

Proposta de arcabouço experimental para rede de sensoriamento espectral usando rádio definido por *software*

Yngrid Keila Silva Cabral^[1], Paulo Ribeiro Lins Júnior^[2], Jerônimo Silva Rocha^[3]

^[1]yngrid.tecinfo@gmail.com, ^[2]paulo.lins@ifpb.edu.br, ^[3]jeronimo.rocha@ifpb.edu.br. Grupo de Pesquisa em Comunicações e Processamento de Informação (GComPI), IFPB - Campus Campina Grande.

RESUMO

Este artigo apresenta uma proposta de arquitetura para uma rede de sensoriamento espectral usando rádios definidos por *software*. Os rádios responsáveis pelo sensoriamento são implementados usando RTL-SDR, um rádio de baixo custo, com capacidade de receber sinais de diversas faixas de frequência, como as usadas em FM, DAB e DVB-T. As funções de sensoriamento são implementadas usando o GNU Radio, *software* livre mais usado para configuração de rádios definidos por *software*, instalados em Raspberry Pi's, o que deixa a estrutura de sensoriamento significativamente compacta e barata se comparada a outras soluções. São realizados experimentos para medir a probabilidade de detecção, em função da relação sinal-ruído, como métrica da eficiência do sistema proposto neste trabalho.

Palavras-chave: Sensoriamento espectral. Rádio Definido por Software. GNU Radio. Raspberry Pi. SDR-RTL.

ABSTRACT

This paper presents an architecture proposal for a spectrum sensing network using software defined radios. The radios responsible for the sensing are implemented with SDR-RTL, a low-cost radio, capable of receiving signals from several frequency bands, such as those used in FM, DAB and DVB-T. Sensing functions are implemented using GNU Radio, the most commonly used free software for configuring software-defined radios installed in Raspberry Pi's, which makes the sensing structure significantly compact and inexpensive when compared to other solutions. Experiments are performed to measure the probability of detection in relation to the signal noiseratio, as a metric of the efficiency of the system proposed in this work.

Keywords: *Spectrum sensing. Software Defined Radio. GNU Radio. Raspberry Pi. SDR-RTL.*

1 Introdução

É inegável que a utilização de dispositivos e serviços sem fio tem se tornado cada vez mais presente na vida cotidiana. Entretanto, o espectro eletromagnético utilizado para comunicações sem fio é um recurso natural limitado e encontra-se alocado para serviços específicos, o que acarreta a impossibilidade da agregação de novos serviços e a diminuição da capacidade de suprir a demanda de determinados serviços.

No âmbito nacional, o órgão responsável por garantir a organização e a distribuição das faixas do espectro é a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). Parte do espectro é destinada a usuários dos serviços denominados licenciados, que necessitam de uma aquisição formal perante à Anatel, como emissoras de rádio, de televisão, entre outros. A outra parte é designada para usuários ou serviços ditos não licenciados, pois não necessitam de contrato prévio com a Anatel, apesar da necessidade de homologação, por essa agência, de equipamentos como, por exemplo, microfones sem fio (AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, 2017).-

Os serviços licenciados que estão alocados no espectro pela Anatel são comumente denominados de Usuários Primários (UP). Grande parte do espectro está alocada para os UPs, contudo estudos realizados pela FCC (*Federal Communications Commission*) apontam que os UPs utilizam o espectro apenas entre 15% e 85% ao longo do dia e que, em aproximadamente 90% do tempo, o espectro licenciado se encontra inutilizado (ROCHA, 2013). Esses dados indicam que há um desperdício significativo do espectro, denominado de lacunas espectrais, e, apesar disso, nos períodos de inutilização, essas lacunas não são aproveitadas por novos serviços licenciados (PINHEIRO, 2013).

O espectro é um recurso importante para a economia. Desse modo, a reutilização e a utilização eficiente do espectro continuam sendo alvo de diversos estudos, como é o exemplo dos Rádios Cognitivos (RC). Os Rádios Cognitivos são dispositivos que têm como principal objetivo utilizar o espectro de forma oportunística, fazendo uso das lacunas espectrais para sua própria comunicação. Esses dispositivos possuem a capacidade de aprender com o ambiente ao seu redor, de modo que, quando necessário, alteram seus parâmetros como, por exemplo, frequência ou potência, para poder utilizar as oportunidades de comunicação (MENDES; SOUZA, 2016).

A utilização ineficiente do espectro eletromagnético causa diversos desperdícios, conforme comprova o estudo de utilização do espectro apresentado pela FCC (ROCHA, 2013). As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são um exemplo de aplicação que utiliza as lacunas espectrais para efetuar a troca de informações necessárias para o funcionamento da rede (GOMES *et al.*, 2014). Para que a utilização dessas lacunas seja realizada, é necessária uma análise do espectro, a fim de localizar as oportunidades de transmissão.

Em ambientes industriais, as RSSFs são utilizadas para o monitoramento de parâmetros críticos como, por exemplo, a temperatura (GOMES *et al.*, 2014). Não é trivial, portanto, que os nós da rede desperdicem o tempo que poderia ser empregado no monitoramento de suas atividades principais, com a análise das oportunidades de transmissão no espectro.

Diante dessa problemática, este trabalho tem como objetivo propor uma arquitetura de rede de sensoriamento espectral, composta de sensores formados por rádios definidos por *software* integrados às placas de desenvolvimento Raspberry Pi, rodando GNU Radio para implementar as funções de sensoriamento. Essa arquitetura pode ser integrada a diversos contextos de redes, como as RSSFs, ou redes IoT (*Internet of Things*), por exemplo, auxiliando no monitoramento para garantia de largura de banda disponível para a transmissão e recepção de dados.

O restante do artigo é organizado da seguinte forma: na Seção 2, é apresentada a fundamentação sobre rádios cognitivos e sensoriamento espectral; na Seção 3, são apresentados os conceitos acerca de rádios, definidos por *software*, com descrição das funcionalidades do GNU Radio – *software* usado neste trabalho; na Seção 4, é apresentada a arquitetura proposta para o sensoriamento espectral, usando-se rádios definidos por *software*; na Seção 5, são apresentados os resultados dos testes e, na Seção 6, as conclusões do trabalho.

2 Rádios Cognitivos e sensoriamento espectral

O Rádio Cognitivo (RC) foi inicialmente sugerido por Mitola e Maguire (1999), e desde então tem sido referenciado como uma solução para o reaproveitamento eficiente do espectro, além dos diversos estudos que compreendem essa tecnologia.

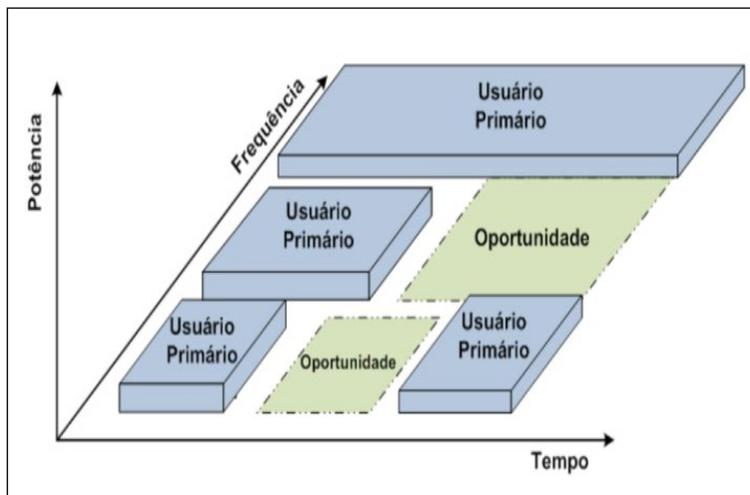
O RC deve primar pela preservação do Usuário Primário (UP) de interferência. Para tal, o RC utiliza as lacunas espectrais de forma oportunística, ou seja,

utiliza o espectro enquanto o UP não está presente, de modo a não causar interferência (ALMEIDA, 2010). Para que o RC seja capaz de aproveitar de maneira hábil as oportunidades de comunicação no espectro, conforme ilustrado na Figura 1, é fundamental a existência de algumas características, como (MENDES; SOUZA, 2016):

- Sensoriamento espectral: o RC deve ser capaz de detectar a presença e ausência do UP de forma eficiente, para poder utilizar as oportunidades de transmissão;

- Cognição: o RC deve ser capaz de aprender com as características do ambiente ao seu redor e mudar seus parâmetros de configuração, como frequência, potência, modulação, entre outros, para aproveitar as oportunidades no espectro;
- Mobilidade no espectro: o UP pode voltar a utilizar o espectro a qualquer momento, por isso, o RC deve ser capaz de detectar a presença do UP e mudar de frequência, de modo a não causar interferência.

Figura 1 – Ilustração de oportunidades de transmissão

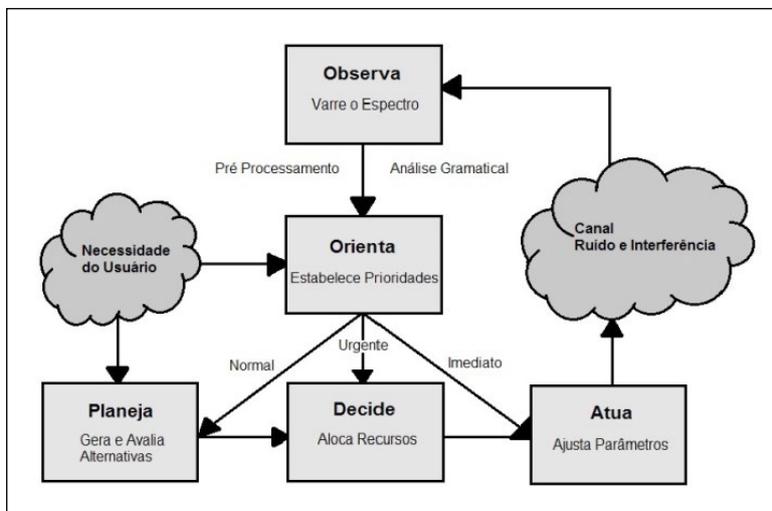


Fonte: Adaptado de Almeida (2010).

O funcionamento do RC, conforme proposto por Mitola e Maguire (1999), apresenta as etapas de observação, orientação, planejamento, decisão

e atuação, também denominadas de ciclo cognitivo (ROCHA, 2013). Esse ciclo é ilustrado na Figura 2.-

Figura 2 – Ciclo cognitivo



Fonte: adaptado de Menezes (2007) apud Felisbino (2015).

- **Observação:** o RC analisa e reúne informações do ambiente em que está inserido;
- **Orientação:** as informações reunidas são analisadas e, por meio disso, o RC determina o nível de prioridade da ação a ser tomada;
- **Planejamento:** o RC analisa os recursos necessários para a ação a ser tomada, de acordo com o nível de prioridade determinado;
- **Decisão:** o RC decide a ação a ser tomada a partir do planejamento executado;
- **Atuação:** o RC executa a ação planejada e decidida nas etapas anteriores.

Uma das principais etapas do funcionamento do RC é o sensoriamento espectral, com o RC sendo capaz de identificar se há no canal a presença de UPs ou apenas ruído. Essa análise pode ser observada de acordo com as hipóteses apresentadas na Equação (1) (YUCEK; ARSLAN, 2009):

$$D(f) = \begin{cases} H_0, & \text{se } r(f) = n(f) \\ H_1, & \text{se } r(f) = s(f) + n(f) \end{cases} \quad (1)$$

em que $D(f)$ é a decisão do sensoriamento, $r(f)$ é o sinal analisado, H_0 é a hipótese de que o sinal analisado seja apenas ruído $n(f)$, e H_1 é a hipótese de que no sinal analisado tenha a presença do sinal de um UP ($s(f)$), com a adição do ruído.

A partir das hipóteses H_0 e H_1 , são verificadas quatro probabilidades importantes para a exatidão do sensoriamento espectral: i) a probabilidade de detecção ($P(d)$), que diz respeito à probabilidade de detectar UPs; ii) a probabilidade de falso alarme ($P(fa)$), em que a decisão do sensoriamento é que o canal está ocupado por um UP, quando na verdade está livre; iii) a probabilidade de aquisição ($P(a)$), em que a decisão é que o canal está livre estando realmente livre; iv) a probabilidade de erro de detecção ($P(ed)$), em que o canal é determinado como livre quando na verdade está ocupado por um UP. O Quadro 1 ilustra a relação entre as hipóteses e as probabilidades do sensoriamento.

Quadro 1 – Conjunto de hipóteses e probabilidades do sensoriamento espectral

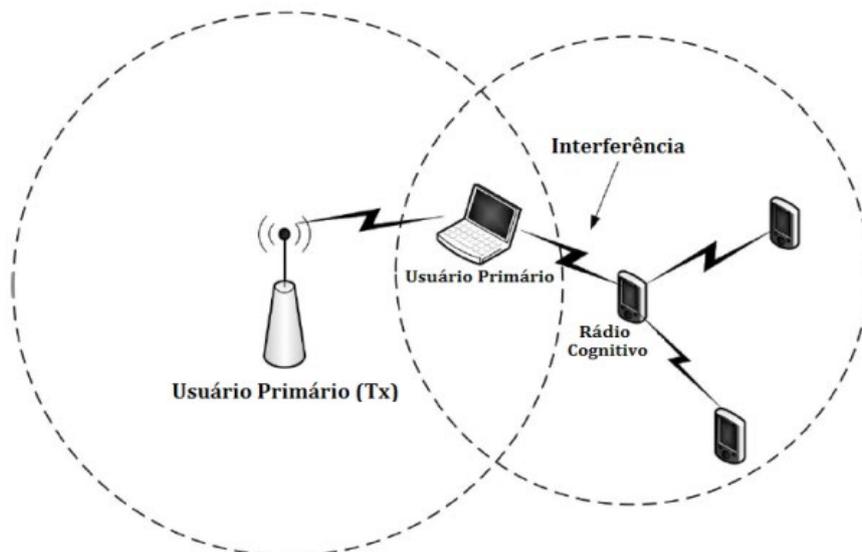
	Decisão	
	H_0	H_1
Ausência de UP	Probabilidade de aquisição	Probabilidade de falso alarme
Presença de UP	Probabilidade de erro de detecção	Probabilidade de detecção

Fonte: Adaptado de Cichón (2016).

As probabilidades de falso alarme e de erro de detecção decorrem de alguns problemas enfrentados pelo sensoriamento espectral, por exemplo (SILVA, 2014):

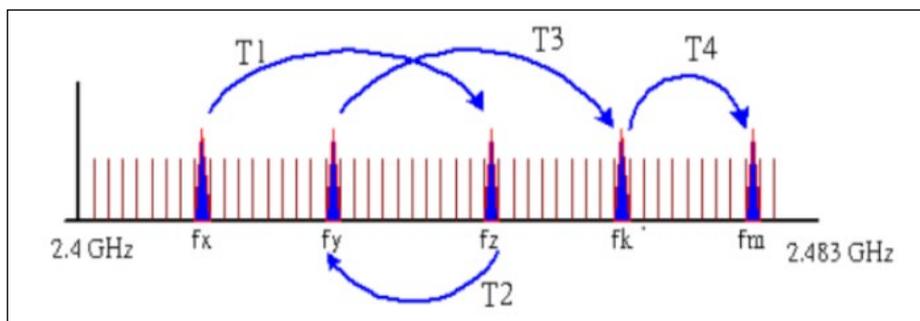
- **Terminal escondido:** ocorre quando o UP se encontra em fase de recepção, ou seja, não está transmitindo nenhum sinal. O processo de sensoriamento determina erroneamente que o canal está livre, causando interferência ao UP, como ilustrado na Figura 3.
- **Espalhamento do espectro:** como forma de atenuar interferências, alguns UPs utilizam técnicas de espalhamento espectral, como FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), em que o espalhamento é realizado em frequência, e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), em que o espalhamento é realizado em código, ilustrados, respectivamente, nas Figuras 4 e 5 a seguir. O processo de espalhamento resulta na diminuição da potência do sinal do UP, de modo que o sinal pode ser confundido com o ruído do canal. Assim, durante o sensoriamento, o RC pode, incorretamente, determinar que o canal está livre.

Figura 3 – Ilustração do terminal escondido



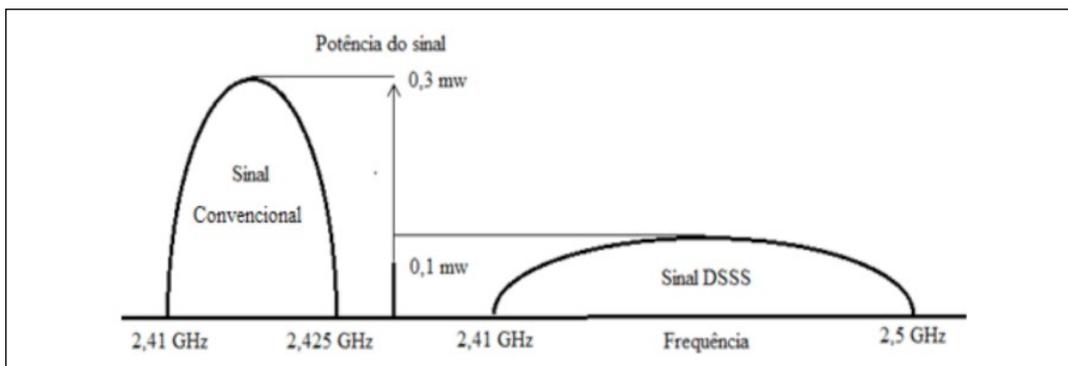
Fonte: adaptado de Yücek e Arslan (2009).

Figura 4 – Ilustração da técnica de espalhamento espectral FHSS



Fonte: adaptado de Silva (2014).

Figura 5 – Ilustração da técnica de espalhamento espectral DSSS



Fonte: adaptado de Silva (2014).

Entre as técnicas de sensoriamento espectral existentes, deve-se utilizar a que apresenta melhor exatidão em relação às características do ambiente trabalhado, para que o resultado do sensoriamento seja confiável, apesar dos desafios existentes.

3 Rádio definido por software

Os RCs (Rádios Cognitivos) devem ser dispositivos capazes de se adaptar ao ambiente em que estão inseridos, por meio da mudança de alguns parâmetros de configuração, como, por exemplo, a frequência, a potência de transmissão, a modulação, a codificação, entre outros. Para que essa característica seja atendida, os RCs não podem utilizar dispositivos convencionais, como receptor FM ou receptor de TV, pois os parâmetros de configuração desses dispositivos são fixos e não podem ser alterados. Portanto, para o paradigma dos RCs, uma das possíveis soluções de implementação são os Rádios Definidos por *Software* (*Software Defined Radio - SDR*) (TEIXEIRA, 2016).

Os SDRs são uma tecnologia em que determinadas funções de transmissão e de recepção, que antes eram implementadas somente em *hardware*, passam a ser implementadas em *software* (GURJÃO, 2013), permitindo que diversas aplicações possam ser executadas em um único tipo de dispositivo.

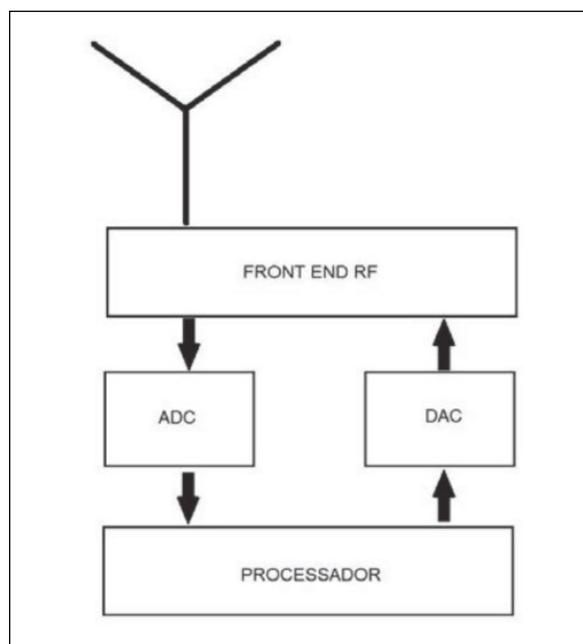
Essa tecnologia possui uma arquitetura geral simples, conforme mostrado na Figura 6, composta por uma antena, o *front-end* de Rádio Frequência (RF) – que é um dispositivo próprio para esse fim – os conversores analógico-digital (ADC, *Analog-to-Digital Conversor*) e digital-analógico (DAC, *Digital-to-Analog Conversor*), e um ambiente de processamento que pode ser um computador ou, por exemplo, um FPGA (*Field Programmable Gate Array*) (BIMBI JUNIOR; OLIVEIRA; BEDICKS JUNIOR, 2015).

Existem diferentes dispositivos para proporcionar a implementação de SDRs, que vão desde equipamentos simples para uso pessoal, como o RTL-SDR (um dispositivo que emprega o circuito integrado RTL2832U da Realtek), até dispositivos robustos voltados para o uso comercial, como é o caso do USRP (*Universal Software Radio Peripheral*).

No que diz respeito à parte de *software* do rádio, este trabalho usou como plataforma o GNU Radio, que é um *framework* de desenvolvimento para SDR aberto, que trabalha com o conceito de blocos de processamento. Cada bloco de processamento

implementado por padrão é uma funcionalidade que anteriormente era implementada a nível de *hardware* em dispositivos específicos, como modulação, filtros, entre outros (BIMBI JUNIOR; OLIVEIRA; BEDICKS JUNIOR, 2015).

Figura 6 – Arquitetura geral de um SDR



Fonte: adaptado de Bimbi Júnior, Oliveira e Bedicks Junior (2015).

Esse *framework* permite a comunicação com dispositivos *front-end* RF para a realização da transmissão e recepção de sinais reais (GURJÃO, 2013). Por exemplo, usando o pacote *gr-osmosdr*, é possível ter um bloco de processamento do RTL-SDR dentro do GNU Radio.

Além de poder utilizar os blocos de processamento existentes, o GNU Radio permite o desenvolvimento de novos blocos nas linguagens Python ou C++. No entanto, internamente, o processamento é realizado utilizando C++, com a linguagem Python aplicada à comunicação entre os blocos de processamento (BIMBI JUNIOR; OLIVEIRA; BEDICKS JUNIOR, 2015). A integração das linguagens Python e C++ é realizada por meio do SWIG (*Simplified Wrapper and Interface Generator*).

O GNU Radio também oferece uma interface de programação interativa baseada em blocos gráficos, denominado *GNU Radio Companion* (GRC) (GURJÃO, 2013), que permite ao usuário a criação de aplicações de comunicação de forma rápida e fácil.

4 Implementação do sensoriamento espectral usando SDR

Neste trabalho é proposta a implementação de um Sistema de Sensoriamento Espectral Cooperativo Centralizado (SSECC) com a utilização de equipamentos de baixo custo. Foi usado o RTL-SDR como *front-end* de RF (Radiofrequência), para captura das amostras no espectro, e a placa Raspberry Pi, para análise e processamento das amostras adquiridas por meio do *framework* GNU Radio.

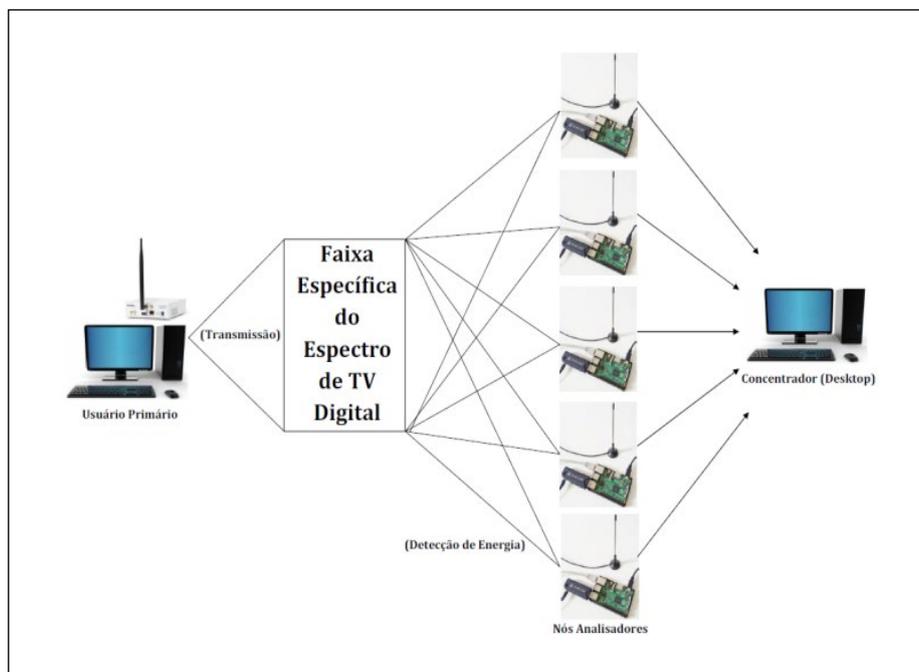
O Raspberry Pi é uma plataforma de desenvolvimento que possui a dimensão de aproximadamente um cartão de crédito, em que todo o *hardware* é integrado em uma única placa, podendo ser conectado a um monitor ou TV e a periféricos como *mouse* e teclado e ser utilizado como um computador *desktop* convencional. Esse equipamento foi desenvolvido no Reino Unido pela Fundação Raspberry Pi (THE RASPBERRY FOUNDATION, 2017) e tem como principal objetivo o desenvolvimento da ciência

da computação em escolas. Por sua característica simples e objetiva, porém, tem sido amplamente explorado em aplicações comerciais, por exemplo, sistemas de monitoramento, detectores de presença, captação de sinais em estações climáticas, entre outros (LUDWIG, 2015).

O cenário abordado neste trabalho é composto por cinco RTL-SDR e cinco Raspberry Pi, que, em conjunto, compõem um nó analisador do espectro, e dois computadores pessoais, em que um é utilizado como concentrador das informações dos nós e o outro como UP, em conjunto a um USRP, para a transmissão do sinal.

Cada um dos cinco nós analisa uma faixa do espectro e, por meio da técnica de detecção de energia, determina se o canal está livre ou ocupado. Após isso, as decisões dos nós são passadas para o concentrador, em que todas as decisões são analisadas e as oportunidades de transmissão são determinadas. Na Figura 7 é ilustrado o cenário trabalhado.

Figura 7 – Ilustração do cenário que compõe o SSECC



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Usuário Primário (UP) implementado neste trabalho gera amostras de números aleatórios de intervalo $[min, max]$, sendo, na implementação realizada, gerados valores de 0 e 1. Em seguida, as

amostras são moduladas em BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), que realiza a modulação binária em fase, ou seja, o *bit* 0 é transmitido em uma fase, e o *bit* 1 é transmitido a 180 graus desse. Essa modulação foi

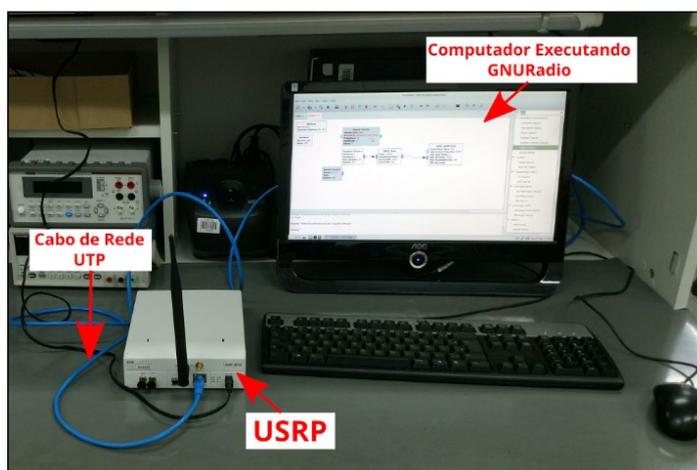
escolhida pela simplicidade apresentada, tendo em vista que o detector de energia não diferencia o tipo de modulação utilizada.

Após a modulação, uma constante é multiplicada pelo sinal resultante, para realizar uma variação no valor de amplitude do sinal. Por fim, o sinal é transmitido por meio do USRP. A estrutura física do transmissor pode ser observada na Figura 8, na qual aparecem o computador executando o GNU Radio e o USRP N210 ligado ao computador por meio de um cabo de rede UTP.

A frequência utilizada para a transmissão foi escolhida a partir do plano de atribuição de canais digitais da Anatel (AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, 2017). Foi escolhido o canal 40, com frequência central de 629 MHz – tendo em vista que esse canal se encontra vago na cidade de Campina Grande, onde o experimento foi realizado –, e foi utilizada uma largura de banda de 6 MHz referente à banda de TV.

Cada um dos nós analisadores é construído pela integração de um Raspberry Pi, usando como interface aérea um RTL-SDR, como ilustrado na Figura 9.

Figura 8 – Estrutura física do transmissor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Estrutura física do nó analisador



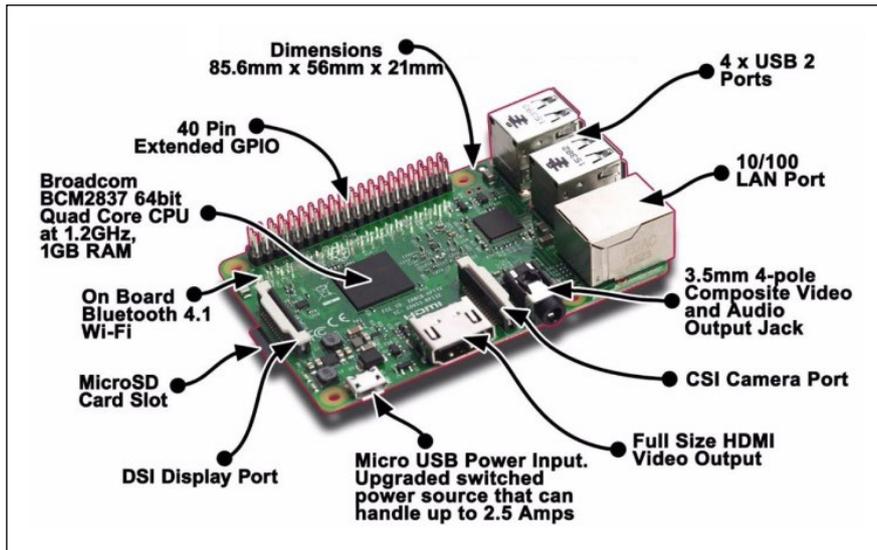
Fonte: Elaborada pelo autor

Neste trabalho, foi utilizado o Raspberry Pi 3 Model B, cuja configuração pode ser observada na Figura 10. Esse dispositivo não apresenta memória não volátil integrada, mas apresenta uma entrada que permite a utilização de cartão de memória SD (SanDisk).

Nesse dispositivo foi instalada a versão mais atualizada do GNU Radio, rodando sobre a distribuição

Ubuntu MATE, na versão 16.04.2, otimizado para rodar no Raspberry Pi e disponível no site do seu fabricante. Para utilizar o RTL-SDR junto ao GNU Radio, um pacote específico deve ser instalado, denominado de *gr-osmosdr*, que proporciona a utilização do RTL-SDR no GNU Radio, mas também de outros dispositivos como o HackRF, o bladeRF, entre outros (OSMOCOM, 2017).

Figura 10 – Configurações do Raspberry Pi usado na construção dos nós analisadores



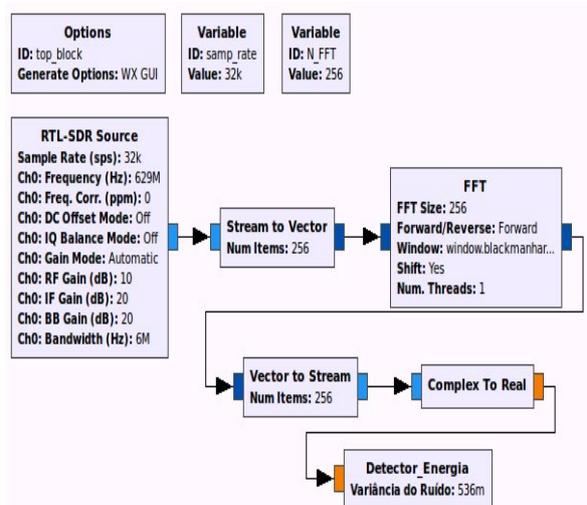
Fonte: The Raspberry Foundation (2017).

Para a implementação da técnica de sensoriamento baseada em detecção de energia, foi usado o utilitário denominado *gr_modtool*, que auxilia a criação de blocos de processamento. Entre as opções disponíveis no *gr_modtool*, foram utilizadas as opções *newmod* e *add* que, respectivamente, proporcionam a criação de um novo módulo além dos existentes no GNU Radio e a adição de um bloco ao módulo criado.

Nos nós receptores, o sinal é adquirido pelo RTL-SDR e passado para o bloco RTL-SDR *Source* do GNU Radio, que está sintonizado na mesma frequência e largura de banda do transmissor (629 MHz e 6 MHz, respectivamente). Após isso, o *stream* captado é convertido em vetores com o tamanho do número de itens da FFT (N), sendo calculada a FFT desses vetores. O N foi escolhido em conformidade ao experimento realizado por Chichón (2016). Ao término do cálculo da FFT, os vetores são novamente convertidos em *stream*, que é convertido de complexo para real, e, por fim, enviado para o bloco Detector de Energia. A variância do ruído e outros aspectos relacionados ao

detector de energia são abordados a seguir. Na Figura 11 é ilustrado o diagrama de blocos do GNU Radio utilizado nos receptores.

Figura 11 – Diagrama de blocos do GNU Radio que compõem os receptores



Fonte: Elaborada pelo autor.

A abordagem de sensoriamento adotada é conhecida como detector de energia. O limiar de decisão do detector de energia depende da variância do ruído (σ^2), que, neste trabalho, foi calculada para o ruído presente no ambiente, ou seja, o espectro foi analisado com o transmissor do UP desligado. Além da variância do ruído, o limiar é função da probabilidade de falso alarme (P_{fa}) e do número de amostras adquiridas para a análise por FFT. A probabilidade de falso alarme foi determinada a partir do padrão do IEEE 802.22 (CICHÓN, 2016), que determina que a probabilidade de falso alarme não deve passar de 0,1 ou 10%, para um bom aproveitamento das oportunidades de transmissão. Por fim, foi adotado um número de 1000 amostras para o detector de energia, em conformidade ao experimento realizado por Cichón (2016).

No experimento, foram considerados até cinco nós analisadores, monitorando a mesma faixa espectral, cujas leituras são avaliadas por um ponto concentrador de informações.

O código do concentrador foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python, e a análise das informações dos nós foi realizada a partir do conceito de votação, em que o concentrador determina que o canal se encontra ocupado se de nós determinarem o canal como ocupado. A regra de votação utilizada neste trabalho foi a relação lógica OU, em que, se pelo menos um dos nós detectar a presença do UP ($P_{d,k}$), o concentrador determina que o canal está ocupado. Essa abordagem foi escolhida pois apresenta melhor desempenho na utilização do detector de energia (AKYILDIZ; LO; BALAKRISHNAN, 2011). O cálculo da probabilidade de detecção da regra OU em relação aos nós cooperadores é realizado a partir da Equação (2) (CHAVES, 2012).

$$Q_d = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - P_{d,k}) \quad (2)$$

5 Resultados e discussões

Os experimentos foram organizados a partir da variação do número de nós que realizam o monitoramento (de 1 a 5 nós), em relação a diferentes valores de SNRs (variando entre -20 a 0 dB), em intervalos de cinco em cinco decibéis.

Foram realizadas 700 rodadas de medição para cada quantidade de nós de sensoriamento, em relação

às diferentes SNRs, ou seja, foram realizadas 700 rodadas de medição com um nó monitorando para uma SNR de 0 dB, depois em -5 dB, e assim por diante, até a aplicação dos cinco nós para uma SNR de -20dB. A rodada de medição diz respeito ao momento em que o nó começa a monitorar o ambiente até a decisão ser tomada e armazenada em um arquivo. Após o fim das simulações, os arquivos gerados pelos nós sensores são reunidos no concentrador para a análise dos dados e geração dos resultados. Durante os experimentos, os nós sensores foram posicionados a uma distância de aproximadamente 2,3 metros do UP.

Na configuração do Usuário Primário (UP) para essa simulação, considerou-se que o UP transmite com a modulação BPSK, seguindo uma abordagem de taxa de falso alarme constante (*Constant False Alarm Rate*, CFAR), com probabilidade de falso alarme de 0,1.

Na Figura 12 são ilustrados os resultados obtidos para a variação do número de nós utilizados e para a variação dos valores de SNR. Foram utilizados cinco valores de SNR, iniciando em -20 dB a 0 dB. Como é possível observar no gráfico, a probabilidade de detecção tende a crescer à medida que o número de nós cooperadores aumenta. A probabilidade de detecção com cinco nós cooperando manteve-se próxima ao valor de 100%, o que é satisfatório, tendo em vista a baixa potência do sinal do UP nessas condições.

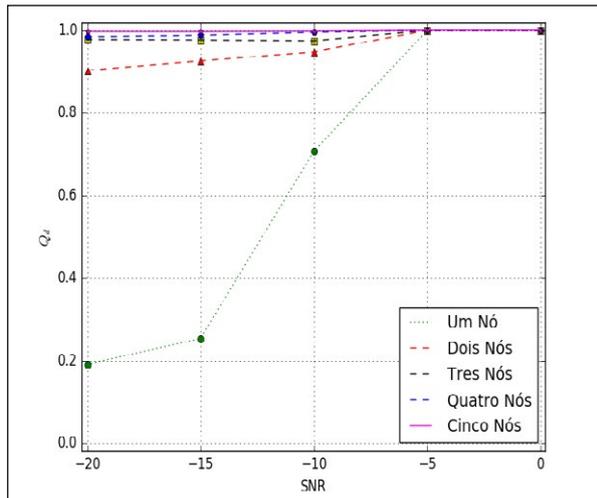
Na Tabela 1 são ilustrados os dados específicos contidos no gráfico da Figura 12. A partir dela é possível notar a pequena queda da probabilidade de detecção em relação à diminuição dos valores de SNR. Quanto aos resultados obtidos nesses experimentos, para a probabilidade de falso alarme adotada, as probabilidades de detecção resultante se mantiveram dentro do que o padrão do IEEE 802.22 estabelece, ou seja, uma probabilidade de detecção de 0,9.

Tabela 1 – Especificação dos dados no gráfico da Figura 12

Nº de nós	SNR (dB)				
	-20	-15	-10	-5	0
1	0,191	0,254	0,707	1	1
2	0,902	0,926	0,947	1	1
3	0,977	0,976	0,974	1	1
4	0,984	0,987	0,995	1	1
5	0,997	0,996	0,997	1	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Gráfico da probabilidade de detecção, em função da relação sinal-ruído (SNR) para o teste de 1 a 5 nós



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 Considerações finais

Este trabalho apresenta uma arquitetura para uma rede de sensoriamento espectral, utilizando rádio definido por *software*.

Foram descritas as premissas da arquitetura proposta, detalhando-se cada parte, com destaque para o uso do RTL como interface aérea, integrado ao Raspberry Pi, o que exime a necessidade de usar um computador para cada nó sensor, pela necessidade de ter o *software* implementado em GNU Radio, barateando, assim, a solução proposta para o problema.

A arquitetura é validada, considerando um cenário no qual um único usuário primário fixo é mantido transmitindo, e a rede de sensoriamento possui uma configuração com até cinco nós sensores, todos monitorando simultaneamente o mesmo canal. Foi usada como métrica de desempenho a probabilidade de detecção, a partir da qual se pode verificar que a arquitetura proposta no trabalho funciona com desempenho similar ao apresentado em outras arquiteturas cujos resultados de avaliação estão dispostos na literatura citada.

A arquitetura de rede de sensoriamento proposta neste trabalho pode servir de base para outras configurações, alterando-se a interface ou o esquema de sensoriamento, podendo-se integrar, inclusive, em outras configurações de usuário primário, por exemplo, redes IoT ou Wi-Fi.

REFERÊNCIAS

- ANATEL. Agência Nacional de Telecomunicações. **Plano Básico de Canais de TV Digital (PBTVD)**. 2017. Disponível em: <<https://goo.gl/pA1pFz>>. Acesso em: dez. 2017.
- AKYILDIZ, I. F.; LO, B. F.; BALAKRISHNAN, R. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey. **Physical Communication**, v. 4, n. 1, p. 40-62, 2011.
- ALMEIDA, E. P. L. **Desenvolvimento de técnica de sensoriamento do espectro embasada em detecção de energia para aplicações em sistemas rádio cognitivos**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- BIMBI JUNIOR, S.; OLIVEIRA, V. C.; BEDICKS JUNIOR, G. Rádios definidos por software com aplicações GNU radio. **Revista de Radiodifusão**, v. 9, n. 10, p. 13-20, 2015.
- CHAVES, D. S. **Análise do sensoriamento espectral por detecção de energia**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- CICHÓN, K. **Reliable and energy-efficient spectrum sensing in cognitive radio systems**. 2016, 146 f. Tese (*Doctor of Philosophy*) – Poznan University of Technology, Poznan, Poland, 2016.
- FELISBINO, A. **Sensoriamento espectral em redes de rádio cognitivo**. 2015. 76 f. Monografia (Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- GOMES, R. D. *et al.* Desafios de redes de sensores sem fio industriais. **Revista de Tecnologia da Informação e Codificação**, v. 4, n. 1, p. 1-12, jul. 2014.
- GURJÃO, E. C. Introdução ao GNU Radio. **Revista de Tecnologia da Informação e Codificação**, v. 3, n. 1, p. 1-5, 2013.
- LUDWIG, R. **HouseManager: comunicação sem fio de baixo custo para sistema da automação residencial**. 2015. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Redes de Computadores) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, 2015.

MENDES, A.; SOUZA, R. A. A. Uma análise sobre o estado da arte do sensoriamento espectral realizado pelos rádios cognitivos. In: SEMINÁRIO DE REDES E SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES, 5., 2016, Santa Rita do Sapucaí. **Anais...** Santa Rita do Sapucaí: SRST, 2016.

MITOLA, J.; MAGUIRE, G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal. **IEEE Personal Communications**, v. 6, n. 4, p. 13-18, 1999.

OSMOCOM. **Osmocom GNU radio blocks**, 2017. Disponível em: <<https://osmocom.org/projects/sdr/wiki/GrOsmoSDR>>. Acesso em: jul. 2017.

PINHEIRO, G. P. Uma perspectiva neoconstitucional da regulação do espectro radioelétrico. **Revista Direitos Humanos e Democracia**, v. 1, n. 2, p. 182-2010, jul./dez., 2013.

ROCHA, J. S. **Algoritmos de sensoriamento espectral para acesso a canais cognitivos**. 2013. 86 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SILVA, M. M. **Avaliação de algoritmos de detecção de espaços espectrais brancos para aplicações de rádio cognitivo**. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

TEIXEIRA, P. M. M. **Radio source localisation using software defined radio**. 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores)–Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

THE RASPBERRY FOUNDATION. **About us**. 2017. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/about/>>. Acesso em: abr. 2017.

YUCEK, T.; ARSLAN, H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 11, n. 1, p. 116-130, 2009.