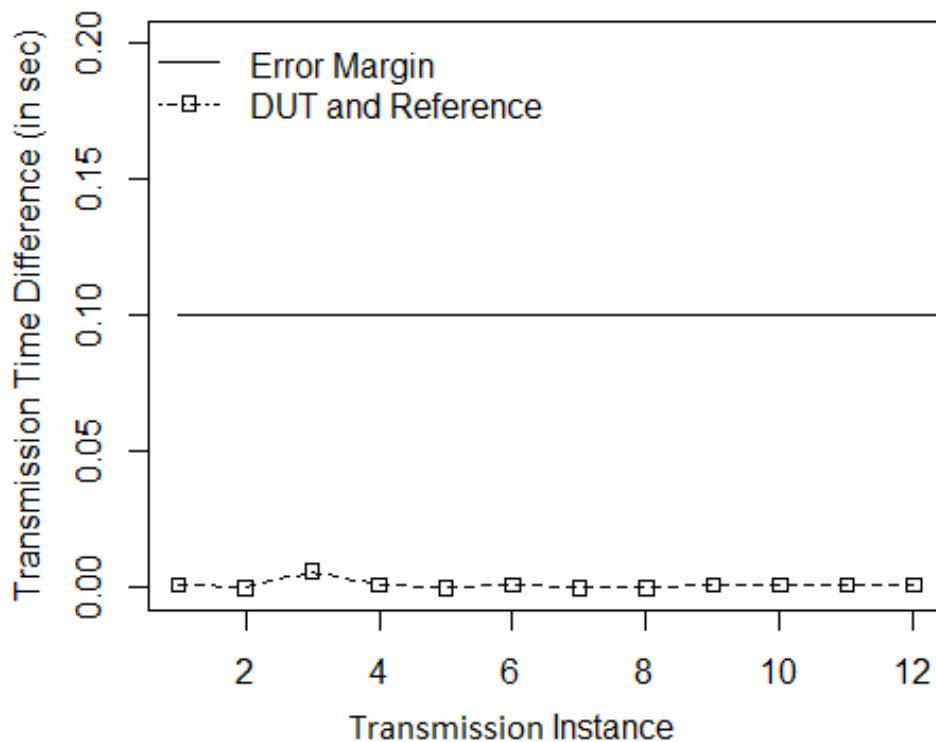
Portanto, se essa margem for admissível pelas operadoras e órgãos reguladores (por exemplo, nos cenários em que o padrão de uso do usuário primário não é tão dinâmico, como bandas/sinais de TV), o DUT seria aprovado no teste. Mas, quando nenhuma margem de erro ($\alpha = 0$) é considerada, apenas 5 instâncias de detecção ou transmissão realizadas pelo DUT têm a mesma duração correspondente àquelas alcançadas pelo dispositivo de referência. Isso leva a um valor de PoM igual a 20,83%, indicando que o DUT não seria aprovado no teste.

Figura 12 – Diferença entre a duração de cada sensoriamento realizada pelo DUT e pelo dispositivo de referência em uma execução de teste.



Fonte: O Autor.

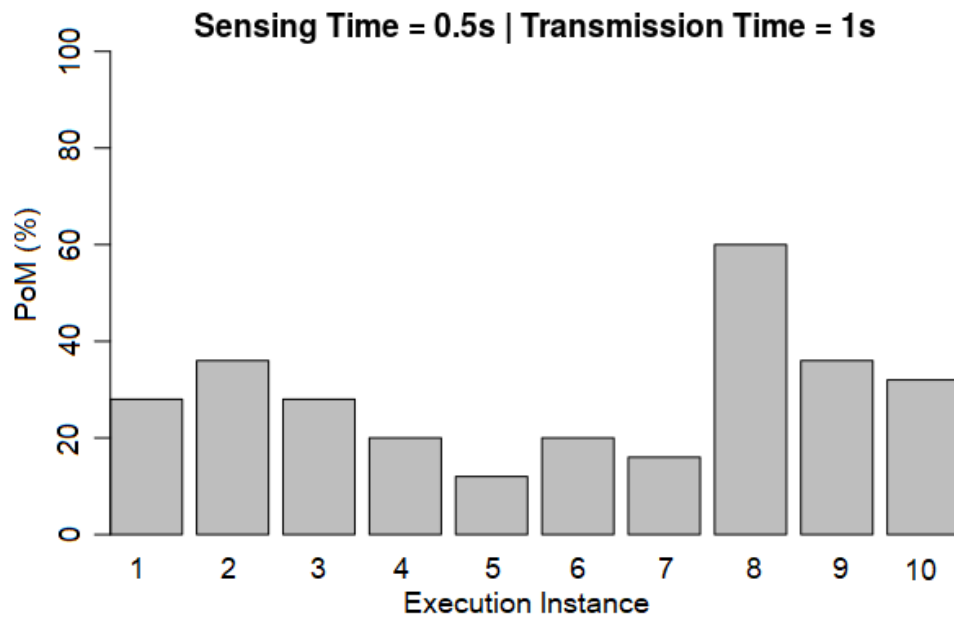
Figura 13 – Diferença entre a duração de cada transmissão realizada pelo DUT e pelo dispositivo de referência em uma execução de teste.



Fonte: O Autor.

A Fig. 14 mostra os resultados em termos de PoM para 10 execuções de teste com os tempos de detecção e transmissão iguais a 0,5s e 1s, respectivamente. Podemos observar que, em geral, a pontuação de PoM não ultrapassou 40% e seu maior valor foi cerca de 60% na instância #8. Isso implica que (considerando a métrica PoM) o comportamento do DUT não tem grande semelhança com o de referência, visto que o nível alvo é 100% de casamento, por exemplo.

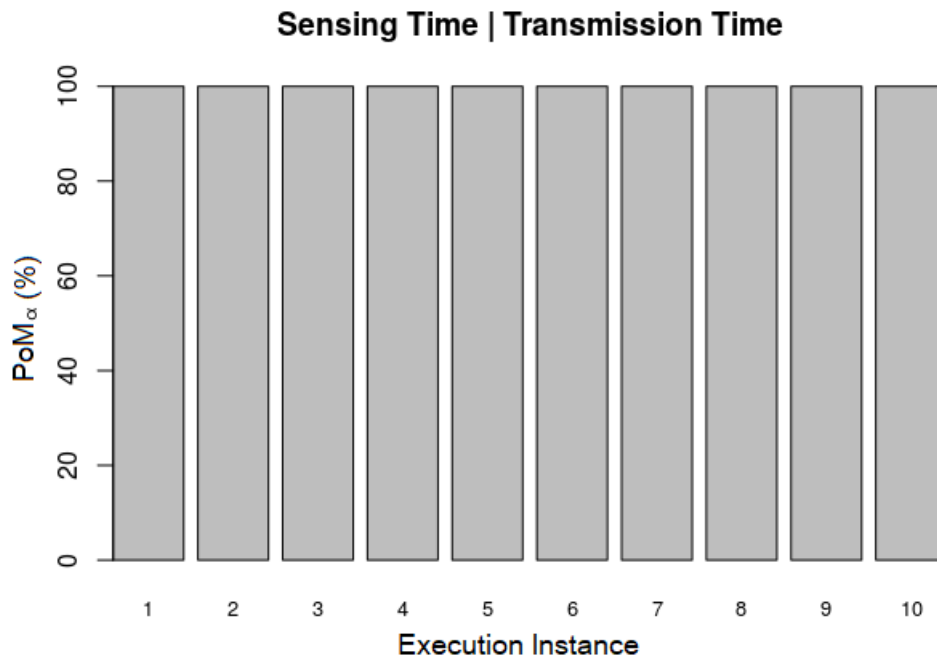
Figura 14 – Resultados em termos de PoM para 10 instâncias de execução do caso de teste, considerando os tempos de detecção e transmissão iguais a 0,5s e 0,1s, respectivamente.



Fonte: O Autor.

Quando a PoM_α (com alfa igual a 0,1) é levado em consideração, a Fig. 15 mostra que o DUT opera dentro da margem de erro em todas as instâncias de execução, alcançando $PoM_{0,1}$ igual 100%.

Figura 15 – Resultados em termos de PoM_α para 10 instâncias de execução do caso de teste, considerando os tempos de detecção e transmissão iguais a 0,5s e 0,1s, e $\alpha = 0,1$.



Fonte: O Autor.

Já no segundo caso de teste, analisou-se a conformidade do DUT em relação ao tempo de detecção do canal em diferentes limites e larguras de banda. Valores como 1,4, 3, 6, 10, 15 e 20 MHz (usados em redes LTE e operadoras de TV) e 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 e 2 segundos foram adotados para largura de banda e tempo de detecção de canal (TDC), respectivamente.

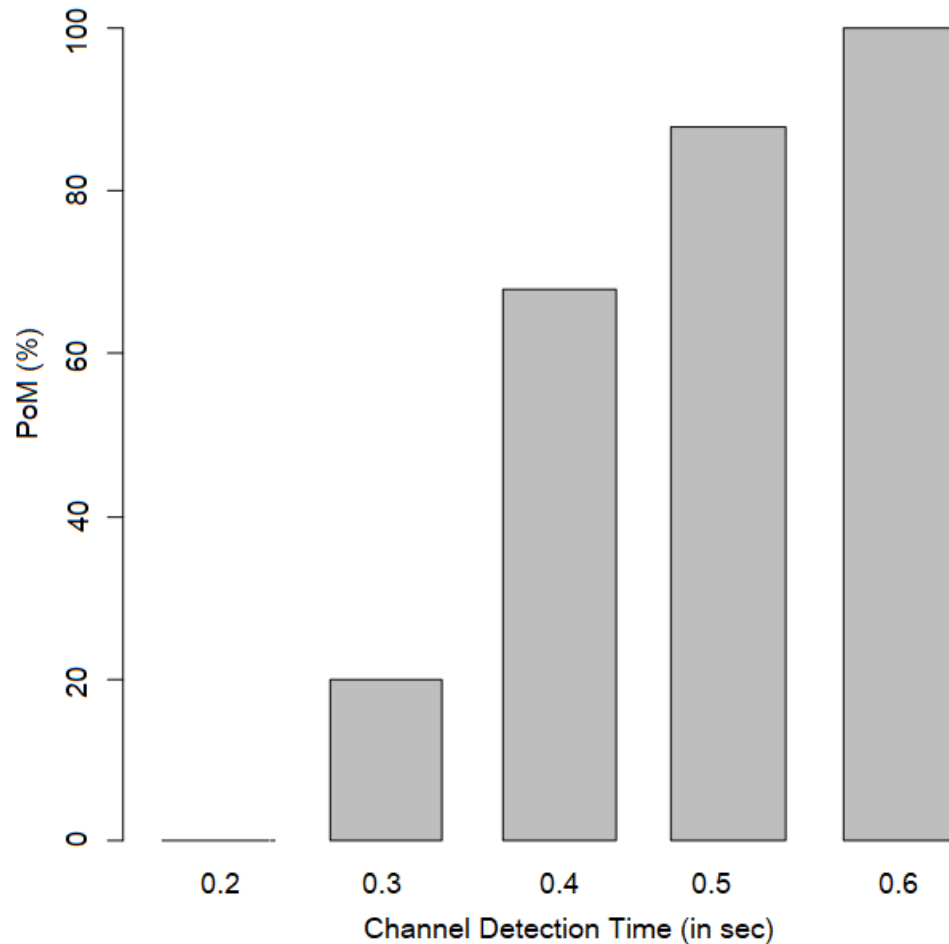
Além disso, considerou-se um DUT equipado com duas antenas, permitindo que a detecção do espectro ocorra mesmo quando o DUT estiver realizando transmissão.

O sistema proposto também admite outras abordagens (por exemplo, sensoriamento e transmissão não simultâneos e sensoriamento com períodos fixos ou variáveis) que podem ser vistas como dispositivos com diferentes capacidades (ex., configurações de processamento e hardware) dentro de uma família de dispositivos ou de diferentes fornecedores.

A Fig. 16 apresenta os resultados (PoM) obtidos pelo DUT no segundo teste, considerando diferentes tempos de detecção de canal e uma largura de banda igual a 1,4 MHz. Note-se que quando o tempo de detecção de canal é 0,2s, o DUT não é capaz de operar dentro do limite, ou seja, PoM é 0%. Esse limite (0,2s) pode ser considerado em bandas licenciadas onde o padrão de uso primário é dinâmico, como as bandas de celular em áreas urbanas. Quando tempos de detecção de canais mais altos são definidos, o DUT demonstra uma PoM maior, atingindo 100% em 0,6s. Em bandas onde o uso primário é menos frequente (por exemplo,

transmissão de TV em áreas rurais), o tempo de detecção de canal igual a 0,6 s pode atender aos requisitos de proteção. Nesse escopo, o DUT estaria em conformidade.

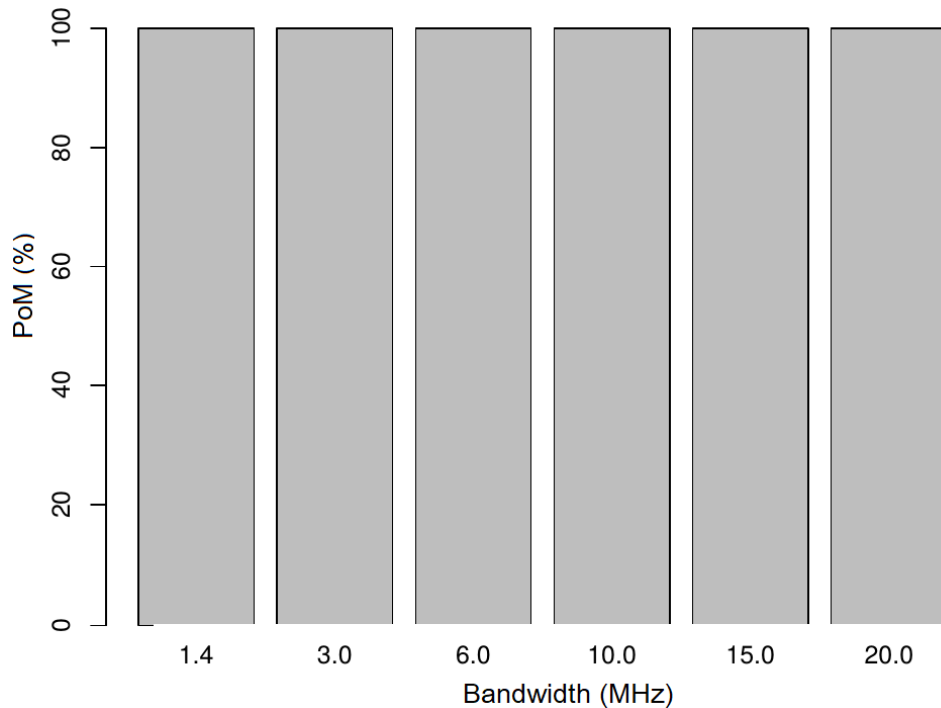
Figura 16 – Resultados em termos de PoM para o segundo teste sob diferentes tempos de detecção de canal, com largura de banda do canal igual a 1,4 MHz



Fonte: O Autor.

A Fig. 17 apresenta os resultados do segundo teste sob diferentes larguras de banda de canal e um tempo de detecção de canal igual a 2s, que é o limite definido no padrão *IEEE 802.22* para Redes Regionais de Rádio Cognitivo Sem Fio (*Cognitive Radio Wireless Regional Area Networks - WRAN*) operando em espaços em branco de TV (*TV White Spaces - TVWS*) (STEVENSON C. R.; CALDWELL, 2009). Os resultados mostram que o DUT é capaz de operar dentro do limite (tempo de detecção de canal) para todas as larguras de banda testadas, ou seja, está em conformidade ($PoM = 100\%$) com o limite definido.

Figura 17 – Resultados de *PoM* para o segundo teste com diferentes larguras de banda de canal e com tempo de detecção de canal igual a 2s.



Fonte: O Autor.

Vale ressaltar que os resultados apresentados visam mostrar a viabilidade do sistema proposto para testes de conformidade em CR. Assim, o DUT é tratado como uma caixa preta, ou seja, os mecanismos e tecnologias embutidos no DUT que contribuem para que ele seja aprovado/reprovado no teste não são o foco. O ponto principal é como o sistema proposto funciona e como ele pode fornecer resultados para uma análise de conformidade de DUT em CR.

Além das métricas anteriores, o sistema proposto é flexível para suportar outras, que podem ser definidas e armazenadas no Banco de Dados de *Scripts* de Avaliação de Resultados. Por exemplo, se for importante saber o quão distante (em valores absolutos) o comportamento do DUT está do Disp. Referência em relação aos tempos de detecção e transmissão no primeiro caso de teste, a diferença de tempo total pode ser definida para expressar a diferença acumulada entre o tempo de detecção (transmissão) do DUT e o tempo correspondente do Disp. Referência.

7 CONCLUSÃO

A tecnologia de rádio cognitivo fornece um uso inteligente e eficiente do espectro, permitindo que novos sistemas sem fios e aplicativos 5G sejam suportados. Embora muitas pesquisas tenham sido realizadas em CR, metodologias e sistemas de testes de conformidade ainda são inexplorados. Nesse sentido, este trabalho apresentou uma metodologia/sistema de teste de conformidade para rádios cognitivos, que permite verificar se um dispositivo atende às políticas regulatórias impostas, o que é essencial para um lançamento assertivo no mercado.

Adotou-se um *testbed* baseado em USRP's para instanciar o sistema/metodologia, mostrando sua viabilidade através de uma prova de conceito com dois casos de teste e uma métrica proposta, analisando a conformidade do dispositivo quanto aos tempos de sensoriamento, transmissão e detecção de canal. Os resultados mostraram que o dispositivo sob teste estava longe do dispositivo de Referência em ambas as perspectivas (funcionalidade-comportamento e limites de operação) e precisava ser aprimorado para obter níveis aceitáveis. Mas, quando uma margem de erro era tolerável, ele operava na faixa/comportamento aceitável em relação ao dispositivo de Referência, obtendo 100% de correspondência.

Além disso, destaca-se a modularidade e flexibilidade do sistema para suportar outros limites, métricas e casos de teste. O *testbed* criado também executa testes de conformidade e análises de forma automática, não exigindo um conhecimento profundo em programação do usuário, facilitando sua adoção.

7.1 CONTRIBUIÇÕES

O presente trabalho apresenta as seguintes contribuições:

- A concepção de uma arquitetura de ambiente ambiente de teste para análise de conformidade em rádios cognitivos e sua instanciação através de plataformas USRP N210 equipadas com antenas LP0410 e caixas de proteção, responsáveis por instanciar os casos de testes e executar as funcionalidades de CR, kit de ferramentas de desenvolvimento de software GNU Radio, juntamente com a linguagem de programação *Python*, usados como ferramentas de codificação dos experimentos, além da linguagem de programação multi-paradigma orientada a objetos voltada à manipulação, análise e visualização de dados, a linguagem *R*.

- Uma metodologia desenvolvida para a análise de conformidade de CR em relação as duas principais perspectivas:
 - conformidade de funcionalidades (com dispositivos de referência);
 - conformidade com limites de operação

A metodologia foi implementada com base na estrutura de testes de conformidade em três estágios definida na norma ISO IS-9646, como também nos padrões de teste definidos pelo 3GPP e ETSI, e consta com:

- DUT - Dispositivo sob Teste;
 - Dispositivo de Referência;
 - Banco de dados de casos de teste, *scripts* de avaliação de resultados e limites de conformidade;
 - Controladores de teste de rádios cognitivos.
- Elaboração de um conjunto de testes de conformidade através de uma pesquisa exploratória sobre as normativas estabelecidas para RC, com orientações e métodos que nortearam a construção dos casos de testes presentes no documento, organizados por funcionalidades.
 - Além das contribuições mencionadas acima, também ressaltar-se a elaboração de uma métrica de conformidade utilizada como parâmetro para indicar a porcentagem de correspondência (PoM) entre os comportamentos do DUT e do Dispositivo de Referência.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Como direções futuras, destaca-se a adição de novos casos de teste que englobam o sensoriamento de espectro e outras funcionalidades para CR (por exemplo, mobilidade de espectro e controle de potência) e suas métricas relacionadas. Além disso, endereçamento de cenários e funcionalidades 5G/6G requeridos para serem suportadas nos dispositivos de rádio também se mostra como um ponto futuro de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F.; LEE, W.-Y.; VURAN, M. C.; MOHANTY, S. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, v. 50, n. 13, p. 2127 – 2159, 2006. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128606001009>>.
- ALAM, S.; SOHAIL, M. F.; GHOURI, S. A.; QURESHI, I.; AQDAS, N. Cognitive radio based smart grid communication network. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 72, p. 535–548, 2017.
- AMRUTHA, V.; KARTHIKEYAN, K. V. Spectrum sensing methodologies in cognitive radio networks: A survey. In: *2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 306–310.
- BABU, K.; VEMUR, S. A low-cost software defined radio based cognitive radio test-bed for lte networks. *International Journal of Engineering & Technology*, v. 7, n. 3.1, p. 51–55, 2018.
- BADOI, C.-I.; PRASAD, N.; CROITORU, V.; PRASAD, R. 5g based on cognitive radio. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 57, n. 3, p. 441–464, 2011.
- BALIEIRO, A.; FALCÃO, M.; DIAS, K. An evolutionary scheme for secondary virtual networks mapping onto cognitive radio substrate. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2019, p. 19 pages, 2019.
- BALIEIRO, A.; YOSHIOKA, P.; DIAS, K.; CAVALCANTI, D.; CORDEIRO, C. A multi-objective genetic optimization for spectrum sensing in cognitive radio. *Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 8, p. 3640–3650, 2014.
- CHEN, S.; LIANG, Y.; SUN, S.; KANG, S.; CHENG, W.; PENG, M. Vision, requirements, and technology trend of 6g: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed. *IEEE Wireless Communications*, v. 27, n. 2, p. 218–228, 2020.
- Cordeiro, C.; Challapali, K.; Birru, D.; Sai Shankar. Ieee 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. In: *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 328–337. ISSN null.
- DABAGHCHIAN, M.; ALIPOUR-FANID, A.; LIU, S.; ZENG, K.; LIY, X.; CHEN, Y. Who is smarter? intelligence measure of learning-based cognitive radios. *arXiv preprint arXiv:1712.09315*, 2017.
- DASILVA, P.; GHISING, A.; PATIL, S.; WANG, H. Implementation of cognitive radio network testbed for multimedia communications. *EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications*, European Alliance for Innovation (EAI), v. 4, n. 15, 2018.
- DIETRICH, C. B.; WOLFE, E. W.; VANHOY, G. M. Cognitive radio testing using psychometric approaches: applicability and proof of concept study. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, v. 73, n. 2, p. 627–636, Nov 2012. ISSN 1573-1979. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10470-012-9954-0>>.

ERICSSON. *Breakthrough 5G data call using dynamic spectrum sharing to accelerate nationwide 5G deployments*. 2019. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/news/2019/9/ericsson-spectrum-sharing>>.

FOUNDATION, T. G. R. *GNU Radio About GNU Radio*. 2019. Disponível em: <<https://www.gnuradio.org/about/>>.

GUNGOR, V. C.; SAHIN, D.; KOC AK, T.; ERGUT, S.; BUCCELLA, C.; CECATI, C.; HANCKE, G. P. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE transactions on Industrial informatics*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 529–539, 2011.

Haykin, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 23, n. 2, p. 201–220, Feb 2005. ISSN 1558-0008.

HONG, X.; WANG, J.; SHI, J. Cognitive radio in 5g: a perspective on energy-spectral efficiency trade-off. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, p. 46–53, 2014.

Hong, X.; Wang, J.; Wang, C.; Shi, J. Cognitive radio in 5g: a perspective on energy-spectral efficiency trade-off. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 7, p. 46–53, July 2014. ISSN 1558-1896.

INSTITUTE, V. T. *CORNET - Cognitive Radio Network Testbed*. 2015. Disponível em: <<https://cornet.wireless.vt.edu/>>.

ISO, G. Information technology, open systems interconnection, conformance testing methodology and framework. *International Standard IS*, v. 9646, 1991.

KHAWAJA, W.; OZDEMIR, O.; YAPICI, Y.; ERDEN, F.; GUVENC, I. Coverage enhancement for nlos mmwave links using passive reflectors. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, v. 1, p. 263–281, 2020.

KULKARNI, S.; MARKANDE, S. Comparative study of routing protocols in cognitive radio networks. In: *2015 International Conference on Pervasive Computing (ICPC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5.

LI, Y. R.; B.GAO; ZHANG, X.; HUANG, K. Beam management in millimeter-wave communications for 5g and beyond. *IEEE Access*, v. 8, p. 13282–13293, 2020.

LIN, F.; HU, Z.; HOU, S.; YU, J.; ZHANG, C.; GUO, N.; WICKS, M.; QIU, R. C.; CURRIE, K. Cognitive radio network as wireless sensor network (ii): Security consideration. In: *Proceedings of the 2011 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 324–328.

MARTIAN, A.; PETRICA, L.; RADU, O. Cognitive radio testing framework based on usrp. In: *2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 212–215.

MCGREW, K. S. Chc theory and the human cognitive abilities project: Standing on the shoulders of the giants of psychometric intelligence research. *Intelligence*, v. 37, n. 1, p. 1 – 10, 2009. ISSN 0160-2896. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160289608000986>>.

Mitola, J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications. In: *1999 IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99) (Cat. No.99EX384)*. [S.l.: s.n.], 1999. p. 3–10. ISSN null.

MUECK, M.; PIIPPONEN, A.; KALLIOJÄRVI, K.; DIMITRAKOPOULOS, G.; TSAGKARIS, K.; DEMESTICHAS, P.; CASADEVALL, F.; PÉREZ-ROMERO, J.; SALIENT, O.; BALDINI, G. et al. Etsi reconfigurable radio systems: status and future directions on software defined radio and cognitive radio standards. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 48, n. 9, p. 78–86, 2010.

Nghia Le, T.; Chin, W.; Chen, H. Standardization and security for smart grid communications based on cognitive radio technologies—a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 1, p. 423–445, Firstquarter 2017. ISSN 2373-745X.

NOKIA. *Nokia expands 5G offering with new radio access AirScale solutions*. 2020. Disponível em: <<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/04/09/nokia-expands-5g-offering-with-new-radio-access-airscale-solutions>>.

Parvez, I.; Rahmati, A.; Guvenc, I.; Sarwat, A. I.; Dai, H. A survey on low latency towards 5g: Ran, core network and caching solutions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 20, n. 4, p. 3098–3130, 2018.

Ramani, V.; Sharma, S. K. Cognitive radios: A survey on spectrum sensing, security and spectrum handoff. *China Communications*, v. 14, n. 11, p. 185–208, Nov 2017. ISSN 1673-5447.

RESEARCH™, E. *USRP N210*. 2019. Disponível em: <<https://www.ettus.com/all-products/un210-kit/>>.

SAGDUYU, Y.; SOLTANI, S.; ERPEK, T.; SHI, Y.; LI, J. A unified solution to cognitive radio programming, test and evaluation for tactical communications. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 10, p. 12–20, Oct 2017. ISSN 0163-6804.

SHARMA, R.; KOTTERMAN, W.; LANDMANN, M.; SCHIRMER, C.; SCHNEIDER, C.; WOLLENSCHLÄGER, F.; GALDO, G. D.; HEIN, M.; THOMÄ, R. Over-the-air testing of cognitive radio nodes in a virtual electromagnetic environment. *International Journal of Antennas and Propagation*, v. 2013, 08 2013.

SOLLENBERGER, E.; ROMANO, F.; DIETRICH, C. Test and evaluation of cognitive and dynamic spectrum access radios using the cognitive radio test system. In: *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–2.

SRINIVASA, S.; JAFAR, S. A. Cognitive radios for dynamic spectrum access—the throughput potential of cognitive radio: A theoretical perspective. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 45, n. 5, p. 73–79, 2007.

STEVENSON C. R., C. G. L. Z. H. W. S. S.; CALDWELL, W. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 1, p. 130–138, 2009.

T. ŠOLC; MOHORČIČ, M.; FORTUNA, C. A methodology for experimental evaluation of signal detection methods in spectrum sensing. *PLoS one*, v. 13, n. 6, 2018.

TEAM, P. C. *Python: A dynamic, open source programming language*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.python.org/>>.

TEAM, R. C. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2013. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>.

- THOMAS, J.; MENON, P. A survey on spectrum handoff in cognitive radio networks. In: *2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.
- THOMAS, R. W.; FRIEND, D. H.; DASILVA, L. A.; MACKENZIE, A. B. Cognitive networks. In: *Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems*. [S.l.]: Springer, 2007. p. 17–41.
- THOMPSON, J. J.; HOPKINSON, K. M.; SILVIUS, M. D. A test methodology for evaluating cognitive radio systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 14, n. 11, p. 6311–6324, Nov 2015. ISSN 1536-1276.
- TOWHIDLOU, V.; SHIKH-BAHAEI, M. Cross-layer design in cognitive radio standards. *arXiv preprint arXiv:1712.05003*, 2017.
- TRETMANS, J. An overview of osi conformance testing, formal methods and tools group. *University of Twente (Translated and adapted from: Tretmans J, van de Lagemaat J, Conformance Testen. In: Handboek Telematica, vol II, pp 4400 1–19. Samson)*, 2001.
- WANG, B.; LIU, K. J. R. Advances in cognitive radio networks: A survey. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, v. 5, n. 1, p. 5–23, 2011.
- You, M.; Liu, Q.; Sun, H. A cognitive radio enabled smart grid testbed based on software defined radio and real time digital simulator. In: *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN 2474-9133.
- ZEROMQ. ØMQ - *The Guide*. 2019. Disponível em: <<http://zguide.zeromq.org/page:all>>.
- ZHANG, S.; QIAN, Z.; WU, J.; LU, S. An opportunistic resource sharing and topology-aware mapping framework for virtual networks. In: IEEE. *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*. [S.l.], 2012. p. 2408–2416.
- ZHAO, Y.; MAO, S.; NEEL, J. O.; REED, J. H. Performance evaluation of cognitive radios: Metrics, utility functions, and methodology. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 4, p. 642–659, April 2009. ISSN 0018-9219.

APÊNDICE A – DOCUMENTO DE TESTES

A.1 SENSORIAMENTO DE ESPECTRO

A.1.1 Consciência Estática

A.1.1.1 *Definição e aplicabilidade*

Este teste avalia a capacidade do Rádio Cognitivo de adaptar seus intervalos de transmissão e sensoriamento, que podem estar sujeitos às camadas de gerenciamento e regulação. A autoconsciência garante que o rádio esteja funcionando corretamente e, o mais importante, que esteja ciente de seu estado. Observe que os parâmetros de detecção dependem do ambiente e da capacidade do CR. Quanto mais intervalos de transmissão/sensoriamento o CR suportar, melhor flexibilidade ele pode fornecer à aplicação.

A.1.1.2 *Requisitos Mínimos*

NA

A.1.1.3 *Objetivo do Teste*

Garantir o controle e o tempo de resposta do CR em relação à detecção de espectro e permitir o teste de mobilidade espectral.

A.1.1.4 *Método de Teste*

A.1.1.4.1 *Requisitos Iniciais*

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico.

A.1.1.4.2 *Procedimento*

- Defina os tempos de detecção e transmissão em DUT e CTS. Os valores dos parâmetros correspondentes em DUT e CTS devem ser iguais. Os valores devem ser mantidos

durante o teste.

- Use valores que variam de 0,05s a 60s.
 - Use tempos iguais, ou seja, 0,1s para sensoriamiento e transmissão; 0,2s para sensoriamiento e transmissão; e assim por diante.
 - Use tempos diferentes para sensoriamiento e transmissão que são 0,1s para sensoriamiento e 10s para transmissão; 0,2s para sensoriamiento e 9s para transmissão; 1s para sensoriamiento e 0,5s para transmissão; e assim por diante.
- Verifique os logs no CTS e no DUT.

A.1.1.5 Requisitos do Teste

Todos os valores definidos no DUT devem corresponder aos valores do CTS. Preste atenção às pequenas diferenças nos limites dos intervalos de sensoriamiento e transmissão.

A.1.2 Consciência Dinâmica

A.1.2.1 Definição e aplicabilidade

Este teste avalia a capacidade do Rádio Cognitivo de adaptar seus intervalos de transmissão e sensoriamiento durante a operação de CR, ou seja, dinamicamente. Ele verifica a capacidade do CR de adaptar seus parâmetros de operação aos diferentes padrões de uso dos canais que podem variar ao longo do tempo.

A.1.2.2 Requisito mínimo

Consciência Estática

A.1.2.3 Objetivo do Teste

Garantir o controle e tempo de resposta do CR, no que diz respeito ao sensoriamiento de espectro, e ajuste dinâmico dos tempos de transmissão e sensoriamiento durante a operação.

A.1.2.4 Método de Teste

A.1.2.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico.

A.1.2.4.2 Procedimento

- Define um conjunto de tempos de detecção e transmissão a serem adotados pelo DUT e CTS e a data e hora em que devem ser definidos durante o teste.
- Define um conjunto de tempos de detecção e transmissão a serem adotados pelo DUT e CTS e a data e hora em que devem ser definidos durante o teste.
 - Use valores que variam de 0,05s a 60s. Tamanhos de saltos diferentes podem ser adotados.
 - Use tempos iguais, ou seja, 0,1s para sensoriamento e transmissão; 0,2s para sensoriamento e transmissão; e assim por diante.
 - c. Use tempos diferentes para sensoriamento e transmissão que são 0,1s para sensoriamento e 10s para transmissão; 0,2s para sensoriamento e 9s para transmissão; 1 s para sensoriamento e 0,5s para transmissão; e assim por diante.
- Verifique os logs no CTS e no DUT.

A.1.2.5 Requisitos de Teste

Todos os valores definidos no DUT devem corresponder aos valores do CTS. Preste atenção às pequenas diferenças nos limites dos intervalos de sensoriamento e transmissão e as marcas de tempo quando as transições de transmissão/sensoriamento e sensoriamento/transmissão ocorrem em ambos os dispositivos.

A.1.3 Consciência de Ambiente Estático e Controlado

A.1.3.1 Definição e aplicabilidade

Este teste verifica a sensibilidade de potência do DUT em um ambiente controlado e estático.

A.1.3.2 Requisito mínimo

N/D

A.1.3.3 Objetivo do Teste

Para garantir a precisão da sensibilidade de energia do receptor CR em uma faixa de potência sob condições estáticas e controladas.

A.1.3.4 Método de Teste

A.1.3.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: ambiente de teste básico

A.1.3.4.2 Procedimento

- Defina vários níveis de potência no CTS. Para cada instância de teste, um nível é definido.
- Meça a potência média no DUT em cada mudança.

A.1.3.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT. Deve haver valores correspondentes a todos os valores definidos no CTS. Conversões de escala podem ser aplicadas.

A.1.4 Consciência de Ambiente Dinâmico e Controlado

A.1.4.1 Definição e aplicabilidade

Os testes de consciência de ambiente controlado garantem a sensibilidade de potência do DUT considerando os níveis de potência dinâmicos e controlados.

A.1.4.2 Requisito mínimo

Consciência de ambiente estático e controlado

A.1.4.3 Objetivo do Teste

Este teste avalia a precisão da sensibilidade de potência do receptor CR em um ambiente controlado, onde o nível de energia muda dinamicamente durante o teste. O CR receptor deve ser capaz de detectar as mudanças de níveis de potência durante o teste.

A.1.4.4 Método de Teste

A.1.4.4.1 Requisitos Iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico.

A.1.4.4.2 Procedimento

- Defina vários níveis de potência no CTS e defina quando a potência vai mudar durante o teste.
- Meça a potência média no DUT e os intervalos em que ocorrem durante o teste.

A.1.4.5 Requisitos de Teste

Verifique o log do DUT. Devem existir valores que correspondam a todos os valores definidos no CTS, em relação ao nível de potência e carimbos de data/hora quando ocorrem as transições de potência. Conversões de escala podem ser aplicadas

A.1.5 Consciência Pura de Ambiente

A.1.5.1 Definição e aplicabilidade

Os testes de consciência pura de ambiente garantem a sensibilidade de potência do DUT em um ambiente real onde o espectro eletromagnético pode ser imprevisível.

A.1.5.2 Requisito mínimo

N/D

A.1.5.3 Objetivo do Teste

Garanta a precisão da sensibilidade de potência em uma faixa de potência sob condições padrão para o CR receptor.

A.1.5.4 Método de Teste

A.1.5.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste paralelo.

A.1.5.4.2 Procedimento

- Deixe DUT e CTS em modo de sensoriamento por um período prolongado em um canal ocupado, livre e intermitente (por exemplo, canal de 6Mhz alocado para TVWS). Canais com larguras de banda diferentes podem ser considerados

A.1.5.5 Requisitos de teste

Verifique os registros do DUT. Deve haver valores correspondentes a todos os valores definidos no CTS. Conversões de escala podem ser aplicadas.

A.1.6 Sensibilidade Externa

A.1.6.1 Definição e aplicabilidade

CR é necessário para não interferir com o sinal primário. O CR deve ser capaz de detectar os sinais primários transmitidos em diferentes larguras de banda. Este teste garante a sensibilidade correta para trabalhar em campo com sinais primários que adotam larguras de banda diferentes.

A.1.6.2 Requisito mínimo

N/D

A.1.6.3 Objetivo do Teste

Garantir a sensibilidade correta do CR em várias larguras de banda.

A.1.6.4 Método de Teste

A.1.6.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste paralelo.

A.1.6.4.2 Procedimento

- Deixe DUT e CTS em modo de detecção por um período prolongado em canais livres e intermitentes com 200kHz, 1MHz, 2MHz, 6MHz, 10MHz e 20MHz. Neste caso de teste, um canal é adotado em cada instância.

A.1.6.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT. Deve haver valores correspondentes a todos os valores definidos no CTS. Conversões de escala podem ser aplicadas.

A.1.7 Sensibilidade Externa de Transmissão e Sensoriamento

A.1.7.1 Definição e aplicabilidade

Refere-se à capacidade do DUT de registrar o carimbo de data/hora quando o sinal primário está presente/ausente no canal. Envolve sensoriamento de canal e fornece suporte para a decisão do CR.

A.1.7.2 Requisito mínimo

N/D

A.1.7.3 Objetivo do Teste

Para verificar se o DUT é capaz de detectar quando o canal está ocioso/ocupado.

A.1.7.4 Método de Teste

A.1.7.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de Teste: Ambiente de Teste Paralelo

A.1.7.4.2 Procedimento

- Deixe o DUT no modo de sensoriamento por um período prolongado no canal pré-definido (sugere-se a adoção dos parâmetros de sensoriamento de maior resolução)
- Defina CTS para transmitir sinal primário usando o canal predefinido.
 - Use diferentes períodos para ocioso e ocupado
- Verifique os logs do CTS e DUT

A.1.7.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT. Deve haver valores correspondentes a todos os valores definidos no CTS. Conversões de escala podem ser aplicadas.

A.1.8 Sensibilidade Interna

A.1.8.1 Definição e aplicabilidade

O CR é necessário para não interferir com o sinal primário. Portanto, ele deve ser capaz de detectar os sinais de PU que possuem limites de detecção diferentes. Garantir a sensibilidade correta leva ao trabalho correto no campo.

A.1.8.2 Requisito mínimo

N/D

A.1.8.3 Objetivo do Teste

Garanta a sensibilidade correta de CR em vários limites internos.

A.1.8.4 Método de Teste

A.1.8.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de Teste: Ambiente de Teste Paralelo

A.1.8.4.2 Procedimento

- Deixe DUT e CTS em modo de sensoriamento por um período prolongado em um canal ocupado, livre e intermitente
 - Use canais com 200KHz, 1MHz, 2MHz, 6MHz, 10MHz e 20MHz
- Em cada largura de banda, definir limite de sensoriamento de espectro

- Use limites -114dB, -107dB e -85dB.

A.1.8.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT e CTS. Deverá haver indicações de detecção de energia no log do DUT de acordo com os valores detectados no CTS.

A.1.9 Sensibilidade interna em múltiplos canais

A.1.9.1 Definição e aplicabilidade

O CR é necessário para não interferir com o sinal primário que adota vários canais para transmissão. Assim, garantir a sensibilidade correta leva a um trabalho correto no campo.

A.1.9.2 Requisito mínimo

Teste anterior de sensibilidade interna

A.1.9.3 Objetivo do Teste

Garantir a sensibilidade correta do CR em vários canais com diferentes limites de sensoriamento.

A.1.9.4 Método de Teste

A.1.9.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste duplo.

A.1.9.4.2 Procedimento

- Deixe DUT e CTS1 em modo de sensoriamento por um período prolongado em canais ocupados, livres e intermitentes
 - Use canais com 1Mhz, 2Mhz, 6Mhz, 10Mhz e 20Mhz

- Realize teste com número diferente de canais (por exemplo: 2, 4 e 8 canais)
- Em cada largura de banda, defina limite de detecção de espectro
 - Use limites -114dB, -107dB e -85dB.
- Defina CTS0 para transmitir o sinal primário adotando as configurações (largura de banda e potência).

A.1.9.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT e CTS1. Deverá haver indicações de detecção de potência no log do DUT de acordo com os valores detectados no CTS.

A.1.10 Sensibilidade Fora de Banda - Transmissão por Terceiro

A.1.10.1 Definição e aplicabilidade

A emissão fora de banda precisa ser verificada e controlada para não interferir nas transmissões realizadas em canais adjacentes a um determinado canal. O CR é necessário para verificar a emissão fora de banda. Este teste se refere à capacidade do DUT de detectar canais adjacentes aos adotados por uma comunicação de terceiros. Envolve sensoriamento de canais não contíguos.

A.1.10.2 Requisito mínimo

Teste anterior de sensibilidade interna

A.1.10.3 Objetivo do Teste

Verificar se o DUT é capaz de medir o nível de potência nos canais adjacentes de um canal pré-definido, usado por terceiros.

A.1.10.4 Método de Teste

A.1.10.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste paralelo.

A.1.10.4.2 Procedimento

- Deixe DUT e CTS1 em modo de sensoriamento por um período prolongado nos canais adjacentes de um canal pré-definido
- Defina CTS0 para transmitir o sinal primário usando um canal predefinido.
 - Use diferentes larguras de banda e potências de transmissão
- Verifique os logs do CTS1 e DUT

A.1.10.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT e CTS1. Deve haver valores correspondentes a todos os valores em CTS0.

A.1.11 Sensibilidade Fora de Banda

A.1.11.1 Definição e aplicabilidade

O CR é necessário para verificar a emissão fora da banda de sua transmissão. Este teste se refere à capacidade do DUT de detectar canais adjacentes ao adotado em sua comunicação, a fim de controlar a emissão de interferência fora da banda. Envolve sensoriamento de canais não contíguos.

A.1.11.2 Requisito mínimo

Teste anterior de sensibilidade fora de banda - transmissão por um terceiro

A.1.11.3 Objetivo do Teste

Para verificar a capacidade do DUT de medir a emissão fora de banda (interferência) de sua transmissão.

A.1.11.4 Método de Teste

A.1.11.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste paralelo.

A.1.11.4.2 Procedimento

- Ajuste o CTS no modo de sensoriamento por um longo período nos canais adjacentes de um canal predefinido.
- Defina o DUT para transmitir sinal usando um canal predefinido
- Defina o DUT para sensorar os canais adjacentes ao mesmo tempo (duas antenas podem ser necessárias)
 - Use BWs de canal diferente e potências de transmissão
- Verifique os logs do CTS e DUT

A.1.11.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT e CTS. Deve haver valores de DUT correspondendo a todos os valores em CTS

A.1.12 Consciência de Sequência de Detecção

A.1.12.1 Definição e aplicabilidade

O CR deve sensorar os canais antes de realizar sua comunicação. Mesmo de forma aleatória, uma sequência de sensoriamento de canais precisa ser seguida pelo CR. Este teste se

refere à capacidade do DUT de sensorar os canais de acordo com uma ordem predefinida, que pode envolver canais contíguos ou não contíguos.

A.1.12.2 Requisito mínimo

Teste anterior de Consciência Dinâmica.

A.1.12.3 Objetivo do Teste

Para verificar a capacidade do DUT de sensorar os canais em uma ordem predefinida.

A.1.12.4 Método de Teste

A.1.12.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste paralelo.

A.1.12.4.2 Procedimento

- Definir a ordem de sensoriamento dos canais e o tempo de sensoriamento de cada um
- Defina DUT e CTS para sensorar os canais de acordo com a ordem e o tempo predefinido.
- Defina CTS1 para realizar a transmissão usando os canais.
- Verifique os logs do CTS e DUT

A.1.12.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT e CTS. Deve haver valores de DUT correspondendo a todos os valores em CTS

A.2 CONTROLE DE POTÊNCIA

A.2.1 Consciência de Potência

A.2.1.1 *Definição e aplicabilidade*

O teste de consciência certifica que o CR pode transmitir em um determinado nível de potência para não interferir na transmissão de outros rádios.

A.2.1.2 *Requisito mínimo*

N/D

A.2.1.3 *Objetivo do Teste*

Garantir a precisão do nível de potência de saída em uma faixa de potência em condições normais para um CR transmissor.

A.2.1.4 *Método de Teste*

A.2.1.4.1 *Requisitos iniciais*

Ambiente de teste: ambiente de teste básico

A.2.1.4.2 *Procedimento*

- Definir vários níveis de potência no DUT
- Medir a potência média no CTS em cada mudança
- Verificar os logs do CTS e DUT.
- Os valores devem corresponder.

A.2.1.5 Requisitos de teste

Todos os valores definidos no DUT devem corresponder aos valores do CTS. Conversões de escala podem ser aplicadas.

A.3 MOBILIDADE ESPECTRAL

A.3.1 Operação de CR Sem Mobilidade de Espectro

A.3.1.1 Definição e aplicabilidade

O CR deve ser capaz de transmitir dados quando o canal está livre e desocupá-lo caso contrário. Este teste avalia a capacidade do DUT de transmitir dados (sinal) e desocupar o canal de acordo com os tempos de transmissão e silêncio predefinidos. Este teste considera o sensoriamento perfeito e não adota a mobilidade do espectro, ou seja, troca de canal.

A.3.1.2 Requisito mínimo

Testes anteriores de sensoriamento de espectro e sensibilidade de potência.

A.3.1.3 Objetivo do Teste

Garantir o controle e o tempo de resposta do CR em relação aos tempos de transmissão e silêncio.

A.3.1.4 Método de Teste

A.3.1.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico.

A.3.1.4.2 Procedimento

- Definir tempos diferentes para sensoriamento e transmissão no DUT

- Transmitir alguns dados (sinal) no DUT durante os períodos de transmissão e não transmitir nada durante os períodos de sensoriamento (silêncio) para que o CTS possa estar ciente dos períodos de transmissão e sensoriamento.
- Definir o CTS para sentir apenas o ambiente.
- Verifique os logs no CTS e no DUT.

A.3.1.5 Requisitos de teste

Todos os valores definidos no DUT devem corresponder aos valores do CTS. Preste atenção às pequenas diferenças nos limites dos intervalos de detecção e transmissão.

A.3.2 Operação de CR com Mobilidade de Espectro

A.3.2.1 Definição e aplicabilidade

Os testes de mobilidade espectral avaliam a capacidade que o Rádio Cognitivo pode ter de continuar transmitindo dados mesmo quando realiza mobilidade espectral, ou seja, quando muda seu canal de operação. Neste teste, o DUT deve ser capaz de realizar a mobilidade do espectro para retomar sua comunicação. Assumimos a capacidade de negociação subjacente em ambos CR, que ainda não está padronizada. Portanto, ambos os CRs usam uma sequência predefinida de canais para realizar sua comunicação, o que significa que a funcionalidade de sensoriamento de espectro não é um alvo neste teste.

A.3.2.2 Requisitos mínimo

Testes anteriores de detecção de espectro, sensibilidade de potência e mobilidade espectral.

A.3.2.3 Objetivo do Teste

Garantir o controle e o tempo de resposta do CR quanto à mobilidade do espectro, bem como a continuidade da operação.

A.3.2.4 *Método de Teste*

A.3.2.4.1 *Requisitos iniciais*

Ambiente de teste: Ambiente de teste duplo.

A.3.2.4.2 *Procedimento*

- Configure o DUT para trabalhar em uma sequência de canais (dois ou mais canais) e defina o tempo em que ele transmite o sinal em cada canal e quando muda o canal, de acordo com os objetivos do teste. Aplique as mesmas configurações no CTS. O CTS nunca transmite dados, apenas detecta os canais.
- Transmita alguns dados (sinal) no DUT usando a sequência de canais predefinida e realizando a mobilidade do espectro. Portanto, o CTS1 pode estar ciente da transmissão do DUT, bem como do canal que está sendo usado pelo DUT durante o teste.
- Verifique os logs no CTS e no DUT.

A.3.2.5 *Requisitos de teste*

Todos os valores definidos no DUT devem corresponder aos valores do CTS. Preste atenção às pequenas diferenças nos limites dos intervalos de sensoriamento e transmissão.

A.3.3 Sensoriamento e Transmissão sem Mobilidade de Espectro

A.3.3.1 *Definição e aplicabilidade*

O CR é necessário para sensoriar o espectro para determinar a presença de PU e decidir quando transmitir e qual canal adotar. Este teste não considera a mobilidade do espectro, portanto o DUT deve desocupar o canal quando o PU reaparecer, interrompendo sua transmissão, e reassumi-lo quando o PU deixar o canal. Este teste envolve sensoriamento de espectro e transmissão de sinal (dados).

A.3.3.2 Requisito mínimo

Teste anterior de operação de CR com mobilidade de espectro

A.3.3.3 Objetivo do Teste

Verificar a capacidade do DUT de combinar sensoriamento de espectro e transmissão de dados (sinal) durante sua operação.

A.3.3.4 Método de Teste

A.3.3.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste duplo.

A.3.3.4.2 Procedimento

- Definir intervalos de transmissão/silêncio (sensoriamento) no CTS0.
- Defina CTS0 para transmitir dados durante o tempo de transmissão apenas para manter o canal ocupado para fins de teste.
- Definir intervalos de transmissão/sensoriamento no DUT.
- Defina CTS1 para sensoriar o canal. CTS1 nunca transmite dados. Portanto, ele pode estar ciente da transmissão do DUT (registros de data/hora).
- Definir intervalos de transmissão/sensoriamento no CTS0 de modo que possa:
 - Manter o canal ocupado enquanto o DUT estiver em modo de sensoriamento no canal, forçando-o a desocupar o canal/interromper a transmissão.
 - Mantenha o canal livre enquanto o DUT executa o sensoriamento do canal, para que o DUT possa transmitir dados durante um tempo predefinido.
- Verifique os logs no CTS1 e no DUT.

A.3.3.5 Requisitos de teste

Verifique o log do DUT e CTS. Deve haver valores de DUT correspondendo a todos os valores em CTS.

A.3.4 Sensoriamento e Transmissão com Mobilidade de Espectro

A.3.4.1 Definição e aplicabilidade

O CR é necessário para sensoriar o espectro para determinar a presença de PU e decidir quando e qual canal adotar para realizar sua transmissão. Ele deve desocupar o canal quando o PU reaparecer e escolher outro canal para retomar sua comunicação (mobilidade do espectro). Este teste envolve sensoriamento de espectro, transmissão e mobilidade do espectro.

A.3.4.2 Requisito mínimo

Teste anterior de sensoriamento e transmissão sem mobilidade de espectro.

A.3.4.3 Objetivo do Teste

Para verificar a capacidade do DUT de manter sua transmissão em andamento, mesmo quando ele tem que mudar o canal de comunicação.

A.3.4.4 Método de Teste

A.3.4.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste duplo.

A.3.4.4.2 Procedimento

- Defina CTS0 para transmitir dados apenas para manter o canal ocupado para fins de teste.

- Configure o DUT para trabalhar em um conjunto de canais (dois ou mais canais), de acordo com os objetivos do teste. Aplique as mesmas configurações no CTS1. CTS1 nunca transmite dados.
- Definir intervalos de transmissão/sensoriamento no CTS0:
 - Manter o canal ocupado enquanto o DUT está no modo de sensoriamento em um canal, forçando-o a mudar de canal.
 - Manter o canal livre no segundo canal, para que o DUT possa transmitir dados durante um tempo predefinido e voltar ao primeiro canal quando o intervalo terminar.
 - Faça CTS1 seguir o DUT para todos os canais que ele mudar.
- Transmita alguns dados (sinal) no DUT durante os períodos de transmissão e detecte os canais durante os períodos de sensoriamento, para que o CTS1 possa estar ciente dos períodos de transmissão e sensoriamento.
- Ao usar mais de dois canais, sempre escolha o próximo canal para sensoriar o espectro, mas seguindo a mesma tendência:
 - Ao usar dois canais, mantenha um canal ocupado e o outro livre para transmissão de dados;
 - Ao utilizar três canais, mantenha dois canais ocupados e o outro disponível para transmissão de dados;
 - Ao usar quatro canais, mantenha três canais ocupados e transmita os dados usando o outro canal.
 - A definição de quais canais ficarão livres ou ocupados pode ser feita de forma aleatória.
- Verifique os logs no CTS e no DUT.

A.3.4.5 *Requisitos de teste*

Verifique o log do DUT e CTS. Deve haver valores de DUT correspondendo a todos os valores em CTS

A.4 CONSCIÊNCIA DE LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A.4.1 teste de GPS

A.4.1.1 *Definição e aplicabilidade*

Testar o GPS do CR permite que eles atendam aos requisitos de contexto, políticas e suporte de fornecimento de informações. Esse teste se aplica a qualquer CRS.

A.4.1.2 *Requisito mínimo*

N/D

A.4.1.3 *Objetivo do Teste*

Garantir que o CR tenha acesso correto à sua localização.

A.4.1.4 *Método de Teste*

A.4.1.4.1 **Requisitos iniciais**

Ambiente de teste: ambiente de teste básico ou ambiente de teste paralelo

A.4.1.4.2 **Procedimento**

- Coloque DUT e CTS em várias posições.
- Colete os logs durante o transporte.

A.4.1.5 *Requisitos de teste*

Verifique o log do DUT. O registro da posição GPS deve ser o mesmo em ambos os registros.

A.4.2 Acesso ao Banco de Dados

A.4.2.1 Definição e aplicabilidade

O acesso a informações externas é um requisito para o CR. Este teste requer uma conexão alternativa com acesso à Internet. Este teste é necessário para o CR que precisa acessar TVWS.

A.4.2.2 Requisito mínimo

Testes em GPS, Sensoriamento de Espectro, Controle de Potência e Mobilidade Espectral.

A.4.2.3 Objetivo do Teste

Garante que o CR tenha acesso correto a um banco de dados.

A.4.2.4 Método de Teste

A.4.2.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste autônomo.

A.4.2.4.2 Procedimento

- Verifique se o DUT possui os métodos de acesso ao banco de dados conforme RFC7545 e se há conexão à internet disponível.
- Faça com que o DUT forneça uma localização. Use modelos de RFC7545 para a solicitação. Atualize os campos na Solicitação de espectro do PAWS com 'X' maiúsculo e outros como 'centro' e 'antena'.
- Aguarde pelo menos 10 segundos pela resposta.

A.4.2.5 Requisitos de teste

Se todos os parâmetros estiverem corretos, a resposta pode se parecer com PAWS Spectrum Response. Observe os valores com 'X' maiúsculo, bem como aqueles como 'timestamp'; 'RulesetIds', 'eventTime' e 'spectra' podem mudar

A.5 MODULAÇÃO ADAPTATIVA

A.5.1 Modulação Adaptativa

A.5.1.1 Definição e aplicabilidade

Espera-se que os CRs adaptem a modulação de acordo com o espectro. Este teste se aplica a qualquer CR que requeira adaptabilidade de modulação para sua operação.

A.5.1.2 Requisito mínimo

Teste de detecção de espectro, controle de potência e mobilidade espectral.

A.5.1.3 Objetivo do Teste

Certifique-se de que o CR está adaptando sua modulação de acordo com os requisitos de comunicação.

A.5.1.4 Método de Teste

A.5.1.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico. Inclui suporte para monitoramento de rede (por exemplo, Wireshark) em ambos os terminais.

A.5.1.4.2 Procedimento

- Definir DUT para transmitir alguns sinais (por exemplo, onda senoidal) e definir CTS para receber os sinais
- Sincroniza DUT e CTS para alterar a modulação em intervalos específicos.
 - Utilizar os valores de outros testes (Consciência Estática ou Sensibilidade Externa)
- Definir ferramenta de monitoramento de rede no DUT e CTS (por exemplo, Wireshark)

A.5.1.5 Requisitos de teste

Os logs do DUT e CTS devem corresponder aos valores referentes aos parâmetros de transmissão (modulação, tempo) e os logs do tráfego da rede devem apresentar valores próximos da quantidade de dados. Diferenças no receptor podem representar problemas de adaptação (modulação incorreta) ou atraso nas mudanças de modulação.

A.6 ACESSO DINÂMICO E DESCOBERTA DE REDE

Esta seção contém testes em funções cognitivas mistas. Damos atenção especial à integração das funções cognitivas com o acesso a dados externos, ou seja, TVWSDB.

A.6.1 Processamento de Dados (controle de potência de canal)

A.6.1.1 Definição e aplicabilidade

Esta seção contém testes sobre a integração de controle de potência e TVWSDB e avalia como o CR pode aplicar informações fornecidas por bases de informações para controlar sua potência de transmissão. Aplica-se em situações onde CR tem acesso a bancos de dados externos.

A.6.1.2 Requisito mínimo

Teste de sensoriamento de localização e controle de potência.

A.6.1.3 Objetivo do Teste

Certificar-se de que o rádio pode usar as informações fornecidas pelo TVWSDB e aplicá-las corretamente à sua potência de transmissão, ajudando assim a controlar o compartilhamento e reutilizar o espectro entre CR e o PU.

A.6.1.4 Método de Teste

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico.

A.6.1.4.1 Requisitos iniciais

A.6.1.4.2 Procedimento

- Faça com que o DUT solicite informações de espectro de um banco de dados. Use informações de posição real ou informações de posição controlada. Atualize os campos na solicitação de espectro do PAWS com 'X' maiúsculo e outros como 'centro' e 'antena'.
- Aguarde pelo menos 10 segundos pela resposta.
- Analise e use os valores da chave "espectros", que é a "resoluçãoBwHz" e o primeiro "perfil".
- Verifique os parâmetros de transmissão em DUT e CTS

A.6.1.5 Requisitos de teste

Deve haver valores no DUT correspondentes a todos os valores definidos no CTS em relação ao canal e à potência de transmissão. Os resultados em PAWS Spectrum Response afirmam que o rádio deve transmitir a 30dbm em um canal de 6Mhz na banda de 518Mhz. Outros valores podem ser aplicados dependendo da posição fornecida pelo GPS.

A.6.2 Processamento de Dados (controle de potência e canal)

A.6.2.1 Definição e aplicabilidade

Esta seção contém testes sobre a integração de controle de potência e TVWSDB e avalia como o CR pode aplicar informações fornecidas por bases de informações para controlar sua potência de transmissão. Aplica-se em situações onde CR tem acesso a bancos de dados externos.

A.6.2.2 Requisito mínimo

Teste de detecção de localização e controle de potência.

A.6.2.3 Objetivo do Teste

Certifique-se de que o rádio pode usar as informações fornecidas pelo TVWSDB e aplicá-las corretamente à sua potência de transmissão, ajudando assim a controlar o compartilhamento e reutilização do espectro entre CR e PU.

A.6.2.4 Método de Teste

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico.

A.6.2.4.1 Requisitos iniciais

A.6.2.4.2 Procedimento

- Faça com que o DUT solicite informações de espectro de um banco de dados usando o método. Use informações de posição real ou informações de posição controlada. Atualize os campos na solicitação de espectro do PAWS com 'X' maiúsculo e outros como 'centro' e 'antena'.
- Aguarde pelo menos 10 segundos pela resposta.

- Analise e use os valores da chave "espectros", que é a "resoluçãoBwHz" e o primeiro "perfil".
- Verifique os parâmetros de transmissão em DUT e CTS

A.6.2.5 Requisitos de teste

Deve haver valores no DUT correspondentes a todos os valores definidos no CTS em relação ao canal e à potência de transmissão. Os resultados em PAWS Spectrum Response afirmam que o rádio deve transmitir a 30dbm em um canal de 6Mhz na banda de 518 Mhz. Outros valores podem ser aplicados dependendo da posição fornecida pelo GPS.

A.6.3 Tratamento de Erros

A.6.3.1 Definição e aplicabilidade

Dispositivos que usam informações de banco de dados devem tratar as exceções corretamente. A RFC7545 fornece orientação sobre como o dispositivo deve lidar com os erros.

A.6.3.2 Requisito mínimo

Testes de sensoriamento de espectro, controle de potência, mobilidade espectral e reconhecimento de localização.

A.6.3.3 Objetivo do Teste

Esse teste garante que o CR possa lidar com erros de acesso aos bancos de dados e até mesmo funcionar corretamente na sua ausência.

A.6.3.4 Método de Teste

A.6.3.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste autônomo

A.6.3.4.2 Procedimento

- Crie uma solicitação para um banco de dados usando valores para coordenadas (por exemplo, 22.503329 -174.184191, que corresponde a um ponto no meio do Oceano Pacífico.) Use o modelo em Solicitação de espectro do PAWS.

A.6.3.5 Requisitos de teste

Verifique se o JSON recebido contém o código de erro -104, representando OUTSIDE_COVERAGE.

A.7 TESTES DE LIMITES

Esta seção contém testes que verificam se o DUT executa a ação/funcionalidade de destino dentro de limites definidos.

A.7.1 Detecção de Canal

A.7.1.1 Definição e aplicabilidade

Testes anteriores verificaram a capacidade do DUT de sensorar o espectro e detectar a presença de PU. Porém, não verificaram se o DUT o faz em tempo hábil. Os órgãos reguladores (por exemplo, FCC) definem o tempo que PU pode tolerar interferência antes que o SU a detecte e deixe o canal, que é denominado tempo de detecção de canal. Este teste verifica se o DUT é capaz de verificar a presença de PU e deixar o canal dentro do tempo de detecção do canal.

A.7.1.2 Requisito mínimo

Teste de detecção de espectro e mobilidade do espectro.

A.7.1.3 Objetivo do Teste

Garantir que o DUT seja capaz de sensorear o espectro (presença de PU), atendendo ao requisito de tempo de detecção de canal e sob determinadas condições (por exemplo, SNR e largura de banda do canal).

A.7.1.4 Método de Teste

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico.

A.7.1.4.1 Requisitos iniciais

A.7.1.4.2 Procedimento

- Defina diferentes instantes para que o PU inicie sua transmissão (considerando o início do teste como ponto de referência).
- Defina o CTS para transmitir o sinal primário de acordo com o padrão e as condições definidas (por exemplo, BW e SNR).
 - Usando diferentes BWs: 1,4MHz, 3MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz, 20KHz, 6MHz.
 - Faça com que o SNR seja: 1db, -21db, -12db.
- Configure o DUT para iniciar a transmissão quando o teste começar.
- Definir o tempo de detecção do canal para cada cenário (tipo de sinal, BW e SNR)P por exemplo, 2s

A.7.1.5 Requisitos de teste

O DUT tem que detectar o espectro, detectar o PU e deixar o canal atendendo ao tempo de detecção do canal alvo (no máximo).

A.7.2 Limite de Emissão Fora de Banda

A.7.2.1 Definição e aplicabilidade

Os testes anteriores verificaram a capacidade do DUT de detectar a emissão fora da banda (canais adjacentes). Mas, eles não verificaram se o DUT não ultrapassou o limite de emissão fora da banda. Se for negligenciado, as transmissões em canais adjacentes podem ser degradadas. O limite de emissão fora da banda depende da quantidade de interferência que as transmissões adjacentes podem tolerar. Este teste verifica se o DUT é capaz de manter a emissão fora de banda dentro do limite.

A.7.2.2 Requisito mínimo

Teste de sensibilidade fora de banda e controle de potência.

A.7.2.3 Objetivo do Teste

Garantir que o DUT seja capaz de manter a emissão fora de banda dentro do limite.

A.7.2.4 Método de Teste

A.7.2.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste: Ambiente de teste básico.

A.7.2.4.2 Procedimento

- Defina o limite de emissão fora da banda de acordo com as normas.
- Configure o DUT para realizar a transmissão.
 - Usando diferentes BWs: 1,4MHz, 3MHz, 10 MHz, 15MHz, 20 MHz, 20KHz, 6 MHz.
 - Faça com que o SNR seja: 1db, -21db, -12db.
- Defina o CTS para detectar os canais adjacentes.

A.7.2.5 Requisitos de teste

O DUT deve realizar sua transmissão sem emitir potência fora da banda além do aceitável.

A.7.3 Limite de Emissão Dentro da Banda

A.7.3.1 Definição e aplicabilidade

Os testes anteriores verificaram a capacidade do DUT de detectar a emissão dentro da banda. Mas, também é importante verificar se o DUT não ultrapassou o limite de emissão dentro da banda. Se for negligenciado, as transmissões que compartilham o mesmo canal podem ser degradadas (além do limite de cobertura ou na comunicação subjacente). O limite dentro da banda pode ser definido pelos órgãos reguladores. Este teste verifica se o DUT é capaz de manter a emissão dentro da banda dentro do limite.

A.7.3.2 Requisito mínimo

Teste do controle de energia.

A.7.3.3 Objetivo do Teste

Garantir que o DUT seja capaz de manter a emissão dentro da banda dentro do limite.

A.7.3.4 Método de Teste

A.7.3.4.1 Requisitos iniciais

Ambiente de teste básico.

A.7.3.4.2 Procedimento

- Definir o limite de emissão dentro de acordo com as normas dos órgãos regulares.
- Configure o DUT para realizar a transmissão.

- Usando diferentes BWs: 1,4MHz, 3MHz, 10 MHz, 15MHz, 20MHz, 20KHz, 6 MHz.
- Faça com que o SNR seja: 1db, -21db, -12db.
- Defina CTS para detectar o canal usado pelo DUT.

A.7.3.5 Requisitos de teste

O DUT deve realizar sua transmissão sem emitir potência dentro da banda além do aceitável.