

Dissertação de Mestrado



Rádio Cognitivo Embarcado para Internet das Coisas

Daniel Mazzer

Fevereiro/ 2016

Daniel Mazzer

Rádio Cognitivo Embarcado para Internet das Coisas

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
Laboratório WOCA - Wireless and Optical Convergent Access

Santa Rita do Sapucaí-MG - Brasil
2016

Mazzer, Daniel
M477r
Rádio Cognitivo Embarcado para Internet das Coisas. Daniel
Mazzer. – Santa Rita do Sapucaí, 2016.
160 p.

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior.
Dissertação de Mestrado – Engenharia de Telecomunicações –
Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia.

1. Internet das coisas 2. Internet do futuro 3. Nova Genesis 4.
Rádio definido por software. 5. Sensoriamento Espectral 6. Engenharia de
Telecomunicações. I. Sodré Junior, Arismar Cerqueira. II. Instituto Nacional de
Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

Daniel Mazzer

Rádio Cognitivo Embarcado para Internet das Coisas

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

Trabalho aprovado em ____/____/____ pela comissão julgadora:

**Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré
Júnior**
Orientador - Inatel

Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti
Inatel

Prof. Dr. Kleber Zuza Nobrega
Instituto Federal do Maranhão - IFMA

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito
Coordenador do Curso de Mestrado

Santa Rita do Sapucaí-MG - Brasil
2016

Agradecimentos

Deixo aqui registrado o agradecimento às pessoas que contribuíram com apoio, incentivo e orientação para que a conclusão deste trabalho se tornasse uma realidade.

À minha família, em especial aos meus pais, agradeço ao incentivo, à orientação constante sobre valores da vida e ao carinho que sempre, mesmo quando distante, levo comigo.

À minha esposa Carolina pelo apoio, incentivo e, também, pela paciência durante o tempo que dediquei para a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior pela valiosa orientação concedida e pela confiança depositada no meu trabalho.

Aos professores Dr. Antônio Marcos Alberti, Dr. Carlos Alberto Ynoguti, Dr. Carlos Nazareth Motta Marins, Dr. Luciano Leonel Mendes, Dr. José Antônio Justino Ribeiro, Dr. José Marcos Câmara Brito e Dr. Rausley A. A. de Souza pelo tempo dedicado aos ensinamentos fundamentais para minha formação como pesquisador e pelo constante voto de confiança.

Aos colegas do Laboratório de Hardware e Software Embarcado e ao gerente Marcelo, suas valiosas orientações me colocaram no caminho ideal para conduzir este trabalho.

Ao Inatel e seus funcionários, em especial à Gisele Moreira dos Santos, que me ajudou de forma incondicional no decorrer do cursos, nas matrículas e inúmeros requerimentos.

Aos companheiros do laboratório WOCA, pela ótima convivência, orientação e, claro, pelos momentos de descontração. Em especial para a Marília Martins Bontempo pela parceria e contribuição em diversos trabalhos, sem pesar esforços.

Resumo

Pesquisas indicam um crescimento sem precedentes no volume de dispositivos eletrônicos fazendo uso de comunicação sem fio para os próximos anos. Com estimativas de dezenas de bilhões de dispositivos compartilhando o espectro de rádio frequência, o uso eficiente do espectro se torna uma necessidade e ao mesmo tempo um problema desafiador a ser resolvido. O rádio cognitivo representa uma solução potencial para o compartilhamento do espectro eletromagnético, por meio da alocação de canais de usuários primários à aqueles secundários, ou seja, não licenciados. Este trabalho apresenta a concepção e implementação de uma plataforma de rádio cognitivo embarcado, de baixo custo, aplicado à Internet das Coisas, chamada CogRIoT (*Cognitive Radio for Internet of Things*). A plataforma foi desenvolvida para operar de forma distribuída, em canais licenciados ou não licenciados e associa técnicas de sensoriamento espectral, plataformas embarcadas, Internet do futuro e tecnologias de rádio definido por *software*. Testes de desempenho foram conduzidos fazendo uso de dispositivos no contexto de Internet das Coisas, mostrando o benefício da associação de dois temas importantes no âmbito das telecomunicações.

Palavras-chave: Internet das coisas, Internet do futuro, NovaGenesis, plataformas embarcadas, rádio cognitivo, rádio definido por software e sensoriamento espectral.

Abstract

Studies from researching companies estimates an unprecedented growth in the amount of electronic devices communicating wirelessly. With tens of billions of devices sharing the radio frequency spectrum the efficient use of the spectrum becomes an important concern. Cognitive radio has been proposed as a solution for a more efficient radio frequency spectrum allocation where primary user channels are allocated by unlicensed secondary users. This work was carried out the design and implementation of CogRIoT, a low-cost embedded cognitive radio platform applied to Internet of Things. The platform was designed to operate in a distributed architecture and may be applied over licensed or unlicensed channels. Also, this work associates spectral sensing techniques, embedded platforms, future Internet and software defined radio architecture. Performance evaluation were conducted making use of Internet of Things devices, showing the benefit of the combination of two major topics in telecommunications.

Keywords: cognitive radio, embedded platforms, future Internet, Internet of Things, NovaGenesis, software defined radio and spectrum sensing.

Lista de Publicações

- ① R. M. Borges ; D. Mazzer ; T. R. R. Marins ; Arismar Cerqueira S. Jr. ; **Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter.** Optical Engineering, 55(3), p. 031118, 2016. doi:10.1117/1.OE.55.3.031118. Aceito para publicação em 29 de outubro 2015.
- ② D. Mazzer ; M. M. Bontempo ; Arismar Cerqueira S. Jr. ; **Low-Cost Embedded Cooperative Cognitive Radio for Internet of Things.** In: IEEE Iberchip, 2016, Florianópolis. Proceedings of Iberchip 2016, 2016. Aceito para publicação em 05 de janeiro de 2016.
- ③ J. C. Silva ; F. Andery ; D. Mazzer ; E. P. Frigieri ; Arismar Cerqueira S. Jr. ; L. D. P. Mendes ; **Factorial Design Analysis Applied to the Performance of Transmission Power Optimization Techniques for Wireless Sensor Networks.** IEEE Iberchip, 2016, Florianópolis. Proceedings of Iberchip 2016, 2016. Aceito para publicação em 05 de janeiro de 2016.
- ④ D. Mazzer ; M. M. Bontempo ; A. M. Alberti ; Arismar Cerqueira S. Jr.; **Low-cost Software-defined Wireless Cognitive Network based on Real-time Multi-Sector Spectrum Sensing and Reconfigurable Antenna Array.** Microwave and Optical Technology Letters (Print), 2016. Aceito para publicação em 04 de abril de 2016.
- ⑤ A. M. Alberti ; D. Mazzer ; M. M. Bontempo ; Lucio H. de Oliveira ; Arismar Cerqueira S. Jr. ; **Convergent Solution of Future Internet and Cognitive Radio in the Context of Internet of Things.** Computers & Electrical Engineering, Elsevier.
Em processo de revisão desde 25 de fevereiro de 2016.

Listas de Figuras

Figura 1 – Estimativa de crescimento de dispositivos para IoT	20
Figura 2 – Previsão de crescimento de dispositivos para diferentes tecnologias de acesso	21
Figura 3 – Topologia de rede <i>mesh</i>	23
Figura 4 – Oportunidades de uso do espectro por um rádio cognitivo. . . .	28
Figura 5 – Ciclo de atividades de um rádio cognitivo.	29
Figura 6 – Função densidade de probabilidade da variável de decisão T . .	31
Figura 7 – Arquitetura para <i>Software Defined Radio</i>	36
Figura 8 – Exemplo de um demodulador FM implementado no GNU Radio.	38
Figura 9 – Topologia de redes de sensores sem fio	39
Figura 10 – Hardware brasileiro <i>open source</i> para IoT : momote 001. . . .	40
Figura 11 – Transformação de dados em sabedoria.	44
Figura 12 – Componentes da plataforma CogRIoT	45
Figura 13 – Composição de <i>hardware</i> da <i>SC</i> : placa de processamento, receptor de RF e antena.	46
Figura 14 – Diagrama em blocos da <i>Sensing Cell</i>	47
Figura 15 – Demonstrativo do problema do terminal oculto, ou <i>hidden node</i> .	48
Figura 16 – Diagrama em blocos do <i>Sensing Cell Controller</i>	49
Figura 17 – Interface gráfica do bloco <i>Sensing Cell Controller</i>	51
Figura 18 – Divisão do espectro em BW compatíveis com a do <i>hardware</i> da <i>SC</i>	52
Figura 19 – Diagrama em blocos do <i>Sensing Information Storage and Analysis</i> .	54
Figura 20 – Aplicação do CogRIoT em um ambiente com múltiplos <i>FCs</i> .	58
Figura 21 – Relação dos blocos CogRIoT na sabedoria sobre o canal. . . .	60
Figura 22 – (a) Fotografia do arranjo de antenas reconfigurável construído; (b) Diagrama em blocos da chave de RF.	63
Figura 23 – (a) Modelo computacional e (b) diagrama de irradiação do arranjo de antenas reconfigurável ECRAA, quando apenas um elemento é excitado.	63

Figura 24 – Montagem do sistema RT-MSESS e todos seus componentes.	64
Figura 25 – Diagrama em blocos do sistema RT-MSESS.	65
Figura 26 – Diagrama em blocos da aplicação de processamento digital de sinal que desempenha a detecção de energia.	66
Figura 27 – Resultado experimental da curva ROC para o detector de energia.	66
Figura 28 – Cenário de testes montado para avaliação do sistema RT-MSESS.	67
Figura 29 – Canais Wi-Fi, evidenciando os canais 1 e 9, e ilustração de uma fatia do espectro observada pelo algoritmo de sensoriamento espectral.	68
Figura 30 – Resultado da variável estatística de decisão T' . (a) Antena de referência monopolo; (b), (c) e (d) Elementos 1, 2 e 3 do arranjo de antenas reconfigurável, respectivamente.	69
Figura 31 – Resultado da decisão final de alocação do canal. (a) Antena de referência monopolo; (b), (c) e (d) Elementos 1, 2 e 3 do arranjo de antenas reconfigurável, respectivamente.	70
Figura 32 – Kit de desenvolvimento utilizado como rádio de comunicação no experimento.	72
Figura 33 – Ambiente de comunicação sem fio mostrando blocos CogRIoT, rádios M_1 e M_2 e usuário interferente M_{int}	74
Figura 34 – Diferentes curvas de PER. Curvas em 921MHz obtidas em canal com interferência. Curva em 924MHz obtida em canal sem interferência fazendo uso da informação de sensoriamento da plataforma CogRIoT.	75
Figura 35 – Sensoriamento Espectral com rádios em 921 MHz.	76
Figura 36 – Sensoriamento Espectral com rádios em 924 MHz.	76
Figura 37 – Integração entre CogRIoT e o serviço NovaGenesis SSS.	79
Figura 38 – Fotografia dos monitores durante a integração: (a) CogRIoT SCC e (b) NovaGenesis SSS.	82
Figura 39 – Esquema implementado no GNU Radio do transmissor gerador de interferência (controle de probabilidade de transmissão omitido da figura).	104

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Descrição do Problema	23
1.3	Abordagem e Escopo da Pesquisa	24
1.4	Principais Contribuições da Dissertação	25
1.5	Estrutura da Dissertação	26
2	TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO	27
2.1	Rádio Cognitivo	27
2.1.1	Sensoriamento Espectral	29
2.1.2	Sensoriamento Espectral Utilizando Detecção de Energia	32
2.1.3	Sensoriamento Espectral Cooperativo	33
2.2	Rádio Definido por Software – SDR	35
2.2.1	Componentes Básicos de um SDR	36
2.2.2	GNU Radio	37
2.3	Dispositivos para Internet das Coisas	38
2.4	Internet do Futuro – NovaGenesis	40
3	COGRIOT – RÁDIO COGNITIVO EMBARCADO PARA INTERNET DAS COISAS	43
3.1	Introdução	43
3.2	Associando Rádio Cognitivo e Internet das Coisas	44
3.3	<i>Sensing Cell – SC</i>	45
3.3.1	Detalhamento do <i>Hardware</i>	46
3.3.2	Detalhamento do <i>Software</i>	47
3.4	<i>Sensing Cell Controller – SCC</i>	48
3.4.1	Processamento Digital de Sinais – Sensoriamento Espectral	49
3.4.2	Detalhamento do <i>Software</i> de Controle	50
3.4.3	Transmissão das Informações	52
3.5	<i>Sensing Information Storage and Analysis – SISA</i>	53
3.5.1	Detalhamento do <i>Software</i> de Armazenamento	54
3.5.2	Detalhamento do <i>Software</i> de Análise	55
3.5.3	Divulgação de Conhecimento Sobre o Meio	56
3.6	<i>Fusion Center – FC</i>	57

3.6.1	Detalhamento do <i>Software</i> de Análise e Armazenamento	57
3.6.2	Alocação Dinâmica de Recursos	58
3.7	Integração dos Blocos CogRIoT	59
4	IMPLEMENTAÇÕES E RESULTADOS	61
4.1	RT-MSESS – <i>Real-Time Multi-Sector Embedded Spectrum Sensing</i>	61
4.1.1	Arranjo de Antenas Reconfigurável	62
4.1.2	Detalhamento do Hardware	64
4.1.3	Algoritmo de Sensoriamento Espectral	65
4.1.4	Avaliação do Sistema RT-MSESS	67
4.1.5	Resultados do Sistema RT-MSESS	68
4.2	Sensoriamento Espectral Cooperativo para IoT	71
4.2.1	Concepção do Experimento	72
4.2.2	Conclusões	76
4.3	Integração de Sistema de Rádio Cognitivo na NovaGenesis	76
4.3.1	Serviços NovaGenesis de Sensoriamento Espectral	77
4.3.2	Integração da Plataforma CogRIoT ao Serviço NovaGenesis Spectrum Sensing Service	78
4.3.2.1	Comando “get_info”	79
4.3.2.2	Comando “set_config”	80
4.3.2.3	Dados de Sensoriamento Espectral	81
4.3.3	Conclusões	82
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS		87
APÊNDICES		95
APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE DA PLATAFORMA COGRIOT		97
A.1	Licença de Uso do Código Fonte	98
APÊNDICE B – ARQUIVOS DE CONFIGURAÇÃO		99
B.1	Arquivo de Configuração do Bloco SCC	100
B.2	Arquivo de Configuração do Bloco SISA	101

B.3	Arquivo de Configuração do Bloco <i>FC</i>	101
APÊNDICE C – SIMULADOR DE USO DO CANAL DE RF		103
C.1	Código fonte do Simulador de Uso do Canal	104
APÊNDICE D – PUBLICAÇÕES		109

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

A crescente miniaturização dos componentes eletrônicos e evolução das tecnologias de comunicação sem fio tem viabilizado o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos conectados à Internet para aplicações diversas. O termo Internet das Coisas ou IoT (*Internet of Things*) vem sendo utilizado para caracterizar esta classe de novos produtos, que em sua maioria são compostos por dispositivos desempenhando funcionalidades de sensores e/ou atuadores, comunicando-se em redes com ou sem fio [1]. Diversos segmentos da indústria vêm cada vez mais utilizando redes de sensores sem fio (WSN – *Wireless Sensor Networks*) e dispositivos de comunicação máquina-máquina (M2M – *Machine to Machine*), mudando a forma como negócios e processos são gerenciados e otimizados. Sistemas formados por diversos sensores conectados em rede, coletando e fornecendo dados, disponibilizam uma nova e imensa quantidade de informações permitindo às empresas a observarem por uma nova perspectiva os seus produtos e processos. Estima-se que, atualmente, 25 bilhões de dispositivos estejam conectados à Internet e que cerca de 50 bilhões de dispositivos conectados estarão presentes no ambiente industrial e no “dia a dia” da população em 2020. A Figura 1 ilustra este crescimento, o qual equivale a uma estimativa de quase 7 dispositivos por pessoa no planeta [2]. Dados de pesquisa também revelam que os PCs (*Personal Computers*) representarão menos de 50% do tráfego IP (*Internet Protocol*) mundial a partir de 2019 [3]. Esta significativa quantidade de dispositivos conectados vem chamando a atenção da academia, indústria e entidades regulamentadoras.

Os dispositivos M2M são muitas vezes empregados em produtos comerciais de aplicações diversas como medidores de gás e água, iluminação pública, rastrea-

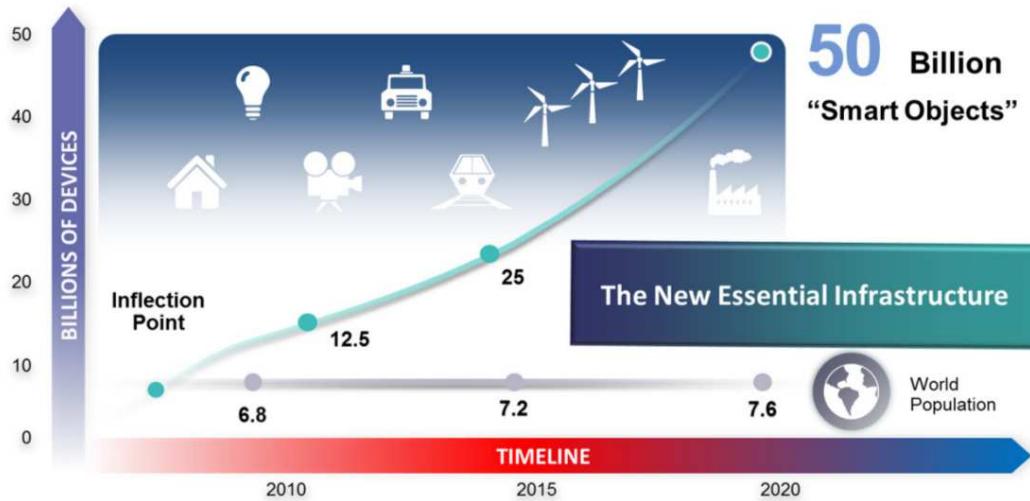


Figura 1 – Estimativa de crescimento de dispositivos para IoT (retirado de [4]).

mento de ativos ou animais, entre outros [5]. Os dispositivos M2M comunicam-se diretamente com seus servidores em nuvem (*cloud*) e, tipicamente, não têm conhecimento de outros dispositivos ou redes. Por outro lado, os dispositivos IoT podem fazer uso de informações de outros dispositivo IoT ou outras redes para tomar uma decisão. Como exemplo, um dispositivo M2M pode ser empregado em uma máquina de venda automática (*vending machine*) para comunicar a central de distribuição que um produto está em falta ou que a máquina precisa de manutenção. Em outro exemplo, um automóvel equipado com um dispositivo IoT pode identificar condições de uma rodovia coletando informações de outros automóveis, GPS, semáforos e outros sensores, com o intuito de identificar uma melhor rota de navegação.

Atualmente, muitos destes dispositivos M2M fazem uso das redes de telefonia celular para tráfego de informações, mas pesquisas recentes estão apontando para uma mudança na maneira de conexão destes dispositivos, como observado na Figura 2. Estima-se que novos produtos evoluirão para utilizar transceptores de baixo consumo de energia e alta cobertura geográfica (LPWA – *Low Power Wide Area*), alcançada por meio do uso de banda de comunicação sem fio ultra-estreita. Este crescimento aponta para o uso de redes privadas, formadas pela conexão de centenas ou milhares de dispositivos acessando a Internet através de um *gateway* [6]. A representatividade de conexões LPWA para todo segmento M2M irá crescer de menos de um milhão de dispositivos em 2014 para 933 milhões de conexões em 2019 [7, 8].

Diferente dos dispositivos M2M que utilizam conectividade com rede

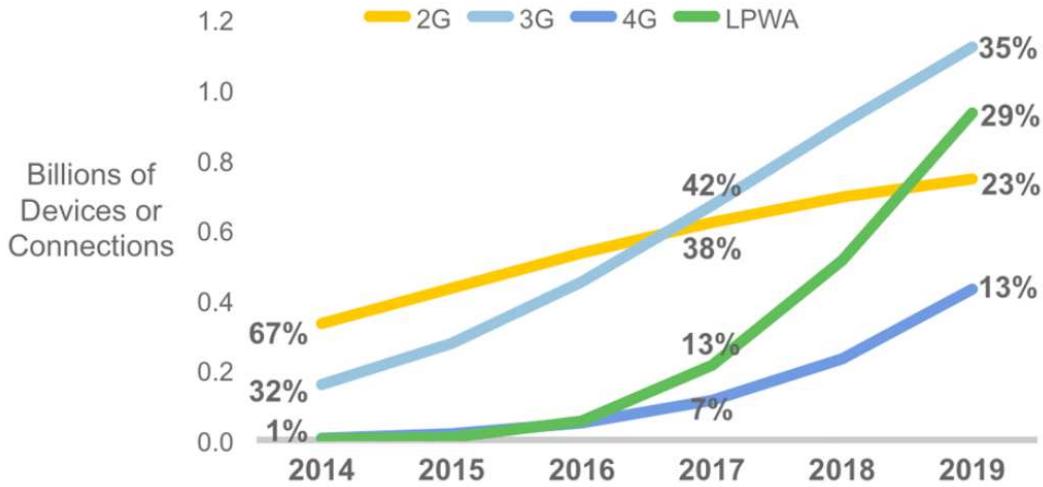


Figura 2 – Previsão de crescimento de dispositivos para diferentes tecnologias de acesso: 2G, 3G, 4G e LPWA (retirado de [7]).

celular, o acesso à Internet por dispositivos IoT sem fio é viabilizado por faixas do espectro de radiofrequência (RF) que não requerem licenciamento para utilização. É comum o uso das faixas destinadas a aplicações industriais, científicas e médicas, chamada ISM ou, no inglês, *Industrial, Scientific and Medical*. No Brasil, as faixas ISM disponíveis são regulamentadas pela Anatel [9, 10] e mostradas na Tabela 1. O uso das faixas ISM é impulsionado pela padronização mundial e também pela disponibilidade de transceptores de RF de baixíssimo custo. É comum que os dispositivos IoT possuam tamanho reduzido e, muitas vezes, o baixo consumo de energia é um requisito de projeto que não pode ser atendido por módulos de comunicação da rede de telefonia celular. Alinhados à estas necessidades, fabricantes de dispositivos e fabricantes de componentes para RF têm desenvolvido produtos para as faixas ISM de 915MHz e 2,45GHz. Nestas faixas de frequência, os componentes eletrônicos de RF, como transceptores e antenas, possuem dimensões reduzidas e demandam baixo consumo de energia.

Observando os números expressivos das estimativas apresentadas nas pesquisas citadas, torna-se necessário empenhar um controle de acesso ao espectro de RF ainda mais eficiente. Com diferentes dispositivos acessando o mesmo meio, muitas vezes utilizando características de acesso bastante distintas, é usual que camadas de aplicação provisionem técnicas de controle de acesso (MAC – *Medium Access Control*) que maximizem o sucesso da transmissão. Observando o meio como um ambiente não-cooperativo, os dispositivos que possuírem algoritmos de MAC mais eficientes tendem a estabelecer uma comunicação menos suscetível a falhas [11–14]. Entretanto, um algoritmo MAC com conhecimento adicional sobre

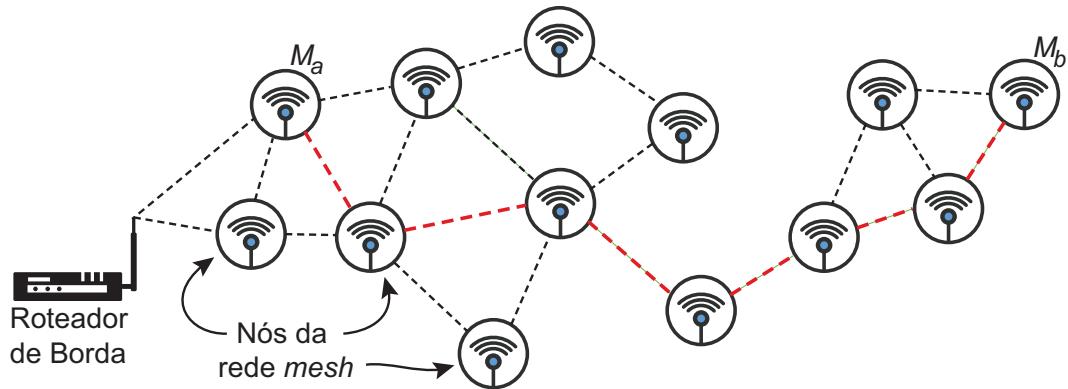
o meio poderá oferecer um desempenho ainda melhor.

Tabela 1 – Faixas para uso ISM no Brasil.

Faixa de Frequência	Frequência Central	Largura de Banda
6765–6795 kHz	6780 kHz	30 kHz
13553–13567 kHz	13560 kHz	14 kHz
26957–27283 kHz	27120 kHz	326 kHz
40,66–40,70 MHz	40,68 MHz	40 kHz
433,05–434,79 MHz	433,92 MHz	1,74 MHz
902–928 MHz	915 MHz	26 MHz
2400–2500 MHz	2450 MHz	100 MHz
5725–5875 MHz	5800 MHz	150 MHz
24–24,25 GHz	24,125 GHz	250 MHz
61–61,5 GHz	61,25 GHz	500 MHz
122–123 GHz	122,5 GHz	1 GHz
244–246 GHz	245 GHz	2 GHz

Alguns algoritmos MAC específicos para redes IoT já estão disponíveis para algumas arquiteturas de rede. Para algumas aplicações IoT, redes do tipo *mesh* vêm sendo utilizadas com maior frequência. A adoção deste tipo de rede em aplicações para WSN é notável devido a fatores como a praticidade para integrar novos dispositivos à rede, economia de energia global do sistema, flexibilidade para cobrir grandes áreas geográficas e robustez na entrega de informações [15]. Cada dispositivo neste tipo de rede, ou simplesmente nó, pode receber e enviar mensagens, assim como ilustrado na Figura 3. O nó também pode desempenhar um papel de roteador, recebendo e entregando mensagens entre nós vizinhos. Portanto, neste tipo de rede, dois nós que estão fora do alcance de RF, M_a e M_b , podem fazer uso de nós intermediários para estabelecer uma comunicação, expandindo a área geográfica de cobertura da rede, sem necessariamente aumentar a potência de transmissão RF. Protocolos de roteamento de rede como o implementado pela pilha ZigBee [16] e o RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) [17] dão suporte nativo a este tipo de rede, entre outros.

Observando o cenário crescente de dispositivos e acessos sem fio, as atividades que geraram resultados para esta dissertação foram desenvolvidas com objetivo de associar técnicas de rádio cognitivo à redes e sistemas voltados para aplicações em IoT.

Figura 3 – Topologia de rede *mesh*.

1.2 Descrição do Problema

A ITU (*International Telecommunication Union*) [18] define padrões de alocação do espectro radioelétrico, adotados como referência pela maioria dos países. Agências nacionais de regulamentação do uso das telecomunicações, como a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) no Brasil [19] e a FCC (*Federal Communications Commission*) nos Estados Unidos da América [20], definem legislações e concessões para uso do espectro de RF dentro de seus territórios. Para o caso de uso não-licenciado nas faixas ISM, as normas da ANATEL e FCC são semelhantes, destacando-se as normas para limites de potência máxima de transmissão e tempo de uso do canal. Para uso estático, em apenas uma única frequência na faixa de 915 MHz, estipula-se que a intensidade de campo elétrico média, medida a 3 metros de distância do transmissor, não ultrapasse 50 mV/m, o que corresponde a -1,23 dBm EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*). Para algumas aplicações, este valor máximo de potência de transmissão pode caracterizar uma restrição no alcance de um enlace de rádio. É possível empregar, nesta faixa, técnicas de espalhamento espectral como DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) ou FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) [21]. A técnica FHSS permite que transmissores operem com potência máxima de 24 dBm, desde que respeitando o número de saltos, largura de banda e tempo de permanência em cada salto [22]. Este valor de potência de transmissão é permitido pois neste caso, com o uso do FHSS, a legislação observa a potência de transmissão média dentro de todo canal ISM de 915MHz. Implementações de FHSS permitem que um dispositivo explore uma porção maior do canal de RF, tornando-o mais robusto contra interferências de outros usuários. Já para a técnica DSSS, alguns transceptores de RF de baixo custo disponibilizam o recurso implementado, eliminando a necessidade de recursos computacionais de,

por exemplo, um microcontrolador. Entretanto, o acréscimo de largura de banda oferecido pelo DSSS não é grande o suficiente de modo a evitar interferência intercanal.

Estas técnicas de espalhamento espectral já estão bem estabelecidas e são utilizadas por diversas aplicações de comunicação sem fio. Por isso, atualmente, são consideradas técnicas de baixa complexidade de implementação quando aplicadas em comunicação ponto a ponto ou ponto-multiponto unidirecional (*broadcast*). Para algumas aplicações, como por exemplo as redes que conectam medidores de energia inteligentes [15], centenas ou até milhares de dispositivos poderão compor uma única rede *mesh*. Em outros casos, os dispositivos IoT alimentados por baterias permanecem dormentes em modo de baixo consumo de energia, comunicando-se esporadicamente. Nestes cenários, implementar um protocolo FHSS demandaria, entre outros fatores, que todos os nós mantivessem sincronismo de relógio entre si para permitir saltos em frequência sincronizados. Este requisito demanda alta complexidade de *hardware* e *firmware*, além de exigir alto consumo de energia, uma vez que, para uma transmissão com sucesso, os nós envolvidos em uma comunicação precisam efetuar saltos de frequência na mesma cadência. Tal acréscimo de complexidade impacta diretamente no custo do dispositivo sem fio, o que pode inviabilizar seu uso para determinados mercados. Devido a estas limitações, as aplicações IoT muitas vezes tendem a estabelecer uma rede em canal fixo de RF, caracterizando um risco de confiabilidade uma vez que não existe garantia de que o canal escolhido estará disponível a todo o tempo [23].

Associando os desafios para se estabelecer comunicação sem fio entre dispositivos para IoT às estimativas de crescimento do uso das faixas ISM, este trabalho tem como objetivo principal apresentar a concepção e o desenvolvimento de uma plataforma que otimize a comunicação entre dispositivos para IoT fazendo uso de técnicas de rádio cognitivo, rádio definido por software, sistemas distribuídos e plataformas embarcadas.

1.3 Abordagem e Escopo da Pesquisa

Esta dissertação foi proposta inicialmente como uma complementação da tese de mestrado do MSc. Egídio Raimundo Neto [24] apresentada em 2014. O foco do trabalho citado foi a implementação do sistema ACRoF (*Adaptive and Cognitive Radio over Fiber*) [25], que consiste em um sistema de rádio cognitivo e adaptativo sobre fibra. O sistema apresentado ainda dependia de equipamentos de medição para a realização do sensoriamento espectral e fazia uso de roteadores

Wi-Fi com *firmware* modificados servindo como rádios cognitivos.

Já o presente trabalho apresenta o conceito e a implementação do sistema CogRIoT, que é uma plataforma de rádio cognitivo aplicado a sistemas e redes para IoT, utilizando plataformas embarcadas de baixo custo.

A elaboração desta dissertação foi conduzida por meio de pesquisas sobre as atuais técnicas de sensoriamento espectral e alocação dinâmica de recursos. Técnicas de complexidade compatível com a possibilidade de implementação em dispositivos embarcados foram avaliadas, viabilizando a construção de uma plataforma de sensoriamento totalmente embarcada. A oportunidade de utilização de novas tecnologias de baixo custo e a aplicação para a realidade de Internet das Coisas fez com que o foco do presente trabalho fosse diferente do anterior. Além da faixa de 2,45GHz, a faixa de 915MHz também foi utilizada nos experimentos através do uso de plataformas próprias para aplicações de IoT. Ainda, foram consideradas as limitações de capacidade de processamento e disponibilidade de energia destes dispositivos.

Os próximos capítulos apresentarão implementações em dispositivos IoT e coleta de resultados através de testes em campo, com a finalidade de ilustrar a eficiência e viabilidade de utilização de técnicas de RC prestando suporte a redes para IoT. Além disso, através da aplicação de técnicas de rádio cognitivo em canais não-licenciados, será mostrado que é possível obter incremento expressivo na qualidade da comunicação de dispositivos IoT em redes sem fio. Dados de sensoriamento espectral foram coletados em ambiente de RF não-controlado, por meio da realização de experimentos no campus do Inatel no período compreendido entre os meses de setembro a dezembro de 2015.

1.4 Principais Contribuições da Dissertação

Este trabalho traz três contribuições principais: concepção e implementação da plataforma CogRIoT de sensoriamento cooperativo para Internet das Coisas; implementação de um sistema embarcado de sensoriamento espectral e espacial em tempo real; e a integração inédita do sistema de sensoriamento espectral para rádio cognitivo na arquitetura NovaGenesis de Internet do futuro [26].

A plataforma desenvolvida fica como um *framework* para estudo e aplicação prática de técnicas de rádio cognitivo. O sensoriamento espectral e espacial viabiliza o uso eficiente do espectro eletromagnético ao longo de diferentes faixas de cobertura de uma rede sem fio. A integração com a NovaGenesis torna possível

expandir a oferta de serviços desta plataforma, provando ser uma ferramenta promissora para diversas aplicações de Internet do futuro.

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação segue em outros quatro capítulos. No Capítulo 2, é apresentada uma introdução às tecnologias de telecomunicações envolvidas na elaboração da dissertação. O Capítulo 3 descreve a plataforma CogRIoT de rádio cognitivo para aplicações de IoT e os seus principais blocos funcionais. O Capítulo 4 relata as implementações realizadas durante o desenvolvimento da plataforma, assim como os seus respectivos resultados experimentais. As conclusões e as propostas de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

Capítulo 2

Tecnologias de Comunicação

2.1 Rádio Cognitivo

Com o crescente volume de equipamentos e dispositivos fazendo uso de comunicação sem fio, o espectro de RF tem se tornado cada dia mais congestionado [25, 27, 28]. A realocação de frequência para serviços já estabelecidos são custosas e, muitas vezes, inviabilizadas pela complexidade da migração. Entretanto, é notado que canais licenciados nem sempre têm sido utilizados continuamente ou em toda banda disponível. Em canais desta natureza, o usuário licenciado, chamado de usuário primário, subutiliza uma faixa preciosa do espectro de RF, que poderia estar sendo compartilhada com outros usuários.

Para buscar meios de aumentar a eficiência de alocação do espectro de RF sem violar os direitos do usuário primário, técnicas de rádio cognitivo (RC) vêm sendo propostas como sendo uma forma de compartilhamento inteligente do espectro de RF [29–31]. Os usuários secundários – ou usuários cognitivos – analisam o canal licenciado a um usuário primário buscando oportunidades de uso. Quando a oportunidade é encontrada, o acesso ao canal é estabelecido, sem que a comunicação do usuário primário seja prejudicada.

Um exemplo de baixa eficiência no uso do espectro são os canais alocados para o serviço de televisão terrestre. Em determinadas regiões geográficas, nem todos os canais estão ocupados por usuários primários (emissoras de TV). Como a ocorrência de alteração de uso destes canais ocorre esporadicamente, é possível definir de forma clara a eventual disponibilidade de canais por meio de uma consulta a, por exemplo, um banco de dados [32]. Também no contexto de canais de televisão, uma vez que existe o usuário primário, é inviável tentar alocar um usuário secundário, já que o usuário primário utiliza o canal com alta eficiência.

Em canais onde o usuário primário está presente mas não ocupa o canal de forma eficiente, por exemplo, não ocupando todas as frequências do canal a todo momento, a identificação de oportunidade de uso do espectro não é tão trivial quanto uma consulta a uma base de dados. Nestes casos, torna-se necessário que o usuário secundário identifique, utilizando uma técnica de sensoriamento espectral, oportunidades de uso do canal sem interferir na comunicação do usuário primário [11, 33]. A Figura 4 ilustra um espectro de RF hipotético onde existem oportunidades espetrais que podem ser utilizadas por um rádio cognitivo.

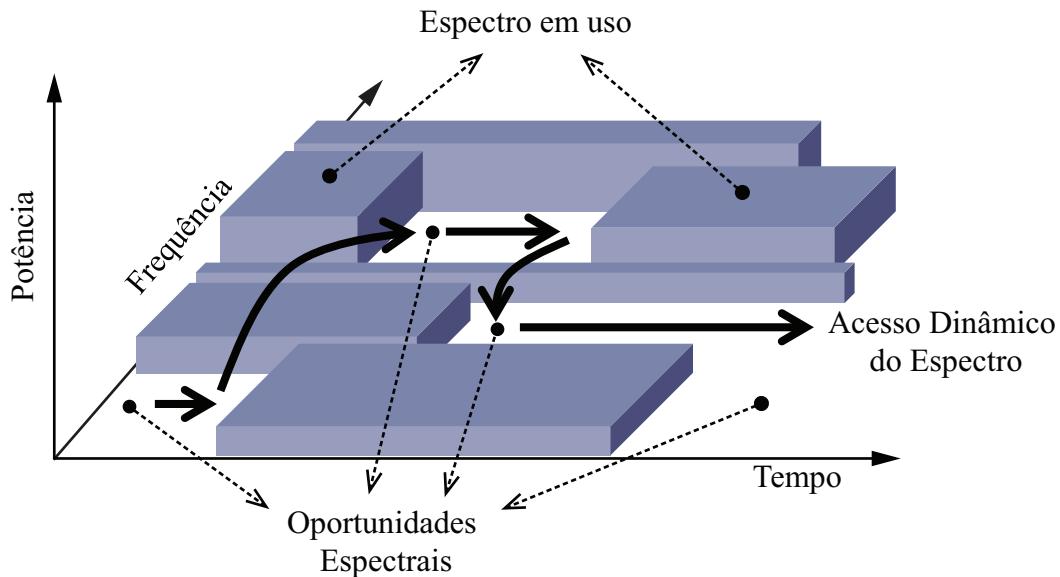


Figura 4 – Oportunidades de uso do espectro por um rádio cognitivo.

A tarefa de identificar os usuários no canal é atribuída ao bloco de sensoriamento espectral, sendo este considerado um dos recursos mais importantes de um sistema de rádio cognitivo [34, 35]. Qualquer decisão tomada pelo rádio cognitivo sobre alocar ou não um determinado canal será realizada com base na informação fornecida pelo bloco de sensoriamento espectral.

A concepção de um rádio cognitivo só é possível pela flexibilidade oferecida pela tecnologia de rádio definido por *software* (SDR – *Software Defined Radio*). Utilizando uma plataforma SDR, parâmetros como modulação, taxa de bits, largura de banda, entre outros, são variáveis definidas em *software*, que atreladas a um *hardware* que suporte estes parâmetros, definem a característica de operação de um rádio. O rádio cognitivo pode se reconfigurar para a funcionalidade de sensoriamento espectral, a fim de identificar a existência do usuário primário e quando ele está fazendo uso do canal. Reconfigurando o seu *software*, o rádio cognitivo pode aplicar técnicas de modulação adaptativas ao meio onde o acesso

oportunístico ao espectro será realizado sem, necessariamente, alterar a plataforma de hardware utilizada.

A Figura 5 ilustra as etapas de um rádio cognitivo desde o sensoriamento do canal até a alocação de recursos. Inicialmente, é realizado o sensoriamento dos sinais presentes no ambiente do espectro radioelétrico. Os dados coletados são analisados buscando identificar o acesso ao canal pelo usuário primário. A ausência do usuário primário no canal é informada para o bloco seguinte, que irá definir estratégia de alocação deste canal, utilizando as informações fornecidas pelos blocos anteriores. A estratégia de alocação irá definir, por exemplo, a técnica de transmissão que será utilizada. A informação de alocação reconfigura então o rádio cognitivo para utilizar parâmetros de acesso ao meio, condizentes com a oportunidade de uso do espectro para que, finalmente, uma transmissão oportunística seja realizada.

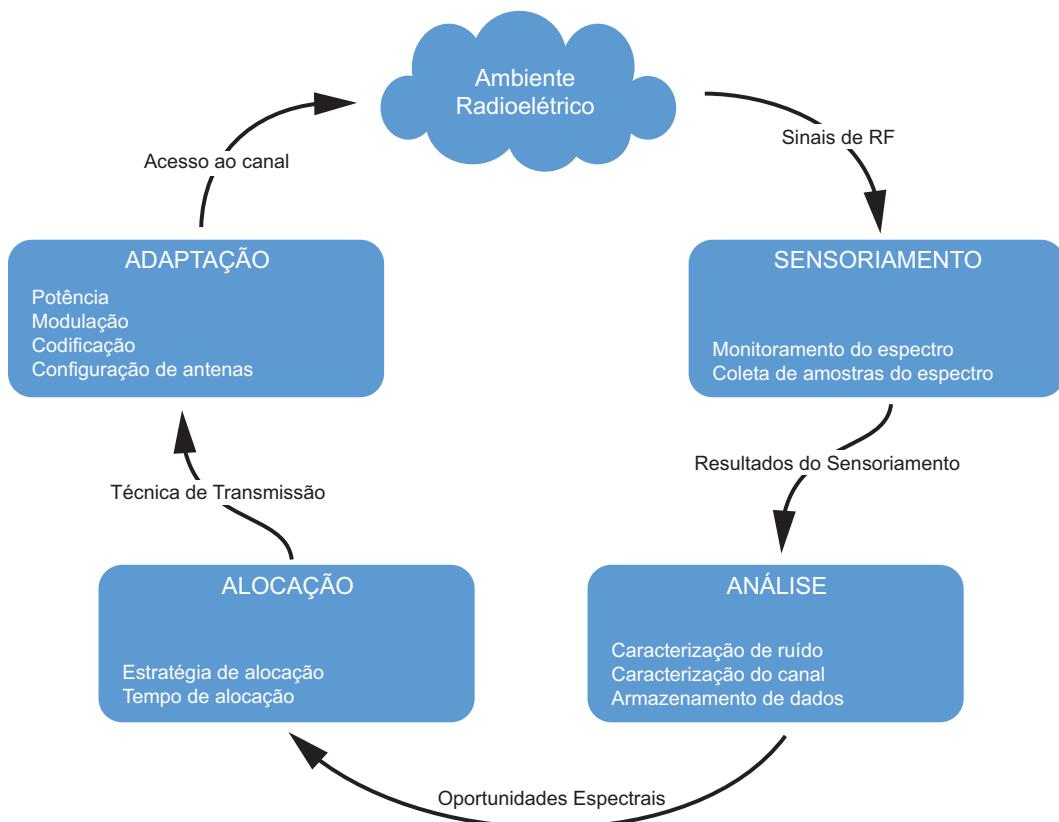


Figura 5 – Ciclo de atividades de um rádio cognitivo.

2.1.1 Sensoriamento Espectral

A habilidade de um rádio cognitivo de alocar dinamicamente um canal não utilizado do espectro de RF está diretamente relacionada a sua capacidade

de detectar se o canal não está realmente em uso pelo usuário primário [28]. Por este motivo, o sensoriamento espectral é um componente crucial de um rádio cognitivo. A técnica de sensoriamento espectral utilizada irá impactar diretamente na precisão e eficiência da detecção do usuário primário, evitando assim interferir em sua comunicação [36]. Entretanto, o resultado do sensoriamento espectral pode ser afetado por características do meio como a incerteza sobre o ruído e distorções causadas pelo canal. Estas perturbações aleatórias podem degradar o desempenho do algoritmo de sensoriamento.

Existem diversas técnicas de sensoriamento espectral [34, 37], algumas com foco em alguma aplicação específica e outras para uso geral. A principal funcionalidade de um bloco de sensoriamento espectral é indicar a presença do usuário primário no canal. A ocupação de um canal pelo usuário primário pode ser definida analiticamente por meio de um teste de hipóteses binário, onde duas delas são possíveis, \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 , como segue:

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0: \text{ausência do usuário primário} \\ \mathcal{H}_1: \text{presença do usuário primário} \end{cases} \quad (2.1)$$

O bloco que realiza o sensoriamento espectral pode decidir por uma destas duas hipóteses, que dependem do algoritmo utilizado e das condições do canal. O algoritmo de sensoriamento pode decidir pelas seguintes possibilidades:

- Decidir por \mathcal{H}_0 quando a hipótese \mathcal{H}_0 é verdadeira – $Pr(\mathcal{H}_0 | \mathcal{H}_0)$
- Decidir por \mathcal{H}_1 quando a hipótese \mathcal{H}_0 é verdadeira – $Pr(\mathcal{H}_1 | \mathcal{H}_0)$
- Decidir por \mathcal{H}_0 quando a hipótese \mathcal{H}_1 é verdadeira – $Pr(\mathcal{H}_0 | \mathcal{H}_1)$
- Decidir por \mathcal{H}_1 quando a hipótese \mathcal{H}_1 é verdadeira – $Pr(\mathcal{H}_1 | \mathcal{H}_1)$

Estas hipóteses são decididas por um rádio cognitivo por meio da variável de estatística de teste T associada a um limiar de decisão λ . Se $T > \lambda$, é decidido que o espectro está ocupado pelo usuário primário (hipótese \mathcal{H}_1), caso contrário, o canal é considerado livre (hipótese \mathcal{H}_0). Dado que a variável de estatística T é uma variável aleatória, o resultado de decisão de um rádio cognitivo sobre a alocação de um canal também é definido por meio de um valor de probabilidade. Portanto, quando o bloco de sensoriamento espectral decide sobre o estado de alocação de um canal, existe uma probabilidade desta informação estar incorreta. As possibilidades de decisão confrontadas com a realidade do canal recebem nomenclatura utilizada na literatura, conforme abaixo:

- **Probabilidade de alarme falso:** probabilidade de detectar o usuário primário, sendo que ele não está presente, definido como P_{FA} (*False Alarm*).
- **Probabilidade de detecção:** probabilidade de detectar o usuário primário, sendo que ele está presente, definido como P_D (*Detection*).
- **Probabilidade de buraco espectral:** probabilidade de não detectar o usuário primário, sendo que ele não está presente, definido como P_{SH} (*Spectral Hole*).
- **Probabilidade de falso positivo:** probabilidade de não detectar o usuário primário, sendo que ele está presente, definido como P_{MD} (*Miss Detection*).

Para avaliar o comportamento da variável de decisão T , é possível considerar duas funções densidade de probabilidade, $f_0(t)$ e $f_1(t)$, representando respectivamente as hipóteses \mathcal{H}_0 e \mathcal{H}_1 , mostradas na Figura 6. A variância das curvas $f_0(t)$ e $f_1(t)$ se sobrepõem para alguns valores do limiar de decisão λ , o que torna difícil a tomada de decisão sobre a hipótese correta. Variar o valor de λ , pode resultar em uma das hipóteses sendo escolhida com maior probabilidade, causando erros na decisão de alocação. O valor de P_D aumenta na medida em que o valor do limiar de decisão λ diminui, e o oposto ocorre com o valor de P_{FA} . Aumentar o valor de λ significa que o bloco de sensoriamento espectral só irá decidir por \mathcal{H}_1 quando a variável T indicar forte influência do usuário primário no canal. Neste caso, os sinais fracos do usuário primário podem não ser detectados, resultando em valores maiores de P_{MD} .

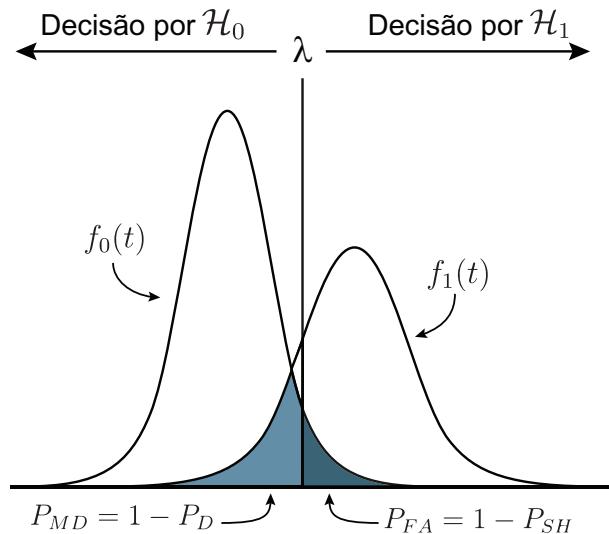


Figura 6 – Função densidade de probabilidade da variável de decisão T .

Observando que o valor de λ afeta diretamente o resultado do sensoriamento espectral, seu valor deve ser estipulado analisando sua influência nos valores de P_D e P_{FA} . A curva ROC (*Receiver Operating Characteristics*) é utilizada na literatura como ferramenta para a definição do valor de λ a partir de valores de P_D e P_{FA} [38]. Utilizando esta curva, é possível definir um valor para o limiar de decisão e conhecer o comportamento do detector, podendo prever antecipadamente os possíveis equívocos de decisão.

2.1.2 Sensoriamento Espectral Utilizando Detecção de Energia

Existem inúmeras técnicas e maneiras para se estabelecer uma comunicação sem fio. Para determinadas aplicações como telefonia celular e serviços de *broadcast*, a forma de acesso ao meio é previamente estabelecida por meio de padronizações. Em outras, rádios com tecnologias proprietárias de transmissão podem estar presentes e pode não ser possível conhecer a tecnologia de acesso ao meio utilizada. Nas aplicações para Internet das Coisas, este segundo cenário é o mais presente nas instalações atuais. Devido a diferentes fornecedores de transceptores e diferentes pilhas¹ de comunicação. Em resumo, não existe uma padronização para o acesso ao meio para estes dispositivos.

Neste cenário, elaborar um bloco para sensoriamento espectral que consiga reconhecer diversos padrões de acesso ao meio a fim de identificar um usuário é tarefa que demandaria alta complexidade computacional, atrelada a um *hardware* de alto custo. Entretanto, existem técnicas para identificar a presença de um usuário no canal sem a necessidade de identificar a tecnologia de comunicação utilizada para acessar o meio. Um deles é o método da detecção de energia, considerado um método sub-ótimo [39], é dos mais simples de ser implementado e que apresenta resultados de detecção relevantes para determinadas aplicações [40].

A técnica de detecção de energia foi escolhida para a implementação das atividades descritas nesta dissertação. Devido à simplicidade de implementação, esta técnica permitiu a utilização de plataformas embarcadas de baixo custo e, ainda assim, realizar o sensoriamento espectral em tempo real.

Em um detector de energia tradicional, a energia de N amostras de RF do sinal recebido X pode ser calculada como segue. Neste primeiro passo é calculado

¹ Pilha é o nome dado à aplicação que monta e desmonta pacotes destinados a uma comunicação com ou sem fio. Neste contexto podemos citar ZigBee, 6LoWPAN, Bluetooth, DASH7, entre outros.

o valor da variável estatística de decisão T :

$$T = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |X(n)|^2. \quad (2.2)$$

Na ausência do usuário no canal, o ruído é o único sinal presente no receptor de RF, portanto a variância da potência do ruído do canal precisa ser conhecida. Conhecer a potência do ruído representa o principal ponto negativo nesta técnica, uma vez que o sistema de sensoriamento precisa prover meios para calcular ou estimar este valor. Existem técnicas específicas para estimar ou calcular o ruído do canal. Outras buscam tornar desnecessário o conhecimento prévio da potência do ruído, como o caso da técnica de detecção por autovalores [41]. Neste trabalho, o ruído do canal foi medido antes de cada experimento. Assumindo que a potência do ruído é conhecida é possível calcular o valor ótimo da variável estatística de decisão, T' :

$$T' = \frac{T}{\sigma_n^2}. \quad (2.3)$$

Com o valor de T' disponível, é possível definir um limiar de decisão λ através de análise da curva ROC. Arbitrando valores para λ é possível definir a energia mínima necessária para que o detector reconheça o canal como ocupado. Desta forma, o canal será considerado livre ou ocupado através do seguinte teste:

$$\text{Decisão} = \begin{cases} \mathcal{H}_0 & \text{se } T'(n) \leq \lambda \rightarrow (\text{Livre}) \\ \mathcal{H}_1 & \text{se } T'(n) > \lambda \rightarrow (\text{Ocupado}) \end{cases} \quad (2.4)$$

Portanto, para o detector de energia, aumentar o valor de λ implica em detectar usuário primário quando uma quantidade maior de energia é detectada no canal. Valores baixos podem resultar em valores altos de P_{FA} , uma vez que variação o ruído poderá ser detectado como usuário primário.

2.1.3 Sensoriamento Espectral Cooperativo

Mesmo podendo operar sozinho, o sistema de rádio cognitivo é mais eficiente quando mais de um rádio fornece informações sobre o canal observado, constituindo uma rede cooperativa de sensoriamento espectral [42–44]. Problemas como incerteza sobre o ruído, desvanecimento, sombreamento e usuário oculto são minimizados em sistemas cooperativos. Os métodos mais comuns de cooperativismo são o local e o distribuído [34]. No método local, o próprio dispositivo provê

meios de cooperativismo como, por exemplo, empregando antenas reconfiguráveis e utilizando algoritmos correlacionais [45, 46]. Já no cooperativismo distribuído, a informação de mais de um rádio cognitivo é utilizada para a tomada de decisão sobre a presença do usuário primário no canal.

De modo geral, os métodos cooperativos buscam reduzir a probabilidade de falso alarme, o tempo de sensoriamento e a existência de usuários ocultos. Três arquiteturas básicas de rádio cognitivo cooperativo são discutidas na literatura: centralizada, distribuída e distribuída externa, resumidas a seguir.

Sensoriamento cooperativo centralizado

Uma central coleta informações de sensoriamento de todos os rádios cognitivos da rede, formando uma visão global do canal. Esta central pode distribuir esta informação para os rádios da rede ou controlar diretamente cada um.

Vantagem: Visão geral de todos os rádios e do canal.

Desvantagem: Alto tráfego de dados se a rede for muito grande.

Sensoriamento cooperativo distribuído

Nesta arquitetura os rádios cognitivos que compõem a rede de sensoriamento trocam informações sobre o uso do canal, mas cada rádio toma a decisão sobre a alocação do canal.

Vantagem: Baixo tráfego de dados, não possui único ponto de falha

Desvantagem: Problema do terminal oculto.

Sensoriamento cooperativo distribuído externo

Neste caso, agentes externos realizam o sensoriamento espectral e distribuem esta informação para os rádios cognitivos. Esta arquitetura também pode ser aplicada às outras duas anteriores, formando um sistema híbrido. Agentes externos podem ser utilizados para cobrir locais onde o sensoriamento pelo rádio cognitivo é impossibilitado por algum motivo.

Vantagem: Simples implementação, baixo custo.

Desvantagem: Necessita de infraestrutura adicional à rede de rádios de comunicação, uma vez que os rádios envolvidos no sensoriamento não são utilizados para comunicação entre os usuários.

2.2 Rádio Definido por Software – SDR

As técnicas de transmissão sem fio evoluem continuamente desde as primeiras transmissões na década de 1890 [47, 48]. Inicialmente, rádios totalmente baseados em *hardware* eram desenvolvidos para aplicações específicas, normalmente de funcionalidade única, atendendo somente a aplicação para a qual ele foi concebido. Esta arquitetura atendia ao propósito inicial o qual aquele rádio foi desenvolvido, mas falhava em flexibilidade para reutilização. Novas funcionalidades ou aplicações não poderiam aproveitar uma mesma plataforma, por isso um novo *hardware* era desenvolvido. Com o aprimoramento de tecnologias embarcadas de processadores, dispositivos de programação lógica (FPGA – *Field Programmable Gate Array*) e transceptores de RF, tornou-se possível o desenvolvimento de rádios flexíveis em suas características de funcionamento. Os parâmetros de um rádio podem ser dinamicamente definidos, fazendo uso de implementações de *software* para essa finalidade. Tal flexibilidade só pode ser conseguida utilizando plataformas de *hardware* que suportem tal versatilidade.

Desde o surgimento do termo SDR e os primeiros relatos de implementações [27, 49, 50], plataformas e ferramentas vêm sendo desenvolvidas e aplicadas na academia, defesa e indústria. Diversas plataformas de *hardware* estão disponíveis comercialmente, algumas repletas de recursos e outras de baixo custo. Os desenvolvedores de SDR podem optar por diversas ferramentas de *software*, ou *frameworks*, para implementação de rádios definidos por *software*, com a disponibilidade de soluções comerciais e outras *open source*.

Porém, nem toda aplicação deve utilizar um rádio definido por *software*. A utilização de uma plataforma SDR para a concepção de um sistema de comunicação deve ser avaliada caso a caso. A alta flexibilidade do SDR vem acompanhada de um custo relativamente alto quando comparado a uma plataforma para fim específico. Fatores como o volume de produção, tempo de desenvolvimento, disponibilidade de componentes dedicados, entre outros, podem servir como parâmetros para avaliar a viabilidade de uso de uma plataforma SDR. Para fins de pesquisa científica, estas plataformas têm grande atratividade, pois possibilitam a implementação física de novas tecnologias, somente reconfigurando o SDR. Como exemplo, empresas como a Nutaq anunciam produtos SDR para pesquisa e desenvolvimento do padrão 5G para acesso celular móvel [51], que até o momento não possuí um padrão definido. A empresa MathWorks disponibiliza ferramentas para desenvolvimento de sistemas LTE utilizando o *software* Matlab associado a um *hardware* para SDR [52]. Em produtos comerciais, a Huawei [53] e ZTE [54] disponibilizam

equipamentos utilizando plataformas SDR proprietárias para estações rádio base de telefonia celular nos padrões GSM e LTE.

2.2.1 Componentes Básicos de um SDR

A arquitetura SDR, conforme apresentado na Figura 7, pode ser dividida em blocos simplificados: *frontend* de RF analógico; etapa de condicionamento de sinais contemplando *firmware* embarcado e *software* para processamento digital de sinais; e a plataforma de *software* computacional, desempenhando algoritmos para processamento digital de sinais e interface gráfica com o usuário (opcional).

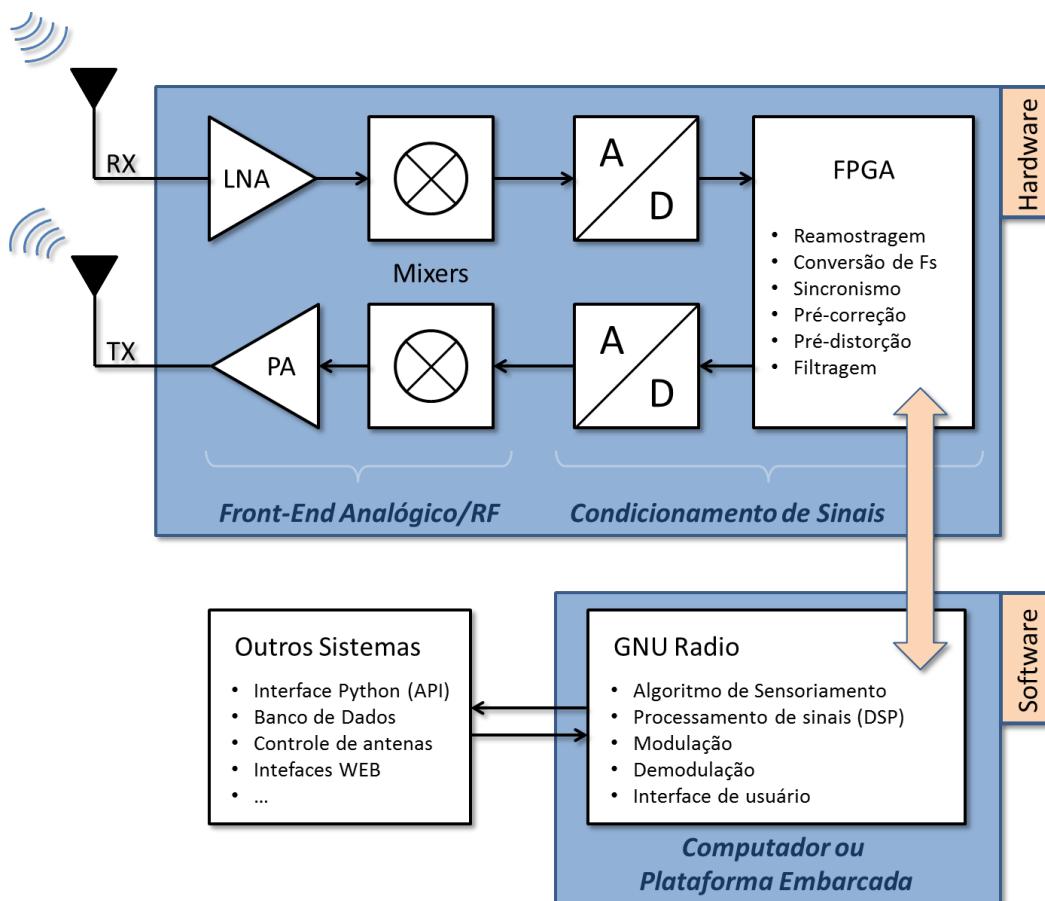


Figura 7 – Arquitetura para *Software Defined Radio*.

O *frontend* analógico é composto pelos componentes eletrônicos necessários para transmitir e receber sinais de RF, que usualmente são gerados e recebidos por transceptores integrados de RF ou circuitos discretos de modulação e demodulação. Também é essencial ao *frontend* disponibilizar conversores de domínio de sinais analógico/digital. Para suportar capacidades de comunicação com alta capacidade e complexidade, processadores ou FPGAs são utilizados entre o *frontend* analógico e

o *software* do SDR. Em algumas plataformas, o FPGA desempenha funcionalidades de processamento digital de sinais (DSP) básicas e em outras pode implementar processamentos mais elaborados como códigos corretores de erro, filtros adaptativos ou até mesmo um rádio completo.

Controlando o *hardware* normalmente existe um *framework* para aplicações de SDR, onde algoritmos para DSP estão disponíveis para utilização. Estes algoritmos são normalmente disponibilizados para o desenvolvedor na forma de blocos que se interconectam. Blocos como moduladores, demoduladores, filtros, codificadores, operadores matemáticos, entre outros, podem ser arranjados para formarem sistemas de comunicação extremamente flexíveis. Do ponto de vista do *framework* para SDR, praticamente não existe limitação para o que pode ser criado. Entretanto, na prática, esta flexibilidade será limitada pelos recursos de *hardware* disponíveis.

Utilizando um *framework* para SDR, o sistema desenhado nesta aplicação envia e recebe amostras digitais do sinal que será transmitido ou recebido pela plataforma de *hardware*. É comum que estas aplicações sejam executadas em computadores, mas já é possível utilizar *frameworks* em plataformas embarcadas, como será mostrado no Capítulo 4.1.

Frameworks como o GNU Radio e o MathWorks Matlab Simulink oferecem interface gráfica que está disponível tanto durante o desenvolvimento do projeto do SDR quanto durante sua execução. Este tipo de interface não é essencial para o desenvolvimento e operação de um sistema SDR, principalmente quando aplicado a plataformas embarcadas, mas acelera o desenvolvimento e é extremamente útil para aplicações em projetos de pesquisa e instrumentação [55].

2.2.2 GNU Radio

Considerado o *framework* para SDR mais ativo na comunidade *open source*, o GNU Radio [56, 57] possui ferramentas para a construção de rádios definidos por *software* de alta qualidade e complexidade. O *framework* é implementado em linguagem C++ e possui extensões para acesso a aceleradores em *hardware*, recurso que maximiza o desempenho dos algoritmos de DSP, permitindo processamento de sinais em tempo real. Com interfaces de *software* disponíveis em linguagem Python, o desenvolvimento no *framework* é bastante atrativo e simplificado, ainda oferecendo grande flexibilidade para expansão de suas capacidades originais. Por exemplo, é possível desenvolver um rádio no GNU Radio e, na mesma aplicação, um serviço de comunicação TCP/IP ou de armazenamento de informações em

banco de dados.

Existem blocos nativos no GNU Radio para interface com plataformas de *hardware* para SDR, variando desde equipamentos de alto desempenho [58] a receptores de interface USB custando menos de 20 dólares [59]. Para interação como o *hardware*, dois blocos especiais são utilizados: bloco “*Source*” para receber do *hardware* amostras de RF já convertidas para o domínio digital; e o bloco “*Sink*” para enviar para o *hardware* amostras digitais do GNU Radio que serão transmitidas por RF. A Figura 8 apresenta, como exemplo, um demodulador FM implementado no GNU Radio. Para simplificar o diagrama, alguns blocos foram omitidos da figura.

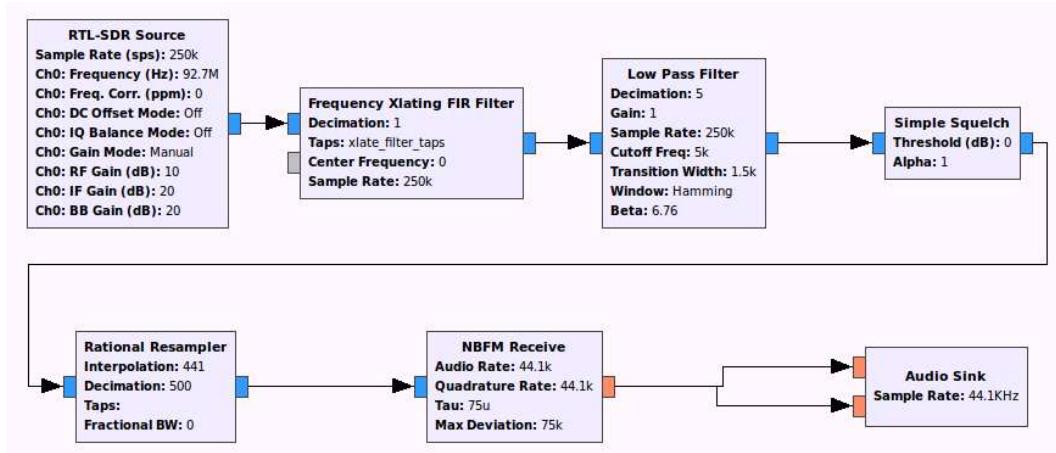


Figura 8 – Exemplo de um demodulador FM implementado no GNU Radio.

2.3 Dispositivos para Internet das Coisas

Também impulsionado pelo avanço crescente na microeletrônica, a disponibilidade de componentes eletrônicos e demandas de mercado têm viabilizado o desenvolvimento sensores de baixo custo, baixo consumo e habilitados para comunicação sem fio. Estes dispositivos possuem capacidade de sensoriamento do ambiente, processamento de dados e comunicação sem fio de curto alcance [4,60–62]. Mesmo com recursos de processamento e energia muitas vezes limitados, estes sensores são capazes de se comunicarem, formando redes de sensores de grandes dimensões compostas por centenas ou até milhares de dispositivos, onde a densidade destas redes pode chegar a 20 nós por m³ [63]. Tais dispositivos são alguns dos grandes impulsionadores do acontecimento da IoT.

Podendo receber energia de fonte de alimentação contínua, muitas vezes os sensores são associados à necessidade de baixo consumo de energia. Neste

caso, podem ser alimentados por bateria ou energia capturada do ambiente (*energy harvesting*) [64]. Alguns dispositivos alimentados por baterias podem ser descartáveis, isto é, são eliminados quando a energia da bateria se esgota. Existem aplicações fazendo uso de técnicas de *energy harvesting*, “capturando” e convertendo fontes como luz solar, calor, vibração mecânica, fluxo de fluídos, eólica, RF entre outras, para energia elétrica. Nestes casos o consumo de energia do sensor é minimizado por meio de técnicas eficientes de comunicação, uma vez que grande parte da energia consumida pelo sensor é utilizada pelos componentes de RF [65, 66].

A conectividade da rede de sensores pode ser inicialmente definida por meio de topologias de rede estrela ou malha (*mesh*), como presentada na Figura 9. Na topologia de rede estrela, cada sensor, ou nó, se conecta diretamente a uma estação central. Na topologia de rede *mesh*, os sensores propagam pacotes de dados utilizando nós vizinhos como rotas de comunicação. Outras topologias híbridas vêm sendo propostas, como por exemplo o arranjo de sensores em grupos (*clusters*) de redes menores, com alguns sensores formando redes em malha [4, 62, 67]. Topologias de redes híbridas também são propostas para redes com sensores móveis [68]. Para suportar estas topologias, camadas de acesso ao meio (MAC - *Media Access Control*), algoritmos de roteamento de pacotes e algoritmos de controle de consumo de energia vêm sendo propostos, possuindo características que atentem necessidades específicas de cada aplicação.

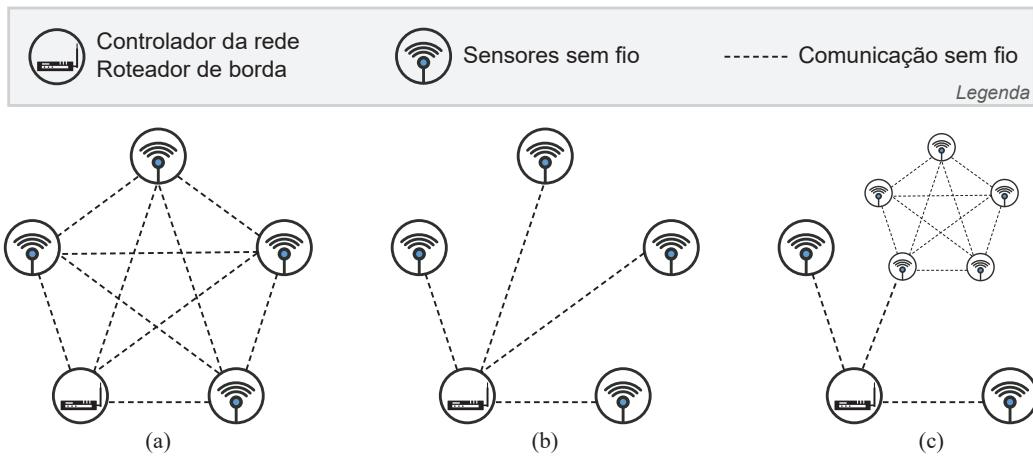


Figura 9 – Topologia de redes de sensores sem fio: (a) Mesh; (b) Estrela; (c) Híbrida Mesh/Estrela.

Mostrados de forma genérica até aqui, os sensores e a topologia da rede WSN são definidos com base na aplicação final à qual serão integrados. A necessidade de processamento, confiabilidade de entrega de mensagens, dis-

ponibilidade de energia, atraso na entrega de mensagens, mobilidade do sensor, entre outros fatores são levados em consideração na definição da arquitetura a ser implementada. As aplicações para WSN são diversas: sistemas em grid, casas inteligentes, cidades inteligentes, rodovias inteligentes, sensores biométricos, sensores ambientais, monitoramento de ativos, monitoramento de animais de estimação, entre outros [4, 62, 69]. Para a plataforma de rádio cognitivo concebida neste trabalho, foram considerados sensores alimentados por baterias, empregando transceptores de RF integrados e baixa capacidade de processamento. Para o estado atual da plataforma desenvolvida, a topologia da rede de sensores monitorada não é relevante. Na Figura 10 o dispositivo para IoT “Momote 001” [70] com capacidade para formar uma WSN em 2,45GHz é apresentado como exemplo.



Figura 10 – Hardware brasileiro *open source* para IoT : momote 001.

2.4 Internet do Futuro – NovaGenesis

O termo Internet do Futuro representa as novas propostas e implementações de arquiteturas de rede que buscam substituir ou evoluir a Internet de hoje. A Internet surgiu na década de 60 e é utilizada praticamente sem grandes modificações desde a década de 70. Com isso, já apresenta aspectos obsoletos, uma vez que seus protocolos foram desenvolvidos em uma época onde as necessidades de capacidade de processamento, armazenamento e comunicação eram muito

inferiores às que hoje são demandadas por usuários e máquinas. Neste cenário, novas aplicações e produtos devem lidar com a complexidade, imperfeições e limitações das tecnologias anteriores [71].

O projeto NovaGenesis [26, 72] nasceu com a proposta de ser uma nova arquitetura para a Internet, sem ter o compromisso de utilizar a arquitetura atual, mas fazendo uso de tecnologias correntes. Sendo uma implementação de Internet do Futuro, a NovaGenesis foi idealizada observando os problemas e limitações da arquitetura atual, oferecendo soluções.

O projeto foi iniciado em 2008 pelo Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti. A primeira prova de conceito foi implementada e testada em 2012 na Coréia do Sul. Outros avanços têm sido feitos desde então no laboratório ICT (*Informations and Communications Laboratory*) localizado no Inatel, Brasil. O projeto NovaGenesis caminha para se tornar uma implementação completa de uma arquitetura de Internet do Futuro.

Para contribuir com o projeto, foi desenvolvida uma interface de integração de um sistema de sensoriamento espectral à NovaGenesis. A implementação e resultados desta atividade estão descritos no Capítulo 4.

Capítulo 3

CogRIoT – Rádio Cognitivo Embarcado para Internet das Coisas

Neste capítulo, a plataforma CogRIoT é apresentada. Ela associa dois temas distintos abordados pela comunidade científica: Rádio Cognitivo e Internet das Coisas. CogRIoT é uma implementação completa, de baixo custo, cooperativa, embarcada e de tempo real, onde técnicas de rádio cognitivo são aplicadas aos requisitos de comunicação das redes e dispositivos IoT. Detalhes sobre o código fonte da plataforma estão disponíveis no Apêndice A.

3.1 Introdução

A plataforma CogRIoT foi desenvolvida para melhorar as condições de comunicação de uma rede sem fio, observando-se o contexto de Internet das Coisas. O objetivo é obter conhecimento sobre o ambiente radioelétrico e divulgá-lo para um sistema de comunicação sem fio, para que este possa conhecer o ambiente radioelétrico no qual está operando. A plataforma foi desenvolvida tendo o diagrama da Figura 11 como referência de arquitetura. Na base temos o *dado*, depois *informação*, *conhecimento* e *sabedoria*. O *dado* é o valor cru, obtido de apenas uma célula de sensoriamento. Este precisa ser acrescido de *informações*, como por exemplo, em que condições aquele dado foi obtido. Considerando o sistema de rádio cognitivo cooperativo, diversos fornecedores estarão disponibilizando informações que, quando tratadas em conjunto, permitem a um usuário *conhecer* melhor os padrões de utilização do canal. Por fim, o termo *sabedoria* se refere à situação onde o sistema consegue determinar padrões

comportamentais do ambiente e até oferecer previsões sobre seu uso. A cada passo ascendente na pirâmide, o produto fornecido pela plataforma CogRIoT tem maior significado prático e maior valor para tomada de decisões [2].

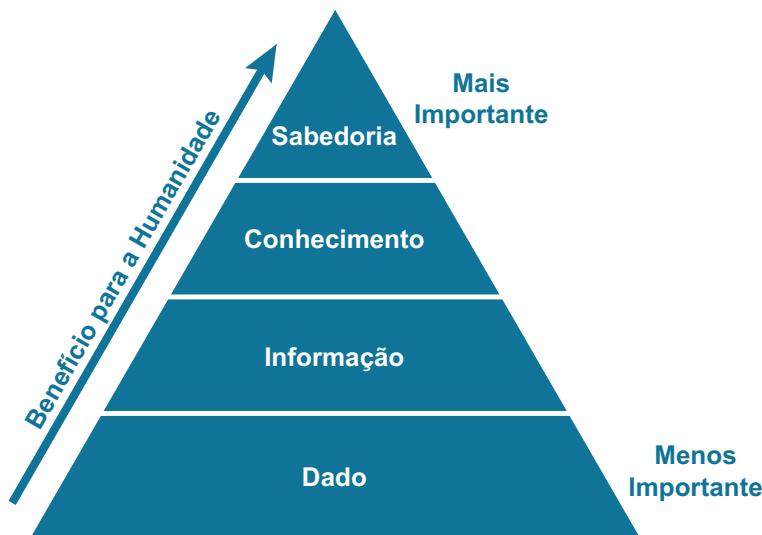


Figura 11 – Transformação de dados em sabedoria.

3.2 Associando Rádio Cognitivo e Internet das Coisas

Redes de rádios cognitivos vêm sendo propostas como a solução para definir regras e técnicas para um uso mais eficiente do espectro licenciado de RF. Como benefício, o RC permite que usuários em canais congestionados escoem seu tráfego através de canais de RF licenciados a outros usuários, que por algum motivo não fazem uso eficiente do canal. Entretanto, técnicas de RC podem ser aplicadas às redes em canais não-licenciados, também no contexto de IoT [73].

No conceito original, o RC identifica o usuário primário no canal e monitora o uso que ele faz do espectro. Este monitoramento, ou sensoriamento, pode identificar padrões de acesso ao canal no tempo e na frequência. Nas situações onde o canal não é utilizado pelo usuário primário, o usuário cognitivo (secundário) pode fazer o uso oportunístico do espectro, não interferindo no usuário licenciado. No contexto de IoT, as redes são concebidas em canais não-licenciados, normalmente faixas ISM do espectro de RF. Desta forma, não existe a definição formal do usuário primário. Em contrapartida, existem centenas ou milhares de outros usuários realizando acesso ao canal, sem qualquer hierarquia ou cooperativismo, o que justifica a concepção de um sistema que monitore e forneça informação sobre o meio.

Porém, agregar as capacidades completas de um rádio cognitivo a um dispositivo IoT iria adicionar custo, tamanho, complexidade e consumo de energia, seguindo no caminho oposto às suas necessidades. Para associar técnicas de rádio cognitivo a este cenário, o dispositivo IoT não realiza sensoriamento na plataforma desenvolvida, mas possui a capacidade de trocar de canal de RF e parâmetros limitados de modulação, através do recebimento de um comando. Conforme apresentado na Sessão 2.1.3, a plataforma CogRIoT utiliza um sistema de sensoriamento espectral distribuído externo.

O sistema CogRIoT foi idealizado com foco em fazer uso de hardware de baixo custo, mas permitindo que a plataforma possa se expandir para sistemas mais complexos no futuro. A arquitetura de *software* é desacoplada do *hardware* e os elementos da plataforma podem estar distribuídos em computadores e locais diferentes. Os componentes da plataforma são apresentados na Figura 12 sendo compostos pelos blocos: *Sensing Cell (SC)*; *Sensing Cell Controller (SCC)*; *Sensing Information Storage and Analysis (SISA)*; e *Fusion Center (FS)*. Nas sessões seguintes serão apresentados os blocos do sistema CogRIoT em detalhes e na Sessão 3.7 será apresentado um fluxo de funcionamento com todos os blocos integrados.

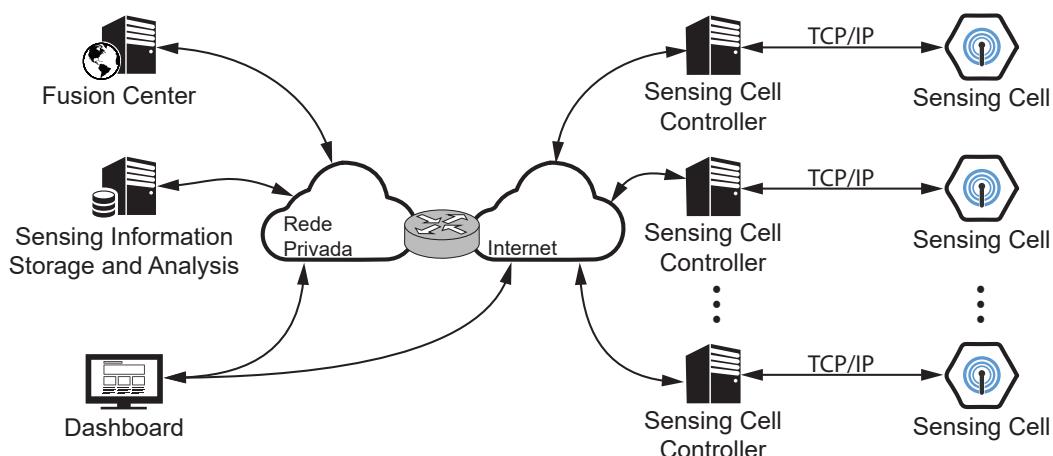


Figura 12 – Componentes da plataforma de rádio cognitivo para IoT – CogRIoT.

3.3 *Sensing Cell – SC*

A célula de sensoriamento (*SC*) tem como funcionalidade principal obter amostras do espectro de RF e disponibilizá-las para o *SCC*. Além disso, a *SC* tem capacidade para receber comandos para configurar parâmetros de recepção e

controlar arranjos de antenas reconfiguráveis. Para integrar ao sistema CogRIoT, a *SC* estabelece comunicação TCP/IP com o bloco *SCC*.

A *SC* pode ser definida como um receptor de RF desacoplado da unidade de processamento digital de sinais. Este desacoplamento permite flexibilidade para que outras tecnologias de recepção de RF sejam utilizadas, sem impactar em grandes modificações no restante da plataforma.

3.3.1 Detalhamento do *Hardware*

A *SC* é composta por dois sistemas: uma placa de processamento e um receptor de RF. A placa de processamento é uma *Raspberry PI 2 Model B*, que possui um processador de quatro núcleos ARM Cortex-A7 de 900MHz, 1GB de memória RAM, quatro portas USB, uma porta *Fast Ethernet* e pinos de entrada e saída para propósito geral (GPIO – *General-Purpose Input/Output*). O sistema operacional Linux Debian [74] foi instalado nesta placa e customizado para a necessidade do projeto. A Figura 13 ilustra a *SC* composta pela placa de processamento, o receptor de RF e uma antena monopolo.

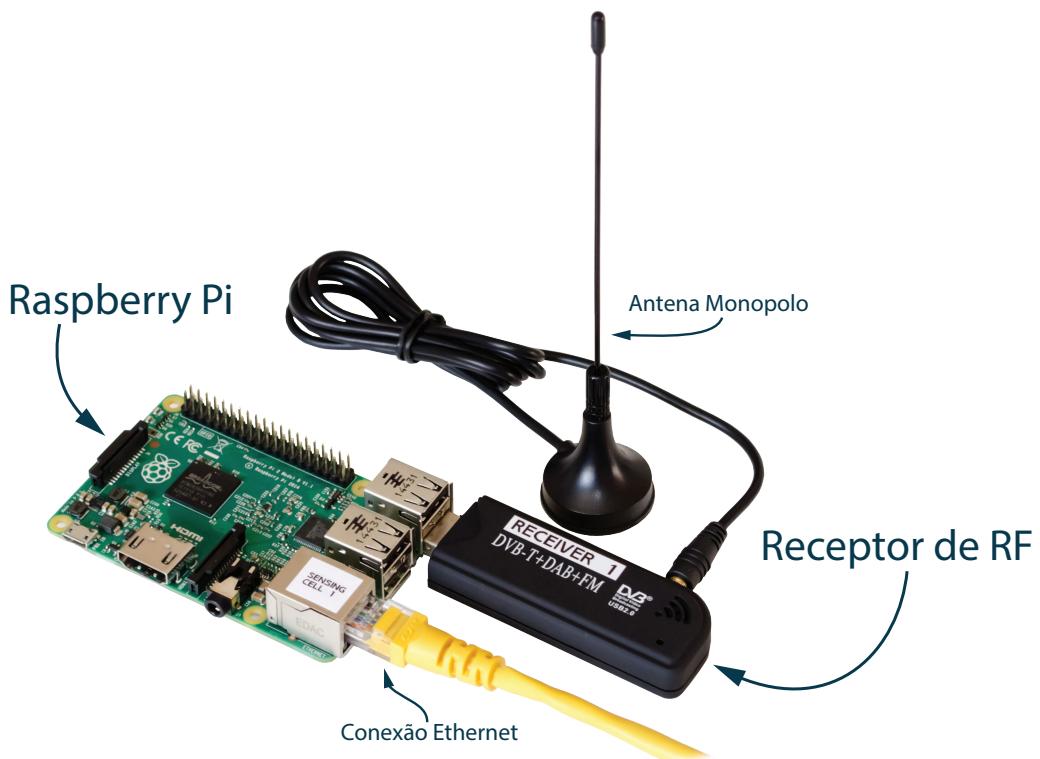


Figura 13 – Composição de *hardware* da *SC*: placa de processamento, receptor de RF e antena.

Um receptor de televisão digital DVB-T de baixo custo, conectado na porta

USB da placa de processamento, foi utilizado como receptor de RF. Fornecido por diversos fabricantes, este receptor se tornou bastante popular após Eric Fry [75] ter disponibilizado informações de como controlar os parâmetros do demodulador e obter as amostras I e Q (em fase e em quadratura) de sua porta USB. Após esta descoberta, outros interessados desenvolveram *drivers* e aplicativos para fazer uso deste dispositivo como um receptor para SDR de baixíssimo custo [59], encontrado no mercado por cerca de US\$11,00. Este receptor é composto por dois componentes principais, um *tuner* (que varia de modelo entre os fabricantes) e o demodulador RTL2832U [76].

3.3.2 Detalhamento do *Software*

Um software de código fonte aberto (*rtl_tcp*), fornecido pelo grupo OsmoCom [77], foi utilizado para configurar o receptor de RF, coletar as amostras demoduladas e transmiti-las para o *SCC* via protocolo TCP/IP, através da interface Ethernet da placa de processamento. O grupo OsmoCom também disponibiliza um bloco para o GNU Radio que se comunica com o aplicativo instalado no *SCC*. Esta comunicação permite que os parâmetros do receptor de RF sejam modificados remotamente e em tempo real utilizando o GNU Radio. Desta maneira o *SCC* pode selecionar o canal que será utilizado para sensoriamento espectral pela *SCC*. Além disso, também é possível modificar remotamente o ganho do LNA (*Low-Noise Amplifier*), frequência de amostragem e ajustes do filtro de entrada do receptor de RF. A Figura 14 apresenta o digrama em blocos simplificado da *SCC*.

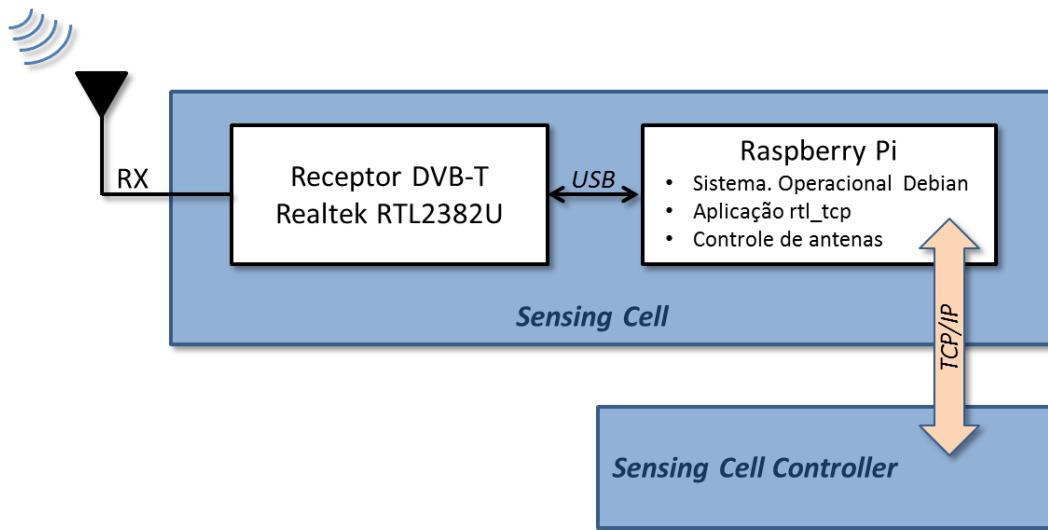


Figura 14 – Diagrama em blocos da *Sensing Cell*.

A plataforma CogRIoT pode receber dados de sensoriamento espectral de mais de uma *SC* simultaneamente. Ao obter dados do espectro por mais de uma fonte, caracteriza-se um sistema cooperativo de sensoriamento espectral. Desta forma é possível aumentar a área de sensoriamento e problemas tradicionais em sistemas de rádio cognitivo, como o efeito do usuário oculto (*hidden node*), são minimizados ou até mesmo eliminados [14, 78] A Figura 15 ilustra o problema do usuário oculto. No exemplo, assumindo que M_a está transmitindo para M_b , se M_c realizar o sensoriamento espectral não irá detectar M_a . Desta forma, M_c poderia iniciar uma transmissão com M_b considerando que o canal está livre, prejudicando a comunicação com o usuário M_a .

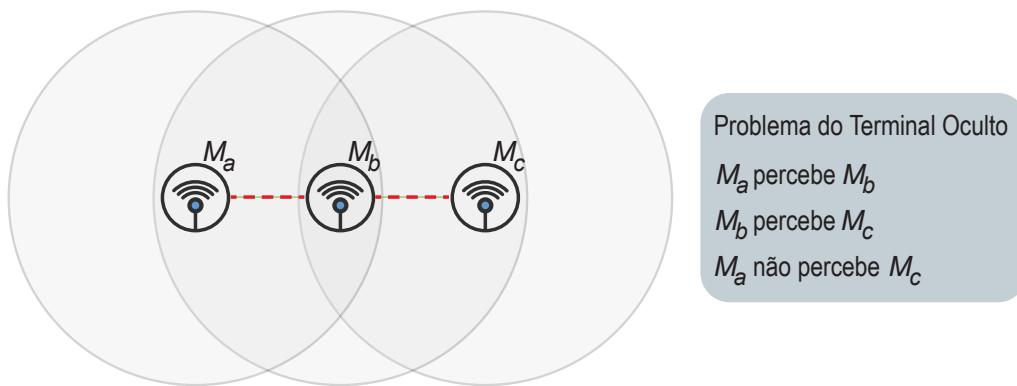


Figura 15 – Demonstrativo do problema do terminal oculto, ou *hidden node*.

3.4 *Sensing Cell Controller – SCC*

O bloco *SCC* (*Sensing Cell Controller*) controla os parâmetros da *SC* e também realiza o processamento dos sinais de sensoriamento, conforme apresentado na Figura 16. O *SCC* é uma arquitetura de SDR desenvolvida para execução em computador pessoal ou plataforma embarcada. O processamento realizado pelo *SCC* pode ser dividido em quatro partes principais: controle da *SC*; processamento digital de sinais; propagação das informações processadas; e controle dos parâmetros de sensoriamento. O primeiro bloco é responsável pelo recebimento de amostras da *SC*; o segundo bloco realiza o processamento digital de sinais, onde todas as amostras da *SC* são recebidas e processadas pelo algoritmo de sensoriamento espectral; o terceiro bloco transmite as informações de sensoriamento espectral para o bloco *SISA* adicionando informações sobre as condições com que as amostras foram obtidas; por último, o quarto bloco é responsável por controlar o canal que será selecionado para sensoriamento e

também configurar o arranjo de antenas. Os blocos 1 e 2 foram desenvolvidos no *framework* GNU Radio e os blocos 3 e 4 foram desenvolvidos em Python. Todos os blocos fazem parte de uma única aplicação escrita em Python, executada por linha de comando.

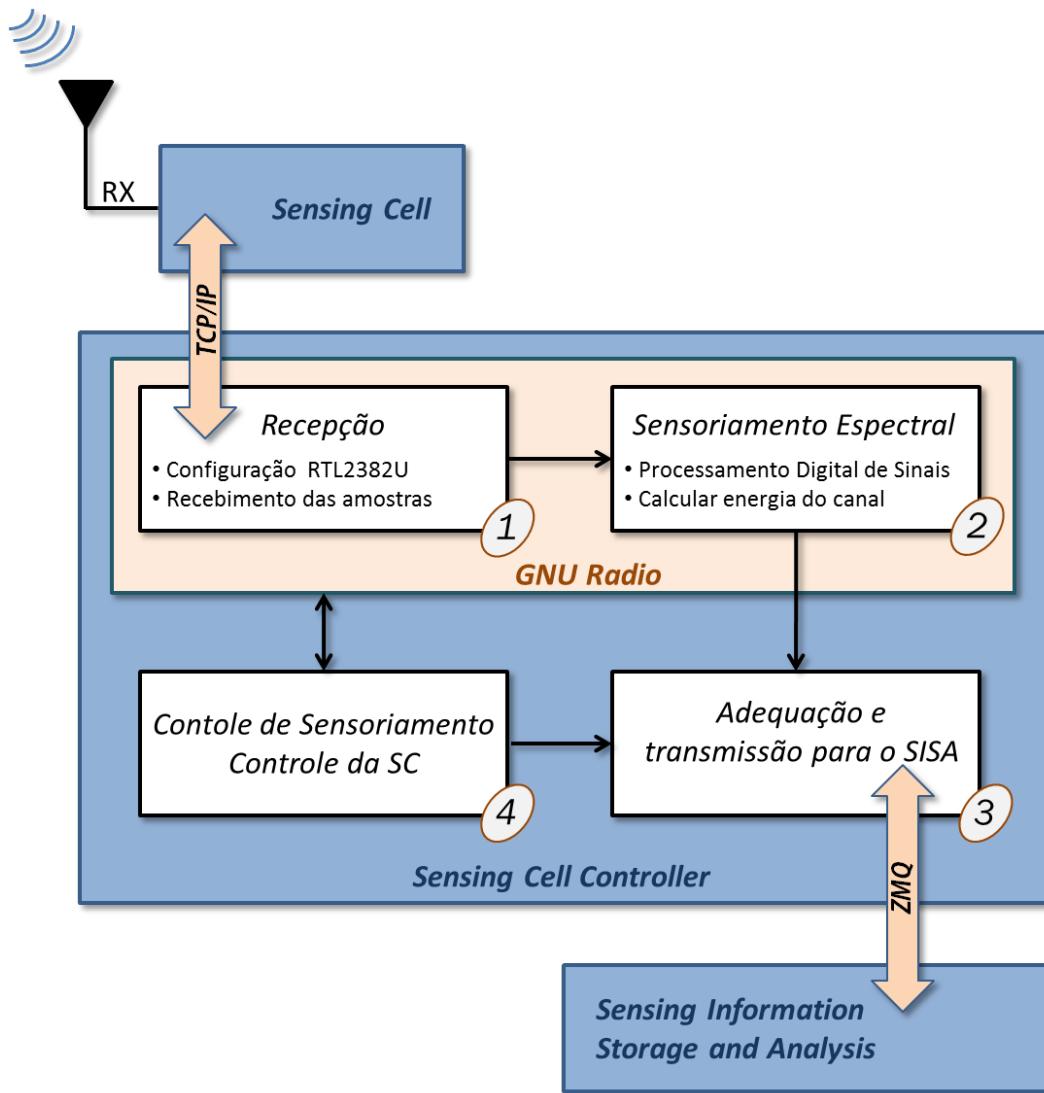


Figura 16 – Diagrama em blocos do *Sensing Cell Controller*. (1) Recebimento de amostras de RF; (2) Algoritmo de sensoriamento espectral; (3) Transmissão de informação de sensoriamento para o SISA; (4) Controle de parâmetros de sensoriamento e controle da *SC*.

3.4.1 Processamento Digital de Sinais – Sensoriamento Espectral

A técnica de detecção de energia, apresentada na Sessão 2.1.2, foi aplicada ao bloco *SCC* com a finalidade de obter uma grandeza proporcional à probabilidade de existência de um usuário no canal observado, definida como probabilidade

de detecção Pd . Para formar o valor de Pd , N amostras são coletadas e o vetor de detecção T é definido conforme a regra abaixo:

$$T(n) = \begin{cases} 0 & \text{se } E_{rx}(n) \leq \lambda \\ 1 & \text{se } E_{rx}(n) > \lambda \end{cases} \quad (3.1)$$

onde E_{rx} representa a energia detectada pelo receptor de RF e λ o limiar (*threshold*) de detecção. A técnica para obtenção da energia do canal é tratada no Capítulo 2. Após completado o vetor T com N valores, Pd é calculado como segue:

$$Pd = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T(n) \quad (3.2)$$

desta forma, Pd assume qualquer valor entre 0 e 1, dependendo da quantidade de amostras que foram coletadas indicando a presença ou ausência de energia no espectro de RF. Sendo assim, para os casos extremos: $Pd = 1$ indica que todas as amostras sensoreadas estavam acima do valor definido por λ ; $Pd = 0$ indica o contrário.

3.4.2 Detalhamento do *Software de Controle*

A aplicação do *SCC* pode ser considerada híbrida, uma vez que parte do código faz chamadas a classes do *framework* GNU Radio e parte é escrita em Python nativo. No GNU Radio foram desenvolvidas as aplicações de DSP e recebimento das amostras da *SC*. A mesma aplicação instancia os blocos que desempenham as funcionalidades de processamento digital de sinais e também outras duas funcionalidades: comunicação com outros blocos e controle dos parâmetros de sensoriamento.

A aplicação que representa o *SCC* é executada por linha de comando, sendo passado, neste momento, um arquivo de configuração como parâmetro. No arquivo constam os endereços IP do *SC* que será monitorado e do *SISA* que receberá as informações processadas. Além destes, constam também os parâmetros que definem a configuração do receptor de RF e a forma com que o sensoriamento do canal será efetuado. Um exemplo de arquivo de configuração e o detalhamento de cada parâmetro está descrito no Apêndice B.

Após o aplicativo ser inicializado, o resultado de Pd é apresentado em uma interface gráfica em tempo real¹, conforme ilustrado na Figura 17. Na interface,

¹ Para reduzir carga computacional, a aplicação não possui interface gráfica na versão embarcada.

barra numérica informa o valor da variável Pd , que também pode ser visualizada na linha em azul do gráfico a direita. A linha vermelha mostra a variável T' após o teste por \mathcal{H}_0 ou \mathcal{H}_1 . O campo “*Sensing Cell*” indica o endereço IP e porta TCP da *SC* que fornece as amostras de RF. O campo “*RX Freq*” informa em qual frequência o *SC* está sintonizado. Os campos “*RX Gain*”, “*RX IF Gain*” e “*RX BB Gain*” permitem ajustar o ganho de entrada da *SC*. O campo “*Lambda*” permite ajustar o valor do limiar de detecção λ . A interface gráfica foi desenvolvida para ser simples, mas sem deixar de oferecer uma forma eficiente de visualizar o funcionamento do bloco *SCC*. Devido à flexibilidade do GNU Radio, outras interfaces mais elaboradas podem ser desenvolvidas em versões futuras da plataforma.

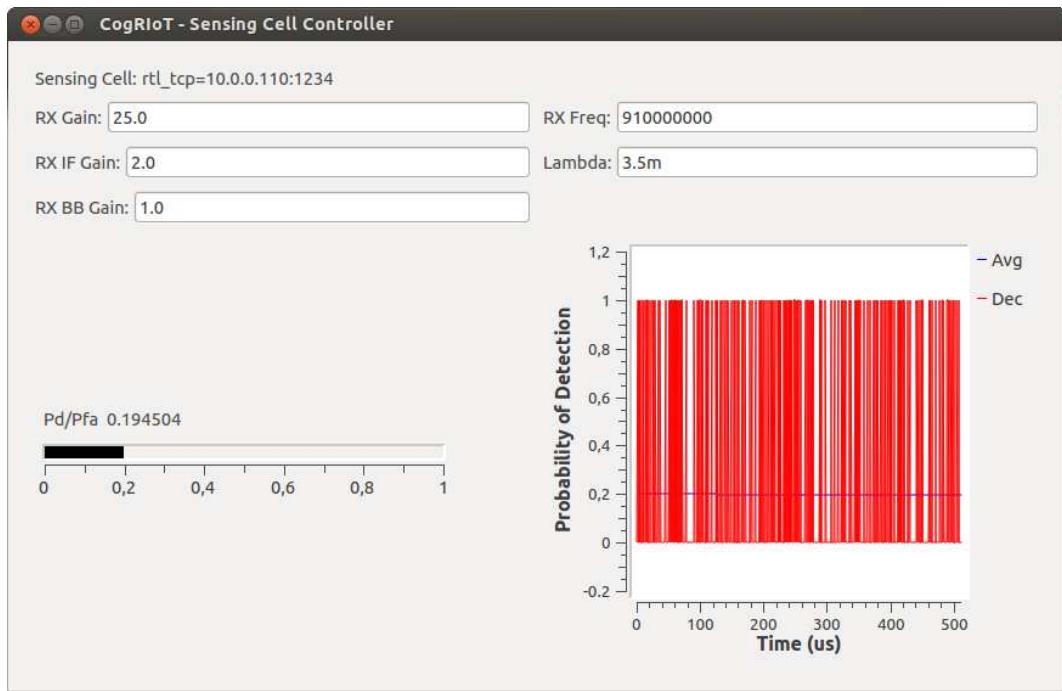


Figura 17 – Interface gráfica do bloco *Sensing Cell Controller*.

Para qualquer que seja o *hardware* para SDR, sempre existirá um limite máximo para a largura de faixa (BW – *bandwidth*) de operação do receptor. No caso do *hardware* utilizado nesta implementação, o limite de BW é de 2MHz. Um recurso importante do *SCC* é de permitir ao sistema realizar o sensoriamento espectral em uma BW maior que a BW limitada pelo *hardware* do receptor. Através do arquivo de configurações da *SC*, o *software* de controle identifica a BW onde o sensoriamento espectral deve ser realizado e também a BW do *hardware* da *SC*. Se a BW do receptor de RF for inferior à BW de interesse para o sensoriamento espectral, o *SCC* automaticamente divide a faixa do espectro

em fatias, cada qual com uma BW compatível com a da *SC*. Para permitir cobrir toda a faixa de interesse, o *SCC* comanda a troca de frequência de recepção do *SC* em intervalos de tempo predefinidos, permitindo assim que toda faixa a ser sensoreada seja coberta.

Se o canal a ser observado pelo *SC* for maior que a BW máxima do receptor de RF da *SC*, BW_{SC} , o número de divisões do espectro, k é definido como segue:

$$k = \frac{(\text{Frequência Final}) - (\text{Frequência Inicial})}{BW_{SC}} \quad (3.3)$$

A Figura 18 mostra como o *SCC* divide o espectro e realiza o sensoriamento espectral em uma faixa maior do que a capacidade do *SC*.

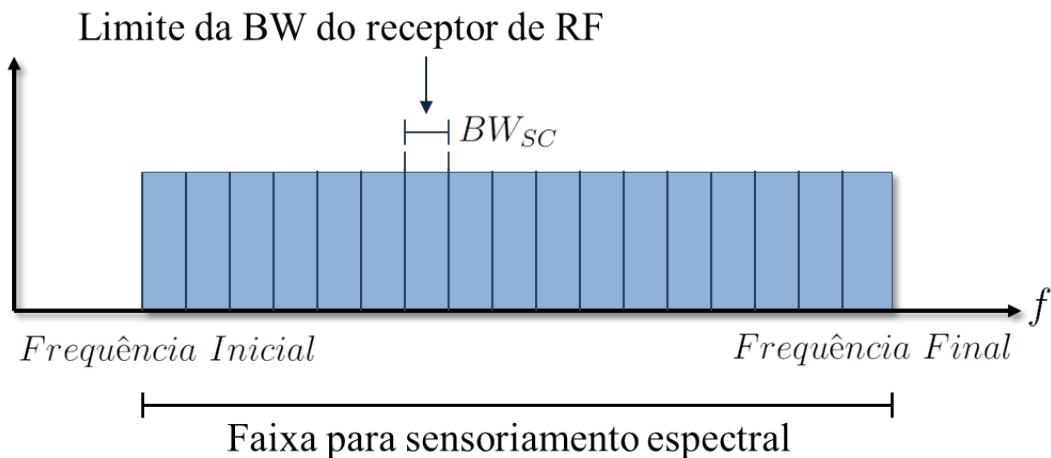


Figura 18 – Divisão do espectro em BW compatíveis com a do *hardware* da *SC*.

A divisão do espectro em diversas fatias permite o sensoriamento espectral em faixa larga. Como ponto negativo, o tempo total de sensoriamento é k vezes maior quando comparado à situação onde o *SC* tem BW suficiente para observar toda a banda de interesse. Além disso, a medida que a BW de sensoriamento é expandida, a taxa de amostras de RF recebidas pelo GNU Radio aumentam, resultando em consequente aumento de carga computacional.

3.4.3 Transmissão das Informações

O *SCC* deve transmitir a informação de sensoriamento do espectro de RF para o bloco *SISA*. Além das informações de sensoriamento espectral (variável Pd), o *SCC* envia os parâmetros descritos na Tabela 2. Estes parâmetros adicionais são necessários para permitir ao *SISA* identificar a fonte geradora dos dados de sensoriamento e também conhecer o momento em que a amostra foi coletada.

Tabela 2 – Dados transmitidos do bloco *SCC* para o bloco *SISA*.

Parâmetro	Descrição
cellid	Identificador único do <i>SCC</i>
msgid	Identificador único da mensagem transmitida ao <i>SISA</i>
date	Data e hora da coleta da amostra P_d
freq	Frequência sintonizada pela <i>SC</i>
channel	Canal sintonizado pela <i>SC</i>
sector	Seleção do arranjo de antenas reconfiguráveis
sensor	Valor de sensoriamento espectral P_d

A comunicação com o bloco *SISA* é realizada utilizando o protocolo de comunicação ZeroMQ (ZMQ) [79] e as mensagens envidas são codificadas em *strings* no formato JSON (*JavaScript Object Notation*) [80]. As informações de sensoriamento espectral são imediatamente transmitidas para o *SISA* para a finalização do processamento de detecção de energia. O *SCC* não armazena informações de sensoriamento.

3.5 *Sensing Information Storage and Analysis – SISA*

O bloco *SISA* (*Sensing Information Storage and Analysis*) possui duas funcionalidades principais: armazenamento das informações de sensoriamento espectral e processamento das informações de sensoriamento, em busca de maior conhecimento estatístico sobre o meio radioelétrico. Este bloco foi implementado em Python e já não faz mais uso do *framework* GNU Radio. As informações de um *SCC* são recebidas via protocolo ZeroMQ, portanto a arquitetura garante desacoplamento entre os demais componentes do sistema, podendo ser executado em outro computador e em outra localidade.

Cada bloco *SISA* tem capacidade de receber informações de um ou mais blocos *SCC*. Um bloco *SISA* realiza o armazenamento das informações e a análise de dados apenas nos módulos conectados diretamente a ele. Esta arquitetura constitui um sistema distribuído de armazenamento e processamento de dados. Se a quantidade de *SCCs* em uma região é muito grande, ultrapassando a capacidade de processamento de um bloco *SISA*, um outro bloco *SISA* pode ser instalado para dividir a carga computacional. A Figura 19 apresenta o diagrama em blocos do *SISA* e como ele está inserido na arquitetura da plataforma CogRIoT.

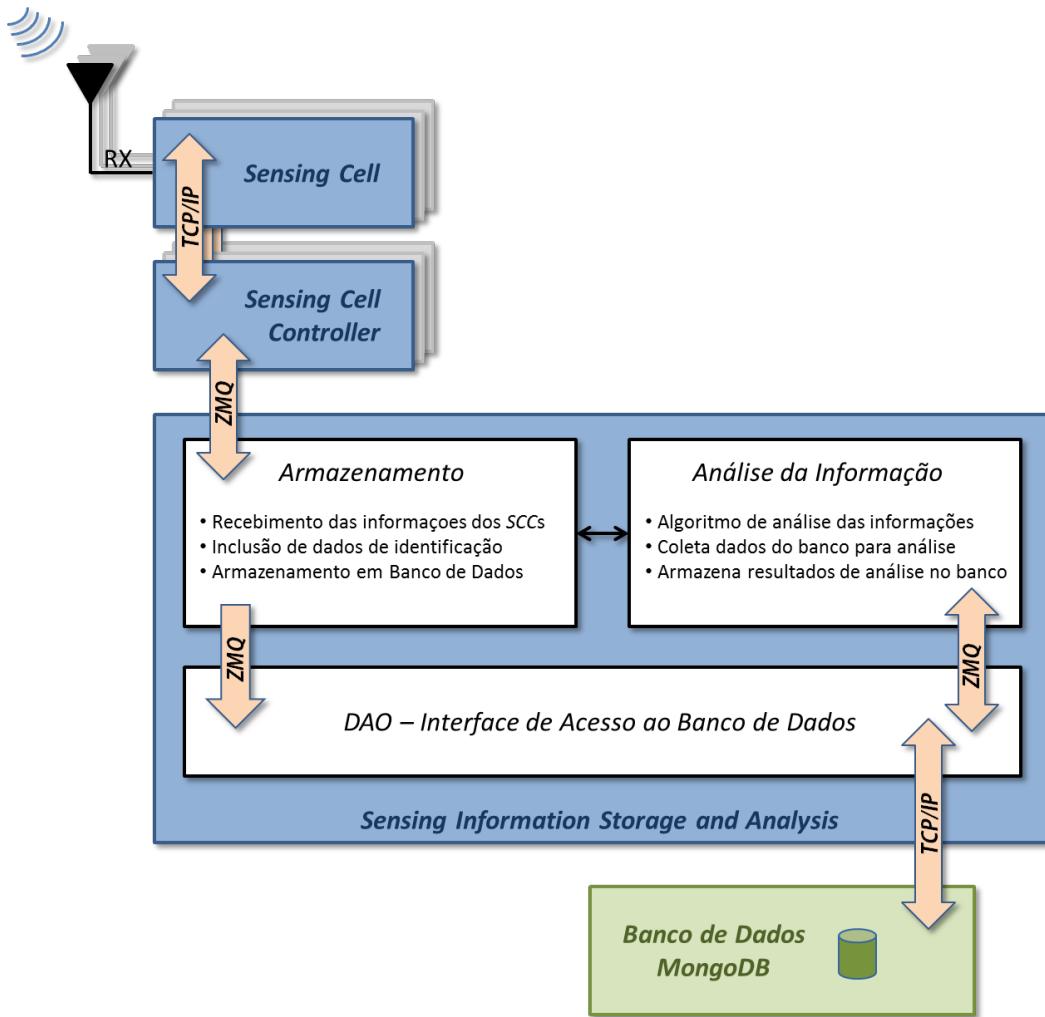


Figura 19 – Diagrama em blocos do *Sensing Information Storage and Analysis*.

3.5.1 Detalhamento do *Software de Armazenamento*

O bloco *SISA* armazena em um banco de dados todas as informações recebidas de um ou mais blocos *SCC*. O armazenamento das informações em banco de dados permite que algoritmos de análise façam consultas destas informações e crie um histórico de utilização do canal para geração de estatísticas. Desta forma, é possível que um algoritmo de análise identifique oportunidades de uso do canal baseadas em hábitos de acesso ao meio realizados por outros usuários.

Na plataforma desenvolvida foi utilizado o banco de dados MongoDB [81]. Este banco de dados do tipo NoSQL possui um modelo de armazenamento de dados baseado em arquivos, diferente dos tradicionais bancos de dados SQL que armazenam dados em estruturas orientadas por tabelas. Concebido para armazenar grande volume de informações que não necessariamente possuem a mesma estrutura, no MongoDB as informações podem ser armazenadas como

strings no formato JSON, e as consultas podem ser realizadas pelas chaves destas *strings*. A decisão de usar este banco foi tomada devido a esta última flexibilidade, que torna mais simples o processo de desenvolvimento, principalmente quando a estrutura dos dados muda constantemente. Mantendo a filosofia de arquitetura desacoplada, o *SISA* realiza o acesso ao banco de dados utilizando conexão Ethernet. Portanto, outro tipo de banco de dados pode ser utilizado mediante a implementação adicional de camada de acesso DAO (*Data Access Object*). Desta forma a implementação do *SISA* pode ser compatibilizada com outros banco de dados, não se limitando somente ao MongoDB.

A camada DAO foi implementada para prover os comandos necessários de acesso e manipulação do banco de dados. No momento da inicialização do *SISA*, um arquivo de configuração é passado como parâmetro. Neste arquivo um campo informa o endereço IP e porta TCP da instância do banco de dados MongoDB que será acessada através do DAO. A interação com o MongoDB é realizada através de um *driver* para Python, *PyMongo*, fornecido pelos próprios desenvolvedores do MongoDB.

3.5.2 Detalhamento do *Software* de Análise

O software de análise é um modulo dentro da plataforma do *SISA*. A funcionalidade deste módulo é analisar as informações provenientes dos blocos *SCC*, e gerar informações de maior relevância. O produto deste módulo, isto é, o resultado da análise, pode ser definido através de alguma necessidade específica de conhecimento do canal. Na implementação atual, como prova de conceito, o módulo de análise de informações consulta o banco de dados e calcula o uso médio do canal por dia, em intervalos de 4 horas, a partir das 0h. O resultado revela o uso estatístico de uso do canal, observado por cada *SCC*. Esta informação revela o uso de cada canal para diferentes horários do dia. Um usuário interessado em utilizar este canal, pode fazer uso desta informação estatística para selecionar o canal de comunicação, tendo conhecimento de como ele é alocado por outros usuários em determinados horários do dia.

O algoritmo de análise observa o banco de dados em busca de novas informações armazenadas. Quando pelo menos 50 novos registros são encontrados, o algoritmo os recebe e verifica a data e hora em que a amostra foi coletada pelo *SCC*. Fazendo uso desta informação, o valor médio do sensoriamento espectral é atualizado e armazenado no banco de dados, em uma coleção² destinada para

² No MongoDB, os diferentes arquivos que organizam o banco de dados são chamados de

este fim. No banco de dados, um arquivo é gerado para cada *SCC*. A Tabela 3 apresenta uma abstração de como os dados são armazenados no banco de dados. Para cada *SCC*, uma tabela deste tipo é mantida. Nas células da tabela, $Pd[i, j]$ armazenam o valor médio de energia para o canal de frequência $f[i]$, onde i é um índice que identifica o canal selecionado e j identifica o intervalo de 4h do dia em que o valor médio de sensoriamento foi obtido.

Tabela 3 – Estrutura do algoritmo de análise do bloco *SISA*, para cada *SSC*.

Canal \ Horas	0:00 3:59	4:00 7:59	8:00 11:59	12:00 15:59	16:00 19:59	20:00 23:59
$f[0]$	$Pd[0, 0]$	$Pd[0, 1]$	$Pd[0, 2]$	$Pd[0, 3]$	$Pd[0, 4]$	$Pd[0, 5]$
$f[1]$	$Pd[1, 0]$	$Pd[1, 1]$	$Pd[1, 2]$	$Pd[1, 3]$	$Pd[1, 4]$	$Pd[1, 5]$
$f[2]$	$Pd[2, 0]$	$Pd[2, 1]$	$Pd[2, 2]$	$Pd[2, 3]$	$Pd[2, 4]$	$Pd[2, 5]$
...

A atualização de cada valor de $Pd[i, j]$ é realizada calculando a média aritmética simples. Um histórico por dia é armazenado no banco de dados, o que pode permitir que uma análise comportamental de uso do canal por dia possa ser processada. Outras implementações mais complexas e elaboradas para o módulo de análise podem ser desenvolvidas. A sua funcionalidade pode ser direcionada para alguma necessidade especial da rede IoT ou da aplicação que irá utilizar o canal para se comunicar.

3.5.3 Divulgação de Conhecimento Sobre o Meio

O resultado da análise das informações realizadas pelo bloco *SISA* é armazenado em banco de dados, também identificando unicamente a fonte geradora da informação e detalhes de quando ela foi criada. O resultado da análise pode ser acessado por meio de uma consulta direta ao bloco *SISA*, que possui uma API para esta funcionalidade. Tal estratégia pode ser interessante para sensoriamento espectral em ambientes pequenos, onde apenas um *SISA* está presente. Quando mais de um bloco *SISA* está presente na plataforma CogRIoT, é fundamental centralizar a informação do conhecimento do canal observado por cada *SISA*. Desta forma, é possível que uma consulta à plataforma revele informações de uma região geográfica mais abrangente. Fazendo uma analogia, um bloco *SISA* pode receber informações de *SCCs* instalados em um bairro de uma cidade. Portanto cada bairro terá seu *SISA*. Se uma comunicação precisa ser estabelecida entre casas vizinhas, a consulta ao *SISA* pode ser suficiente. Mas para conectar dispositivos

coleções. É o equivalente a uma tabela em um banco SQL.

em avenidas que se estendem por mais de um bairro, a consulta centralizada será mais eficiente. O bloco *SISA* disponibiliza acesso via protocolo ZeroMQ para consulta direta ou para centralizar as informações através do bloco *Fusion Center*, apresentado a seguir.

3.6 Fusion Center – FC

Nesta concepção, o centro de fusão de informação, ou *FC* (*Fusion Center*), recebe as informações de um ou mais *SISA* de uma rede CogRIoT. As informações de diversos blocos *SISA* são mais uma vez analisadas e processadas, desta vez permitindo à plataforma correlacionar informações de posicionamento geográfico onde as informações de sensoriamento espectral foram obtidas. Portanto, o *FC* atua como um concentrador na plataforma CogRIoT.

Podendo ser único em uma rede CogRIoT, a plataforma também pode permitir a existência de níveis hierárquicos entre blocos deste tipo. Desta forma é possível definir macro células de informações de sensoriamento. Por exemplo em uma aplicação de *smart grid*, cada cidade poderia possuir um *FC* em um nível hierárquico inferior ao *FC* de um estado, conforme ilustrado na Figura 20. Esta arquitetura divide a carga computacional do *FC* e também reduz a densidade de tráfego de informações, constituindo um sistema distribuído de informações. De forma análoga à arquitetura de software apresentada para o bloco *SISA*, usuários interessados em conhecer o meio em determinada região geográfica podem realizar a consulta no *FC* daquela região.

3.6.1 Detalhamento do *Software* de Análise e Armazenamento

A arquitetura de software do *FC* também centraliza as informações em um banco de dados MongoDB. As informações que são recebidas dos blocos *SISA* são armazenadas em banco de dados. Novas informações são adicionadas permitindo ao *FC* identificar a fonte que gerou a informação e o momento em que ela foi obtida. Uma segunda análise nos dados poderia ser realizada, fazendo uso da informação de diversos *SISA*. Nesta implementação, o bloco de análise não foi desenvolvido e apenas uma instância de *FC* foi utilizada nos testes. Entretanto, a arquitetura de software utilizada não limita a plataforma somente às condições de teste. Na versão atual, o bloco *FC* permite disponibilizar informações de utilização do espectro de RF por região geográfica.

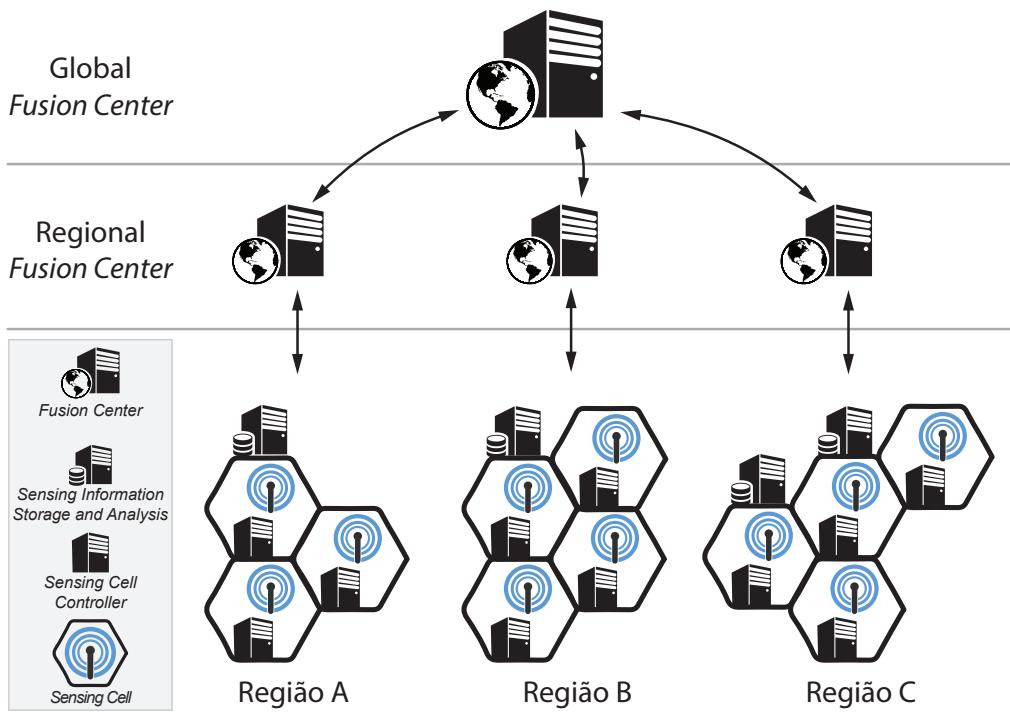


Figura 20 – Aplicação do CogRIoT em um ambiente com múltiplos FCs. Os FCs das regiões hipotéticas A, B e C, são conectados um FC global.

3.6.2 Alocação Dinâmica de Recursos

O bloco *FC* possui uma API onde as informações de sensoriamento espectral podem ser consultadas através de regras de pesquisa. A API permite que um usuário consulte a alocação do espectro por dia, por hora, por canal de RF e por região geográfica.

Uma rede IoT, ou outro usuário interessado em estabelecer uma comunicação sem fio, pode realizar uma consulta ao *FC* utilizando a API. Fica sob responsabilidade do usuário ajustar a frequência de operação que será utilizada na comunicação. A saída de Código 1 apresenta um exemplo de comando de consulta recebido pelo *FC*. Neste exemplo, a consulta não é específica a nenhum *SCC* e sim uma região geográfica específica, portanto o campo “*scc_id*” está vazio e o campo “*sensing_location*” informa uma coordenada geográfica. O campo “*sensing_freq*” informa a banda onde a consulta será realizada e o campo “*sensing_time*” indica o interesse no horário das 14h, que corresponde ao intervalo de horário compreendido entre as 12h e 15h analisado pelo algoritmo do *SCC*.

A resposta ao comando solicitado será gerada pelo *FC* de acordo com a listagem de Código 2. A resposta informa o identificador do *SCC* que forneceu os dados, sua localização geográfica, a data e hora em que a informação foi

```

1  {
2      "query": {
3          "scc_id": "",
4          "sensing_location": "-22.257360, -45.696651",
5          "sensing_freq": [915000000, 920000000],
6          "sensing_time": "14h"
7      }
8  }

```

Código 1: Exemplo de JSON recebido pelo *FC* para consulta de utilização do canal de RF.

transmitida e um vetor contendo valores de sensoriamento para cada frequência no intervalo solicitado. O melhor canal é calculado baseado no menor valor de sensoriamento deste vetor e disponibilizado no campo “best_channel”.

```

1  {
2      "response": {
3          "scc_id": "a65faefc-56f7-11e5-a483-001dbaeafa596",
4          "scc_location": "-22.257360, -45.696651",
5          "date": "2015-11-23T18:25:43.511Z",
6          "sensing": {
7              "915000000": "0.33",
8              "916000000": "0.32",
9              "917000000": "0.71",
10             "918000000": "0.49",
11             "919000000": "0.29",
12             "920000000": "0.35"
13         },
14         "best_channel": "919000000",
15     }
16 }

```

Código 2: Exemplo de JSON transmitido pelo *FC* em resposta a consulta sobre utilização do canal de RF.

3.7 Integração dos Blocos CogRIoT

As informações de sensoriamento espectral fluem na plataforma CogRIoT através dos blocos apresentados até aqui. Bloco a bloco, o valor cru da energia instantânea de uma observação do canal vai sendo associada a outras fontes e se tornando mais relevante no processo de decisão de um rádio cognitivo. A pirâmide de sabedoria, apresentada na Introdução deste capítulo, pode ser utilizada para mapear os blocos da plataforma CogRIoT, como mostrado na Figura 21.

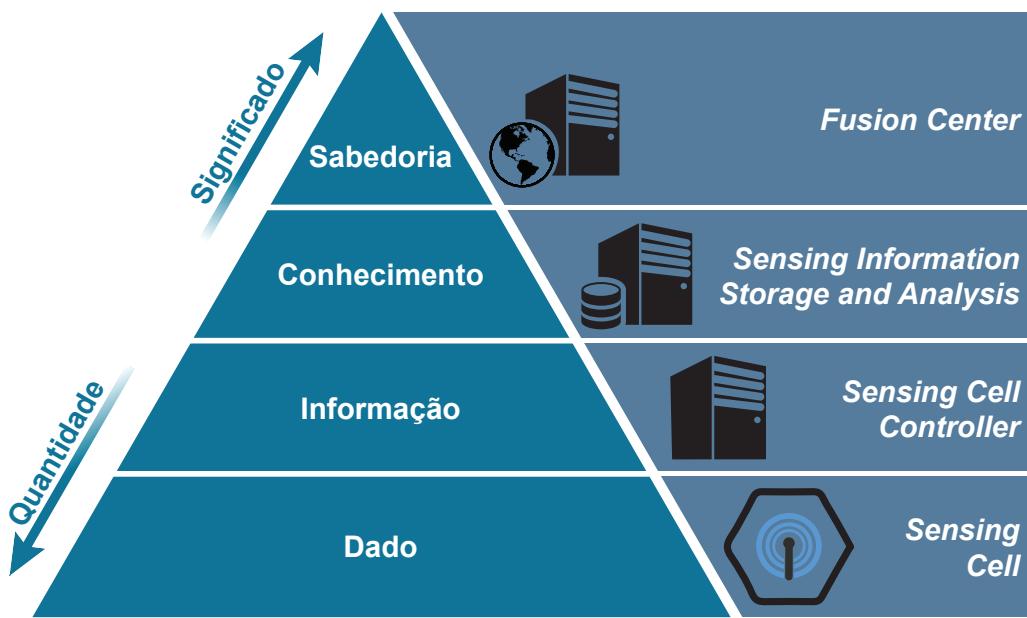


Figura 21 – Relação dos blocos CogRIoT na sabedoria sobre o canal.

Conforme o dado de sensoriamento é propagado pelos blocos, o seu significado passa a representar a alocação do canal de forma mais abstrata. Por meio da análise do dado coletado pelo *SC*, tem-se as amostras de RF coletadas no tempo, sem nenhuma informação adicional. O *SCC* calcula a energia destas amostras, adiciona informações de data e hora em que estas amostras foram processadas. O bloco *SISA* armazena, permite análise estatística de uma coleção de *SCCs* e identifica melhores canais para comunicação. Finalmente, o *FC* possibilita a divulgação do conhecimento do ambiente radioelétrico, para que interessados em estabelecer uma comunicação por meio dele, tenham *a priori* a informação sobre os melhores canais para isso.

Capítulo 4

Implementações e Resultados

4.1 RT-MSESS – *Real-Time Multi-Sector Embedded Spectrum Sensing*

Neste capítulo serão apresentados a concepção, desenvolvimento e os resultados experimentais de um sistema de sensoriamento espectral e espacial em tempo real, utilizando plataforma embarcada. O sistema leva o nome de **RT-MSESS** (*Real-Time Multi-Sector Embedded Spectrum Sensing*). O uso de um arranjo de antenas reconfigurável torna possível identificar o posicionamento geográfico do usuário primário em uma aplicação de sensoriamento espectral. Com informações sobre o posicionamento geográfico do usuário primário, é possível alocar usuários secundários em outras regiões geográficas. Desta forma, consegue-se estabelecer uma alocação mais eficiente do espectro de RF, sem interferir na comunicação do usuário primário. Foi também estudada a possibilidade de implementação de um sistema de sensoriamento espectral utilizando uma plataforma embarcada. Serão apresentados os resultados de desempenho do sistema construído, bem como notas sobre o desempenho e limitações da plataforma embarcada.

O conceito de arranjos de antenas reconfiguráveis tem sido aplicado amplamente nos sistemas de comunicação sem fio [82, 83]. Os benefícios mais relevantes são aumento de BW por usuário e ganho na eficiência de uso do espectro de RF. Seus parâmetros eletromagnéticos como banda de operação, padrão de radiação e polarização podem ser ajustados para atender a uma necessidade de comunicação específica.

Com o avanço da microeletrônica, os processadores de alto desempenho para aplicações embarcadas vêm se tornando cada vez mais acessíveis. Os chamados

SoC, ou *System on Chip*, oferecem uma significativa redução de custo e simplicidade de desenvolvimento. Recebem este nome pois, além do processador, no mesmo componente eletrônico já estão disponíveis diversos periféricos integrados. A implementação desta aplicação foi realizada utilizando uma placa de desenvolvimento onde um SoC, que agrupa uma região de FPGA (*Field Programable Gate Array*) e um processador de dois núcleos ARM Cortex-A9, foi utilizado na implementação do bloco detector de energia. A utilização de uma plataforma embarcada permite a criação de sistemas SDR mais compactos e de menor custo.

O RT-MSESS foi implementado para servir como bloco de sensoriamento espectral para um sistema de rádio cognitivo. Seu principal objetivo é observar o uso do canal de Wi-Fi, utilizando uma plataforma embarcada para execução do algoritmo de sensoriamento espectral. Como objetivo, o sistema se propõe a identificar a origem dos usuários neste meio em tempo real, respeitando os limites de capacidade computacional da plataforma embarcada. O detalhamento da implementação e resultado dos testes seguem no restante deste capítulo.

4.1.1 Arranjo de Antenas Reconfigurável

São chamados de reconfiguráveis os arranjos de antenas que, de alguma maneira, permitem que seus parâmetros eletromagnéticos sejam modificados durante seu funcionamento. Existem diversas formas de controlar estas características, sendo que na concepção do RT-MSESS foi utilizado um arranjo de antenas de três elementos construído de forma a ser eletricamente reconfigurável. Este arranjo de antenas recebe o nome de **ECRAA** (*Electrically-Controlled Reconfigurable Antenna Array*). O arranjo foi desenvolvido especificamente para este projeto, pela aluna do Inatel Marília Martins Bontempo, no laboratório WOCA/Inatel¹.

A construção do ECRAA é baseada em três elementos impressos em PCI (Placa de Circuito Impresso), cada um sendo um dipolo de meio comprimento de onda e também três elementos refletores, conforme mostrado na Figura 22a. No centro do arranjo, blindado pelos planos refletores, foi instalado um circuito eletrônico basicamente composto por uma chave de RF de fator 1:3. Este circuito permite eletronicamente selecionar o sinal de apenas um dos elementos da antena, deixando os outros dois elementos praticamente desligados, conforme diagrama da Figura 22b. A chave de RF utilizada no projeto (SKY13373) atenua em aproximadamente 30dB os elementos desligados. O outros modelos de chave de

¹ O desenvolvimento e os resultados do arranjo de antenas estão descritos no artigo *Low-cost Software-defined Wireless Cognitive Network based on Real-time Multi-Sector Spectrum Sensing and Reconfigurable Antenna Array*, submetido para publicação em dezembro de 2015.

RF poderiam ser empregados para oferecer uma atenuação maior aos elementos não selecionados, sem prejudicar o conceito proposto nesta aplicação. Além das conexões de RF, o circuito da chave de RF também possui um conector para alimentação elétrica e seleção de chaveamento.

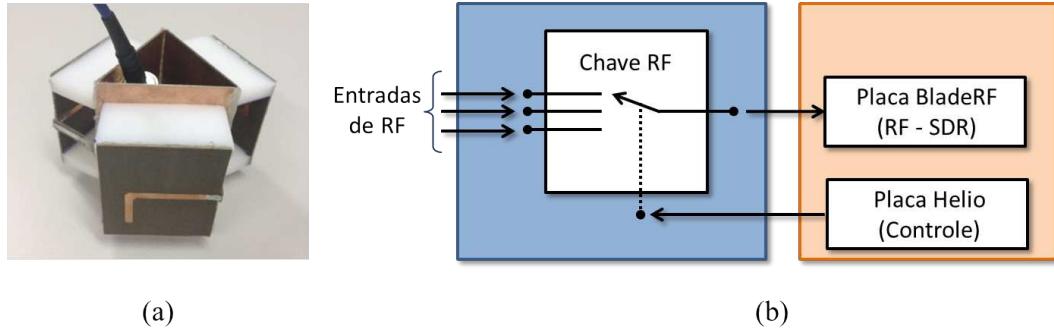


Figura 22 – (a) Fotografia do arranjo de antenas reconfigurável construído; (b) Diagrama em blocos da chave de RF.

O arranjo foi construído para operar na faixa ISM compreendida entre 2,4GHz a 2,5GHz. Cada elemento do arranjo foi desenvolvido com o objetivo de se obter uma abertura de 120° no lóbulo principal, de forma que ao chavear entre os três elementos, o arranjo de antenas consiga cobrir uma área de 360°. A Figura 23a apresenta o modelo tri-dimensional quando apenas um elemento está selecionado e a Figura 23b, o resultado numérico de simulação apresentando o diagrama de irradiação de cada elemento.

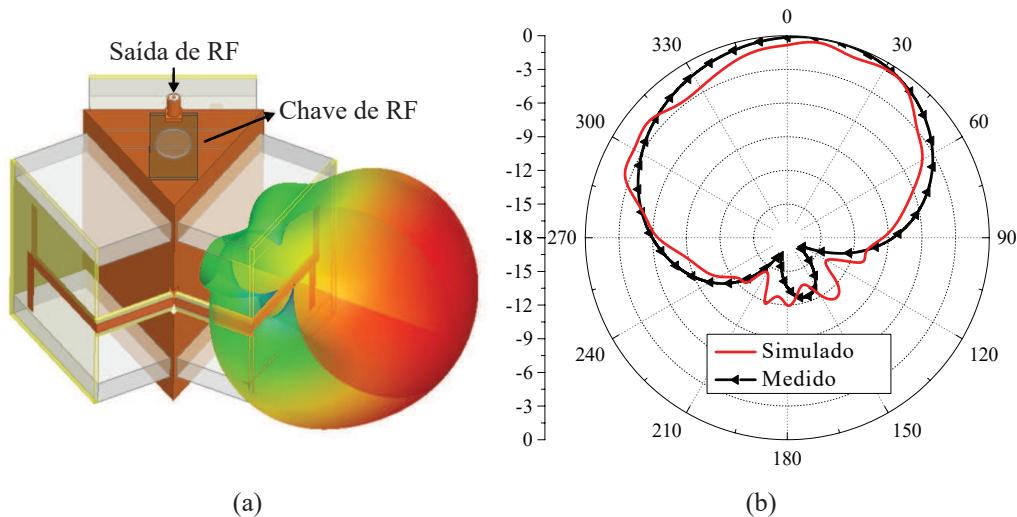


Figura 23 – (a) Modelo computacional e (b) diagrama de irradiação do arranjo de antenas reconfigurável ECRAA, quando apenas um elemento é excitado.

4.1.2 Detalhamento do Hardware

A implementação do RT-MSESS foi realizada utilizando os seguintes componentes (Figura 24): arranjo ECRAA; plataforma de RF para SDR e placa de processamento embarcada. Fabricada pela empresa Nuand [84], a placa BladeRF é uma plataforma para SDR equipada com um transceptor de RF que cobre a faixa de 300MHz a 3,8GHz. Esta possui uma interface USB 3.0 própria para trafegar dados entre a placa e um computador. A placa *Helio*, fabricada pela empresa Macnica [85], foi utilizada como plataforma embarcada para executar o algoritmo de sensoriamento espectral.

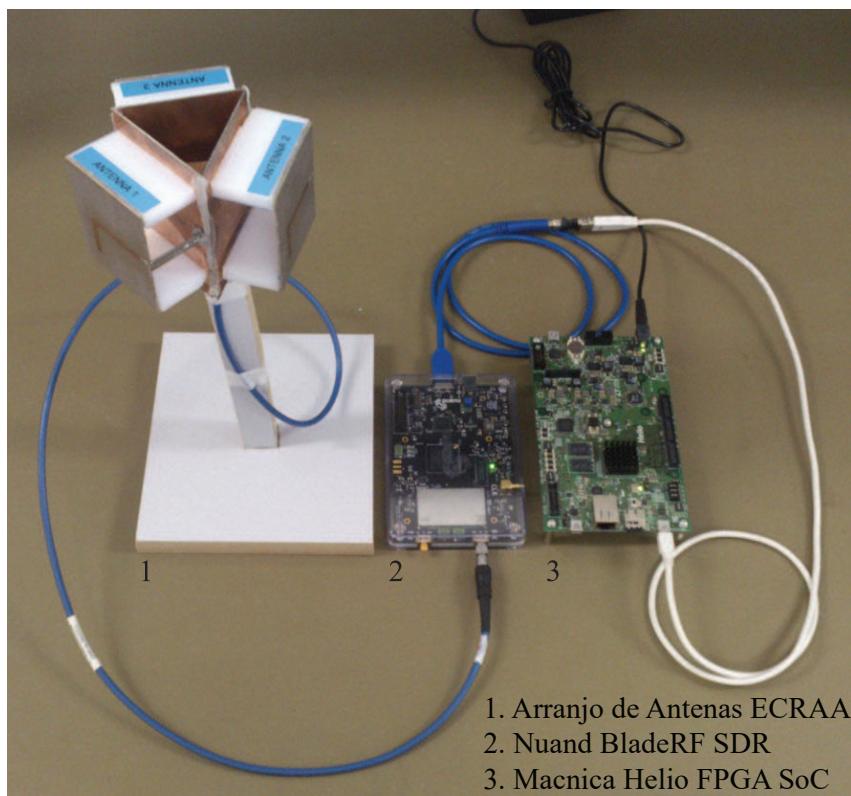


Figura 24 – Montagem do sistema RT-MSESS e todos seus componentes.

A Figura 25 ilustra o diagrama em blocos do sistema RT-MSESS. Os sinais recebidos pelo arranjo de antenas ECRAA são enviados para a plataforma SDR BladeRF, que demodula o sinal de RF recebido e o converte para digital. Este sinal digital é então transmitindo através da interface USB 3.0 para a plataforma de processamento embarcado *Helio*, onde o algoritmo de sensoriamento espectral irá processar as amostras recebidas.

A placa BladeRF possui um *front-end* de RF para transmissão e recepção simultânea. Nesta aplicação, apenas o modo de recepção foi utilizado. Esta

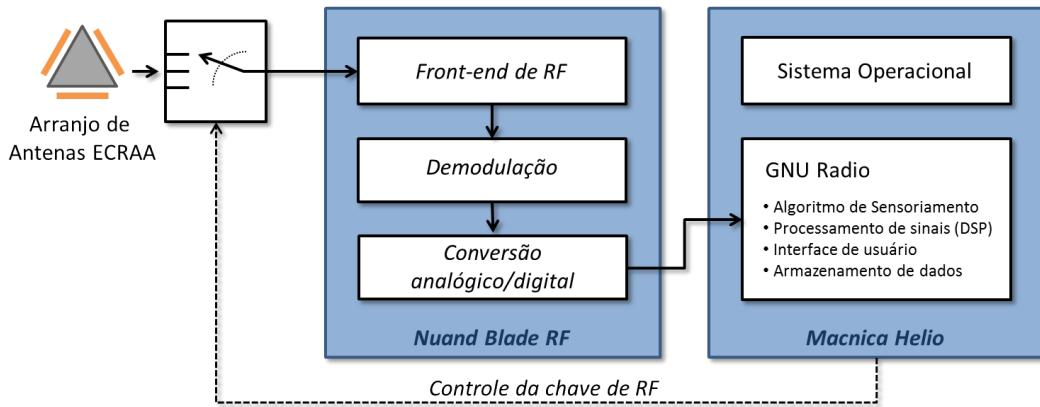


Figura 25 – Diagrama em blocos do sistema RT-MSESS.

placa realiza processamento básico das amostras recebidas, convertendo-as para o domínio digital, e precisa estar conectada a uma plataforma computacional, que irá desempenhar o processamento digital de sinais necessários a uma aplicação SDR. Na placa *Helio*, composta por um SoC Altera Cyclone V que integra um FPGA e um processador de dois núcleos, foi instalada uma distribuição Linux Debian e, nela, o *framework* GNU Radio. Os sinais para seleção do elemento ativo do arranjo ECRAA são gerados pela placa *Helio*. Através da aplicação desenvolvida, uma interface digital controla o circuito da chave de RF.

4.1.3 Algoritmo de Sensoriamento Espectral

A implementação do algoritmo de sensoriamento espectral por detecção de energia foi baseada na técnica apresentada no Capítulo 2. O algoritmo foi adaptado para se adequar às limitações do *hardware* da plataforma embarcada e a implementação foi realizada no *framework* GNU Radio. As amostras de RF recebidas são processadas conforme o diagrama em blocos da Figura 26.

A implementação do algoritmo que realiza o cálculo de detecção de energia foi realizado fazendo o uso de um filtro passa-baixas, que se comporta de forma semelhante ao cálculo de energia descrito na equação 2.2 [86]. O filtro tem topologia de primeira ordem IIR (*Infinite Impulse Response*). Com este filtro, é possível utilizar valores arbitrários para a variável N , sem necessariamente aumentar a quantidade de memória RAM consumida para o armazenamento de amostras. Isso torna essa técnica bastante adequada para a realidade das plataformas embarcadas, que possui quantidade limitada de recursos disponíveis. Pela equação 2.2, ao se ajustar o valor de N o comportamento do detector também é alterado. Neste filtro, é possível ajustar coeficientes que definem sua resposta em frequência, obtendo

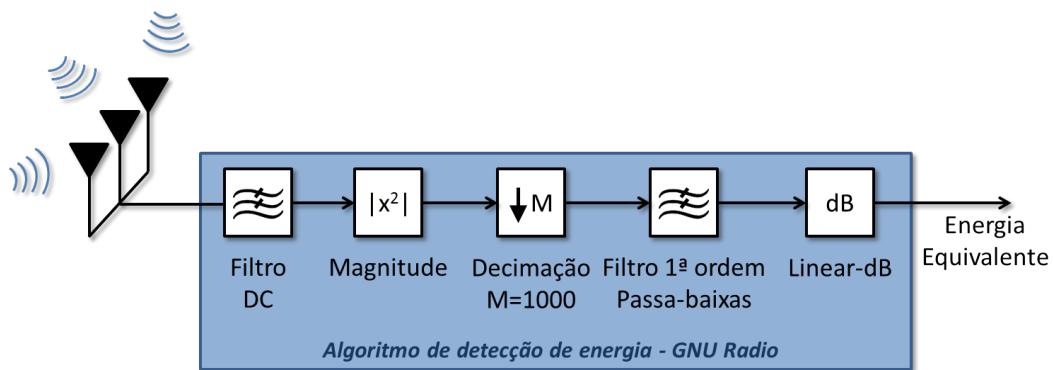


Figura 26 – Diagrama em blocos da aplicação de processamento digital de sinais que desempenha a detecção de energia.

resultados semelhantes.

Para avaliar o desempenho do detector de energia e encontrar seu ponto ideal de funcionamento, a curva ROC foi gerada para três valores de SNR, conforme apresentado na Figura 27. Os pontos da curva foram obtidos experimentalmente, utilizando uma aplicação especialmente construída para essa finalidade. Nesta aplicação SDR, controles permitem variar valores de SNR e coletar valores de P_D e P_{FA} .

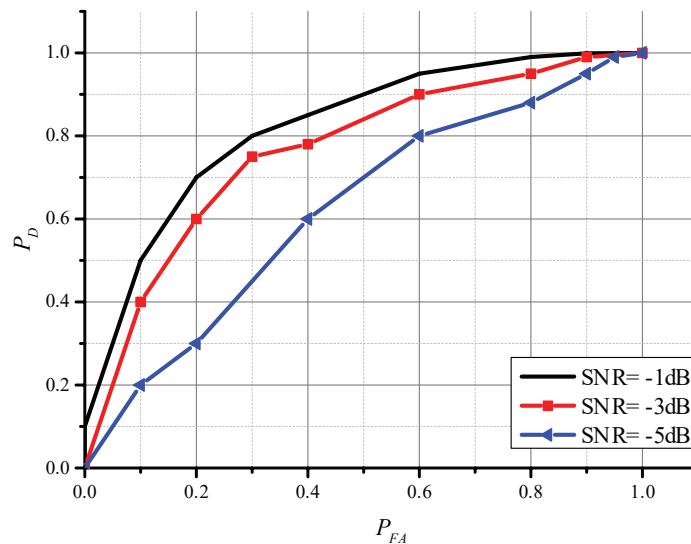


Figura 27 – Resultado experimental da curva ROC para o detector de energia.

Para a realização do sensoriamento espectral espacial, a aplicação desenvolvida controla dois terminais de GPIO da placa *Helio* que foram conectados na placa da chave de RF do arranjo ECRAA. Ativando um elemento por vez, o algoritmo de sensoriamento coleta informações de energia e as armazena para

análise futura.

4.1.4 Avaliação do Sistema RT-MSESS

O sistema foi experimentalmente avaliado no campus do Inatel. Dois rádios Wi-Fi (IEEE802.11b) foram utilizados para gerar comunicação na faixa ISM de 2,4GHz. Estes rádios TX_1 e TX_2 , foram configurados para usar uma largura de banda de 20MHz, com frequências centrais em 2,412GHz (Wi-Fi canal 1) e 2,452GHz (Wi-Fi canal 9) respectivamente. Em um ambiente com pouca influência de outros rádios Wi-Fi, o transmissor TX_1 foi posicionado perpendicularmente ao lóbulo principal do elemento 1 do arranjo ERCAA, a 5 metros de distância. O transmissor TX_2 foi posicionado perpendicular ao lóbulo principal do elemento 2, a 7 metros de distância. Um usuário foi posicionado próximo a cada um dos transmissores. A Figura 28 ilustra a montagem do ambiente.

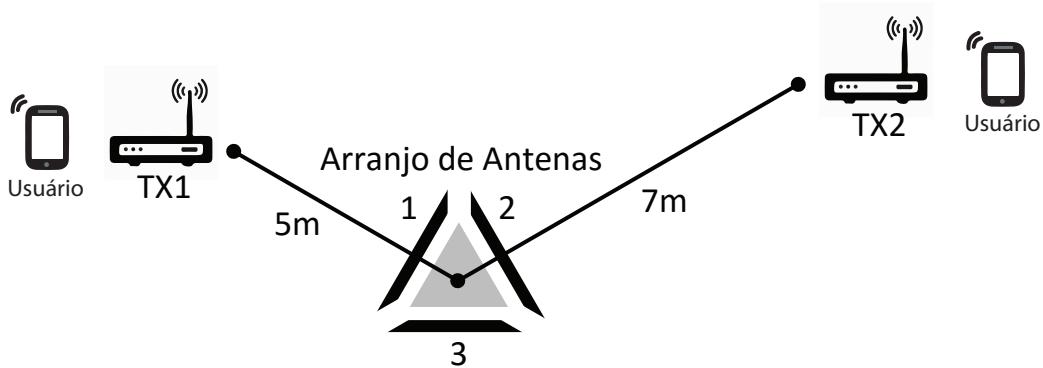


Figura 28 – Cenário de testes montado para avaliação do sistema RT-MSESS.

O objetivo principal do experimento é observar uma faixa de 100MHz entre 2,4 a 2,5GHz e avaliar a alocação espectral de cada um dos três setores detectados pelo arranjo de antenas reconfigurável. A placa *Helio* limitou a taxa de amostragem que pode ser configurada na placa *BladeRF*. Valores de BW acima deste valor resultaram em perda de amostras. Desta forma, para atingir o objetivo de observar uma BW de 100MHz, o algoritmo de sensoriamento divide esta BW em fatias conforme a Equação 3.3, e a energia de cada uma delas é calculada. Neste caso específico, como o sinal transmitido é conhecido, a BW de interesse foi dividida em 50 fatias de 2MHz, de forma a minimizar o tempo total de sensoriamento do espectro. A Figura 29 o sensoriamento espectral na BW de 100MHz.

Uma antena monopolo adicional foi utilizada nos experimentos para avaliar

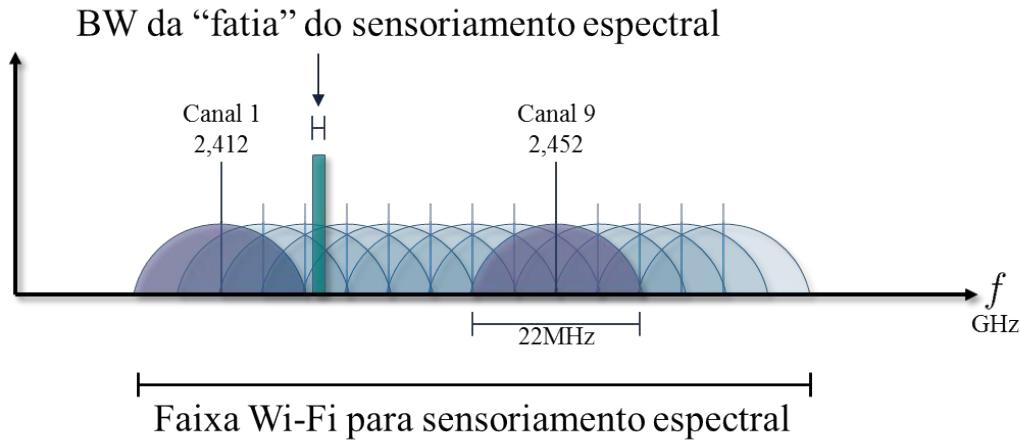


Figura 29 – Canais Wi-Fi, evidenciando os canais 1 e 9, e ilustração de uma fatia do espectro observada pelo algoritmo de sensoriamento espectral.

a eficiência obtida com o sistema RT-MSESS, com a finalidade de gerar resultados comparativos. Esta antena serviu para coletar os dados de sensoriamento de referência. Para recepção com a antena de referência a chave de RF não foi utilizada. Antes de iniciar o sensoriamento, o limiar de detecção do sistema λ foi ajustado para produzir um valor de $P_{FA} = 0,1\%$ com os dois transmissores desligados. Variando o valor de λ e observando a curva ROC foi possível definir o valor de $P_{FA} = 0,1\%$. Este ajuste foi realizado para a antena monopolo e também para o arranjo ECRAA. Com o valor do limiar ajustado, os transmissores foram ligados e o sistema RT-MSESS iniciou a coleta dos dados de sensoriamento. A antena monopolo e cada elemento do arranjo ECRAA foram utilizados para um sensoriamento espectral de 2 minutos de duração.

4.1.5 Resultados do Sistema RT-MSESS

Os resultados experimentais obtidos com o sistema RT-MSESS são reportados nas Figuras 30 e 31. Estas figuras representam a variável estatística de teste e o resultado final de decisão de ocupação, respectivamente. Particularmente, as Figuras 30a e 31a representam as medições de referência obtidas através do uso da antena monopolo. Neste primeiro resultado, é possível observar com bastante ênfase a presença dos sinais gerados pelo TX_1 e TX_2 nas frequências de 2,412 e 2,452GHz, respectivamente. Também é possível notar algumas incidências de detecção de falso alarme na Figura 31a, naturalmente causados pelo valor de $P_{FA} = 0,1\%$.

As Figuras 30b-d e 31b-d representam os resultados obtidos considerando

o sensoriamento espectral setorial, onde cada sub-figura representa um elemento do arranjo ERCAA. Nas Figuras 30b e 31b o elemento 1 do arraço identificou com maior ênfase o sinal do TX_2 , enquanto que as Figuras 30c e 31c detectam com maior ênfase, através do elemento 2, o sinal do TX_2 . As Figuras 30d e 31d ainda detectam uma pequena energia transmitida pelos dois rádios, mas com intensidade muito inferior.

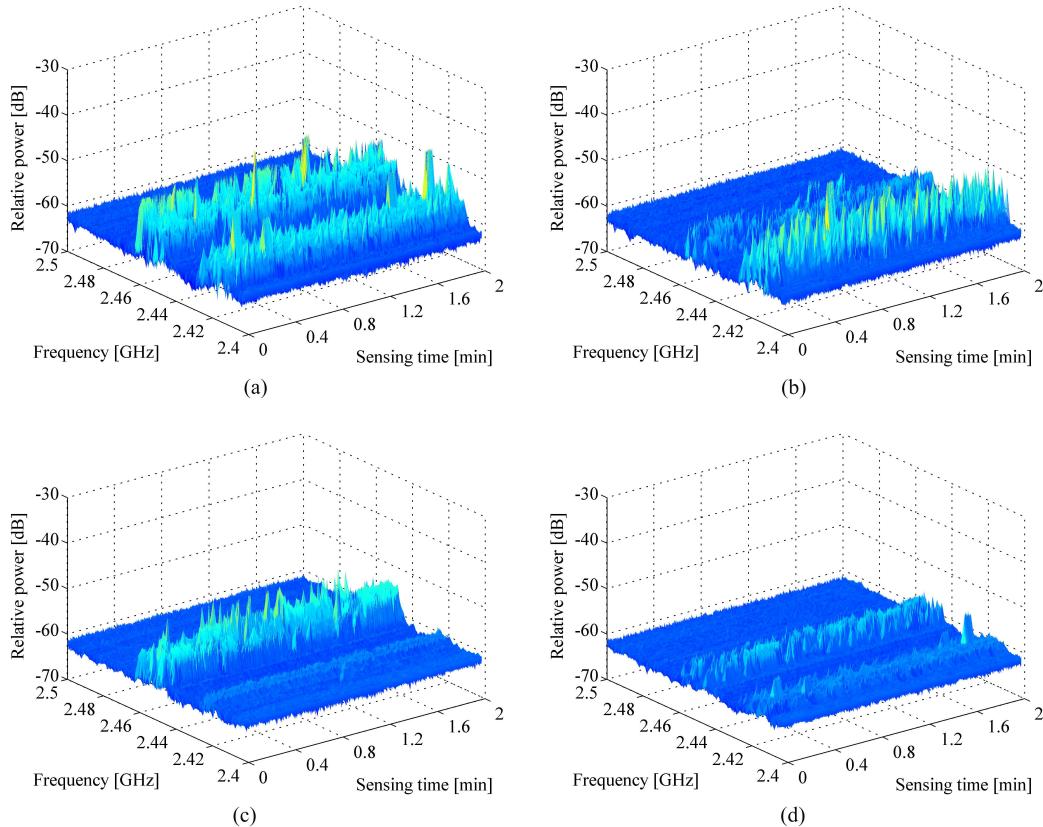


Figura 30 – Resultado da variável estatística de decisão T' . (a) Antena de referência monopolo; (b), (c) e (d) Elementos 1, 2 e 3 do arranjo de antenas reconfigurável, respectivamente.

Complementando a avaliação visual oferecida pelas figuras, uma representação numérica permite uma segunda avaliação da eficiência do sistema setorial quando comparado ao sistema não-setorial (antena monopolo). Fazendo uso dos mesmos dados que geraram as figuras, a Tabela 4 apresenta os resultados de alocação do espectro de RF identificados pelo RT-MSESS. Tais resultados foram coletados em ambiente de radio frequência não-controlado. Por este motivo, os resultados de detecção para cada transmissor varia de elemento para elemento devido a presença de múltiplos percursos e diferentes condições de propagação. Na tabela, ambos os transmissores são detectados pelo monopolo, mas não existe nenhuma informação que possibilite a identificação do posicionamento

geográfico destas fontes. Por outro lado, o uso do arranjo de antenas reconfigurável controlado eletricamente permite detectar a ocupação espectral e também o setor correspondente à localização geográfica de cada transmissor. É possível estimar com segurança que os transmissores TX_1 e TX_2 estão localizados nos setores onde o sensoriamento foi realizado pelos elementos 1 e 2 do arranjo, respectivamente. A precisão de localização poderia ser futuramente aprimorada através de um arranjo com, por exemplo, maior número de setores ou elementos, consequentemente resultando em menor largura de feixe (*beamwidth*) por elemento.

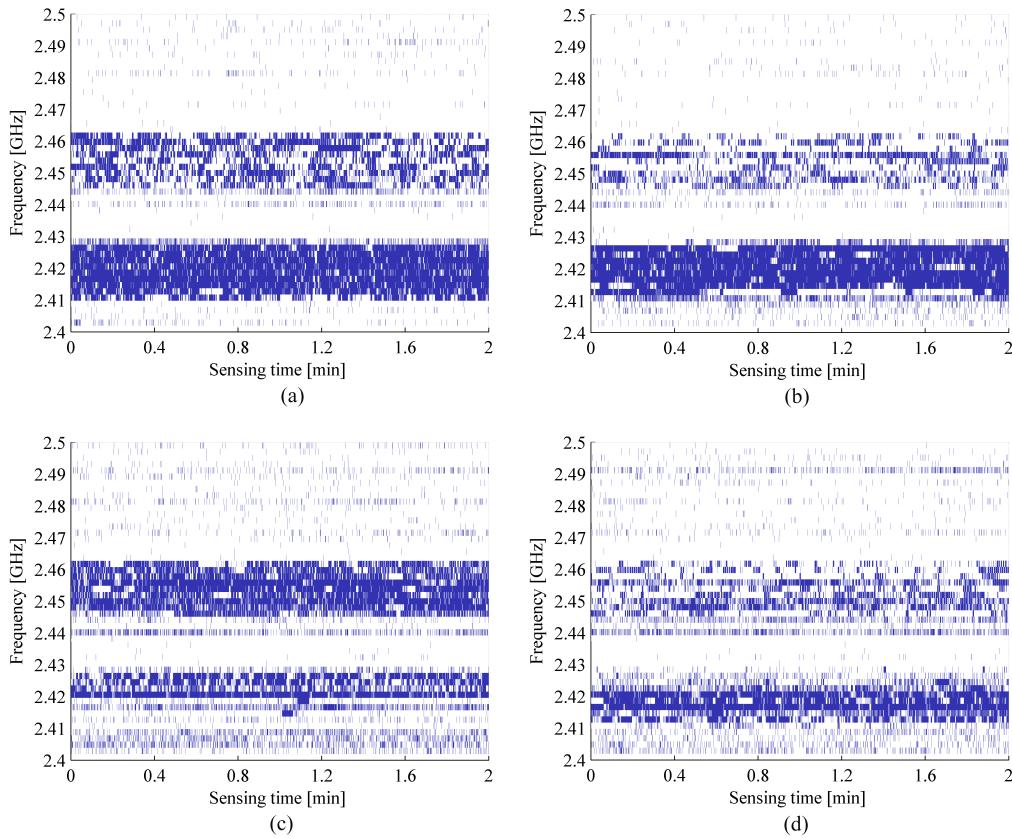


Figura 31 – Resultado da decisão final de alocação do canal. (a) Antena de referência monopolo; (b), (c) e (d) Elementos 1, 2 e 3 do arranjo de antenas reconfigurável, respectivamente.

Tabela 4 – Resultado de decisão de alocação do sistema RT-MSESS.

Frequência	Monopolio	Elemento 1	Elemento 2	Elemento 3
$TX_1 = 2.412\text{GHz}$	61,3%	75,7%	31,4%	25,1%
$TX_2 = 2.452\text{GHz}$	45,2%	25,4%	55,8%	35,2%

Sabendo que a plataforma embarcada utilizada na implementação possui limitações computacionais, o desempenho do algoritmo foi observado e comparado

ao desempenhado por um *notebook*. No estado atual do desenvolvimento do GNU Radio, não existe ferramenta alguma que permita instanciar um bloco de processamento em FPGA fabricados pela empresa Altera, com isso todo o processamento foi realizado na CPU da placa *Helio*. A memória RAM de 1GB da plataforma também limita o tamanho dos *buffers* com que o algoritmo pode trabalhar, consequentemente representando uma possível limitação para algoritmos DSP mais elaborados. Para fins comparativos, os dois processadores ARM da placa *Helio* atingiram 100% de utilização durante a execução dos testes de sensoriamento, enquanto que um *notebook* Intel Core 2 Duo de 2,53GHz com 4GB de memória RAM atingiu 40% de utilização média nos dois núcleos. O receptor de RF tem capacidade para receber, sem perda de amostras, uma BW de até 2MHz. Outras plataformas para SDR possuem BW de 20MHz ou mais, o que reduziria o número de fatias e tempo total de aquisição de amostras de RF.

Com a observação dos gráficos apresentados na Figura 31 e com os valores apresentados na Tabela 4, pode-se concluir que a técnica abordada em conjunto com o arranjo ECRAA viabiliza o sensoriamento espectral ao longo de múltiplos setores, que podem apresentar diferentes características de alocação espectral. O sistema apresentado identifica o posicionamento geográfico dos usuários dentro de regiões de sensoriamento espacial. Desta forma, o sistema oferece informações que permitem a um rádio cognitivo empregar diferentes características de alocação para cada um destes setores, de forma a aumentar a eficiência do uso do espectro. O uso de plataforma embarcada de baixo custo para sensoriamento espectral setorial foi considerado viável e, com o avanço tecnológico, algoritmos mais complexos poderão ser embarcados em plataformas de maior capacidade computacional.

4.2 Sensoriamento Espectral Cooperativo para IoT

Esta sessão descreve a implementação e apresenta análises de desempenho da plataforma de rádio cognitivo para Internet das Coisas – CogRIoT. Uma rede de sensoriamento espectral cooperativo foi implementada usando os blocos *SC* e *SCC* geograficamente distribuídos, conectados a um *SISA*.

Um ambiente onde dois usuários desejam estabelecer uma comunicação foi elaborado para avaliar o desempenho e a eficiência prática da plataforma CogRIoT. Fazendo uso de dois rádios, um para cada usuário, um link de comunicação deve ser estabelecido entre eles. Os rádios irão se comunicar na faixa espectral de 915MHz, destinada a uso ISM e bastante utilizada em aplicações de IoT. A faixa de 915MHz foi utilizada como prova de conceito, entretanto, a aplicabilidade do sistema pode

ser estendida para outras faixas de frequência, licenciadas ou não-licenciadas. Na faixa para uso não-licenciado, não existe garantia de disponibilidade do espectro de RF a todo momento. Os rádios poderão sofrer interferência e consequentemente a comunicação poderá ser prejudicada. Neste experimento, será mostrado como a interferência afeta a comunicação entre os rádios e como o sistema CogRIoT pode ser utilizado para melhorar de forma significativa a qualidade de comunicação sem fio.

4.2.1 Concepção do Experimento

Os rádios que irão formar o *link* de comunicação entre os usuários são kits de desenvolvimento que fazem uso do transceptor de RF CC1120, fabricado pela empresa Texas Instruments [87], apresentados na Figura 32. Estes transceptores de uso geral são de baixo custo e reconfiguráveis, oferecendo flexibilidade para definir o seu modo de operação. Os parâmetros utilizados no experimento estão consolidados na Tabela 5.



Figura 32 – Kit de desenvolvimento utilizado como rádio de comunicação no experimento.

Tabela 5 – Característica dos Rádios.

Recurso	Descrição
Frequência de Operação	902 a 927 MHz
Potência de Transmissão	-21, -17 e -14 dBm
Modulação Digital	2-GFSK
Largura de Banda	200 kHz
Taxa de Bits	150 kbps
Tipo de Transmissão	Por Pacote
Tamanho do Pacote	50 Bytes

Para a execução do experimento um ambiente de comunicação e sensoriamento foi montado como mostrado na Figura 33. Este ambiente busca reproduzir situações reais de comunicação entre dispositivos IoT, como por exemplo a comunicação entre um sensor e um roteador de borda (WSN).

Um par de rádios M_1 e M_2 foram utilizados como dispositivos IoT estabelecendo um *link* de comunicação. Os rádios foram dispostos em salas diferentes, cerca de 50 metros de distância um do outro. Não existe visada direta, mas o posicionamento permite a comunicação entre eles quando não existe a presença de interferência severa no canal. Próximo a cada rádio foi posicionado uma *SC* de forma que SC_1 e SC_2 pudessem realizar o sensoriamento de M_1 e M_2 , respectivamente. O experimento foi conduzido em canal real de RF, desta forma não é possível a isolação perfeita dos limites de RF detectados pelos *SCs*, conforme é ilustrado na Figura 33. Os *SCs* detectam, portanto, sinais vestigiais dos rádios vizinhos e isso é considerado uma situação normal nesta aplicação.

Um outro rádio M_{int} que atua como uma fonte de interferência foi inserido no ambiente, transmitindo sinais em momentos aleatórios. O rádio M_{int} se comporta como um usuário acessando o canal de RF, mas que não pertence à rede IoT dos rádios M_1 e M_2 , caracterizando desta forma, um ambiente de RF multiusuário. O rádio M_{int} foi arbitrariamente posicionado próximo ao rádio M_1 e sempre utiliza o canal na frequência de 921MHz. Detalhes do algoritmo de transmissão deste rádio estão descritos no Apêndice C, por hora, é importante saber que a probabilidade em que o rádio irá transmitir é um parâmetro ajustável.

Com os elementos do experimento posicionados, foi estabelecida a comunicação entre os rádios M_1 e M_2 para diferentes valores de RSSI (*Receiver Signal Strength Indication*). A variação do RSSI foi realizada por meio do controle da potência de transmissão do rádio M_2 . A probabilidade do rádio M_{int} transmitir também foi modificada para avaliar a influência de sua interferência no *link* de comunicação. A contagem da taxa de perda de pacotes – PER (*Packet Error Rate*),

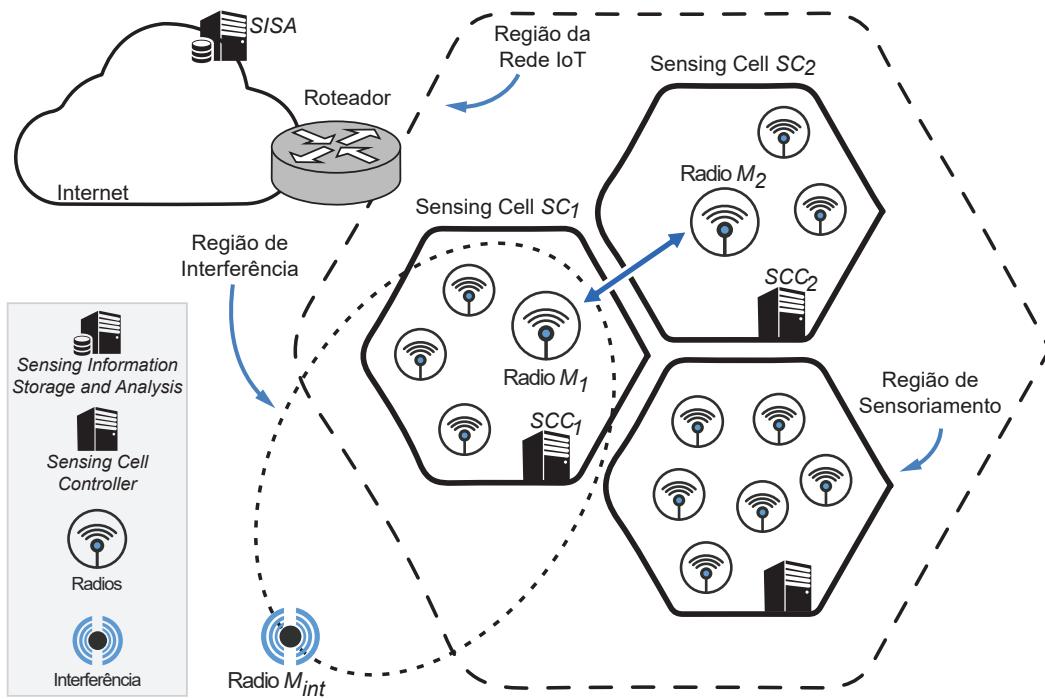


Figura 33 – Ambiente de comunicação sem fio mostrando blocos CogR IoT, rádios M_1 e M_2 e usuário interferente M_{int} .

foi a métrica utilizada para avaliar como a interferência prejudica a comunicação entre os rádios.

Inicialmente, foram coletados dados de PER para diferentes valores de RSSI enquanto o rádio M_{int} permanecia desligado. Depois, outros dados de PER foram coletados para cada valor de RSSI, ajustando diferentes valores de probabilidade de transmissão P_t do rádio M_{int} . A potência de transmissão do rádio M_{int} foi sempre a mesma para todos os experimentos. Seu valor absoluto não é importante, e foi ajustado arbitrariamente para causar perda de pacotes na comunicação entre M_1 e M_2 para valores baixos de RSSI. Os resultados destes experimentos estão apresentados na Figura 34. Cada ponto do gráfico apresenta o resultado de 5000 pacotes transferidos, para cada configuração de RSSI e P_t .

Em um primeiro experimento, foi considerado que os rádios não possuíam informações sobre o canal e arbitrariamente foram configurados para utilizar o canal com frequência central em 921 MHz, neste caso, compartilhando o canal com o rádio M_{int} . Pode ser observado através do gráfico que a medida que P_t aumenta o valor de PER também aumenta, indicando que a interferência do rádio M_{int} prejudica de forma significativa o *link* de comunicação.

O segundo experimento considera a informação coletada pela plataforma de

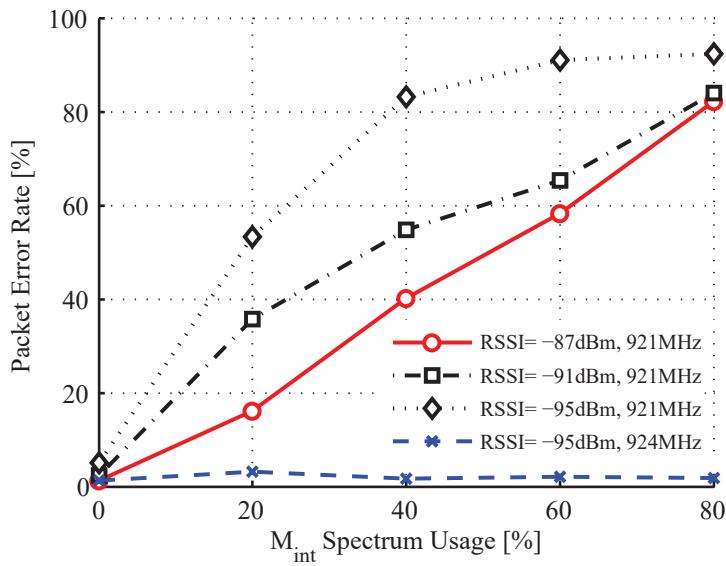


Figura 34 – Diferentes curvas de PER. Curvas em 921MHz obtidas em canal com interferência. Curva em 924MHz obtida em canal sem interferência fazendo uso da informação de sensoriamento da plataforma CogRIoT.

sensoriamento espectral CogRIoT. A Figura 35 apresenta os dados recebidos pelo *SISA* que foram gerados pelos *SCC*₁ e *SCC*₂. Pelo posicionamento geográfico dos rádios, somente o *SC*₁ detecta a presença de *M_{int}*. Desta forma, observando somente o sensoriamento realizado por *SC*₂ (Figura 35b), o canal 921 MHz seria informado como livre, caracterizando o problema de nó oculto (*hidden node*), característico em sistemas não-cooperativos de rádio cognitivo. Como, neste caso, a plataforma CogRIoT utiliza informações de dois *SCs*, na região do rádio *M*₁ este canal é detectado como em uso pelo rádio *M_{int}* devido ao sensoriamento realizado por *SC*₁ (Figura 35a). Com as informações do *SISA*, os rádios foram realocados para o canal de 924 MHz, indicado pelo bloco *SISA* como sendo o de menor utilização. Após a mudança, os rádios não mais compartilharam o canal com o rádio *M_{int}*, que permaneceu no canal 921 MHz. No gráfico da Figura 34, este experimento mostra que não existe mais a influência interferente do rádio *M_{int}* no *link* de comunicação, isto é, o valor de PER não é mais prejudicado por esta fonte de interferência, mantendo-se abaixo do limiar de 5%.

Os dados coletados por *SC*₁ e *SC*₂ após os rádios *M*₁ e *M*₂ terem sido realocados no canal 921 MHz estão apresentados na Figura 36. Neste caso é interessante notar a presença do sinal dos rádios *M*₁ e *M*₂ na frequência de 924 MHz. Pelo fato dos experimentos terem sido conduzidos em ambiente real, outros sinais são detectados pelas *SCs* e não são relacionados a este trabalho, sendo o mais notável na frequência de 917 MHz.

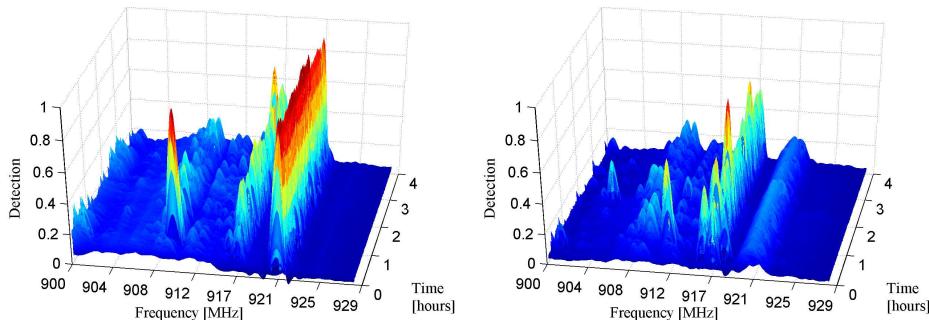


Figura 35 – Sensoriamento Espectral com rádios em 921 MHz: (a) Célula SC_1 e (b) Célula SC_2 .

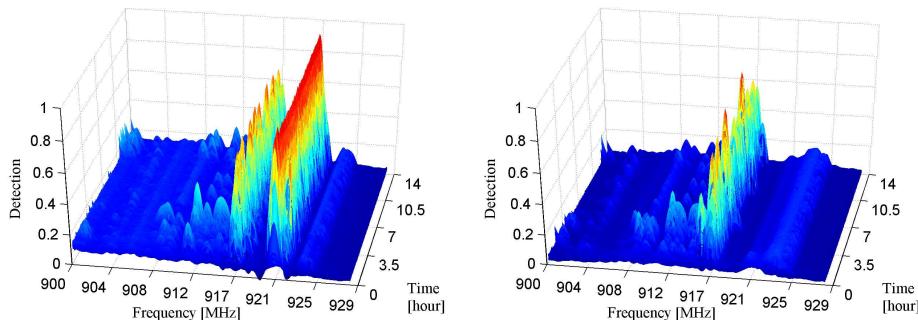


Figura 36 – Sensoriamento Espectral com rádios em 924 MHz: (a) Célula SC_1 e (b) Célula SC_2 .

4.2.2 Conclusões

Através dos dados obtidos do bloco *SISA*, foi mostrado que a plataforma CogRIoT permite aumentar a qualidade de um *link* de radio frequência por meio do fornecimento de informações de uso do espectro de RF. Também pôde-se concluir que a plataforma cooperativa de sensoriamento auxilia na detecção de fontes de interferência que poderiam não ser detectadas em um ambiente não-cooperativo.

Com este experimento, a plataforma CogRIoT foi avaliada do bloco *SC* ao bloco *SISA*, transformando dados de sensoriamento em informação de uso do canal. Esta informação ainda poderia ser associada a padrões e histórico de uso do canal, permitindo um conhecimento maior sobre as características dos usuários.

4.3 Integração de Sistema de Rádio Cognitivo na NovaGenesis

Esta sessão descreve a integração do sistema CogRIoT aos serviços de sensoriamento espectral do projeto NovaGenesis. O *software* de uma API (*Ap-*

plication Program Interface) foi desenvolvido para estabelecer comunicação com os serviços da NovaGenesis. Esta API permite que a NovaGenesis controle o comportamento dos blocos CogRIoT e obtenha informações coletadas por eles. Através desta interface, a NovaGenesis é capaz de utilizar os blocos *SC* e *SCC* para obter informações de uso do espectro de radiofrequência, que podem ser compartilhadas com outros elementos da rede NovaGenesis.

4.3.1 Serviços NovaGenesis de Sensoriamento Espectral

A API entre a plataforma CogRIoT e a NovaGenesis é estabelecida por meio de *serviços NovaGenesis*. Um serviço da NovaGenesis pode ter o objetivo de representar um elemento físico externo e expor seus recursos e funcionalidades. Nesta integração, o conjunto dos blocos *SC* e *SCC* da plataforma CogRIoT são considerados, do ponto de vista da NovaGenesis, como um único elemento externo que necessita ser representado por meio de um serviço NovaGenesis. Desta forma, outros serviços do sistema NovaGenesis podem interagir com estes blocos da plataforma CogRIoT.

Os primeiros serviços de sensoriamento espectral na NovaGenesis foram desenvolvido pelo então mestrando do Inatel, Msc. Lúcio Henrique de Oliveira [88], sob orientação do Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti. O estado atual do projeto NovaGenesis já contempla diversos tipos de serviços desenvolvidos, dentre os quais, os seguintes estão relacionados a sensoriamento espectral e alocação dinâmica de recursos.

- **Spectrum Sensing Service – SSS:** serviço para representar um sistema de sensoriamento espectral e expor os dados de sensoriamento para outros serviços NovaGenesis.
- **Resource Management Service – RMS:** serviço de tomada de decisões que, para isso, utiliza informações fornecidas por outros serviços. No contexto de sensoriamento espectral, este serviço toma a decisão sobre a alocação dinâmica de recursos.
- **Access Point Service – APS:** serviço que representa um rádio (*Wi-Fi access point*), podendo exercer controle sobre suas configurações de operação, como o canal em que opera, o nome que identifica a rede disponível entre outros modos de operação. O RMS pode definir as configurações do *access point* por meio do APS.

O serviço SSS foi customizado para representar os blocos de sensoriamento espectral da plataforma CogRIoT. O RMS e o APS são serviços internos da NovaGenesis e o detalhamento de suas funcionalidades está disponível em [88].

4.3.2 Integração da Plataforma CogRIoT ao Serviço NovaGenesis Spectrum Sensing Service

O serviço SSS, *Spectrum Sensing Service*, foi desenvolvido para permitir a exposição dos dados de um elemento de sensoriamento espectral para os serviços NovaGenesis interessados. Para integração do CogRIoT à NovaGenesis, uma nova versão do serviço SSS foi desenvolvida pelo Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti. Nesta nova versão, o serviço SSS e o bloco *SCC* se comunicam por uma API. Por esta, o SSS pode configurar o *SCC* e também obter informações de sensoriamento espectral para posteriormente disponibilizá-las para a NovaGenesis.

O serviço SSS comunica-se com o bloco *SCC* por meio de três conexões de rede TCP/IP que fazem uso do protocolo de comunicação ZeroMQ (ZMQ) [79]. Estas três conexões formam dois canais de comunicação, um de dados e outros de configurações. O canal de dados utiliza uma conexão ZMQ para transportar as informações de sensoriamento espectral obtidas pelos blocos *SC* e *SCC*. O canal de configuração é formado pela segunda e terceira conexões e é utilizado para que a NovaGenesis obtenha e envie configurações para estes blocos. A comunicação do serviço SSS com outros serviços dentro da nuvem NovaGenesis acontece por meio de conexão Ethernet, sem o uso de TCP/IP, a nuvem NovaGenesis possui

seu protocolo de comunicação próprio. A Figura 37 apresenta a conexão entre os projetos.

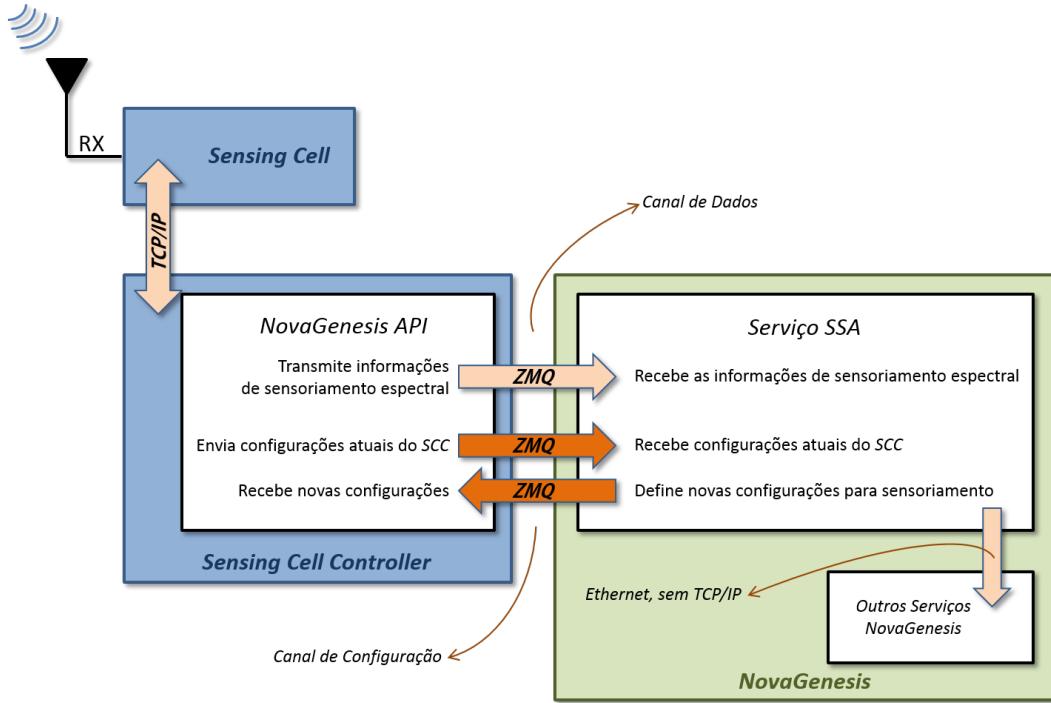


Figura 37 – Integração entre CogRIoT e o serviço NovaGenesis SSS.

Na inicialização do bloco *SCC* um arquivo de configurações define os três endereços IP e portas TCP que serão utilizados para a comunicação com o SSS. De forma semelhante, na inicialização do serviço SSS são informados por linha de comando os endereços IP e as portas TCP para acessar o *SCC*. O protocolo ZMQ possui, entre outras, uma arquitetura de comunicação PUSH/PULL, de forma que, para cada conexão, os dados seguem um sentido unidirecional PUSH → PULL.

As informações trocadas entre o SSS e o *SCC* são estruturadas em *strings* no formato JSON. Nessas *strings* as informações são codificadas em pares chave/valor onde o campo chave identifica o nome de um parâmetro ou comando, atrelado a seu respectivo valor. No canal de configuração a NovaGenesis pode realizar duas operações no *SCC*, por meio dos comandos “get_info” e “set_config”.

4.3.2.1 Comando “get_info”

O comando “get_info” é enviado pelo SSS ao *SCC* para solicitar os recursos de sensoriamento espectral disponíveis, informações de identificação da célula de

sensoriamento e os parâmetros da configuração atual de sensoriamento espectral. O envio do comando está na listagem de Código 3 e um exemplo de comando de resposta está representado na listagem de Código 4. No exemplo, a resposta ao comando “get_info” informa as capacidades de sensoriamento do *SCC* na chave *capacities*, as informações de identificação do *SCC* na chave *cell_info* e as configurações atuais de sensoriamento em *current_config*.

```

1  {
2      "get_info": ""
3 }
```

Código 3: Comando “get_info”, no formato JSON, transmitido pelo SSS e recebido pelo *SCC*.

```

1  {
2      "capacities": {
3          "sensing_freq_min": "100000000",
4          "sensing_freq_max": "1800000000",
5          "sensing_bw_min": "1024000",
6          "sensing_bw_max": "2048000",
7          "sensing_sectors": "1",
8          "sensing_direction": "0"
9      },
10     "cell_info": {
11         "scc_id": "5adc8dfc-66a0-11e5-a257-001dbaefa596",
12         "scc_location": "-22.257360, -45.696651"
13     },
14     "current_config": {
15         "sensing_freq_start": ["900000000", "-1"],
16         "sensing_freq_stop": ["930000000", "-1"],
17         "sensing_bw": "2048000"
18     }
19 }
```

Código 4: Exemplo de resposta ao comando “get_info”, no formato JSON, transmitido pelo *SCC* ao SSS.

4.3.2.2 Comando “set_config”

O comando “set_config”, que é enviado do SSS para o *SCC*, ajusta os parâmetros de sensoriamento espectral que deverão ser utilizados pelo *SCC*. É possível ajustar no *SCC* as frequências inicial e final da faixa de sensoriamento e a BW de cada fatia do espectro, como mostrado na listagem de Código 5.

```

1  {
2    "set_config": {
3      "sensing_freq_start": "400000000",
4      "sensing_freq_stop": "450000000",
5      "sensing_bw": "2048000"
6    }
7 }
```

Código 5: Exemplo de comando “`set_config`”, no formato JSON, transmitido pelo SSS ao *SCC*.

4.3.2.3 Dados de Sensoriamento Espectral

Os dados de sensoriamento espectral são transmitidos de forma contínua pelo *SCC*, pelo canal de dados em uma interface ZMQ PUSH. A listagem de Código 6 apresenta um exemplo de como os dados de sensoriamento espectral são enviados do *SCC* para o SSS. Na mensagem a chave `scc_id` identifica unicamente o *SCC* que gerou a informação, a chave `msgid` identifica a mensagem, a chave `date` identifica a data e hora em que a amostra de sensoriamento foi obtida, a chave `freq` identifica a fatia do canal de radiofrequência em que a amostra de sensoriamento foi obtida e a chave `sensor` informa o valor da variável P_d que, segundo a Equação 3.2, é o valor da probabilidade do canal estar alocado, calculado pelo *SCC*.

```

1  {
2    "scc_id": "0be07c0e-72d5-11e5-b3f6-001dbaefa596",
3    "msgid": "3846865045",
4    "date": "2015-10-17 18:43:14.389205",
5    "freq": "923000000",
6    "sensor": "0.235804"
7 }
```

Código 6: Exemplo de comando contendo os dados de sensoriamento espectral, transmitido pelo *SCC* ao SSS.

4.3.3 Conclusões

A integração entre os sistemas CogRIoT e NovaGenesis permitiu avaliar o serviço SSS, por meio da representação de um bloco *SCC* para outros serviços da NovaGenesis. Desta forma, outros serviços NovaGenesis como o RMS e o APS poderão ser futuramente avaliados com dados reais de sensoriamento espectral. Além disso, este resultado positivo poderá ser utilizado como ponto de partida para pesquisas e testes mais abrangentes na rede NovaGenesis como, por exemplo, o controle de roteadores e clientes Wi-Fi e também dispositivos originalmente concebidos para IoT. A Figura 38 apresenta fotografias dos monitores dos computadores durante a integração do bloco *SCC* CogRIoT ao serviço SSS da NovaGenesis.

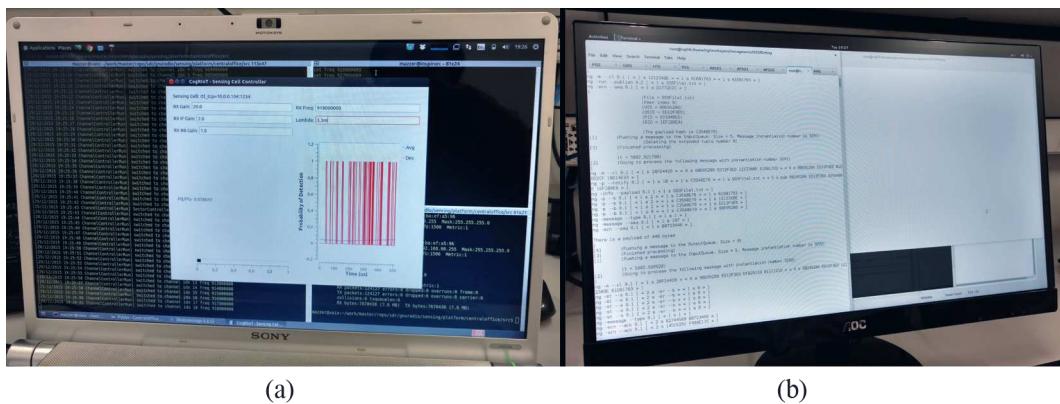


Figura 38 – Fotografia dos monitores durante a integração: (a) CogRIoT *SCC* e (b) NovaGenesis *SSS*.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

O trabalho foi realizado associando duas frentes de pesquisa em telecomunicações: Rádio Cognitivo e Internet das Coisas. A motivação foi criada pela observação das necessidades atuais das redes de dispositivos IoT e pelas pesquisas indicando um crescimento sem precedentes nesta área. Com o principal objetivo de otimizar a comunicação nestas redes, a plataforma de rádio cognitivo para Internet das Coisas, CogRIoT. Conceitos de sensoriamento espectral e rádio cognitivo foram aplicados nos casos de uso para dispositivos de baixíssimo custo e capacidade computacional, utilizando canais não-licenciados.

No Capítulo 1 foi apresentada uma introdução sobre o estado atual de pesquisa e previsões de crescimento das comunicações em redes sem fio e aplicações IoT. Também, foram apresentados outros trabalhos que serviram como ponto de partida para este.

No Capítulo 2 as tecnologias de telecomunicações aplicadas no desenvolvimento da plataforma foram introduzidas: Rádio Cognitivo utilizando sensoriamento espectral por detecção de energia; Rádio Definido por Software focado na utilização do *framework* GNU Radio; uma introdução aos dispositivos e redes para IoT e, por fim, a arquitetura NovaGenesis para Internet do futuro.

No Capítulo 3 foi apresentado o trabalho de concepção e desenvolvimento da plataforma de Rádio Cognitivo Embarcada para Internet das Coisas, CogRIoT. Os blocos que compõem a plataforma foram expostos em detalhes, e a importância de cada um deles no processo de valorizar a informação foi discutido. Foi mostrado também como o uso do banco de dados MongoDB e do protocolo de comunicação ZeroMQ foram extensivamente utilizados para a construção da plataforma, assim como o *framework* GNU Radio.

No Capítulo 4 foram descritas três implementações conduzidas durante

a elaboração deste trabalho. Cada implementação fez uso parcial dos blocos da plataforma CogRIoT, o que permitiu explorar detalhes de alguns blocos com maior profundidade. As implementações também permitiram extrair resultados de desempenho da plataforma em condições reais de uso. Foram mostrados resultados de testes em ambiente radioelétrico não-controlado, onde a realização do sensoriamento espectral pode ser aplicada a uma rede IoT em canal não-licenciado. O experimento mostrou que foi possível minimizar a perda de pacotes durante uma comunicação sem fio. Neste capítulo também foi realizada uma contribuição de integração dos blocos *SC* e *SCC* à NovaGenesis. Esta atividade permitiu avaliar o serviço NovaGenesis SSS representando um elemento *SCC* e, também, fornecer dados de sensoriamento espectral a outros elementos de sua rede. Com esta integração, a NovaGenesis possui um caso de uso onde esta atua como controlador de uma rede de rádios cognitivos.

Foi mostrado, que fazendo uso de plataformas embarcadas e plataformas para SDR de baixo custo, é possível construir sistemas complexos de rádio cognitivo e, ainda assim, obter resultados significativos que possibilitam obter conhecimento sobre o espectro radioelétrico. É importante citar que o sistema desenvolvido não se limita somente às frequências ISM onde os testes foram concebidos (915MHz e 2,45GHz). Pela natureza flexível das plataformas SDR, outras faixas do espectro também podem ser conhecidas pelo sensoriamento espectral da plataforma CogRIoT. Como proposta para trabalhos futuros, um sistema de conversão de frequência através da fotônica [89] pode ser utilizado para converter canais em faixas muito altas do espectro para faixas dentro dos limites dos receptores SDR de baixo custo.

Durante as pesquisas conduzidas pelo autor, ficou clara a importância da camada MAC para comunicação bem sucedida em ambientes com alta incidência de interferência. Novos protocolos MAC vêm sendo propostos para aplicações em IoT. O estudo destes protocolos e o desenvolvimento de algoritmos MAC que funcionem em sinergia com um sistema de sensoriamento espectral, recebendo e fornecendo informações sobre o canal, podem abrir uma nova frente de pesquisa no âmbito do rádio cognitivo e Internet das Coisas.

O IEEE vem trabalhando na definição de técnica TSCH (*Timeslot Channel Hopping*) para o protocolo de camada MAC padrão IEEE 802.15.4, muito utilizado em redes IoT. A aplicação desta técnica também busca o aumento de robustez de comunicação em redes de sensores [90]. Ainda não foram relatadas implementações completas e de código-fonte aberto do protocolo TSCH, tampouco existem transceptores de RF disponibilizando esta funcionalidade em *hardware*. De qualquer

forma, o trabalho proposto nesta dissertação não é invalidado devido a uma técnica de salto em frequência. Os resultados deste estudo podem complementar uma nova técnica onde a sequência de saltos pode ser definida a partir de informações de sensoriamento espectral.

Como proposta para continuidade da plataforma CogRIoT, outras técnicas de sensoriamento espectral poderiam ser avaliadas e implementadas. Com a utilização de plataforma de *hardware* SDR mais poderosa e algoritmos de detecção de energia por transformada FFT, pode ser possível a observação de uma faixa maior do espectro de RF, sem a necessidade de dividir o canal em muitas fatias. Outras técnicas de detecção de padrões poderiam ser pesquisadas e também implementadas, como a detecção de padrões de modulação Wi-Fi, Bluetooth, 802.15.4, DECT e outras. Um detector com estas características poderia extrair o tipo de usuário presente no canal e também disponibilizar esta informação para o *FC*. Experimentos com uma rede CogRIoT mais complexa, composta por um número maior de blocos *SC*, *SCC*, *SISA* e *FC*, poderia ser elaborada para avaliar desempenho, escalabilidade e possível detecção de usuários móveis. Outras formas de integração da plataforma CogRIoT com a NovaGenesis e seus serviços também poderia ser atividade para novos experimentos. Comparação com outras plataformas semelhantes também fica como proposta para trabalhos futuros.

Referências

- 1 CHUI, M.; LÖFFLER, M.; ROBERTS, R. The internet of things. v. 2, n. 2010, p. 1–9. Citado na página 19.
- 2 EVANS, D. The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. *CISCO white paper*, v. 1, p. 14, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 44.
- 3 Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index Forecast and Methodology, 2014–2019. *White Paper*, Cisco Systems, Inc., p. 14, may 2015. Citado na página 19.
- 4 VERMESAN, O.; FRIESS, P. *Internet of Things-From Research and Innovation to Market Deployment*. [S.l.]: River Publishers, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 20, 38, 39 e 40.
- 5 FOSCHINI, L. et al. M2m-based metropolitan platform for IMS-enabled road traffic management in IoT. v. 49, n. 11, p. 50–57. Citado na página 20.
- 6 FANTACCI, R. et al. A network architecture solution for efficient IOT WSN backhauling: challenges and opportunities. v. 21, n. 4, p. 113–119. Citado na página 20.
- 7 Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019. *White Paper*, Cisco Systems, Inc., p. 42, feb 2015. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- 8 Machina Research. M2M growth necessitates a new approach to network planning and optimisation. *White Paper*, Machina Research, p. 12, may 2015. Citado na página 20.
- 9 Agencia Nacional de Telecomunicações - ANATEL. <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2008/104-resolucao-506>>, acessado em 27 nov. 2015. Citado na página 21.
- 10 Agencia Nacional de Telecomunicações - ANATEL. 2015. Citado na página 21.
- 11 DOMENICO, A. D.; STRINATI, E. C.; BENEDETTO, M.-G. D. A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 14, n. 1, p. 21–44, 2012. ISSN 1553-877X. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.

- 12 TIMMERS, M. et al. A distributed multichannel MAC protocol for multihop cognitive radio networks. v. 59, n. 1, p. 446–459. ISSN 0018-9545, 1939-9359. Citado na página 21.
- 13 ZHANG, X.; SU, H. CREAM-MAC: Cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol over dynamic spectrum access networks. *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, v. 5, n. 1, p. 110–123, 2011. Citado na página 21.
- 14 CORDEIRO, C.; CHALLAPALI, K. C-MAC: A Cognitive MAC Protocol for Multi-Channel Wireless Networks. In: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 147–157. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 48.
- 15 LICHTENSTEIGER, B. et al. RF mesh systems for smart metering: system architecture and performance. In: *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*. [S.l.]: IEEE. p. 379–384. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.
- 16 ZigBee Aliance. *The ZigBee Aliance - Web Site*. <<http://www.zigbee.org/>>, acessado em 04 dez. 2015. Citado na página 22.
- 17 WINTER, T. et al. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks,(RFC 6550). *IETF ROLL WG, Tech. Rep*, 2012. Citado na página 22.
- 18 International Telecommunication Union - ITU. *What does ITU do?* <<http://www.itu.int/en/about/Pages/whatwedo.aspx>>, acessado em 10 nov. 2015. Citado na página 23.
- 19 Agencia Nacional de Telecomunicações - ANATEL. *Institucional*. <<http://www.anatel.gov.br/institucional/>>, acessado em 10 nov. 2015. Citado na página 23.
- 20 Federal Communications Commission - FCC. *What We Do*. <<https://www.fcc.gov/what-we-do>>, acessado em 10 nov. 2015. Citado na página 23.
- 21 EPHREMIDES, A.; WIESELTHIER, J.; BAKER, D. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling. *Proceedings of the IEEE*, v. 75, n. 1, p. 56–73, Jan 1987. ISSN 0018-9219. Citado na página 23.
- 22 LOY, M.; KARINGATTIL, R.; WILLIAMS, L. Ism-band and short range device regulatory compliance overview. *Texas Instruments*, 2005. Citado na página 23.
- 23 WATTEYNÉ, T.; ADJIH, C.; VILAJOSANA, X. Lessons learned from large-scale dense ieee802.15.4 connectivity traces. In: *Automation Science and Engineering (CASE), 2015 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 145–150. Citado na página 24.
- 24 NETO, E. R. *Concepção e Implementação da Tecnologia Rádio Cognitivo e Adaptativo sobre Fibra*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, março 2014. Citado na página 24.

- 25 RAIMUNDO-NETO, E. et al. Implementation of an optical-wireless network with spectrum sensing and dynamic resource allocation using optically controlled reconfigurable antennas. *International Journal of Antennas and Propagation*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.
- 26 ALBERTI, A.; SINGH, D. Developing a novagenesis architecture model for service oriented future internet and iot: An advanced transportation system scenario. In: *Internet of Things (WF-IoT), 2014 IEEE World Forum on*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 359–364. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 41.
- 27 MITOLA, J.; MAGUIRE G.Q., J. Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE*, v. 6, n. 4, p. 13–18, Aug 1999. ISSN 1070-9916. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 35.
- 28 DOYLE, L. E. *Essentials of Cognitive Radio*. [S.l.]: Cambridge University Press. ISBN 978-0-511-53367-9. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- 29 HAYKIN, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, IEEE, v. 23, n. 2, p. 201–220, 2005. Citado na página 27.
- 30 FCC, E. *Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order*. [S.l.]: December, 2003. Citado na página 27.
- 31 AKYILDIZ, I. F. et al. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, Elsevier, v. 50, n. 13, p. 2127–2159, 2006. Citado na página 27.
- 32 WANG, J.; GHOSH, M.; CHALLAPALI, K. Emerging cognitive radio applications: A survey. *Communications Magazine, IEEE*, v. 49, n. 3, p. 74–81, 2011. Citado na página 27.
- 33 AXELL, E. et al. Spectrum Sensing for Cognitive Radio : State-of-the-Art and Recent Advances. *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 29, n. 3, p. 101–116, maio 2012. ISSN 1053-5888. Citado na página 28.
- 34 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. ISSN 1553-877X. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 33.
- 35 WANG, W. Spectrum sensing for cognitive radio. In: . [S.l.]: IEEE. p. 410–412. ISBN 978-1-4244-6420-3. Citado na página 28.
- 36 YU, R. et al. Secondary users cooperation in cognitive radio networks: balancing sensing accuracy and efficiency. *Wireless Communications, IEEE*, v. 19, n. 2, p. 30–37, 2012. Citado na página 30.
- 37 KHAN, F.; NAKAGAWA, K. Comparative study of spectrum sensing techniques in cognitive radio networks. In: *Computer and Information Technology (WCCIT), 2013 World Congress on*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–8. Citado na página 30.

- 38 FAWCETT, T. An introduction to roc analysis. *Pattern recognition letters*, Elsevier, v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006. Citado na página 32.
- 39 PENG, F.; CHEN, H.; CHEN, B. On energy detection for cooperative spectrum sensing. In: *Information Sciences and Systems (CISS), 2012 46th Annual Conference on*. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1–6. Citado na página 32.
- 40 URKOWITZ, H. Energy detection of unknown deterministic signals. *Proceedings of the IEEE*, v. 55, p. 523–531, apr. 1967. Citado na página 32.
- 41 NADLER, B.; PENNA, F.; GARELLO, R. Performance of eigenvalue-based signal detectors with known and unknown noise level. In: IEEE. *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 1–5. Citado na página 33.
- 42 GANESAN, G.; LI, Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. In: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*. [S.l.]: IEEE. p. 137–143. Citado na página 33.
- 43 GANESAN, G.; Ye Li. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, part i: Two user networks. v. 6, n. 6, p. 2204–2213. ISSN 1536-1276. Citado na página 33.
- 44 GHASEMI, A.; SOUSA, E. S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments. In: IEEE. *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2005. p. 131–136. Citado na página 33.
- 45 JÚNIOR, R. A. d. S.; SOUZA, R. A. de; GUIMARÃES, D. A. Performance analysis of maximum eingenvale detection in nakagami-m and rice fading channels. Citado na página 34.
- 46 SINGH, A.; BHATNAGAR, M. R.; MALLIK, R. K. Cooperative spectrum sensing in multiple antenna based cognitive radio network using an improved energy detector. v. 16, n. 1, p. 64–67. ISSN 1089-7798. Citado na página 34.
- 47 BONDYOPADHYAY, P. K. Guglielmo marconi-the father of long distance radio communication-an engineer's tribute. In: IEEE. *Microwave Conference, 1995. 25th European*. [S.l.], 1995. v. 2, p. 879–885. Citado na página 35.
- 48 GOMERY, D. *A history of broadcasting in the United States*. [S.l.]: Wiley-Blackwell, 2008. Citado na página 35.
- 49 JOHNSON, P. New research lab leads to unique radio receiver. *E-Systems Team*, v. 5, n. 4, p. 6–7, 1985. Citado na página 35.
- 50 III, J. M. Software radios: Survey, critical evaluation and future directions. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, IEEE, v. 8, n. 4, p. 25–36, 1993. Citado na página 35.

- 51 Nutaq Innovations. *Major Boost For 5G Research As The 5G Development Center Opens.* <<http://www.nutaq.com/library/success-story-news/major-boost-5g-research-5g-development-center-opens>>, acessado em 13 nov. 2015. Citado na página 35.
- 52 The MathWorks, Inc. *LTE Transmitter using Zynq-based Software-Defined Radio (SDR).* <<http://www.mathworks.com/help/lte/examples/lte-transmitter-using-zynq-based-software-defined-radio-sdr.html>>, acessado em 13 nov. 2015. Citado na página 35.
- 53 Huawei Technologies Co., Ltd. *Huawei to Deploy Europe's First SDR-enabled Commercial GSM/UMTS SingleRAN Network for TeliaSonera in Finland.* <<http://pr.huawei.com/en/news/hw-062838-corporate-2-mcn-gsm-umtssoftswitch.htm>>, acessado em 13 nov. 2015. Citado na página 35.
- 54 ZTE Corporation. *One RAN One Dream - SDR Based Single Ran Network.* <http://www.zte.com.cn/cn/events/en_2009sdr/solutions/200908/t20090812_368790.html>, acessado em 13 nov. 2015. Citado na página 35.
- 55 BLOSSOM, E. Gnu radio as an experimental platform: Current capabilities and future directions. In: *Proceedings of the Second ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization.* New York, NY, USA: ACM, 2007. (WinTECH '07), p. 1–2. ISBN 978-1-59593-738-4. Citado na página 37.
- 56 RONDEAU, T.; CORGAN, J. *GNU Radio project Web Site.* <<http://gnuradio.org/>>, acessado em 20 nov. 2015. Citado na página 37.
- 57 BLOSSOM, E. GNU radio: tools for exploring the radio frequency spectrum. *Linux journal*, Belltown Media, v. 2004, n. 122, p. 4, 2004. Citado na página 37.
- 58 Ettus Research. *USRPTM X300 and X310X Series.* <http://www.ettus.com/content/files/X300_X310_Spec_Sheet.pdf>, acessado em 14 nov. 2015. Citado na página 38.
- 59 PERAL-ROSADO, J. del et al. Comparative results analysis on positioning with real lte signals and low-cost hardware platforms. In: IEEE. *Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), 2014 7th ESA Workshop on.* [S.l.], 2014. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 47.
- 60 AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. v. 38, n. 4, p. 393–422. Citado na página 38.
- 61 BHENDE, M.; WAGH, S. J.; UTPAT, A. A quick survey on wireless sensor networks. In: . [S.l.]: IEEE. p. 160–167. ISBN 978-1-4799-3070-8 978-1-4799-3069-2. Citado na página 38.
- 62 AKYILDIZ, I. et al. A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, v. 40, n. 8, p. 102–114, Aug 2002. ISSN 0163-6804. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 40.

- 63 SHIH, E. et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2001. p. 272–287. Citado na página 38.
- 64 GORLATOVA, M.; WALLWATER, A.; ZUSSMAN, G. Networking low-power energy harvesting devices: Measurements and algorithms. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 12, n. 9, p. 1853–1865, 2013. Citado na página 39.
- 65 BLANCKENSTEIN, J.; KLAUE, J.; KARL, H. A survey of low-power transceivers and their applications. *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, v. 15, n. 3, p. 6–17, thirdquarter 2015. ISSN 1531-636X. Citado na página 39.
- 66 AL-KARAKI, J. N.; KAMAL, A. E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. v. 11, n. 6, p. 6–28. Citado na página 39.
- 67 CHEN, T. et al. CogMesh: A cluster-based cognitive radio network. In: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*. [S.l.]: IEEE. p. 168–178. Citado na página 39.
- 68 WANG, Z. et al. A hybrid cluster-based target tracking protocol for wireless sensor networks. v. 2013, p. 1–16. ISSN 1550-1329, 1550-1477. Citado na página 39.
- 69 TUNA, G.; GUNGOR, V. C.; GULEZ, K. Wireless sensor networks for smart grid applications: A case study on link reliability and node lifetime evaluations in power distribution systems. v. 2013, p. 1–11. ISSN 1550-1329, 1550-1477. Citado na página 40.
- 70 Projeto Momote. *Plataforma brasileira para IoT Momote - Web Site*. <<http://momote.io/>>, acessado em 02 dez. 2015. Citado na página 40.
- 71 ALBERTI, A. M. *NovaGenesis - Nova Arquitetura de Internet*. [S.l.], 2014. Citado na página 41.
- 72 NovaGenesis Project. *NovaGenesis Project Website*. <<http://www.inatel.br/novagenesis>>, acessado em 07 dez. 2015. Citado na página 41.
- 73 PRADEEP, P. Research domains for cognitive radio: A survey. In: *IT Convergence and Security (ICITCS), 2015 5th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Citado na página 44.
- 74 Debian. *Debian - The Universal Operational System*. <<https://www.debian.org>>, acessado em 17 nov. 2015. Citado na página 46.
- 75 RTLSDR. *rtl_sdr Wiki - History and Discovery of rtl_sdr*. <http://rtl_sdr.org/#history_and_discovery_of rtl_sdr>, acessado em 17 nov. 2015. Citado na página 47.
- 76 Realtek. *RTL2832U DVB-T COFDM Demodulator + USB 2.0*. <<http://www.realtek.com.tw/>>, acessado em 17 nov. 2015. Citado na página 47.

- 77 OsmoCom. *Wiki rtl-sdr*. <<http://sdr.osmocom.org/trac/wiki/rtl-sdr>>, acessado em 17 nov. 2015. Citado na página 47.
- 78 THENNATTIL, J. J.; MANUEL, E. M. A novel approach in cooperative spectrum sensing for cognitive radio. In: *Intelligent Computational Systems (RAICS), 2013 IEEE Recent Advances in*. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 43–47. Citado na página 48.
- 79 iMatix Corporation. *ZeroMQ Distributed Messaging Website*. <<http://zeromq.org/>>, acessado em 07 dez. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 78.
- 80 CROCKFORD, D. *The json data interchange format*. [S.l.], 2013. Citado na página 53.
- 81 MongoDB, Inc. *MongoDB for GIANT Ideas*. <<https://www.mongodb.org/>>, acessado em 18 nov. 2015. Citado na página 54.
- 82 RAZAVILAR, J.; RASHID-FARROKHI, F.; LIU, K. Software radio architecture with smart antennas: a tutorial on algorithms and complexity. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 662–676, 1999. Citado na página 61.
- 83 CHRISTODOULOU, C. G. et al. Reconfigurable antennas for wireless and space applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 100, n. 7, p. 2250–2261, 2012. Citado na página 61.
- 84 Nuand LLC. *Nuand bladeRF Software Defined Radio*. <<http://nuand.com/>>, acessado em 20 nov. 2015. Citado na página 64.
- 85 Macnica Inc. *Macnica Americas*. <<http://www.macnica.com/>>, acessado em 20 nov. 2015. Citado na página 64.
- 86 TAVARES, S. E. A comparison of integration and low-pass filtering. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 1, p. 33–38. Citado na página 65.
- 87 Texas Instruments. *CC1120 High-Performance RF Transceiver for Narrowband Systems*. [S.l.]: Texas Instruments, 2015. <<http://www.ti.com/lit/ds/swrs112h/swrs112h.pdf>>. Folha de dados. Citado na página 72.
- 88 OLIVEIRA, L. H. de. *Contribuições no desenvolvimento de serviços de representação, controle e alocação dinâmica para a NovaGenesis*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, julho 2015. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 78.
- 89 BORGES, R. M. et al. Photonics-based tunable and broadband radiofrequency converter. *Optical Engineering*, v. 55, n. 3, dez 2016. Citado na página 84.
- 90 IEEE Computer Society et al. *IEEE standard for local and metropolitan area networks. Part 15.4, Amendment 1, Part 15.4, Amendment 1*,. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 978-0-7381-7225-5. Citado na página 84.

Apêndices

APÊNDICE A

Código Fonte da Plataforma CogRIoT

O código fonte da plataforma CogRIoT está disponível online no endereço <<https://github.com/dmazzer/CogRIoT>>. Neste endereço também estão disponíveis as instruções de preparação do ambiente computacional para a execução da plataforma.

A disponibilização livre do código fonte permite que a íntegra do trabalho desenvolvido possa ser aproveitado por outros pesquisadores e que eventuais melhorias na plataforma possam ser disponibilizadas para outros usuários.

A.1 Licença de Uso do Código Fonte

Para o código fonte desenvolvido (*Software*) neste trabalho aplica-se a licença MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), descrita a seguir.

```
# The MIT License (MIT)
# Copyright (c) 2016 Daniel Mazzer

# Permission is hereby granted, free of charge, to any person
# obtaining a copy of this software and associated documentation
# files (the "Software"), to deal in the Software without
# restriction, including without limitation the rights to use,
# copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or
# sell copies of the Software, and to permit persons to whom the
# Software is furnished to do so, subject to the following
# conditions:

# The above copyright notice and this permission notice shall be
# included in all copies or substantial portions of the Software
# .

# THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND,
# EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE
# WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR
# PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR
# COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER
# LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE
# , ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR
# THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE.
```

Código 7: Licença MIT que se aplica ao código desenvolvido.

APÊNDICE B

Arquivos de Configuração

Os arquivos de configuração da plataforma CogR IoT são escritos em formato INI. Cada um dos blocos *SCC*, *SISA* e *FC* possui um arquivo de configuração que é passado por linha de comando quando estes aplicativos são executados. Nas sessões seguintes um exemplo de arquivo para cada bloco é apresentado.

B.1 Arquivo de Configuração do Bloco *SCC*

```

1 [receiver]
2 samp_rate = 2048000
3 rx_gain_if = 2
4 rx_gain_bb = 1
5 rx_gain = 20
6 rx_freq = 917000000
7 rx_bw = 1024000
8
9 # SDR address, may be local (rtl=0) or
10 # remote (rtl_tcp=10.0.0.104:1234)
11 sensor_address = rtl_tcp=10.0.0.104:1234
12
13 [cellcontroller]
14 # local socket address to receive samples from gnuradio
15 listener_address = tcp://0.0.0.0:5050
16 # local socket to push consolidated sensing information
17 collector_push_address = tcp://0.0.0.0:5055
18 # unique identifier, created at first run
19 id = a65faefc-56f7-11e5-a483-001dbaefa596
20 # Number of the array elements or number of sectors covered
21 num_sectors = 2
22 # Geographic location of the antenna array
23 location = -22.257360, -45.696651
24 # Direction in degrees of the first sector element. (0=North)
25 direction = 0
26
27 [sensingprocessor]
28 threshold = 0.0035
29
30 [sensing]
31 # First frequency to be sensed
32 start_freq = 850000000
33 # Last frequency to be sensed
34 stop_freq = 950000000
35 # Band width of each spectrum slice
36 band_width = 2048000
37
38 [channelcontroller]
39 listener_address = tcp://0.0.0.0:5051
40
41 [sectorcontroller]
42 listener_address = tcp://0.0.0.0:5052
43
44 # NovaGenesis Interface
45 [novagenesis]
46 ng_remote_address = tcp://10.0.0.102:6001
47 ng_local_address = tcp://0.0.0.0:6000

```

Código 8: Exemplo de arquivo de configuração do bloco *SCC*.

B.2 Arquivo de Configuração do Bloco *SISA*

```

1 [sisa]
2 # unique identifier, created at first run
3 id = 5478da12-66a3-11e5-9f31-001dbaefa596
4
5 [sensingdatabase]
6 # Sensing database server address
7 address = mongodb://10.0.0.104:27017/
8 # Sensing database name
9 db = SensingData
10
11 [sensingreceiver]
12 # Listener port to receive sensing samples from SCCs
13 zmqpull_address = tcp://127.0.0.1:5155
14
15 [controldatabase]
16 # Control database server address
17 address = mongodb://10.0.0.104:27017/
18 # Control database name
19 db = SISAControl
20
21 [informationdatabase]
22 # Information database server address
23 address = mongodb://10.0.0.104:27017/
24 # Information database name
25 db = SISAInformation

```

Código 9: Exemplo de arquivo de configuração do bloco *SISA*.

B.3 Arquivo de Configuração do Bloco *FC*

```

1 [fusioncenter]
2 # unique identifier, created at first run
3 id = 342453ab-6667-121a-9f31-001dbaefa596
4
5 # ZMQ Listener socket to accept queries and SISA information
6 listener_address = tcp://0.0.0.0:7051
7
8 [informationdatabase]
9 # Information database server address
10 address = mongodb://10.0.0.105:27017/
11 # Information database name
12 db = FCInformation

```

Código 10: Exemplo de arquivo de configuração do bloco *FC*.

APÊNDICE C

Simulador de Uso do Canal de RF

Para avaliar a eficiência da plataforma de rádio cognitivo CogRIoT, na Sessão 4.2 foi proposto um cenário de rede sem fio composta por dispositivos IoT, que se comunicavam entre si. Neste cenário um rádio M_{int} atuava como uma fonte de interferência prejudicando a comunicação entre dois outros rádios. A concepção do rádio M_{int} foi realizada parte no GNU Radio e parte em Python, utilizando uma placa Blade RF para a geração de sinais de RF.

A interferência é gerada pela transmissão de um sinal aleatório no mesmo canal onde acontecia a comunicação entre outros rádios. O sinal transmitido foi gerado através de uma função geradora de ruído aleatório, já disponibilizada no GNU Radio. Um filtro passa baixas foi utilizado de forma que a largura de faixa do sinal transmitido pudesse ser controlada. A Figura 39 apresenta de forma simplificada o diagrama em blocos desenvolvido no GNU Radio.

A aplicação possui os seguintes parâmetros de configuração:

TX Frequency: Frequência central de transmissão.

TX Gain: Potência de transmissão relativa.

Signal BW: Largura de banda do sinal transmitido.

Interference ON%: Porcentagem média do tempo em que o rádio deverá estar transmitindo.

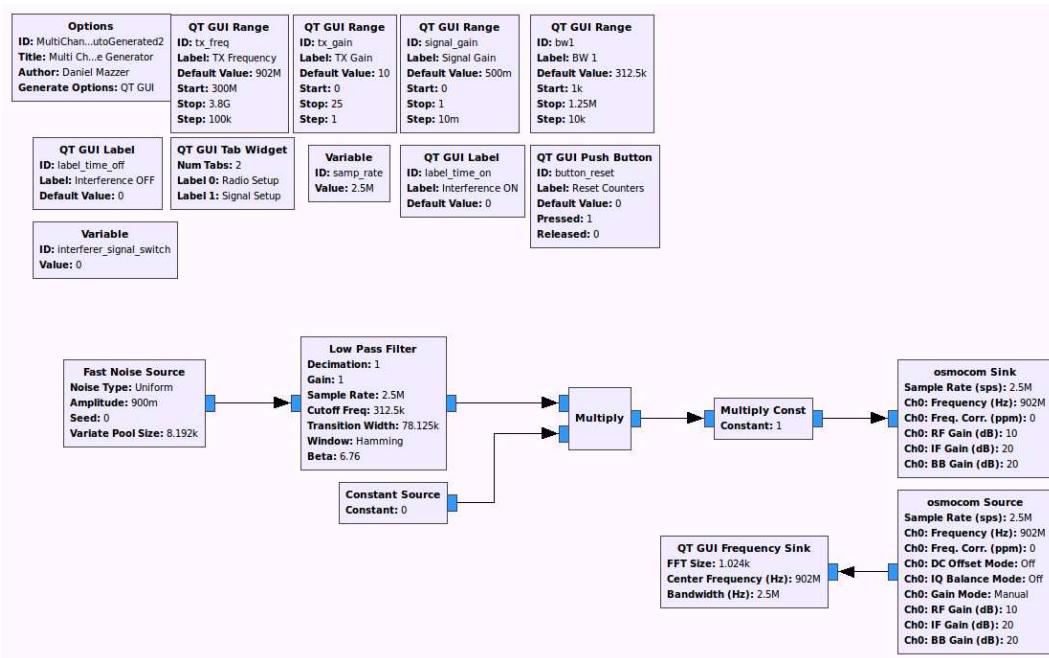


Figura 39 – Esquema implementado no GNU Radio do transmissor gerador de interferência (controle de probabilidade de transmissão omitido da figura).

O parâmetro *Interference ON%* permite definir a probabilidade do rádio transmitir. Esta funcionalidade, desenvolvida em Python, permite coletar dados de P_D e P_{FA} para a elaboração de gráficos de avaliação de desempenho de um sistema de sensoriamento espectral.

C.1 Código fonte do Simulador de Uso do Canal

```

1 ######
2 # GNU Radio Python Flow Graph
3 # Title: Channel Usage Simulator - Controlled Noise
4 # Generator
5 # Author: Daniel Mazzer
6 # Generated: Nov 14 2015
7 #####
8 import sys
9 import threading
10 import time
11 import datetime
12 import random
13 sys.path.append('../grc')
14
15 import MultiChannelNoise

```

```
16 | from PyQt4 import Qt
17 | from gnuradio import gr
18 | from gnuradio.eng_option import eng_option
19 | from optparse import OptionParser
20 | from distutils.version import StrictVersion
21 |
22 | # def getButtonStatus(tb):
23 | #     Qt.QMetaObject.invokeMethod(tb,
24 | #         '_button_reset_push_button', "setText", Qt.Q_ARG("QString",
25 | #             str(self.remotesensor_address)))
26 |
27 | def ChangeNoiseOnOff(NoiseStatus, OnProbability):
28 |     dice = random.randrange(0, 100, 1)
29 |     if dice <= OnProbability and NoiseStatus == 0:
30 |         Estado = 1
31 |         # print ('Ligou ' + str(dice))
32 |         tb.set_label_time_on(str(int(tb.get_label_time_on()
33 |             )+1))
34 |     elif dice > OnProbability and NoiseStatus == 1:
35 |         Estado = 0
36 |         # print ('Desligou ' + str(dice))
37 |         tb.set_label_time_off(str(int(tb.get_label_time_off()
38 |             )+1))
39 |     else:
40 |         Estado = NoiseStatus
41 |         if NoiseStatus == 0:
42 |             # print('Estado anterior (desligado) ' + str(
43 |             dice))
44 |             tb.set_label_time_off(str(int(tb.
45 |                 get_label_time_off())+1))
46 |         else:
47 |             # print('Estado anterior (ligado) ' + str(dice)
|         )
|         tb.set_label_time_on(str(int(tb.
|             get_label_time_on())+1))

48 | if int(tb.get_label_time_on()) > 0:
49 |     print('Total time:      ' + str((float(tb.
50 |         get_label_time_on()) + float(tb.
51 |         get_label_time_off()) ) ) ) + ' s')
```

```

48     print('Interference ON: ' + str((float(tb.
49         get_label_time_on()) / (float(tb.
50             get_label_time_on()) + float(tb.
51                 get_label_time_off())) ) * 100.0) + ' %')
52
53
54     return Estado
55
56
57 def setInterference(InterferenceState):
58     if InterferenceState == 0:
59         tb.set_interferer_signal_switch(0)
60     else:
61         tb.set_interferer_signal_switch(1)
62
63
64 def TimerThread(OnProbability):
65     next_call = time.time()
66     NoiseStatus = 0
67     while True:
68         OnProbability = int(tb.get_onpercent())
69         NoiseStatus = ChangeNoiseOnOff(NoiseStatus,
70             OnProbability)
71         setInterference(NoiseStatus)
72         #     print datetime.datetime.now()
73         next_call = next_call+1;
74         time.sleep(next_call - time.time())
75
76
77 def InitTimers(OnProbability):
78     timerThread = threading.Thread(name='TimerThread',
79         target=TimerThread, args=(OnProbability, ))
80     timerThread.daemon = True
81     timerThread.start()
82
83
84
85 if __name__ == '__main__':
86     parser = OptionParser(option_class=eng_option, usage="%prog: [options]")
87     (options, args) = parser.parse_args()

```

```
87     if(StrictVersion(Qt.qVersion()) >= StrictVersion("4.5.0")):
88         Qt.QApplication.setGraphicsSystem(gr.prefs().get_string('qgui','style','raster'))
89 qapp = Qt.QApplication(sys.argv)
90 tb = MultiChannelNoise.MultiChannelNoise()
91
92 tb._button_reset_push_button.connect(tb._button_reset_push_button, Qt.SIGNAL('clicked()'),
93                                         CounterResetPushButton)
94
95 OnProbability = int(tb.get_onpercent())
96
97 InitTimers(OnProbability)
98 tb.start()
99 tb.show()
100 def quitting():
101     tb.stop()
102     tb.wait()
103     qapp.connect(qapp, Qt.SIGNAL("aboutToQuit()"), quitting)
104     qapp.exec_()
105     tb = None #to clean up Qt widgets
106
107     input('press enter')
108     pass
```

Código 11: Código do Simulador de Uso do Canal.

APÊNDICE D

Publicações

Os seguintes artigos estão transcritos neste Apêndice:

- ① D. Mazzer ; M. M. Bontempo ; Arismar Cerqueira S. Jr. ; **Low-Cost Embedded Cooperative Cognitive Radio for Internet of Things.** In: IEEE Iberchip, 2016, Florianópolis. Proceedings of Iberchip 2016, 2016. Aceito para publicação em 05 de janeiro de 2016.

- ② A. M. Alberti ; D. Mazzer ; M. M. Bontempo ; Lucio H. de Oliveira ; Arismar Cerqueira S. Jr. ; **Convergent Solution of Future Internet and Cognitive Radio in the Context of Internet of Things.** Computers & Electrical Engineering, Elsevier.
Em processo de revisão desde 25 de fevereiro de 2016.

- ③ D. Mazzer ; M. M. Bontempo ; A. M. Alberti ; Arismar Cerqueira S. Jr.; **Low-cost Software-defined Wireless Cognitive Network based on Real-time Multi-Sector Spectrum Sensing and Reconfigurable Antenna Array.** Microwave and Optical Technology Letters (Print), 2016. Aceito para publicação em 04 de abril de 2016.

- ④ J. C. Silva ; F. Andery ; D. Mazzer ; E. P. Frigieri ; Arismar Cerqueira S. Jr. ; L. D. P. Mendes ; **Factorial Design Analysis Applied to the Performance of Transmission Power Optimization Techniques for Wireless Sensor Networks.** IEEE Iberchip, 2016, Florianópolis. Proceedings of Iberchip 2016, 2016.
Aceito para publicação em 05 de janeiro de 2016.

- ⑤ R. M. Borges ; D. Mazzer ; T. R. R. Marins ; Arismar Cerqueira S. Jr. ; **Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter.** Optical Engineering, 55(3), p. 031118, 2016. doi:10.1117/1.OE.55.3.031118. Aceito para publicação em 29 de outubro 2015.

Low-Cost Embedded Cooperative Cognitive Radio for Internet of Things

Daniel Mazzer*, Marlía Martins Bontempo† and Arismar Cerqueira S. Jr.‡

INATEL - National Institute of Telecommunications

Inatel - P.O. Box 05 - 37540-000 - Santa Rita do Sapucaí - MG - Brazil

Email: *daniel.mazzer@inatel.br, †marliamartins@gee.inatel.br and ‡arismar@inatel.br

Abstract—Networks environments in context of Internet of Things have been becoming crowded with thousands of low-cost devices sharing usage of unlicensed RF spectrum bands. Cognitive radio networks have been proposed for many years as a solution to explore underutilized licensed spectrum bands, allowing secondary users to make opportunistic use of it, when the primary user is not transmitting. This paper is regarding an implementation of a low-cost embedded cooperative cognitive radio approach for Internet of Things applications. The proposed solution improves communication performance experimentally evaluated in the 915MHz ISM band. The concept of a distributed and sector aware spectrum sensing system is also presented.

Index Terms—spectrum sensing, cognitive radio, distributed sensing, cooperative sensing, internet of things, wireless sensor network.

I. INTRODUCTION

The Internet of Things (IoT) networks are commonly formed by hundreds or even thousands of devices that share the same radio frequency (RF) spectrum band. This class of devices are commonly small, low-cost and also disposable, for this reason employ simple RF transceivers operating in the ISM (Industrial, Scientific and Medical) bands [1]. Different from desktops and mobile phones, most IoT devices consumes low data bandwidth, transmitting and receiving small bursts of packed information. Some devices have the ability to turn off the transceiver to save energy consumption and wakes-up only when there is some information to be either transmitted or received. Thus these devices are typically powered by batteries the power consumption is a very important concern [2].

Cognitive radios networks (CRN) have been proposed as a solution to define rules and techniques for using underutilized licensed RF bands. One of its benefits is to allow users of congested unlicensed bands to offload their traffic to other parts of the RF spectrum, even the licensed ones. A CRN is able to identify when the legal owner of some RF spectrum portion, called primary user, is not making use of its licensed RF band. Cognitive networks may, in some way, orientate secondary users to make use of this part of the RF spectrum without interfere on primary user communication [3]. To accomplish this a cognitive radio (CR) must identify - or sense - when the licensed RF band is unused and distribute this information for the secondary users that may be interested in establish communication over part of the RF spectrum.

The employment of a RF spectrum sensing technique is convenient, independent of the way that the unused RF band

will be allocated by a secondary user, and is considered one of the CR most important feature [4]. All decisions which a CR will do upon make or not use of a RF band will be based on information provided by one or more RF spectrum sensing radios. CR may be placed alone in a non-cooperative environment or being part of a cooperative network, in which a channel allocation decision is based on information collected by more than one CR.

In ISM bands there is no licensed user, so the primary user is not formally present, but the benefits of the spectrum sensing and CR techniques are still valid. Regulation agencies stipulate that radios must implement some specific channel access techniques for some RF bands, such as frequency hopping spreading spectrum (FHSS) or direct sequence spreading spectrum (DSSS). With FHSS a radio pair keep changing the communication channel frequency over time, spreading the transmitting power over a wider bandwidth. In a point to point communication FHSS is very reliable and have been used for a long time. Some recent applications demand that devices consume very low power to communicate where hundreds or even thousands of devices on same wireless network. This kind of networks are very common in IoT applications, sensor networks (WSN) and smart grid solutions [5]. Mesh networks topologies have been used to reduce device power consumption and installation costs. But establish a synchronized FHSS over mesh networks implies in increase device hardware and firmware complexity. Some low-cost transceivers provides DSSS functionality that does not increase the bandwidth significantly to be robust against inter-channel interference. With this limitations IoT applications lean to use fixed radio frequency band, what may feature a reliability risk since there is no guarantee that the RF band will be available all time.

This work is concerning a implementation of a cognitive radio network based on energy detection from spatially-distributed radio remote units. A database with a short history of RF spectrum usage defines a stochastic information source that may be further used to allow dynamic resource allocation. The proposed system is implemented using low-cost hardware and GNU Radio as a processing platform. Experiments have been carried out using real IoT hardware and network conditions; the communication reliability with the acquired RF spectrum usage awareness is also presented. Section II describes the proposed spectrum sensing network, whereas

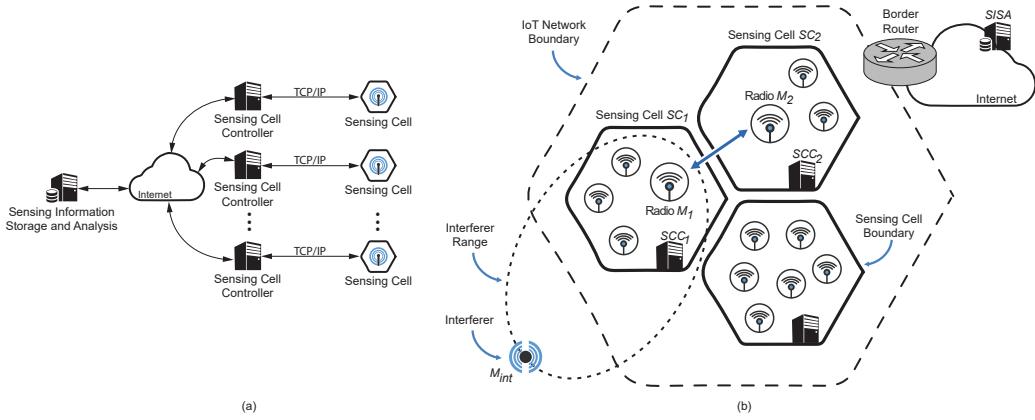


Fig. 1. Cognitive Radio blocks and IoT with interferers and cognitive sensing elements

section III presents the sensing algorithm and the proposed information processing technique. Section IV is regarding deployed system results and the conclusion is summarized at section V.

II. COOPERATIVE SPECTRUM SENSING

The proposed cooperative cognitive radio network is presented in Fig. 1a and is composed by the blocks: Sensing Cell (*SC*); Sensing Cell Controller (*SCC*); Sensing Information Storage and Analysis (*SISA*). The *SC* is responsible to acquire RF information, whereas the *SCC* detect users in the RF spectrum and *SISA* acts as a fusion center having the ability to collect and aggregate information from many *SCCs*. The proposed approach provides higher level of RF spectrum usage information that may be used for a dynamic spectrum allocation.

A. Sensing Cell

The RF spectrum may be sensed by more than one *SC*, which includes a RF receiver, an antenna and a computational processing board. The *SC* hardware is constructed using low-cost commercial hardware based on Raspberry PI 2 [6] processing board and a Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T) receiver acting as a RF receiver. The latter one has becoming popular for software defined radio (SDR) applications [7], [8]. *SCs* may be deployed over different locations in order to cover a wide geographic area, characterizing a cooperative network scenario. More than one source of spectrum sensing information may be used to provide information for a real-time RF spectrum allocation. This proposed cooperative network reduces the hidden node problem effect [9] providing information to discover distinct sectors in order to improve the RF spectrum usage efficiency [10].

In the proposed system the *SCs* are sensing only devices different from other CR implementation approaches in which

each radio is able to sense the spectrum and work as a communication radio [3], [11]. Since the objective is to allocate low resources devices that may not have enough processing capacity to run a spectrum sensing algorithm, the *SCs* may be employed as a support system to existent fixed frequency systems. It is feasible to implement the sensing algorithm over more powerful IoT devices. In context of IoT, a network commonly has its own *border router* or *gateway* that act as a network coordinator and interface to the Internet. The *SC* acquires samples from RF spectrum demodulating them to a baseband digital signal. The digital signal is delivered to the processing board that encapsulates the RF information into TCP/IP packets to be sent to a *SCC*.

B. Sensing Cell Controller

The *SCC* has two important roles in the proposed system: it configures the *SC* receiver parameters and perform the energy detector computation to be sent to *SISA*. The *SCC* runs on standard desktop computer and all energy detection algorithm is done by custom codes developed by authors using GNU Radio framework [12], which is a free software framework tool that provides a set of processing blocks with focus on SDR usage. By controlling *SC* parameters, such as radio central frequency and radio bandwidth, its allow to sense a wide RF spectrum. This is important since the low-cost receiver used in this work has 2 MHz of reception bandwidth. The computed RF spectrum energy information is then sent to *SISA* block.

C. Sensing Information Storage and Analysis

The *SISA* block relies on a specific algorithm that in able to collect data from many *SCCs* and store this information in a database. Another algorithm may consult this database in order to set up a customized and broader information database on the RF spectrum usage. The kind of information that *SISA* provides may be based on a specific region, a specific RF

spectrum band or some calendar range. To prove the concept on this work the *SISA* provides a database information about the RF spectrum utilization divided in hours of a day, based on each *SCC* connected to it. The *SISA* has a Application Program Interface (API) that allows some CR interested on its sensing information to put queries on spectrum information usage statistics.

III. SPECTRUM SENSING BASED ON ENERGY DETECTION

Energy detectors stands for a suboptimal very lightweight algorithm and is considered the most simple spectrum sensing technique [13]. It have been chosen to enable the use of low-cost components, real-time processing. Additionally, it is the most appropriate technique when the transmitted signal is unknown [14].

The energy for N received RF signal X may be calculated as follow and the resultant value defines the test statistic variable T :

$$T = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |X(n)|^2 \quad (1)$$

The noise power variance must be known in order to define an optimal test statistic variable, which represents the most important drawback of this technique, since the system must have means to measure the channel:

$$T' = \frac{T}{\sigma_n^2} \quad (2)$$

To implement the energy detection spectrum sensing method in a real-time system, the received samples are not limited in number as formulated in (1), since the system collects the signal continuously. Therefore, the quadratic values should be integrated in a specific period, for this reason a first order low-pass filter [15] is used as a real integrator circuit. The change in the filter characteristics is similar to change the value of N , but without changing the computation cost and memory consumption.

With the value of T' available, it is possible to define a detection threshold which makes possible to evaluate the channel availability. For a predefined amount of T' samples, percentage of the samples with the value greater than the threshold is counted and this information is forwarded to the *SISA* indicating a quantitative presence of a RF signal on the sensing band.

IV. IMPLEMENTATION OF THE COOPERATIVE COGNITIVE RADIO NETWORK

Figure 1b reports the implementation scenario of the low-cost cooperative cognitive radio for IoT applications. A pair of radios M_1 and M_2 have been used as IoT devices establishing a communication link; their hardware are composed by two Texas Instruments reference designs based on RF transceiver CC1120 [16]. The experiments have been realized in 902 to 928 MHz frequency channel reserved for unlicensed ISM applications. The radios have been configured to continuous

transmit packets with 50 bytes length at a fixed data rate of 150 Kbps using 2-GFSK modulation.

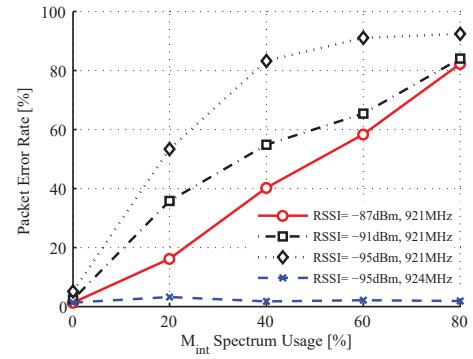


Fig. 2. Packet Error Rate

The radios are placed far away from each other in such a way that a communication between them is possible when no interference is present. Near each radio a *SC* was placed so M_1 and M_2 may be sensed by SC_1 and SC_2 respectively. Another radio M_{int} that acts as an interference source by means of generating random RF spectrum utilization was placed. M_{int} behaves such as a communication device that does not belongs to this IoT network, characterizing a multi-user RF environment. In a practical environment, a perfect isolation of RF boundaries is not possible, so the *SC*'s will also sense some signal from neighbor radio as well the interfering source.

The experiments have been carried out for different values of Receiver Signal Strength Indication (RSSI) by changing the M_2 transmission power. The probability of the radio M_{int} be transmitting was also modified to evaluate its influence over the link communication. Figure 2 reports the experimental results where the Packet Error Rate (PER) parameter has been used as a performance figure of merit. For each test 5000 packets have been sent and the amount of succeeded received packets were recorded. Initially was considered that the radios M_1 and M_2 does not have information about RF spectrum usage, so the 921 MHz channel was selected, the same being used by M_{int} . During the experiment the interfering radio M_{int} randomly transmit messages that are not demodulated by M_1 or M_2 but interferes on link communication increasing the PER. Later a test was conducted where the radios M_1 and M_2 makes use of *SISA* information presented in Fig. 3 to define the link channel. As a centralized source of information, *SISA* indicates that the channel 921 MHz is in use and the channel 924 MHz is available. The hidden node problem will be present as SC_2 does not sense M_{int} signal as shown in Fig. 3b but with SC_1 information M_{int} is detected (Fig. 3a) and the channel of 921 MHz may be avoided. The PER test was conducted again with radios using 924 MHz channel and

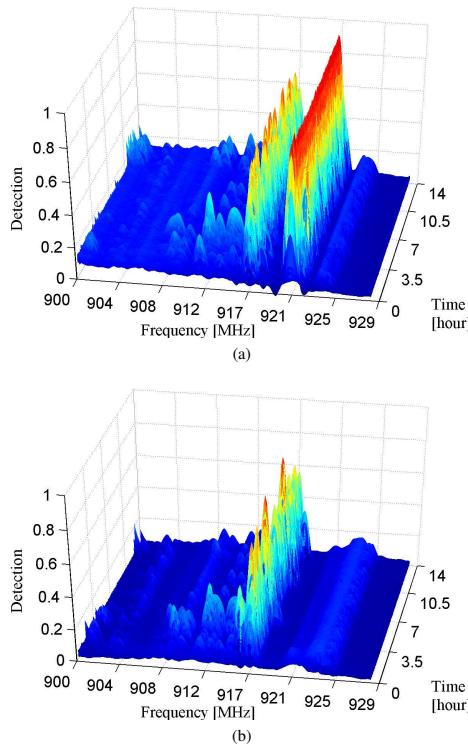


Fig. 3. Spectrum Sensing: (a) *SCC*₁ sensing output and (b) *SCC*₂ sensing output

the result was always below 5%.

Since the experiment have been carried out in a real environment, other signals was also detected by the *SCs* which the most notable being present in 917 MHz, not related to the context of this work.

V. CONCLUSION

The concept and implementation of a low-cost embedded cooperative cognitive radio for internet of things applications have been reported. The proposed technology solution has been shown potential for wireless sensor networks. Moreover, the use of cooperative spectrum sensing based on energy detection has overcome the hidden node problem, which is very common in cooperative cognitive radio networks. An experimental performance investigation based on packet error rate as a function of RSSI has demonstrated the efficiency and applicability of the proposed approach. As a proposal for future work an experimentation may be carried out to evaluate the effect in communication performance for different radios, sensing cells interference sources arrangements.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partially supported by Finep/Funttel Grant No. 01.14.0231.00, under the Radio Communications Reference Center (Centro de Referência em Radiocomunicações - CRR) project of the National Institute of Telecommunications (Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel), Brazil. Authors also thank the financial support from CNPq, CAPES, MCTI and FAPEMIG and technical support from Anritsu and Keysight.

REFERENCES

- [1] E. Z. Tragos and V. Angelakis, "Cognitive radio inspired m2m communications," in *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2013 16th International Symposium on*. IEEE, 2013, pp. 1–5.
- [2] W. K. Seah, Z. A. Eu, and H.-P. Tan, "Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap)-survey and challenges," in *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on*. Ieee, 2009, pp. 1–5.
- [3] J. Mitola and J. Maguire, G.Q., "Cognitive radio: making software radios more personal," *Personal Communications, IEEE*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug 1999.
- [4] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, 2009.
- [5] B. Lichtensteiger, B. Bjelajac, C. Muller, and C. Wietfeld, "Rf mesh systems for smart metering: system architecture and performance," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 379–384.
- [6] Raspberry PI Foundation. (2015) Raspberry PI web site. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>
- [7] Realtek, "Rtl2832u dvb-t cfdm demodulator + usb 2.0," <http://www.realtek.com.tw/>.
- [8] J. del Peral-Rosado, J. M. Parro-Jiménez, J. Lopez-Salcedo, G. Seco-Granados, P. Crosta, F. Zanier, M. Crisci *et al.*, "Comparative results analysis on positioning with real Ite signals and low-cost hardware platforms," in *Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), 2014 7th ESA Workshop on*. IEEE, 2014, pp. 1–8.
- [9] C. Cordeiro and K. Challapalli, "C-MAC: A Cognitive MAC Protocol for Multi-Channel Wireless Networks," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, April 2007, pp. 147–157.
- [10] J. J. Thennattil and E. M. Manuel, "A novel approach in cooperative spectrum sensing for cognitive radio," in *Intelligent Computational Systems (RAICS), 2013 IEEE Recent Advances in*. IEEE, 2013, pp. 43–47.
- [11] X. Zhang and H. Su, "CREAM-MAC: Cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol over dynamic spectrum access networks," *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 5, no. 1, pp. 110–123, 2011.
- [12] T. Rondeau and J. Corgan. (2015) GNU Radio project web site. [Online]. Available: <http://gnuradio.org/>
- [13] F. Peng, H. Chen, and B. Chen, "On energy detection for cooperative spectrum sensing," in *Information Sciences and Systems (CISS), 2012 46th Annual Conference on*. IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [14] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, pp. 523–531, apr. 1967.
- [15] S. E. Tavares, "A comparison of integration and low-pass filtering," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 1, pp. 33–38.
- [16] Texas Instruments, "CC1120 High-Performance RF Transceiver for Narrowband Systems," <http://www.ti.com/lit/ds/swrs112h/swrs112h.pdf>, 2015.

Convergent Solution of Future Internet and Cognitive Radio in the Context of Internet of Things

Antonio M. Alberti^a, Daniel Mazzer^b, Marília M. Bontempo^b, Lucio H. de Oliveira^a, Arismar Cerqueira S. Jr.^b

^aICT Laboratory, INATEL, João de Camargo 510, Centro, Santa Rita do Sapucaí, CEP 37540-000, Minas Gerais, Brazil. Phone: +55 35 34719300

^bWOCA Laboratory, Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL

João de Camargo 510, Centro, Santa Rita do Sapucaí, CEP 37540-000, Minas Gerais, Brazil. Phone: +55 35 34719200

Abstract

Many Internet of things (IoT) requirements are already at the core of next generation wireless networks, including 5G, cognitive radio and future Internet. There is a huge consilience that the majority of Internet devices will become sensors and actuators equipped over ordinary “things”, like cars, lampposts, city squares, wearables, etc. As a consequence, the radio environment will become increasingly crowded with thousands of low-cost devices sharing the unlicensed frequency bands. This paper is regarding a convergent solution of future Internet and cognitive radio in the context of Internet of “things”. The proposed approach is based on an embedded and low cost cooperative spectrum sensing solution, which has been experimentally implemented in the 915 MHz ISM band. Furthermore, we present the concept and implementation of a distributed, software-controlled, sector aware spectrum sensing architecture that employs current Internet protocols to store and analyze spectrum usage information. Finally, the proposed approach has been integrated to a future Internet called NovaGenesis, which has been previously developed by our research group. A proof-of-concept has been experimentally performed, demonstrating for the first time the convergence of IoT, future Internet and cognitive radio.

Keywords: Software-defined, cooperative spectrum sensing, cognitive radio, Internet of things, future Internet, NovaGenesis

1. Introduction

The Internet of “things” (IoT) is challenging all existing information and communication technology (ICT) architectures. First, because many estimates are predicting exponential growths in terms of the number of connected devices, with a diversity of possible technology stacks (heterogeneous networks) and devices connectivity. Second, because many traditional networks were not originally designed to offer the adequate security and privacy for IoT. Third, due to the fact that a significant portion of mobile IoT devices will require efficient rebinding of devices locators. Fourth, because hundreds or even thousands of devices that share the same radio frequency (RF) electromagnetic spectrum.

The IoT requirements are already at the core of all efforts for next generation wireless networks, including 5G [1], cognitive radio [2] and future Internet [3, 4]. 5G efforts like Michailow et al. [1] already consider low power consumption and delay tolerant requirements of machine-to-machine communications. IoT devices are commonly small, low-cost and also disposable, for this reason employ simple RF transceivers operating in the ISM (Industrial, Scientific and Medical) bands [5]. Different from desktops and mobile phones, most IoT devices consumes

low data bandwidth, transmitting and receiving small bursts of packed information. Some devices have the ability to turn off the transceiver to save energy consumption and wakes-up only when there is some information to be either transmitted or received. Furthermore, these devices are typically powered by batteries, and consequently the power consumption is a very important concern [6].

Cognitive radios networks (CRNs) have been proposed as a solution to define rules and techniques for using underutilized licensed RF bands. One of its benefits is to allow users of congested unlicensed bands to offload their traffic to other parts of the RF spectrum, even the licensed ones. A CRN is able to identify when the legal owner of some RF spectrum portion, called primary user, is not making use of its licensed RF band. Cognitive networks may, in some way, orientate secondary users to make use of this part of the RF spectrum without interfere on primary user communication [2]. As a consequence, a cognitive radio (CR) must identify - or sense - when the licensed RF band is unused and distribute this information for the secondary users that may be interested in establish communication over part of the RF spectrum. The tsunami of device’s expected in IoT will push radio frequency spectrum control and management towards more opportunistic approaches, creating a clear link between IoT and CRN.

Last but not least, there is the strong relation between IoT requirements and the future Internet (FI) research [4]. The term future Internet was adopted in the first initiatives aimed at re-thinking the Internet, including the 4D project [7], the future

Email addresses: alberti@inatel.br (Antonio M. Alberti), daniel.mazzer@inatel.br (Daniel Mazzer), mariliamartins@gee.inatel.br (Marília M. Bontempo), lucio.henrique@inatel.br (Lucio H. de Oliveira), arismar@inatel.br (Arismar Cerqueira S. Jr.)

51 Internet design (FIND) initiative [8], the global environment for¹⁰⁸
 52 network innovations (GENI) [9], and the European future Inter-¹⁰⁹
 53 net assembly (FIA) initiative [10]. By FI, we mean any Internet-¹¹⁰
 54 like network that could emerge in the future. This includes
 55 evolutionary approaches, where the fundamental protocols of
 56 the current Internet are maintained and where new ideas are in-¹¹¹
 57 introduced incrementally, or revolutionary approaches, where the-¹¹²
 58 architecture is redesigned from scratch.

59 Examples of evolutionary FI architectures (FIAs) that en-¹¹³
 60 compass IoT scope are: FIWARE [11], SENSEI [12], and
 61 SmartSantander [13]. FIWARE provides a platform to inte-¹¹⁴
 62 grate computer programs called services (or generic enablers -¹¹⁵
 63 GE) via next generation service interfaces (NGSIs). The NGSI-¹¹⁶
 64 9/NGSI-10 is based on RESTful application programming in-¹¹⁷
 65 terfaces (APIs) [11], therefore dependent on current Internet¹¹⁸
 66 technologies. SmartSantander provides a platform for smart¹¹⁹
 67 city services integration and experimentation also using REST-¹²⁰
 68 ful APIs. SENSEI focus was on wireless sensor and actuator¹²¹
 69 networks interoperation, creating a market for sensed informa-¹²²
 70 tion also employing RESTful interfaces. None of these projects¹²³
 71 explore the relation to opportunistic spectrum control and man-¹²⁴
 72 agement, spectrum sensing, or other CRN approaches.¹²⁵

73 Quite surprisingly, very few revolutionary approaches (also¹²⁶
 74 named clean slate proposals) have been considering IoT re-¹²⁷
 75 requirements. Our research group has idealized and developed¹²⁸
 76 a new future Internet architecture called NovaGenesis (NG)¹²⁹
 77 [14], which considers IoT and CRN as key ingre-¹³⁰
 78 dients for FIAs since its beginning. In this paper, we ex-¹³¹
 79 plore for the first time the convergence of IoT, CRN, and FI¹³²
 80 technologies. More specifically, our contributions are three-¹³³
 81 fold. First, we report a successful implementation of a novel¹³⁴
 82 approach of cognitive radio for IoT applications based on a¹³⁵
 83 software-controlled, low-cost and embedded cooperative spec-¹³⁶
 84 trum sensing. Second, we present the concept and experi-¹³⁷
 85 mentally demonstrate a distributed, software-controlled, sector¹³⁸
 86 aware spectrum sensing architecture that employs current Inter-¹³⁹
 87 net protocols to store and analyze spectrum usage information.¹⁴⁰
 88 Third, we extended NovaGenesis with novel services to inter-¹⁴¹
 89 operate with the proposed CRN based on energy detection from¹⁴²
 90 spatially-distributed radio remote units, taking advantage of¹⁴³
 91 other NG ingredients, namely: information-centric networking¹⁴⁴
 92 (ICN) [15], service-oriented architecture (SOA) [16], service-¹⁴⁵
 93 centric networking (SCN) [17], software-defined networking¹⁴⁶
 94 (SDN) [18], network function virtualization (NFV) [19], self-¹⁴⁷
 95 verifying naming (SVN) [20], identifier/locator (ID/Loc) split-¹⁴⁸
 96 ting [21], distributed name resolution, and network caching.¹⁴⁹

97 The remaining of the paper is organized as follows. Section
 98 2 presents our cognitive radio network based on energy detec-¹⁴⁹
 99 tion from spatially-distributed radio remote units. The proposed¹⁵⁰
 100 system is implemented using low-cost hardware and GNU Ra-¹⁵¹
 101 dio as a processing platform. Section 3 presents NovaGene-¹⁵²
 102 sis introduction, fundamental concepts, current implementa-¹⁵³
 103 tion and two novel future Internet services to interoperate with our¹⁵⁴
 104 CR solution. Results and analysis are presented in Section 4.¹⁵⁵
 105 Experiments have been carried out using real IoT hardware and¹⁵⁶
 106 network conditions; the communication reliability with the ac-¹⁵⁷
 107 quired RF spectrum usage awareness is also presented. A proof-¹⁵⁸

of-concept of the new NovaGenesis services together with the embedded spectrum sensing is provided. Finally, we conclude the paper in Section 5, giving direction for future works.

2. Cognitive Radio Network with Embedded Low Cost Cooperative Sensing

2.1. Requirements

The employment of a RF spectrum sensing technique is convenient, independent of the way that the unused RF band will be allocated by a secondary user, and is considered one of the CR most important feature [22]. All decisions a CR will do upon make or not use of a RF band will be based on information provided by one or more RF spectrum sensing radios. CR may be placed alone in a non-cooperative environment or being part of a cooperative network, in which a channel allocation decision is based on information collected by more than one CR.

In ISM bands there is no licensed user, so the primary user is not formally present, but the benefits of the spectrum sensing and CR techniques are still valid. Regulation agencies stipulate that radios must implement some specific channel access techniques for some RF bands, such as frequency hopping spreading spectrum (FHSS) or direct sequence spreading spectrum (DSSS). With FHSS a radio pair keep changing the communication channel frequency over time, spreading the transmitting power over a wider bandwidth. In a point to point communication FHSS is very reliable and have been used for a long time. Some recent applications demand that devices consume very low power to communicate where hundreds or even thousands of devices on same wireless network. This kind of networks are very common in IoT applications, sensor networks (WSN) and smart grid solutions.

Mesh networks topologies have been used to reduce device power consumption and installation costs. But to establish a synchronized FHSS over mesh networks implies in increasing device hardware and firmware complexity. Some low-cost transceivers provides DSSS functionality that does not increase the bandwidth significantly to be robust against inter-channel interference. With this limitations IoT applications lean to use fixed radio frequency band, what may feature a reliability risk since there is no guarantee that the RF band will be available all time.

2.2. Cooperative Spectrum Sensing

The proposed cooperative cognitive radio network is presented in Figure 1a and is composed by the following blocks: Sensing Cell (*SC*); Sensing Cell Controller (*SCC*); Sensing Information Storage and Analysis (*SISA*). The *SC* is responsible to acquire RF information, whereas the *SCC* detect users in the RF spectrum and *SISA* acts as a fusion center having the ability to collect and aggregate information from many *SCCs*. The proposed approach provides higher level of RF spectrum usage information that may be used for a dynamic spectrum allocation.

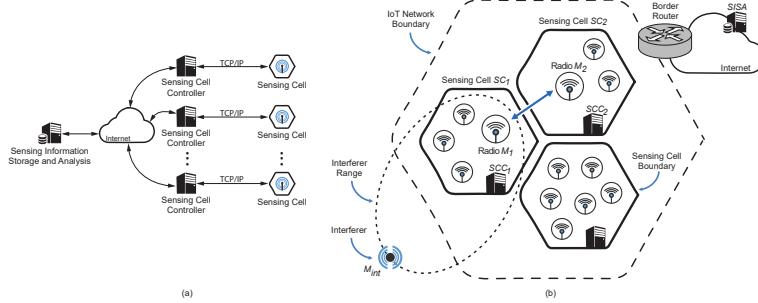


Figure 1: Cognitive Radio blocks and IoT with interferers and cognitive sensing elements.

2.2.1. Sensing Cell

The RF spectrum may be sensed by more than one *SC*, which¹⁹⁹ includes a RF receiver, an antenna and a computational pro-²⁰¹cessing board. The *SC* hardware is constructed using low-cost²⁰²commercial hardware based on Raspberry PI 2 [23] process-²⁰³ing board and a digital video broadcasting-terrestrial (DVB-T)²⁰⁴receiver acting as a RF receiver. The latter one has becoming²⁰⁴ popular for software defined radio (SDR) applications [24, 25].²⁰⁵ *SCs* may be deployed over different locations in order to cover²⁰⁶a wide geographic area, characterizing a cooperative network²⁰⁷ scenario. More than one source of spectrum sensing informa-²⁰⁸tion may be used to provide information for a real-time RF²⁰⁹spectrum allocation. This proposed cooperative network re-²¹⁰duces the hidden node problem effect [26] providing informa-²¹¹tion to discover distinct sectors in order to improve the RF spec-²¹²trum usage efficiency [27].

In the proposed system the *SCs* are sensing only devices dif-²¹⁴ferent from other CR implementation approaches in which each²¹⁵radio is able to sense the spectrum and work as a communica-²¹⁶tion radio [2, 28]. Since the objective is to allocate low re-²¹⁶sources devices that may not have enough processing capacity²¹⁷to run a spectrum sensing algorithm, the *SCs* may be employed²¹⁸as a support system to existent fixed frequency systems. It is²¹⁹feasible to implement the sensing algorithm over more power-²²⁰ful IoT devices. In context of IoT, a network commonly has its²²¹own *border router* or *gateway* that act as a network coordinator²²²and interface to the Internet. The *SC* acquires samples from RF²²³spectrum demodulating them to a baseband digital signal. The²²⁴digital signal is delivered to the processing board that encap-²²⁵sulates the RF information into TCP/IP packets to be sent to a

and radio bandwidth, it allows to sense a wide RF spectrum. This is important since the low-cost receiver used in this work has only 2 MHz of reception bandwidth. The computed RF spectrum energy information is then sent to *SISA* block.

2.2.3. Sensing Information Storage and Analysis

The *SISA* block relies on a specific algorithm that in able to collect data from many *SCCs* and store this information in a database. Another algorithm may consult this database in order to set up a customized and broader information database on the RF spectrum usage. The kind of information that *SISA* provides may be based on a specific region, a specific RF spectrum band or some calendar range. To prove the concept on this work, *SISA* provides a database information about the RF spectrum utilization divided in hours of a day, based on each *SCC* connected to it. The *SISA* has an API that allows some CR interested on its sensing information to put queries on spectrum information usage statistics.

2.2.4. Spectrum Sensing Based on Energy Detection

Energy detectors stands for a suboptimal very lightweight algorithm and is considered the most simple spectrum sensing technique [30]. It have been chosen to enable the use of low-cost components, near real-time processing. Additionally, it is the most appropriate technique when the transmitted signal is unknown [31].

The energy for N received RF signal X may be calculated as follow and the resultant value defines the test statistic variable T :

$$T = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |X(n)|^2 \quad (1)$$

The noise power variance must be known in order to define an optimal test statistic variable, which represents the most important drawback of this technique, since the system must have means to measure the channel:

$$T' = \frac{T}{\sigma_n^2} \quad (2)$$

To implement the energy detection spectrum sensing method in a real-time system, the received samples are not limited in

number as formulated in (1), since the system collects the signal continuously. Therefore, the quadratic values should be integrated in a specific period, for this reason a first order low-pass filter [32] is used as a real integrator circuit. The change in the filter characteristics is similar to change the value of N , but without changing the computation cost and memory consumption.

With the value of T' available, it is possible to define a detection threshold which makes possible to evaluate the channel availability. For a predefined amount of T' samples, percentage of the samples with the value greater than the threshold is counted and this information is forwarded to the SISA indicating a quantitative presence of a RF signal on the sensing band.

3. NovaGenesis Architecture

3.1. Introduction to NovaGenesis

NovaGenesis (NG) is a project that started in 2008 with this question in mind: imagine if there is no Internet architecture right now, how could we design it using the best contemporary technologies? NovaGenesis scope includes not only data exchanging (like any other networking technology), but also data processing and storage (including cloud computing and networking cache). NG design considered a set of state-of-the-art ingredients, focusing on synergistically integrating them [33]. Figure 2 illustrates these key ingredients. The design starting points were naming, name resolution, life-cycling of contents and services, and software representatives/controllers. In next subsections, we will explore these starting points in more detail.

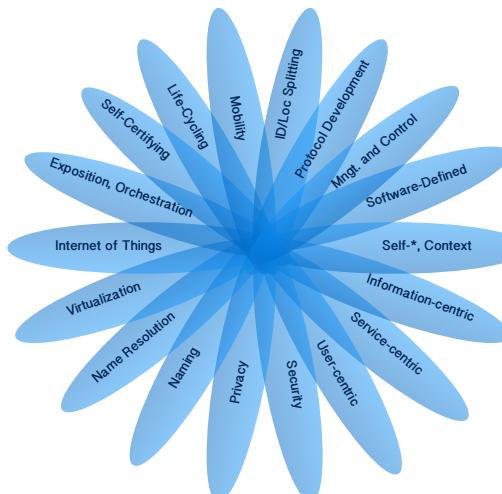


Figure 2: Key ingredients for Future Internet.

3.1.1. Fundamental Concepts

NovaGenesis is founded in a set of fundamental concepts that are required to better understand its design and contributions.

Naming: Names are symbols used to denote one or more individual entities (or existences), like pieces of digital contents, computers, devices, and ordinary things. In this case, to denote means to represent something by signals. By definition, names denote meaning and sense. Natural language names (NLNes) are those used on human language, like “Node 1” or “Domain A”. However, there are names that have no meaning, for example the self-verifying names¹ (SVNes) generated from the output of a mathematical hash function [20]. An example of a 32 bits name generated at NG using *murmurhash* 3 is “28FD4420”. SVNes are said to be self-verifiable, because at any time the binary words used to generate them can be hashed again and get exactly the same output (name). Using SVNes as an alternative to NLNes [15] makes possible to check the relationship between the named entity and the its name at any time. According to Ghodsi et al. [20], SVNes have better security, scalability, and flexibility than NLNes. For the best of our knowledge, this paper proposes for the first time the use of SVNes on IoT and cognitive radio scope.

Name Binding: NovaGenesis approach employs an unlimited number of namespaces, that are linked by means of name bindings. A name binding (NB) is a mapping among two or more names, typically implemented as a vector of the form: <key; value(s)>. A NB can relate a name to an object or a name to other names. Figure 3 illustrates a name binding scheme. The edges are NBs, while the vertices are NLNes or SVNes. For example, Domain 1 name is bound to Router 1, Gateway 2, Mote 4, and Domain 2 names. Observe that NBs can represent entities relationships, i.e. “semantic operators” among entities, like *is contained* or *contains*. In the previous example, one can use the NB <Domain 1; Gateway 2> to represent that Domain 1 contains a Gateway 2.

Name Resolution: In context of Figure 3, name resolution consists on resolving a name to other bound names, i.e. to determine the values behind a certain key. For example, the name Router 1 is bound to the names OS 6, while OS 6 can be resolved to Process 10 and Process 11. NG provides a distributed, hierarchical, name resolution service (NRS) that resolves NLNes or SVNes (keys) in one or more NLNes or SVNes (values).

Identification and Localization: There is no novelty on using names as identifiers or locators on networking. In fact, this is intrinsic to ICTs. However, the adoption of SVNes as identifiers is more recent. NovaGenesis borrowed this idea from other FIAAs, specially NetInf [34] and XIA [35]. Formally, an identifier unambiguously separates an existence from others in a certain name scope. Considering Figure 3, a scope can be denoted by the name Domain 1 and all entities/objects inhabiting this domain can belong to this namespace. In the scope defined by the name Domain 1, the name Process 11 uniquely separates one entity from others, in this case a computer program. Therefore, the name Process 11 can be used as identifier for this software at Domain 1 scope. These concepts are important to understand NG messaging at the end of this section.

¹ Also called self-certifying names

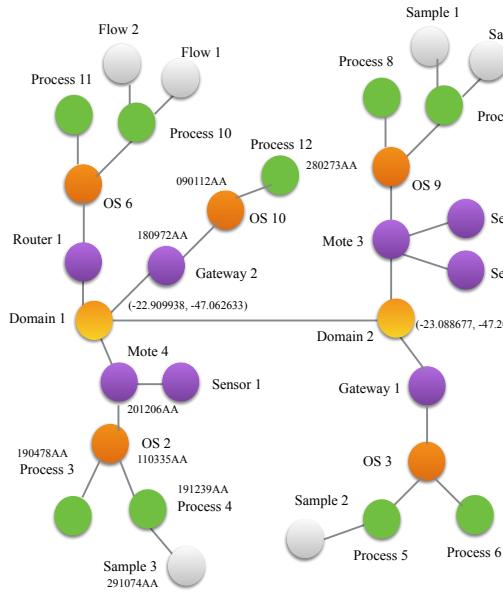


Figure 3: Graph of names and their bindings representing entities relationships in future Internet architecture.

Services and Contracts: A service is a virtual existence aimed at processing, exchanging, or storing information. According to this definition, a computer program (or a process) is a *service*. In fact, we employ the term *process* to name a service instantiation in a computer. NovaGenesis follows SOA principles [16], where service are dynamically composed. In SOA, services life-cycling is contract-based. That is, after peer services discovery, a contract is formulated and negotiated. Thus, a contract can be defined as a piece of information that sets the limits, responsibilities, clauses to be respected, as well as criteria for completion and punishment of services that were poorly executed.

Proxies, Gateways and Controllers: A proxy is an attorney that represents other components in a network. We define a proxy as a service that represents other services or substrate resources for any purpose. As an example, consider an Wi-Fi access point that is represent by a proxy service that “sells” its forwarding capacities. This proxy can negotiate the Wi-Fi capabilities to possible interested clients.

Another important concept is a *gateway*. It translates or encapsulates messages of a certain input protocol to the desired output protocol. Finally, we define a *controller* as a service that controls or does the decision making regarding the configurations of substrate resources or other services. Interestingly, the controlled device can be a physical or a virtual one. For instance, a software controller (a service as any other) can control virtually implemented network functionalities or physical access points in a Wi-Fi network.

3.1.2. Current Implementation

The NovaGenesis web of names (i.e. name bindings graph shown in Figure 3) is implemented in a distributed way. NBs are published and subscribed by services, and stored on hash table data structures hosted by one or more operating systems in distributed computers. In the current design, we adopted an object oriented design (OOD) approach to implement NG components. Every service has several internal objects called *blocks* where functionalities are implemented. *Blocks* are classified in two types: common and specialized. There are two common blocks that are instantiated in all services, as can be seen on Figure 4: gateway (GW) and hash table (HT). The GW provides: (i) inter block communication (IBC) inside a service and inter service communication (ISC) inside an OS. The IBC is a bus for communication among dynamically instantiated classes inside a service. The GW employs an event-driven discipline to process messages according to scheduled times. It removes a message from the head of a priority queue and calls back the message’s destination block. If a message is destined to a block outside a service, the GW forwards the message to the proper destination service, using an output queue (OQ) for this purpose. The GW uses SVNes to decide how to forward/route messages.

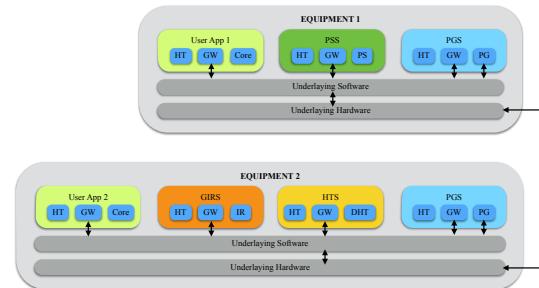


Figure 4: Example of two applications in a simple link scenario.

The current implementation is based in four services:

Publish/subscribe service (PSS): NBs are published by any services through sending a message to an instance of a PSS. The PSS provides the rendezvous among publisher and subscriber services, allowing secure and private access to name bindings. With this aim, the PSS implements the main NG application API that has six primitives: (i) publish NB (with associated data, if any); (ii) publish NB/data and notify other services about a publication; (iii) subscribe a NB/data; (iv) subscribe a NB/data and notify other services about a subscription; (v) deliver a subscribed NB/data; and (vi) revoke a NB/data publication. The PSS can be seen as a distributed API, accessed via PSS names. Additionally, we generalized the PSS to allow pub/sub of contents (data chunks) associated to name bindings, adding to this NRS a network cache functionality.

Generic indirection resolution service (GIRS): The PSS does not store the NB/data published. It forwards them to a GIRS instance, which selects a hash table service (HTS) to

387 store it. Thus, published NB/data are forwarded by the GIRS₄₃₃
 388 to an HTS instance, where they are stored behind a hash table₄₃₄
 389 data structure. Therefore, the GIRS is an intermediate service₄₃₅
 390 among PSS and HTS instances.

391 **Hash table system (HTS):** Stores the NBs and their associated
 392 contents, if any. Consider for example the content named₄₃₆
 393 Sample 3 at Mote 4 of Figure 3. This content will be stored₄₃₇
 394 as a file in a folder of an HTS instance. A name binding <₄₃₈
 395 291074AA, Sample 3 > can relate the SVN of the content to its₄₃₉
 396 NLN.

397 **Proxy/gateway/controller service (PGCS):** This service₄₄₁
 398 provides: (i) message encapsulation over already established₄₄₂
 399 networking technologies, such Ethernet or Wi-Fi; (ii) a proxy₄₄₃
 400 service to represent other NG services inside an OS; (iii) boot-₄₄₄
 401 strapping functionalities to initialize a domain; (iv) software₄₄₅
 402 control of hardware or other computer programs outside NG₄₄₆
 403 environment. The PGCS enables PSS, GIRS, and HTS to dis-₄₄₇
 404 cover one another during initialization. Since an address is a₄₄₈
 405 name that denotes the position to where an existence can in-₄₄₉
 406 habit or be attached, the PGCS relays on its local HT block of₄₅₀
 407 the domain HTS to store name-bindings among already estab-₄₅₁
 408 lished address formats (*e.g.* a real world or an emulated MAC₄₅₂
 409 Ethernet) and/or NG addresses. Independently of the address₄₅₃
 410 format used to connect PGCSes, inside NG all the communica-₄₅₄
 411 tion is name-oriented. Additionally to the gateway service, the₄₅₅
 412 PGCS publishes NBs about other NG services inside an OS to₄₅₆
 413 other PGCSes in the same domain, therefore propagating new₄₅₇
 414 services for their peers.

415 NovaGenesis messages are implemented as objects and se-₄₅₈
 416 rialized to ASCII character arrays with two portions: com-₄₅₉
 417 mand lines (streamed from *CommandLine* objects) and payload₄₆₀
 418 (streamed from a file system archive). There is a bank line sepa-₄₆₁
 419 rating both — an idea borrowed from session initiation protocol₄₆₂
 420 (SIP). The command lines portion is composed by several tex-₄₆₃
 421 tual lines, which can be dynamically expanded according to the
 422 need. The command lines are formatted as:

423
 424 *ng -command –alternative version [vectorial arguments]*

425 Where:

426 -command is the action to be done.
 427 –alternative selects among alternatives the action to be
 428 version selects the desired version of implementa-
 429 [vectorial arguments] are the arguments of the command.

430 Each command can have one or more vectorial arguments,
 431 which are structured as follows:

432 < *n type E1 E2 E3 E4 ... En* >

433 Where:

434 *n* is the number of elements in the argument vector.
 435 *type* is the type of the elements in the argument vector.
 436 *E1 E2 E3 E4 ... En* are the elements of the argument vector.

3.2. Representing the SCC inside NovaGenesis

In this section, we describe two new services developed to interoperate and manage the low cost collaborative sensing approach presented on Section 2 with NovaGenesis. The aim is to converge the spectrum sensing approach for IoT with NG “clean slate” FIA, taking advantage from the benefits of all these research areas.

3.2.1. Spectrum Sensing Service

The spectrum sensing service (SSS) was developed to expose dedicated spectrum sensing hardware or a software-defined radio (SDR) to other NG services. It exposes device features, capabilities, configurations, and details of available spectrum sampling procedures. Other NG services can discover, negotiate, and contract spectrum sensing functionality via their SSS representatives. This process is also a gateway for: (i) dedicated spectrum sensing hardware or SDR, translating NG command lines to non NG configurations, *e.g.* JSON; and for (ii) interoperation of TCP/IP and NG stacks, as illustrated in Figure 5. In this paper scenario, messages coming from the SCC are encapsulated over TCP/IP and delivered to the SSS using push/pull communication model. The SSS changes to publish/subscribe model inside NG cloud/networking, publishing and subscribing name bindings and information objects (like SLAs or spectrum samples) to/from PSS.

The SSS communicates with the SCC through three TCP/IP network connections, which form two communication channels, one for data and other for software-control settings. The data channel carries the spectral sensing information obtained by the components SC (Section 2.2.1) and SCC (Section 2.2.2). The setup channel is formed by the second and third connections and it is used by the NovaGenesis to obtain and send settings for these SC and SCC blocks.

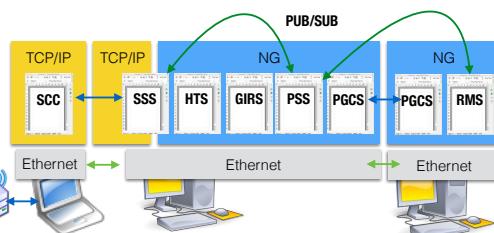


Figure 5: NovaGenesis interoperability solution to cooperative spectrum sensing approach. The SSS provides the bridge among TCP/IP and NG stacks. The SCC sends spectrum samples to SSS, instead of a SISA.

The SSS requires a peer resource management service (RMS) instance. An SLA proposal describes the sampling features of spectrum sensing or SDR equipment it represents, such as rates, resolution, output format, among many others. More specifically, for the interoperation of the previous CRN approach with NovaGenesis, we developed the following contract that the SSS proposes to a RMS instance it discovers using PSS API.

```

{
  "get_info": ""
}

```

Figure 6: *get.info* command in JSON format.

```

{
  "scc_id": "0be07c0e-72d5-11e5-b3f6-001dbaefaf96",
  "msgid": "3846865045",
  "date": "2015-10-17 18:43:14.389205",
  "freq": "923000000",
  "sensor": "0.235804"
}

```

Figure 9: Data format from *SCC* to *SSS*.

```

{
  "capacities": {
    "sensing_freq_min": "100000000",
    "sensing_freq_max": "1800000000",
    "sensing_bw_min": "1024000",
    "sensing_bw_max": "2048000",
    "sensing_sectors": "1",
    "sensing_direction": "0"
  },
  "cell_info": {
    "scc_id": "5adc8dfc-66a0-11e5-a257-001dbaefaf96",
    "scc_location": "-22.257360, -45.696651"
  },
  "current_config": {
    "sensing_freq_start": ["900000000", "-1"],
    "sensing_freq_stop": ["930000000", "-1"],
    "sensing_bw": "2048000"
  }
}

```

Figure 7: Answer transmitted from *SCC* to *SSS*.

473 The information exchanged between the *SSS* and the *SCC*
 474 are structured in strings in JSON format. The information is
 475 encoded in key/value pairs where the key field identifies the
 476 name of a parameter or command, tied to its value. The con-
 477 figuration channel to NovaGenesis can perform two operations:
 478 the commands *get.info* and *set.config*.

479 ***get.info***: The *get.info* command (Figure 6) is sent by *SSS*
 480 to *SCC* in order to request the spectral sensing available func-
 481 tionalities, identifying information of the sensing cell and thes-
 482 parameters of the current configuration of spectral sensing. An
 483 example of a *get.info* command is shown in Figure 7. In this
 484 example, the answer to the *get.info* command contains: (i) thes-
 485 sensing capabilities of the *SCC* in the key *capacities*; (ii) thes-
 486 cell identification information in the key *cell.info*; and (iii) thes-
 487 current spectrum sensing configuration on key *current.config*.
 488

489 ***set.config***: This command is sent from *SSS* to *SCC* to adjust
 490 spectrum sensing parameters according to *RMS*. The parame-
 491 ters that can be adjusted are shown in the Figure 8. They are the
 492 start and end sampling frequencies in Hz, respectively, and the
 493 sampling bandwidth also in Hz.

```

{
  "set_config": {
    "sensing_freq_start": "400000000",
    "sensing_freq_stop": "450000000",
    "sensing_bw": "2048000"
  }
}

```

Figure 8: *set.config* command to adjust *SCC* configurations.

data: The spectrum energy data is continuously transmitted from *SCC* to *SSS*. The Figure 9 illustrates the format of this data. The key *scc.id* uniquely identifies the *SCC* that generated the data. The key *msgid* provides a message sequence number, while the key *date* carries a timestamp of the sample. Last but not least, the key *sensor* contains the estimated probability that the related channel is busy.

3.2.2. Resource Management Service

The RMS implements name-based, contract-oriented, dynamic orchestration of substrate resources exposed by *SSS* (other NG services are being developed, but they are out of the scope of this paper). The RMS mediates the relationship among user applications and the *SSS* instances, inside NovaGenesis cloud/networking (without TCP/IP). When an *SSS* discovers a RMS, it proposes a service level agreement (SLA) with a description of the service to be provided. The RMA accepts the contract and starts being notified of the *SSS*'s publications. This enables the RMS to become aware of the situation of the radio spectrum opportunities on the ISM bands.

3.2.3. Sequence Diagram of Interoperability Solution

Figure 11 provides a sequence diagram of the actions implemented to transport *SCC* spectrum samples to the NovaGenesis RMS. In transaction *a* both the *SSS* and *RMS* publish their name bindings (NBs) to the PSS/GIRS/HTS (called NRS for short). In transaction *b*, they subscribe possible peer keywords, e.g. the *SSS* subscribe the keywords “resource”, “manager”. The NRS returns NBs containing the subscribed keywords. These NBs, have in the value portion self-certifying names (SCNes) of services candidate to be a peer.

When the *SSS* initializes, it sends a *get.info* message to the *SCC*. When the answer returns in transaction *d*, the *SSS* is able to make a service offer to the *RMS*, specifying the possible configurations of the physical device and GNU radio at *SCC*. The *SSS* publishes the offer to the NRS, notifying the candidate RMS in transaction *e*. The *RMS* subscribes the service offer object as illustrated on transaction *f* and Figure 10. In the current prototype, the *RMS* just accepts this offer sending a service acceptance object (transaction *g*). In future versions, we plan to add negotiation actions between *SSS* and *RMS*. Observe that these offer and acceptance objects are transferred using SVNes in the header of NovaGenesis messages. Also, the keys used to subscribe these objects (hash of the object) are used to verify its integrity. To the best of our knowledge, NovaGenesis is the first

536 FIA being used to transfer spectrum sensing SLA information₅₉₀
 537 is a more safe way.₅₉₁

538 In transaction *h*, the SSS subscribes the service acceptance₅₉₂
 539 object published by the RMS and notified by the NRS. Then,₅₉₃
 540 when the *SCC* publishes a data JSON (Figure 9) like in trans-₅₉₄
 541 action *i*, the SSS publishes and notifies the peer RMS. The RMS₅₉₅
 542 then subscribes the data, as shown in transaction *j*. Finally,₅₉₆
 543 the RMS can ask the SSS to change some configuration on the₅₉₇
 544 *SCC*. In this case, it publishes a software-configuration object₅₉₈
 545 that is notified to the peer SSS (transaction *l*). The SSS sub-₅₉₉
 546 scribes the object, translates to the JSON format expected by
 547 the *SCC* as illustrated on Figure 8 (transaction *k*). The *SCC*
 548 then changes the configuration at the GNU Radio, which re-₆₀₀
 549 flects the change on the hardware.

550 4. Results and Analysis

551 4.1. Low Cost Cooperative Sensing and Cognitive Radio

552 The implementation scenario of the low-cost cooperative₆₀₀
 553 cognitive radio for IoT applications was reported in Figure 1b₆₀₁
 554 from Section 2. A pair of radios M_1 and M_2 have been used₆₀₂
 555 as IoT devices establishing a communication link; their hard-₆₀₃
 556 ware are composed by two Texas Instruments reference designs₆₀₄
 557 based on RF transceiver CC1120 [36]. The experiments have₆₀₅
 558 been realized in 902 to 928 MHz frequency channel reserved
 559 for unlicensed ISM applications. The radios have been config-₆₀₆
 560 ured to continuous transmit packets with 50 bytes length at₆₀₇
 561 fixed data rate of 150 Kbps using 2-GFSK modulation.₆₀₈

562 The radios are placed far away from each other in such a way₆₀₉
 563 that a communication between them is possible when no inter-₆₁₀
 564 ference is present. Near each radio a *SC* was placed so M_1 and₆₁₁
 565 M_2 may be sensed by SC_1 and SC_2 respectively. Another radio₆₁₂
 566 M_{int} that acts as an interference source by means of generat-₆₁₃
 567 ing random RF spectrum utilization was placed. M_{int} behaves₆₁₄
 568 such as a communication device that does not belongs to this₆₁₅
 569 IoT network, characterizing a multi-user RF environment. In₆₁₆
 570 a practical environment, a perfect isolation of RF boundarie₆₁₇
 571 is not possible, so the *SCs* will also sense some signal from₆₁₈
 572 neighbor radio as well the interfering source.₆₁₉

573 The experiments have been carried out for different values₆₂₀
 574 of Receiver Signal Strength Indication (RSSI) by changing the₆₂₁
 575 M_2 transmission power. The probability of the radio M_{int} be-₆₂₂
 576 transmitting was also modified to evaluate its influence over the
 577 link communication. Figure 12 reports the experimental results
 578 where the Packet Error Rate (PER) parameter has been used as₆₂₃
 579 a performance figure of merit. For each test 5000 packets have₆₂₄
 580 been sent and the amount of succeeded received packets were₆₂₅
 581 recorded. Initially was considered that the radios M_1 and M_2 ₆₂₆
 582 does not have information about RF spectrum usage, so the 921₆₂₇
 583 MHz channel was selected, the same being used by M_{int} . Dur-₆₂₈
 584 ing the experiment the interfering radio M_{int} randomly trans-₆₂₉
 585 mit messages that are not demodulated by M_1 or M_2 but inter-₆₃₀
 586 feres on link communication increasing the PER. Later a test₆₃₁
 587 was conducted where the radios M_1 and M_2 makes use of *SISA*₆₃₂
 588 information presented in Figure 13 to define the link channel.₆₃₃
 589 As a centralized source of information, *SISA* indicates that the₆₃₄

channel 921 MHz is in use and the channel 924 MHz is available. The hidden node problem will be present as SC_2 does not sense M_{int} signal as shown in Figure 13b but with SC_1 information M_{int} is detected (Figure 13a) and the channel of 921 MHz may be avoided. The PER test was conducted again with radios using 924 MHz channel and the result was always below 5%.

Since the experiment have been carried out in a real environment, other signals was also detected by the *SCs* which the most notable being present in 917 MHz, not related to the context of this work.

4.2. Interoperation with NovaGenesis

507 Figure 14 presents our concept of a convergent solution of
 508 future Internet and cognitive radio in the context of Internet of
 509 “things”. The computer on the left side is running the *SCC* in-
 510 side a GNU Radio instance. The one in the middle is running
 511 five NovaGenesis services, including the SSS for interoperabil-
 512 ity with *SCC*, the PSS that provides a distributed API for NG
 513 pub/sub service, and a PGCS, which encapsulate NovaGene-
 514 sis messages over Ethernet/Wi-Fi. The right computer runs a
 515 PGCS and an RMS instance. The RMS is the target of the spec-
 516 trum samples collected at *SCC*, forwarded to SSS, published to
 517 PSS, and finally subscribed by RMS.

518 4.2.1. Exposition and Discovery

519 Figure 15 contains a partial reproduction of the log of an SSS
 520 exposition message published to the PSS. The first command
 521 line with the command *ng -m -cl* is used by NovaGenesis to
 522 route the message to the destination. NG employs a name-based
 523 routing approach based on tuples of self-certifying names.
 524 The argument [$< 4 s 0BD95286 ED12F3ED 342DD4C5$
 525 $B8101939 >$] contains a tuple that identify/locate the source
 526 of the message (SSS) and the argument [$< 4 s 0BD95286$
 527 $ED12F3ED 449B0B0C 6FDF0A76 >$] provides the ID/Loc
 528 for the PSS. The command line *ng -p -b* is used to publish name
 529 bindings, therefore exposing keywords related to the SSS, e.g.
 530 the key 19656CF3 is the hash of the word “Wi-Fi”. This log is
 531 exactly an example of the transaction *a* from Figure 11. In the
 532 discovery process, the RMS subscribes keywords from the PSS
 533 that represent a possible peer (transaction *b*).

534 4.2.2. Service Offer and Acceptance

535 A *get_info* request is performed by the SSS to the *SCC*. The
 536 answer is used by the SSS to prepare a service offer to the can-
 537 didate peer RMS (transaction *e*). Figure 16 reproduces the mes-
 538 sage that carries a *Service_Offer_2026721035.txt* object (trans-
 539 action *e*). The pub/notify command line (*ng -p -notify*) contains
 540 the name binding $< 1 s 3182F342 > < 1 s Service_Offer_2026$
 541 $721035.txt >$, which links the SVN 3182F342 to a .txt file. A
 542 service acceptance object is published by the RMS and notified
 543 to the SSS as previously described. Observe also the four NBs
 544 that are published related to this file in the *ng -p -b* command
 545 line.

```

ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.cellcontroller_latitude > < 1 s -22.257360 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.cellcontroller_longitude > < 1 s -45.696651 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.cellcontroller_id > < 1 s a65faefc-56f7-11e5a483
-001dbaeaf596 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_sectors > < 1 s 1 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_freq_min > < 1 s 100000000 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_bw_max > < 1 s 2048000 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_bw_min > < 1 s 1024000 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_direction > < 1 s 0 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_freq_max > < 1 s 1800000000 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_freq_stop > < 2 s 930000000 -1 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_freq_start > < 2 s 900000000 -1 > ]
ng -sr --b 0.1 [ < 1 s 17 > < 1 s SSS01.sensing_bw > < 1 s 1000000 > ]

```

Figure 10: SSS service offer in NovaGenesis format to RMS.

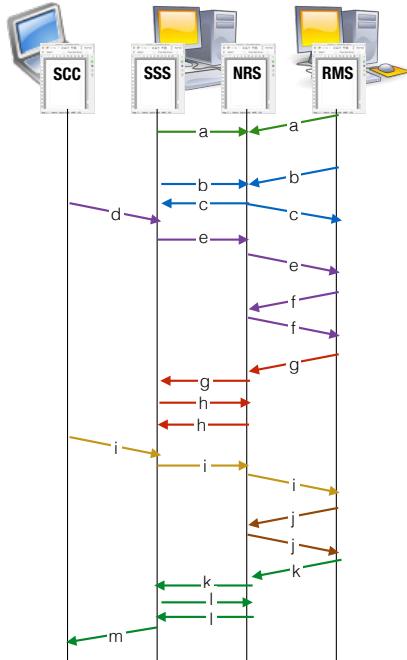


Figure 11: Example of two applications in a simple link scenario.

4.2.3. Publish/Subscribe of Spectrum Sensing Data Objects

A log of an spectrum sensing publication by SSS to RMS is shown on Figure 17. The sensing data is carried in the file *SSSFile_7.txt*. The Figure 18 shows a TCP fragment containing the JSON of a spectrum sensing sample, whereas Figure 19 presents a NG message similar to the Figure 17. Both images have been captured using Wireshark tool. Figure 20 depicts a plot generated from 15 hours of sampling over NovaGenesis. This figure demonstrates that the approach with NovaGenesis generated a result similar to the previous ones obtained over TCP/IP. Finally, Figure 21 it is plotted the mean round trip time (RTT) spent by the RMS to subscribe spectrum sensing objects.

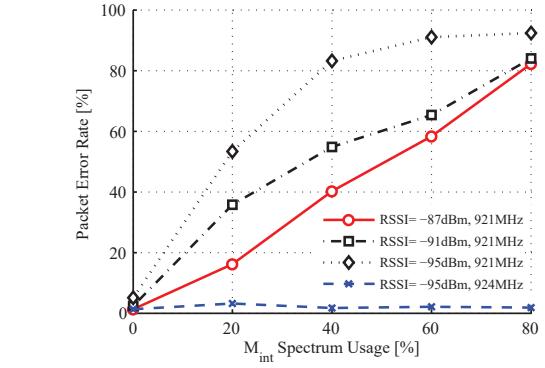


Figure 12: Packet error rate.

from PSS/GIRS/HTS. In the first 9 hours, approximately, the RTT remained linear about 5.2 ms. After, it suffered a small increase probably due to the large amount of sample files stored at the HTS. As a conclusion, we have successfully demonstrated a straightforward convergence of IoT, FI and cognitive radio.

5. Conclusions

This paper explores the convergence of cognitive radio network (CRN), Internet of “things” (IoT), and a future Internet architecture (FIA) called NovaGenesis. We first report the concept and implementation of a low-cost embedded cooperative sensing and cognitive radio architecture for IoT applications. The proposed technology solution can be considered potential for wireless sensor networks, in which software-control is provided using current Internet technology. Moreover, we have experimentally demonstrated that the use of cooperative spectrum sensing based on energy detection has overcome the hidden node problem, which is very common in cooperative cognitive radio networks and for sure will be present on IoT scenarios. An experimental performance investigation based on packet error rate as a function of RSSI has demonstrated the efficiency and applicability of the proposed CRN approach.

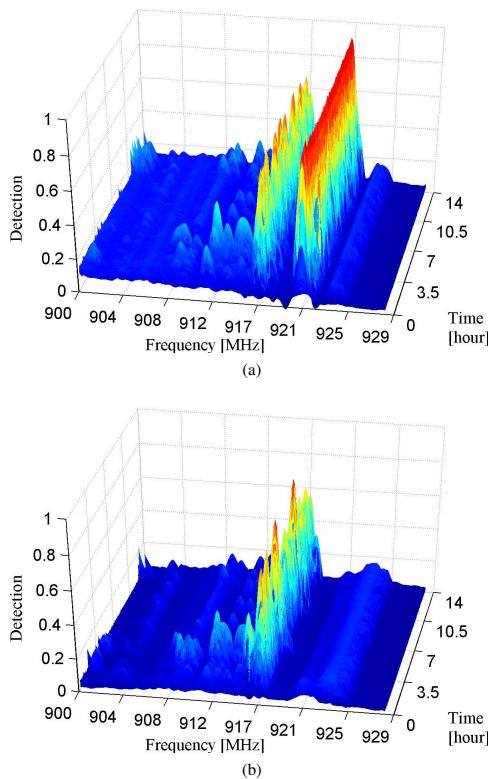


Figure 13: Spectrum Sensing: (a) SCC_1 sensing output and (b) SCC_2 sensing output.

Our second contribution relies on the extension of NovaGenesis with novel services to interoperate with the aforementioned embedded spectrum sensing and software-control approach. In this sense, we report the implementation of two new future Internet services: spectrum sensing service (SSS) and resource management service (RMS). The SSS interoperates with a spectrum sensing controller (SCC), which has a GNU radio implementation for determining energy level at channels on 915 MHz ISM band. The SCC spectrum samples are sent to the SSS using TCP/IP. The SSS translates the data objects from JSON format to NovaGenesis and publishes them to the RMS (without TCP/IP). The RMS subscribes the data objects according to their self-verifying names (SVNes). The data objects are transferred in NovaGenesis messages directly over Ethernet. We demonstrated that NovaGenesis provides an equivalent spectrum sensing data objects transport service for IoT.

Our experimental proof-of-concept demonstrates several novelties that are typically found only on future Internet research: (i) exposition and discovery of next generation wireless services; (ii) contract-based operation with SLA establishment; (iii) distributed name resolution for hosts, operating sys-

tems, services, and data objects using natural language names (keywords) and SVNes; (iv) name-based routing of messages among NovaGenesis services; and (v) provenance and integrity of spectrum sensing data using SVNes. To the best of our knowledge, these features have never been demonstrated before while converging IoT, FIAS and IoT.

Future work includes the evaluation of the proposed embedded and low cost spectrum sensing and cognitive radio architecture with different radios, sensing cells, and interference sources arrangements. We also plan to extend NovaGenesis services to have the same software-control architecture (including SISA and fusion center) as the one based on current Internet. Then, we will be able to compare performance and scalability of both current Internet and future Internet approaches, advancing next generation networks towards opportunistic, service-oriented, name- and contract-based, software-controlled, self-certified named architectures.

Acknowledgments

This work was partially supported by Finep, with resources from Funtel, Grant No. 01.14.0231.00, under the Radiocommunication Reference Center (Centro de Referência em Radicomunicações - CRR) project of the National Institute of Telecommunications (Instituto Nacional de Telecomunicações - Intel), Brazil. Authors also thank the financial support from CNPq, CAPES, MCTI and FAPEMIG.

References

- [1] N. Michailow, M. Matthe, I. Gaspar, A. Caldevilla, L. Mendes, A. Festag, G. Fettweis, Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks, Communications, IEEE Transactions on 62 (2014) 3045–3061.
- [2] J. Mitola, J. Maguire, G.Q., Cognitive radio: making software radios more personal, Personal Communications, IEEE 6 (1999) 13–18.
- [3] A. Alberti, A conceptual-driven survey on future internet requirements, technologies, and challenges, Journal of the Brazilian Computer Society 19 (2013) 291–311.
- [4] J. Pan, S. Paul, R. Jain, A survey of the research on future internet architectures, Communications Magazine, IEEE 49 (2011) 26–36.
- [5] E. Z. Tragos, V. Angelakis, Cognitive radio inspired m2m communications, in: Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2013 16th International Symposium on, IEEE, pp. 1–5.
- [6] W. K. Seah, Z. A. Eu, H.-P. Tan, Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap)-survey and challenges, in: Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on, Ieee, pp. 1–5.
- [7] H. Iqbal, T. Znati, Overcoming failures: Fault-tolerance and logical centralization in clean-slate network management, in: INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE, pp. 1–5.
- [8] D. C. et al., Future Internet Design, Technical Report, MIT, 2005.
- [9] G. group, Geni design principles, Computer 39 (2006) 102–105.
- [10] P. Stuckmann, R. Zimmermann, European research on future internet design, Wireless Communications, IEEE 16 (2009) 14–22.
- [11] F. Ramparany, F. Galan Marquez, J. Soriano, T. Elsaleh, Handling smart environment devices, data and services at the semantic level with the fiware core platform, in: Big Data (Big Data), 2014 IEEE International Conference on, pp. 14–20.
- [12] M. Presser, P. Barnaghi, M. Eurich, C. Villalonga, The sensei project: integrating the physical world with the digital world of the network of the future, Communications Magazine, IEEE 47 (2009) 1–4.

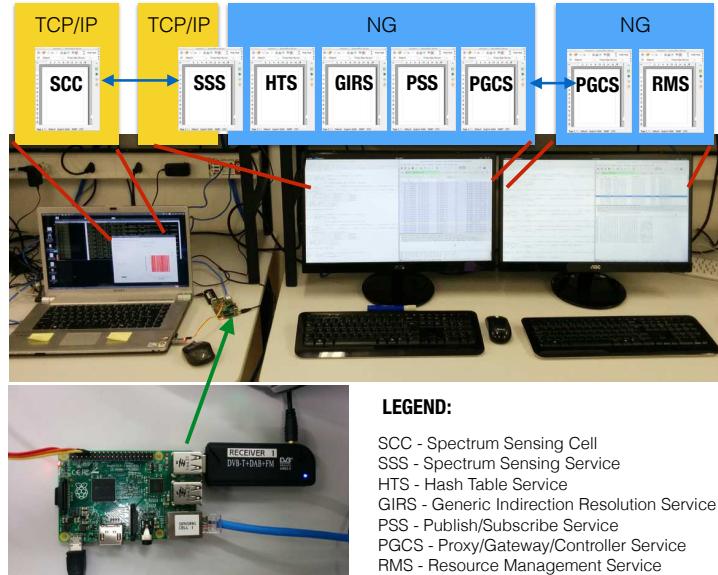


Figure 14: Experimental scenario for interoperability test of collaborative spectrum sensing with NovaGenesis.

```

ng -m --c1 0.1 [ < 1 s ... > < 4 s OBD95286 ED12F3ED 342DD4C5 B8101939 > < 4 s OBD95286
ED12F3ED 449B0B0C 6FDFOA76 > ]
...
ng -p --b 0.1 [ < 1 s 2 > < 1 s 19656CF3 > < 1 s 342DD4C5 > ]
ng -p --b 0.1 [ < 1 s 1 > < 1 s 19656CF3 > < 1 s Wi-Fi > ]
...
ng -message --type 0.1 [ < 1 s 1 > ]
ng -message --seq 0.1 [ < 1 s 28 > ]
ng -scn --seq 0.1 [ < 1 s 76A8DC70 > ]

```

Figure 15: Exposition of SSS keywords and self-verifying names.

- 753 [13] L. Sanchez, V. Gutierrez, J. Galache, P. Sotres, J. Santana, J. Casanueva,⁷⁷⁷
 754 L. Munoz, Smartsantander: Experimentation and service provision in the⁷⁷⁷
 755 smart city, in: Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC),⁷⁷⁸
 756 2013 16th International Symposium on, pp. 1–6.⁷⁷⁹
- 757 [14] L. de Oliveira, A. Alberti, M. Favoretto Casaroli, E. Raimundo-Neto, I. Fe-⁷⁸⁰
 758 liciano da Costa, A. Cerqueira Sodré, Service-oriented, name-based, and⁷⁸¹
 759 software-defined spectrum sensing and dynamic resource allocation for⁷⁸²
 760 wi-fi networks using novagenesis, in: Telecommunications (IWT), 2015⁷⁸³
 761 International Workshop on, pp. 1–8.⁷⁸⁴
- 762 [15] B. Ahlgren, C. Dannewitz, C. Imbrinda, D. Kutscher, B. Ohlman, A⁷⁸⁵
 763 survey of information-centric networking, Communications Magazine,⁷⁸⁶
 764 IEEE 50 (2012) 26–36.⁷⁸⁷
- 765 [16] M. Papazoglou, P. Traverso, S. Dustdar, F. Leymann, Service-oriented⁷⁸⁸
 766 computing: State of the art and research challenges, Computer 40 (2007)⁷⁸⁹
 767 38–45.⁷⁹⁰
- 768 [17] E. Nordström, D. Shue, P. Gopalan, R. Kiefer, M. Arye, S. Ko, J. Rexford,⁷⁹¹
 769 M. J. Freedman, Serval: An end-host stack for service-centric network-⁷⁹²
 770 working, in: S. D. Gribble, D. Katabi (Eds.), NSDI, USENIX Association,⁷⁹³
 771 2012, pp. 85–98.⁷⁹⁴
- 772 [18] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson,⁷⁹⁵
 773 J. Rexford, S. Shenker, J. Turner, Openflow: enabling innovation in cam-⁷⁹⁶
 774 pus networks, SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 38 (2008) 69–74.⁷⁹⁷
- 775 [19] S. Sun, M. Kadoch, L. Gong, B. Rong, Integrating network function⁷⁹⁸
 virtualization with sdr and sdn for 4g/5g networks, Network, IEEE 29
 (2015) 54–59.
- [20] A. Ghodsi, T. Koponen, J. Rajahalme, P. Sarolahti, S. Shenker, Naming
 in content-oriented architectures, in: Proceedings of the ACM SIG-
 COMM Workshop on Information-centric Networking, ICN '11, ACM,
 New York, NY, USA, 2011, pp. 1–6.
- [21] , A survey of identifier-locator split addressing architectures, Comput. Sci.
 Rev. 17 (2015) 25–42.
- [22] T. Yucek, H. Arslan, A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive
 radio applications, IEEE Communications Surveys & Tutorials 11
 (2009) 116–130.
- [23] Raspberry PI Foundation, Raspberry PI web site, 2015.
- [24] Realtek, RTL2832U DVB-T COFDM Demodulator + USB 2.0,
<http://www.realtek.com.tw>, 2012.
- [25] J. del Peral-Rosado, J. M. Parro-Jiménez, J. Lopez-Salcedo, G. Seco-
 Granados, P. Crosta, F. Zanier, M. Crisci, et al., Comparative results
 analysis on positioning with real lte signals and low-cost hardware plat-
 forms, in: Satellite Navigation Technologies and European Workshop on
 GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), 2014 7th ESA Work-
 shop on, IEEE, pp. 1–8.
- [26] C. Cordeiro, K. Challapali, C-MAC: A Cognitive MAC Protocol for
 Multi-Channel Wireless Networks, in: New Frontiers in Dynamic Spec-
 trum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International

```

ng -m --c1 0.1 [ < 1 s 28FD4420 > < 4 s OBD95286 ED12F3ED 342DD4C5 B8101939 >
< 4 s OBD95286 ED12F3ED 449BOBOC 6DF0A76 > ]
ng -p --notify 0.1 [ < 1 s 18 > < 1 s 3182F342 > < 1 s Service_Offer_2026721035.txt >
< 5 s pub FCOAFOEB 1449F6D8 1C873D85 6DCEA2B > ]
ng -info --payload 0.1 [ < 1 s Service_Offer_2026721035.txt > ]
ng -p --b 0.1 [ < 1 s 2 > < 1 s 3182F342 > < 1 s B8101939 > ]
ng -p --b 0.1 [ < 1 s 2 > < 1 s 3182F342 > < 1 s 342DD4C5 > ]
ng -p --b 0.1 [ < 1 s 2 > < 1 s 3182F342 > < 1 s ED12F3ED > ]
ng -p --b 0.1 [ < 1 s 9 > < 1 s 3182F342 > < 1 s OBD95286 > ]
ng -message --type 0.1 [ < 1 s 1 > ]
ng -message --seq 0.1 [ < 1 s 56 > ]
ng -scn --seq 0.1 [ < 1 s 63FEFE81 > ]

There is a payload of 971 bytes

```

Figure 16: Service offer from SSS to RMS.

```

ng -m --c1 0.1 [ < 1 s 28FD4420 > < 4 s OBD95286 ED12F3ED 342DD4C5
B8101939 > < 4 s OBD95286 ED12F3ED 449BOBOC 6DF0A76 > ]
ng -p --notify 0.1 [ < 1 s 18 > < 1 s EDD33B4D > < 1 s SSSFile_7.txt >
< 5 s pub FCOAFOEB 1449F6D8 1C873D85 6DCEA2B > ]
ng -info --payload 0.1 [ < 1 s SSSFile_7.txt > ]
...
ng -scn --seq 0.1 [ < 1 s A65E7906 > ]

There is a payload of 446 bytes

```

Figure 17: Spectrum sensing data being carried in the payload of a publish/notify message.

eth.addr == 00:1d:ba:ef:a5:96				eth.type == 0x1234							
No.	Time	Source	Destination	Prot.	No.	Time	Source	Destination	Protocol	Len	
3598	127.451243	192.168.60.170	192.168.60.106	TCP	278...	717.273963	AsustekC_c9:df:fd	AsustekC_c9:df:3b	0x1234	4	
3599	127.451246	192.168.60.106	192.168.60.170	TCP	278...	717.277425	AsustekC_c9:df:3b	AsustekC_c9:df:fd	0x1234	9	
3600	127.451943	192.168.60.170	192.168.60.106	TCP	278...	717.372209	AsustekC_c9:df:3b	AsustekC_c9:df:fd	0x1234	2	
3601	127.451949	192.168.60.106	192.168.60.170	TCP	278...	717.374300	AsustekC_c9:df:fd	AsustekC_c9:df:3b	0x1234	4	
► Frame 3600: 245 bytes on wire (1960 bits), 245 bytes captured (1960 bits) on interface eth0 ► Ethernet II, Src: SonyCorp_ef:a5:96 (00:1d:ba:ef:a5:96), Dst: AsustekC_c9:df:3b (192.168.60.170) ► Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.60.170, Dst: 192.168.60.106 ► Transmission Control Protocol, Src Port: 5055 (5055), Dst Port: 443 (443) ► Data (197 bytes)											
0000	ac 22 0b c9 df 3b 00 1d ba ef a5 96 00 08 00 45 00	0000	ac 22 0b c9 df fd ac 22 0b c9 df 3b 12 34 5d 2e	4	
0010	00 e7 62 07 40 00 40 06 dd a4 c0 a8 3c aa c0 a8	..b.@.@.	0010	59 c3 00 00 00 00 00 00 00 00 03 c6 6e 67	Y.....	ng	
0020	3c 6a 13 bf ad 78 d3 78 0b ba ed 83 5e 67 80 18	<j...x.x	0020	20 2d 6d 20 2d 2d 63 6c 20 30 2e 31 20 5b 20 3c	-m --cl	0.1 [<	
0030	00 1d bf 9c 00 01 01 08 0a 00 13 69 01 00 55	0030	20 31 20 73 20 32 38 46 44 34 34 32 30 20 3e 20	1 s 28F	D4420 >	
0040	ac e4 b2 00 7b 22 73 65 63 74 6f 72 22 3a 22 5c{"se ct	0040	30 24 30 20 73 20 30 42 44 39 35 32 38 36 20 45	< 4 s	O95286 E	
0050	22 30 5c 22 22 22 2c 22 6d 73 67 69 64 22 3a 22 31	"0""", "m sg	0050	44 31 32 46 33 45 44 20 34 46 38 35 36 31 44 36	D12F3ED	4F8561D6	
0060	30 35 30 32 31 38 30 32 31 22 2c 22 64 61 74 65	05021802 1"	0060	20 38 42 45 42 43 42 30 20 3e 20 3c 20 34 28	8BEBCB 0 > < 4	
0070	22 23 32 30 31 36 2d 30 32 2d 32 20 31 31	:"2016_-02	0070	73 20 46 43 30 41 46 30 45 42 20 31 34 34 39 46	f.C0AF0 EB 1449F	
0080	3a 35 36 3a 32 30 2e 39 33 35 38 37 32 22 2c 22	:56:20.9 35	0080	36 44 38 20 31 43 38 37 33 44 38 35 20 35 39 35	6D8 1C87 3D85 595	
0090	66 72 65 71 22 3a 22 39 30 34 30 30 30 30 30	freq": "9 04	0090	33 30 39 32 35 20 3e 20 5d 0a 6e 67 20 2d 64 20	30925 > l.ng -d	
00a0	22 2c 22 73 65 66 73 6f 72 22 3a 22 30 2e 30 33	,"senso r"	00a0	31 38 20 3e 20 20 3c 20 31 20 73 20 46 36 43 33 39	-b 0.1 [< 1 s	
00b0	39 33 30 39 37 22 2c 22 63 65 6c 6c 69 64 22 3a	93097"	00b0	31 38 20 3e 20 20 3c 20 31 20 73 20 46 36 43 33 39	18 > < 1 s F6C39	
00c0	22 61 36 35 66 61 65 66 63 2d 35 36 66 37 2d 31	"a65faef c-	00c0	34 44 42 20 3e 20 3c 20 31 20 73 20 53 53 53 46	4DB > < 1 s SSSF	
00d0	31 65 35 2d 61 34 38 33 2d 30 30 31 64 62 61 65	1e5-a483 -0	00d0	69 6c 65 5f 35 38 31 38 2e 74 78 20 3e 20 5d	ile_5818 .txt >]	
00e0	0e 66 67 20 26 69 6e 66	6f 20 2d 2d 70 61 79 6c	00e0	5b 20 3c 20 31 20 73 20 61 79 6c	.ng -inf o --payl	
00f0	6f 61 64 20 30 2e 31 20	5b 20 3c 20 31 20 73 20	00f0	53 53 53 46 69 6c 65 5f 35 38 31 38 2e 74 78 74	oad 0.1 [< 1 s	
0100	53 53 53 46 69 6c 65 5f 35 38 31 38 2e 74 78 74	SSSFile_5818.txt	0100						

Figure 18: Fragment of a TCP segment transporting a spectrum sample in JSON format from SCC to SSS.

Figure 19: Fragment of a NovaGenesis message transporting a spectrum sample directly over Ethernet.

- 799 Symposium on, pp. 147–157.
- 800 [27] J. J. Thennattil, E. M. Manuel, A novel approach in cooperative spec-
801 trum sensing for cognitive radio, in: Intelligent Computational Systems
802 (RAICS), 2013 IEEE Recent Advances in, IEEE, 2013, pp. 43–47.
- 803 [28] X. Zhang, H. Su, CREAM-MAC: Cognitive radio-enabled multi-channela⁸⁰⁴
804 MAC protocol over dynamic spectrum access networks, Selected Topics in
805 in Signal Processing, IEEE Journal of 5 (2011) 110–123. 811
- 806 [29] T. Rondeau, J. Corgan, GNU Radio project web site, 2015. 812
- 807 [30] F. Peng, H. Chen, B. Chen, On energy detection for cooperative spectrumu⁸¹³
808 sensing, in: Information Sciences and Systems (CISS), 2012 46th Annuala⁸¹⁴
- Conference on, IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [31] H. Urkowitz, Energy detection of unknown deterministic signals, Proceedings of the IEEE 55 (1967) 523–531.
- [32] S. E. Tavares, A comparison of integration and low-pass filtering, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on 15 (1966) 33–38.
- [33] A. M. Alberti, Searching for synergies among future internet ingredi-

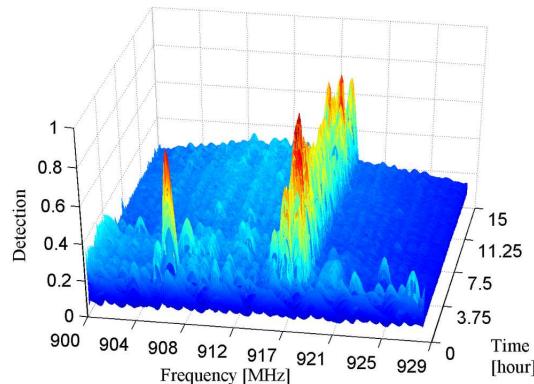


Figure 20: Spectrum sensing output obtained using NovaGenesis as transport network instead of TCP/IP.

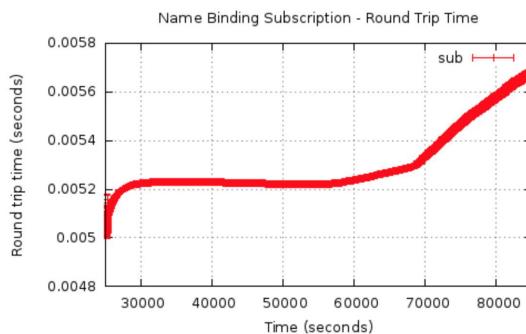


Figure 21: Mean spectrum sample subscription RTT from RMS.

- B15 ents, in: G. Lee, D. Howard, D. Slezak, Y. Hong (Eds.), Convergence
B16 and Hybrid Information Technology, volume 310 of *Communications in*
B17 *Computer and Information Science*, Springer Berlin Heidelberg, 2012,
B18 pp. 61–68.
B19 [34] C. Dannewitz, Netinf: An information-centric design for the future inter-
B20 net, in: Proc. 3rd GI ITG KuVS Workshop on The Future Internet.
B21 [35] D. Han, A. Anand, F. Dogar, B. Li, H. Lim, M. Machado, A. Mukundan,
B22 W. Wu, A. Akella, D. G. Andersen, J. W. Byers, S. Seshan, P. Steenkiste,
B23 XIA: Efficient support for evolvable internetworking, in: Proc. 9th
B24 USENIX NSDI, San Jose, CA.
B25 [36] Texas Instruments, CC1120 High-Performance RF Transceiver for
B26 Narrowband Systems, <http://www.ti.com/lit/ds/swrs112h/swrs112h.pdf>,
B27 2015.

Low-cost Software-defined Wireless Cognitive Network based on Real-time Multi-Sector Spectrum Sensing and Reconfigurable Antenna Array

D. Mazzer, M. M. Bontempo, A. M. Alberti and Arismar Cerqueira S. Jr.

National Institute of Telecommunications, INATEL, Santa Rita do Sapucaí-MG, Brazil.

E-mail: daniel.mazzer@inatel.br

Abstract

This paper presents the development of an electrically-controlled reconfigurable antenna array and its implementation in a low-cost embedded wireless cognitive network with a real-time multi-sector spectrum sensing. The proposed approach has been implemented in the unlicensed 2.4GHz ISM band with the propose of independently performing spatial and spectrum sensing over different sectors of the wireless coverage area in real time. This novel network functionality is ensured by the use of the an antenna array that is able to provide a reconfigurable radiation pattern.

Key words

Antenna array, cognitive radio, embedded systems, reconfigurable antenna, software defined radio and spectrum sensing.

1. Introduction

A cognitive radio (CR) dynamically sets its operational radio conditions depending on the perceived electromagnetic environment. CR allows reallocating the congested frequency bands to unlicensed bands. The decisions are based on many contexts, since a cognitive radio is a self-aware, environment-aware, energy-aware and regulation-aware device [1,2]. Its usage demands improvement in the hardware requirements in order to properly perform the signal processing. Moreover other challenges are involved such as hidden user detection, operation frequency, sensing time, security and other parameters [2]. A CR core is based on a software-defined radio (SDR) [3], which is a radio communication technology based on software defined wireless communication protocols instead of hardwired implementations. Radiofrequency (RF) components and software defined radio implementations have been reported [4,5]. There are also diverse theoretical and numerical investigations of spectrum sensing techniques [6,7]. Smart antennas performance in wireless systems has been evaluated in the last decades as well [8].

In addition to the cognitive radio concept, reconfigurable antennas [10] have exhibited great promise for the next generation of wireless systems. They might be applied to provide greater bandwidth per user channel, higher spectral efficiency and new value-added services and functionalities, such as beam steering and frequency-agile response. This new class of antennas enables the reconfiguration of different electromagnetic properties, such as the bandwidth, radiation pattern and polarization. The reconfiguration can be controlled using a cognitive radio to cope with extendable and reconfigurable multiservice, multistandard and multiband operation, with spectrum and power utilization efficiency. These new usefulness aspects can significantly reduce the number of components, hardware complexity and cost, when compared with current radio technology, which relies on communications systems with inflexible hardware.

The current work proposes the concept and reports the implementation of a totally embedded low-cost software-defined wireless cognitive network based on the use of an electrically-controlled reconfigurable antenna array. It enables to efficiently perform a real-time multi-sector embedded spectrum sensing, which allows a better situation-awareness, i.e. characterization of the radio environment, providing information for an enhanced adaptation of the radio operational parameters. The manuscript is structured in other four sections. Section 2 presents the development of the electrically-controlled reconfigurable antenna array (ECRAA), including the design methodology, numerical and experimental results. The proposed concept of real-time multi-sector embedded spectrum sensing (RT-MSESS) is described in detail in Section 3, whereas Section 4 reports the implementation of the cognitive wireless network based on RT-MSESS. Finally, conclusions and final remarks are addressed in Section 5.

2. Electrically-Controlled Reconfigurable Antenna Array

The proposed electrically-controlled reconfigurable antenna array (ECRAA) is based on three printed half-wave dipoles and plane reflectors, as shown in Fig. 1. A half-wave dipole has been chosen as radiator element due to its simple design and fabrication, as well as its omnidirectional radiation pattern in the magnetic plane. Each arm length for the printed half-wave dipole has been calculated according to [11] and the DiClad 880 substrate from Arlon, electrical permittivity (ϵ_r) equal to 2.2 and loss tangent of 9×10^{-4} has been used to fabricate the antenna array. The antenna central frequency is 2.45 GHz, with the purpose of implementing the whole system using the Industrial, Scientific and Medical (ISM) frequency band of 2.4 GHz. For this reason, each antenna arm is 2.1 cm long. The entire wireless coverage area can be divided into three sectors of 120° , thus the antenna array has three elements.

A conventional dipole has a beamwidth around 78° in the magnetic field plane [11]. A reflector plane has been added to the array structure for achieving a larger beamwidth of 120° . All the antenna array dimensions were numerically optimized using the full-wave electromagnetic software ANSYS HFSS. Its radiation pattern depends on the distance between the conventional dipole to its plane reflector. The optimal distance of 0.15λ (1.9cm) reduces the electrical field plane beamwidth and expands the magnetic field plane beamwidth to 120° in order to properly cover three sectors of 120° . The array radiation pattern is reconfigured by independently exciting the three printed dipoles, correspondent to the three sectors.

The antenna array prototype, presented in Fig. 6, has been fabricated using Teflon pieces to provide space between the ground plane to the printed dipoles, without significantly interfering in the antenna array performance. The RF switch SKY13373 has been used to select and activate each 120° sector responsible for collecting the samples to be processed by the SDR. It was mounted on a printed circuit board (PCB), placed inside the reflector structure, which also works as a ground plane for the PCB transmission lines. The RF switchboard electrical schematic has been designed in order to have the same electrical length for all array elements, avoiding phase difference between them.

Fig. 1 presents the numerical three-dimensional radiation pattern when only one element is excited, whereas Fig. 2 displays the two-dimensional pattern for the three possible configurations. ECRAA makes it possible to independently perform spectrum sensing over three different sectors. Furthermore, if all the three array elements are fed in phase, ECRAA provides an omnidirectional wireless coverage and/or spectrum sensing of the entire area. The measured antenna array gain was 5.40 dBi for the individual excitation configuration, which is in excellent agreement with those obtained in the numerical simulations, as presented in Fig. 2. Fig. 3 reports

comparisons between the numerical and experimental results of the reflection coefficient. The measured fractional bandwidth is 8.0% from 2.37 to 2.67 GHz.

3. Real-time multi-sector embedded spectrum sensing (RT-MSESS)

This section presents our concept of real-time multi-sector embedded spectrum sensing (RT-MSESS) for cognitive wireless networks. The cognitive radio prototype, described in Fig. 4, is composed by the proposed ECRAA and two development boards: Nuand Blade RF and Macnica Helio. The Nuand Blade RF is a low-cost RF front-end for SDR purposes, which contains a super speed USB 3.0, an Altera Cyclone V FPGA fully programmable and a wideband RF transceiver. ECRAA senses the frequency spectrum and sends the collected RF information to the Nuand Blade RF. The latter one converts the RF signal to the digital domain for performing spectrum sensing using a software defined radio platform. The obtained RF signals by each array element are analyzed at different time slots.

The Manica Helio board is based on a System on Chip (SoC) Altera Cyclone V, with an ARM processor and a Field-Programmable Gate Array (FPGA) in the same microchip. It runs a customized GNU Radio application that controls the RF switch and receives the digitalized signal (I/Q samples) from the Blade RF board. GNU Radio is a free software toolkit used for real-time signal processing through a collection of signal processing blocks for SDR applications. It is typically used in desktop PCs [12], but in this paper it has been embedded into a Macnica Helio board. This approach gives more flexibility to create more compact and less expensive SDR platforms and products. Additionally, our strategy makes possible, for the first time, to perform spectrum sensing in real-time. Since the signal is converted to digital, its level in the SDR software represents the real received level value, with some conversion gains. There is no need to express the obtained data in absolute RF power, thus all the power values in the next measurements are referred to Nuand Blade RF maximum input level.

The RT-MSESS algorithm is based on the energy detection (ED) technique due to its simplicity and lightweight implementation [13]. The test statistic T reflects the spectrum occupancy and the primary user is detected if the T is superior to the decision threshold γ . The threshold has been varied starting from the noise floor level for plotting the Receiver Operating Characteristics (ROC) curve [2]. Two measurement conditions allow the determination of the P_{fa} and P_d parameters: P_{fa} is the percentage of signal presence detection when the threshold varies and the radio transmission is turned off; P_d is this percentage when the radio transmission is on. For both experiments, the number of samples N is constant. The measured ROC curve is displayed in Fig. 5. The received samples are not limited in number as formulated in [13], since the system collects the signal continuously. Therefore, the quadratic values should be integrated in a specific period. For this reason, a low-pass filter [14] is

used in order to implement a real integrator circuit. The Macnica Helio board has two General Purpose Input/Output (GPIO) pins used for selecting the antenna that is going to perform the spatial spectrum sensing. These pins are directly connected to the internal multiplexer from the RF switchboard. The Blade RF board processes the samples collected by the antenna array elements, demodulating the received signal to baseband and digitalizing it. Posterior, the Helio board receives the digital I/Q information and a SDR algorithm, developed using the GNU Radio, calculates the energy of the spectrum slice evaluated.

The data obtained from the previous steps presents DC level caused by its direct conversion architecture [15]. It must be eliminated due to the internal DC level generated by the LMS6001D, which is the RF transceiver from the Nuand Blade RF. The decimation block reduces the sample rate of the acquired signal to make energy computation algorithm less intensive and more suitable for an embedded system. The magnitude of the complex RF signal is then calculated. A one-pole low pass filter acts as the integrator, removing fast energy transients. The obtained data is converted from linear to decibel (dB). Finally, after sensing all the frequency range, the algorithm defines the most appropriate frequency for data transmission. The criterion for this decision is choosing the frequency at the lowest energy level.

4. Implementation of the Cognitive Wireless Network based on RT-MSESS and ECRAA

The proposed RT-MSESS solution has been implemented and experimentally evaluated in the Inatel Campus, located in the city of Santa Rita do Sapucaí-Brazil. Two RF radios, TX1 and TX2, have been set to transmit with bandwidth of 20 MHz at 2.412 GHz (802.11b WiFi Channel 1) and 2.452 GHz (802.11b WiFi Channel 9), respectively. TX1 is placed perpendicular to the main lobe from the array element 1, whereas TX2 is placed perpendicular to that of the array element 2. TX1 and TX2 are 05 and 07 meters away from the antenna array, respectively, as illustrated in the inset of Fig. 6. Fig. 6 reports the most important pieces of the cognitive wireless network, namely: the ECRAA prototype, Nuand Blade RF and Manica Helio boards.

The main goal is to sense a 100MHz bandwidth from 2.4 to 2.5GHz, with the purpose of evaluating the spectrum allocation for each sector detected by the reconfigurable antenna array. The maximum feasible sample rate for not causing samples loss is 1MHz, which defines the maximum bandwidth possible to acquire spectrum samples at the receiver. Since this bandwidth is smaller than the desired band for sensing, the 100MHz frequency range is divided into 100 slices for enabling to sense each one for a time. The ED algorithm senses the spectrum for generating the test statistic T and to compute the decision of occupancy. The threshold has been defined in order to provide $P_{fa}=0.1$, which is a typical value used in literature [1]. Initially, a monopole antenna had been

used as reference for comparison purposes. The algorithm acquired 2 minutes of samples for each slice and for each antenna (ECRAA and monopole). ECRAA has been automatically controlled by using the sensing algorithm.

The experimental results of the conventional spectrum sensing, collected using the monopole antenna, and those of the real-time multi-sector spectrum sensing obtained using the proposed reconfigurable antenna array are reported in Figs. 7 and 8. Particularly, Figs. 7a and 8a present two reference measurements obtained by the monopole antenna, in which one can clearly see the channel usage at 2.412 and 2.452 GHz. The first result is regarding the resulted test statistic variation over two minutes, whereas the second one corresponds to the final occupancy decision. The energy density of the two transmitting radios has being perceived by the receiver and is also possible to notice false alarm detections in Fig. 8a, represented as the small false positive detections outside the two transmitted signals ($P_{fa} = 0.1$). The other subfigures demonstrate the spatial spectrum sensing based the multi-sector coverage, with the purpose of contributing for a more efficient spectrum allocation in real-time. Figs. 7b and 8b reveals channel occupancy at emphasis at 2.412 GHz, whereas Figs. 7c and 8c detects it at 2.452 GHz. Figs 7d and 8d still present some residual detection of these two channels, but with much less intensity. As a conclusion, the proposed approach used in conjunction with ECRAA allows to spatially sense through multi sectors, which might present different frequency spectrum occupancy. Demanding in this way, specific resources allocation in order to provide an enhanced spectral efficiency.

A further experimental performance evaluation has been conducted as a function of the percentage of spectrum occupancy detection of each WiFi channel obtained by the monopole antenna and by each array element, as summarized in Tab. 1. Both channels are detected by the monopole, but it does not present any information regarding the location of each transmitter. On the other hand, the use of the proposed reconfigurable antenna array allows detecting the spectrum occupancy and also the sector correspondent to the RF transmitter. For instance, it is possible to find out the transmitters TX1 and TX2 are located over the area sensed by the array elements 1 and 2, respectively. The location accuracy might be further improved by increasing the number of sectors, which can be easily implemented by using array elements with narrow beamwidth.

5. Conclusions

This work has been focused on two main contributions: the development of a 5.4dBi electrically-controlled antenna array with reconfigurable radiation; a successful implementation of a novel low-cost real-time embedded cognitive radio based on the concept of multi-sector spectrum sensing. The proposed antenna array in conjunction with an embedded real time SDR system enables to perform the spectrum sensing over different sectors of the wireless coverage. Its performance has been shown superior to that of a conventional spectrum

sensing based on a monopole antenna, which provides an omnidirectional coverage. Our technological solution allows detecting the spectrum occupancy and also the sector correspondent to the RF transmitter.

The proposed real-time multi-sector embedded spectrum sensing represents a significant improvement if compared to Smart Wi-Fi solutions [16], since it performs a blind spatial sensing in contrast of Wi-Fi routers that know the number of users connected according to its protocol. RT-MSESS is able to sense any kind of protocol and/ or technology in order to dynamically allocate the network resources in high-efficient wireless networks. Furthermore, it becomes important to highlight the proof of concept has been implemented in the 2.4GHz ISM band, but the proposed solution can be applied to much higher frequencies, including in the millimeter wave range, respecting the RF front-end operational limitations. As a future work, it is aimed to implement RT-MSESS in optical-wireless using photonics-based frequency down-conversion [17] in order to perform the spectrum sensing over the entire (Ultra Wideband) UWB frequency range, i.e. from 3.1 to 10.6GHz.

Acknowledgements

This work was partially supported by Finep/Funttel Grant No. 01.14.0231.00, under the Radio Communications Reference Center (Centro de Referência em Radiocomunicações - CRR) project of the National Institute of Telecommunications (Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel), Brazil. Authors also thank the financial support from CNPq, CAPES, MCTI and FAPEMIG and technical support from Anritsu, Keysight, and ESSS-ANSYS.

References

- [1] E. Raimundo-Neto, J. R. G. da Rosa, M. A. F. Casaroli, I. Feliciano da Costa, A. M. Alberti, and Arismar Cerqueira Sodré Jr., "Implementation of an Optical-Wireless Network with Spectrum Sensing and Dynamic Resource Allocation Using Optically Controlled Reconfigurable Antennas," *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014.
- [2] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, 2009.
- [3] H. Arslan and J. Mitola, "Special Issue: Cognitive radio, software-defined radio, and adaptive wireless systems," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 7, no. 9, pp. 1033–1035, Nov. 2007.
- [4] C. G. Christodoulou et al, "Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 100, No. 7, July 2012.
- [5] Arismar Cerqueira Sodré Junior, Igor Feliciano da Costa, Leandro Tiago Manera, and José Alexandre Diniz, "Optically Controlled Reconfigurable Antenna Array Based on E-Shaped Elements," *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014.
- [6] C. Sun et al, "Fast Beamforming of Electronically Steerable Parasitic Array Radiator Antennas: Theory and Experiment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-52, 7, July 2004, pp. 1819-1832.
- [7] H. Harada. "Software defined radio prototype toward cognitive radio communication systems." First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005.
- [8] Y. Lin et al. "SODA: A high-performance DSP architecture for software-defined radio." *Micro*, IEEE 27.1, pp. 114-123, 2007.
- [9] Y. Zeng and Y. Liang. "Eigenvalue-based spectrum sensing algorithms for cognitive radio." *IEEE Transactions on Communications*, pp. 1784-1793, 2009.
- [10] KJ Ray Liu, "Software radio architecture with smart antennas: a tutorial on algorithms and complexity." *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 17.4 pp. 662-676, 1999.
- [11] C. Balanis, "Antenna theory: analysis and design", John Wiley & Sons, 2012.
- [12] M. Adib Sarjari et al, "Energy detection sensing based on GNU radio and USRP: An analysis study." *IEEE Malaysia International Conference*, 2009.
- [13] H. Urkowitz, "Energy Detection of unknown deterministic signals", *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, p. 523–531, Apr. 1967.

- [14] S. E. Tavares, "A comparison of integration and low-pass filtering", Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on 15.1/2 pp. 33-38, 1966.
- [15] R. Svitek and S. Raman, "DC Offsets in Direct-Conversion Receivers: Characterization and Implications" 2005 IEEE Microwave Magazine, pp. 76-86, Sep. 2005.
- [16] G. Mohan, "Auto Channel Selection in 2.4 GHz using overlap" White paper, 2013.
- [17] R. M. Borges, T. N. Rodovalho and Arismar Cerqueira Sodré Junior, "Reconfigurable multi-band radio-frequency transceiver based on photonics technology for future optical wireless communications," IET Optoelectronics, vol.9, no. 5, pp. 257–262, Oct. 2015.

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1 The antenna array numerical model and its radiation pattern at 2.45 GHz.

Fig. 2 Radiation pattern in the H-plan for the three possible configurations.

Fig. 3 Reflection coefficient: simulation and measurement.

Fig. 4 Block diagram of the low-cost embedded multi-sector spectrum sensing.

Fig. 5 ROC curve obtained using energy detection technique implemented in the GNU Radio framework.

Fig. 6 Implementation of the real-time multi-sector embedded spectrum sensing (RT-MSESS).

Fig. 7 Experimental results of the test statistic variation: **(a)** Monopole antenna; **(b)** Array element 1; **(c)** Array element 2; **(d)** Array element 3.

Fig. 8 Experimental results of the final occupancy detection (White: free band; Dark blue: band in use): **(a)** Monopole antenna; **(b)** Array element 1; **(c)** Array element 2; **(d)** Array element 3.

FIGURE 1

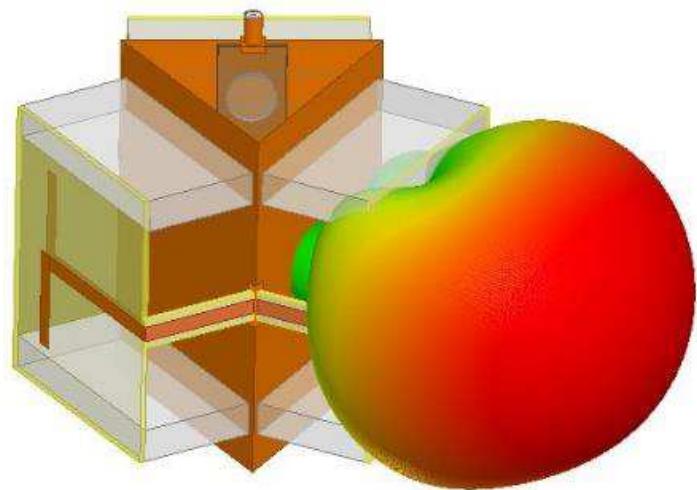


FIGURE 2

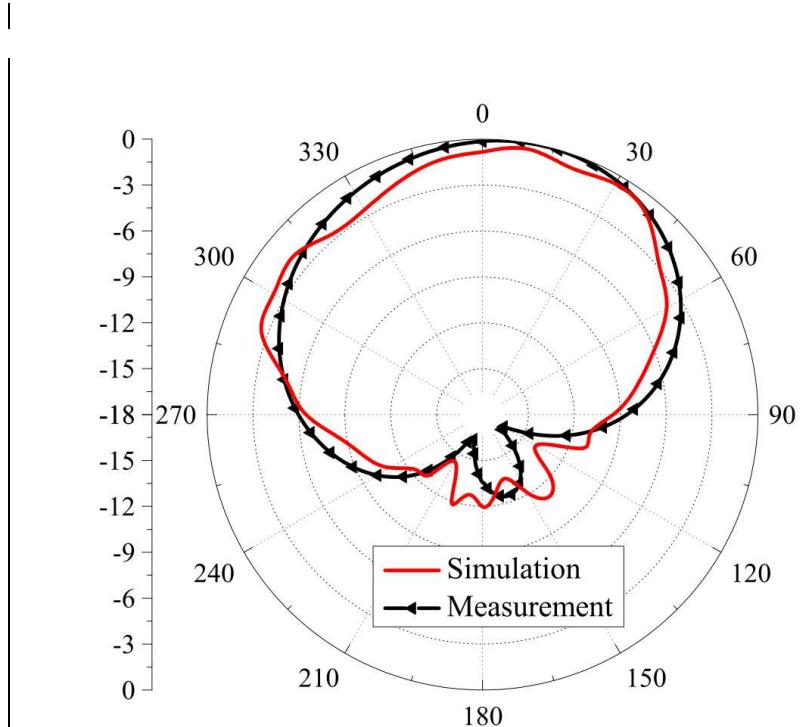


FIGURE 3

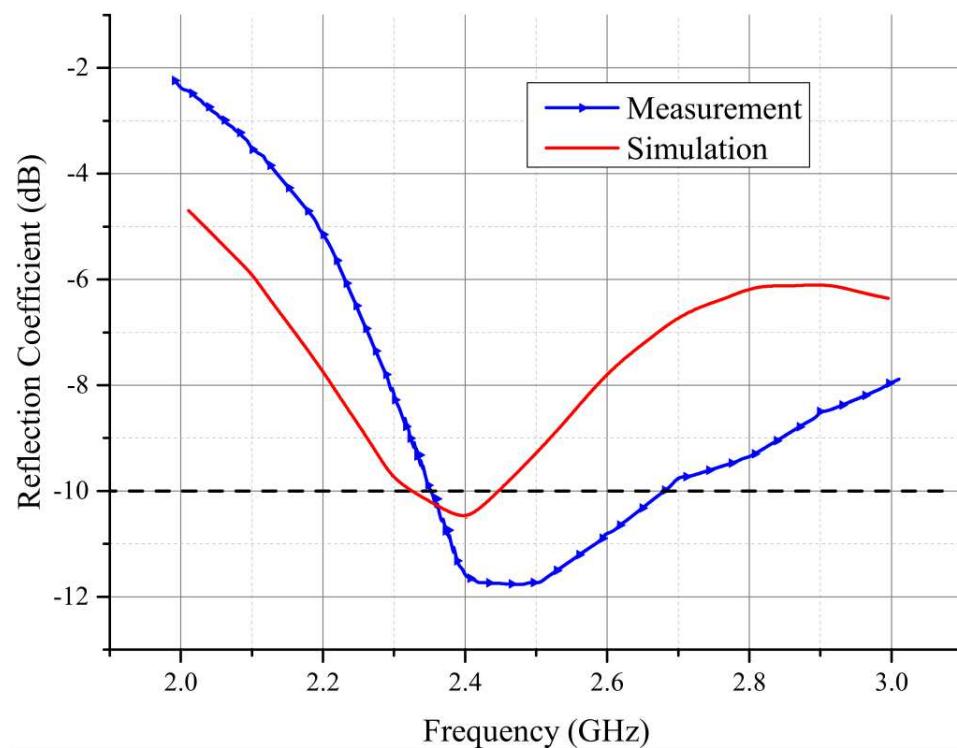


FIGURE 4

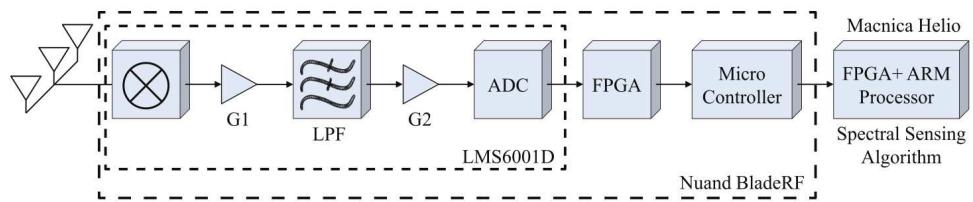


FIGURE 5

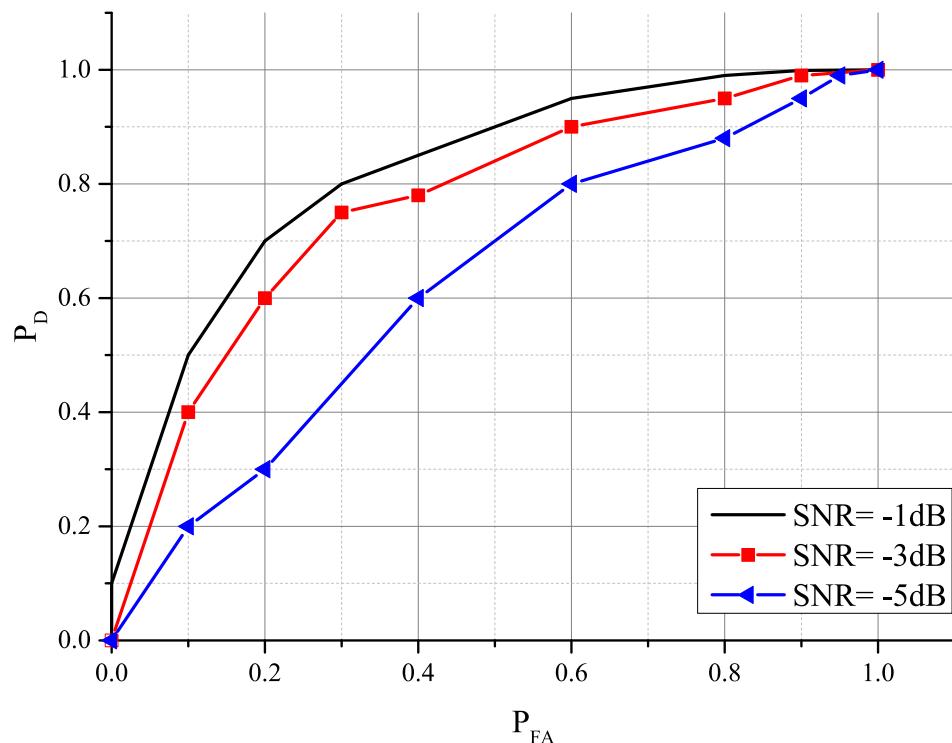


FIGURE 6

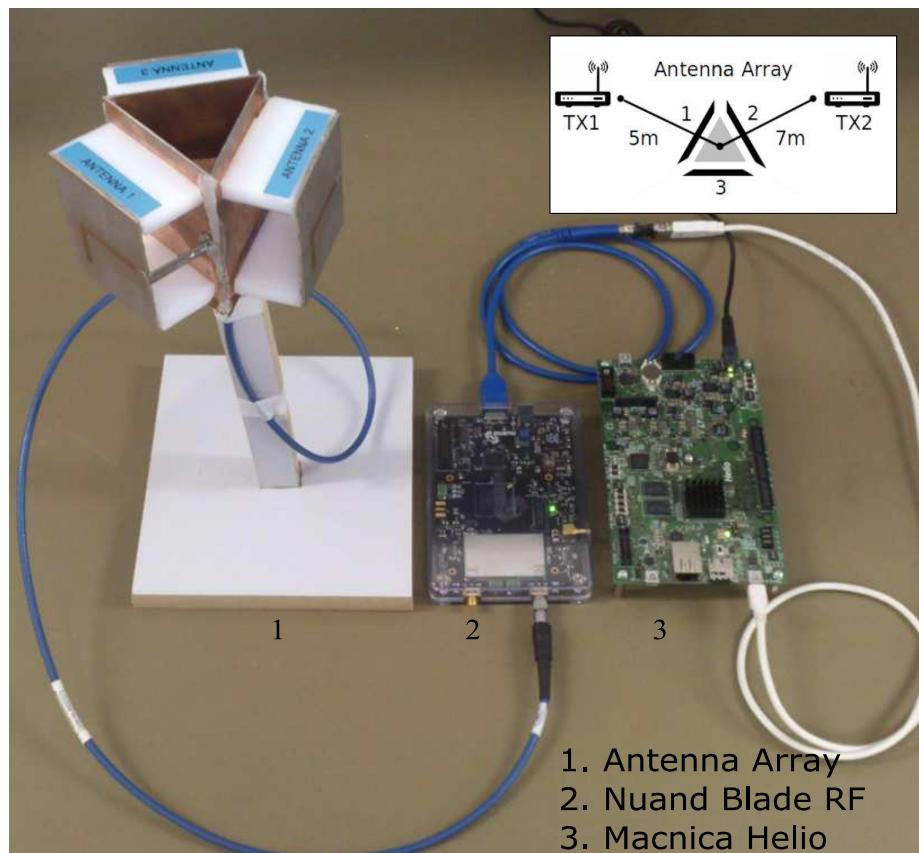


FIGURE 7

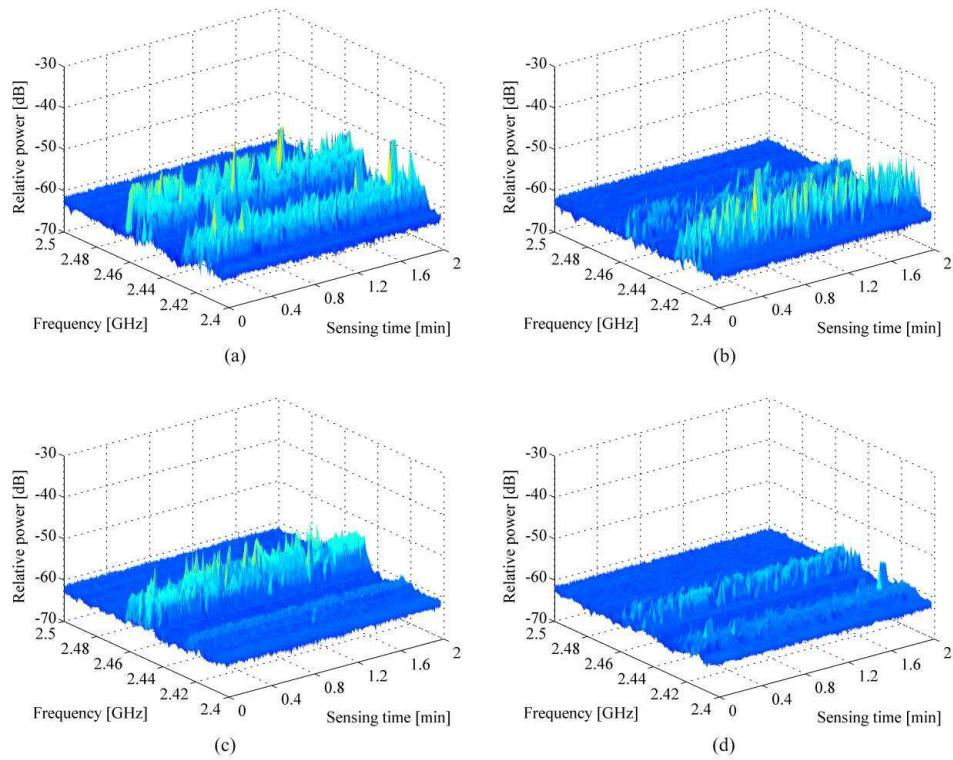
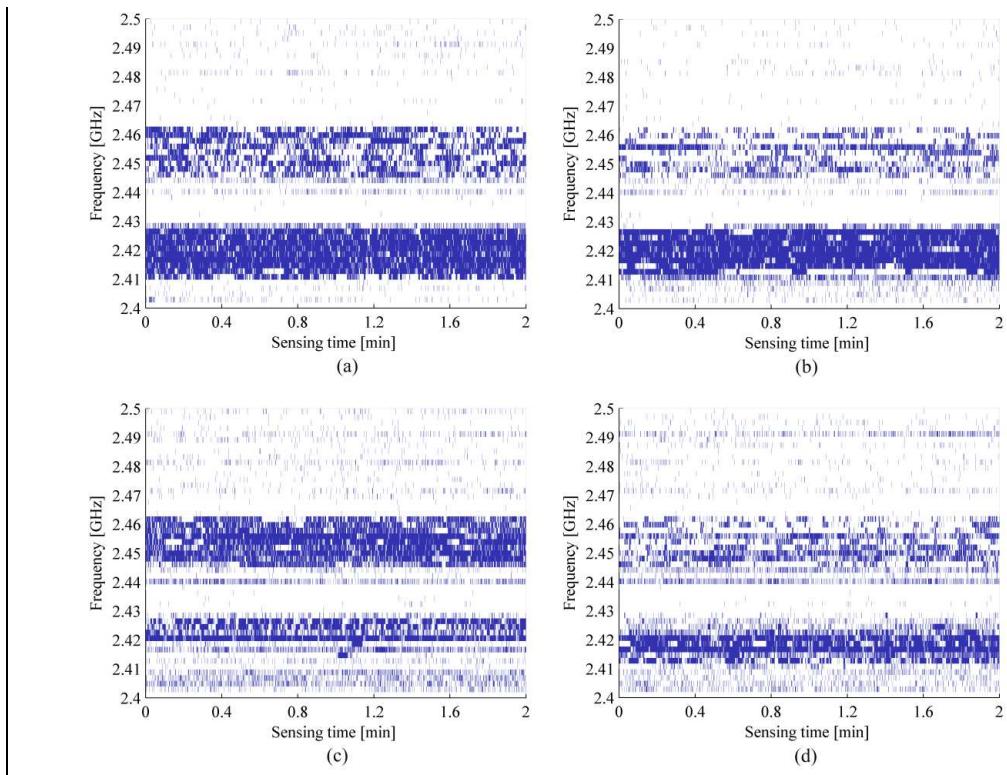


FIGURE 8



TABLES CAPTIONS

TABLE I. PERCENTAGE OF SPECTRUM OCCUPANCY DETECTION OF EACH RF TRANSMITTER.

TABLE 1

Frequency	Monopole	Array Element 1	Array Element 2	Array Element 3
TX ₁ : 2.412GHz	61.3%	75.7%	31.4%	25.1%
TX ₂ : 2.452GHz	45.2%	25.4%	55.8%	35.2%

Factorial Design Analysis Applied to the Performance of Transmission Power Optimization Techniques for Wireless Sensor Networks

Jonathan de C. Silva, Felipe Andery, Daniel Mazzer, Edielson P. Frigeri, Lucas D. P. Mendes

INATEL - National Institute of Telecommunications

510 João de Camargo Avenue, 37540-000 Santa Rita do Sapucaí - MG - Brazil

jonathancs, fandery, daniel.mazzer, edielson@inatel.br, dpmendes@gmail.com

Abstract—Ever-reducing costs for building microelectromechanical devices have boosted the growth of WSNs (Wireless Sensor Networks), allowing greater sensing coverage through the connection of more nodes to a network. Despite its advantages, the complexity of the management of these devices interactions has also increased. Thus, the assessment of different proposals for enhancing performance metrics needs to be carried out. Then, the best characteristics of each will make the creation of new and enhanced proposals possible. In this work, the energy-consumption problem is tackled by using a Particle Swarm Optimization- (PSO) and a Prim's algorithm-based approaches to achieve a connected network while choosing lower transmission power for each node. Moreover, the proposals comparison includes the computing time for each of them to complete the selection of the aforementioned power. Finally, this work is concluded by presenting results that prove that Prim's-based solution outperforms the PSO-based one both in energy-saving and computing time.

Index Terms—Energy-Saving, Prim's algorithm, PSO, WSN.

I. INTRODUCTION

The cost for building microelectromechanical devices keeps its descent as microelectronics advance [1]. On one hand, it enables the growth in the number of nodes that form Wireless Sensor Networks (WSNs). On the other, new challenges arise for keeping communication effective and energy consumption low.

In general, proposals for improving the mentioned metrics in WSNs are categorized either as centralized or distributed [2]. For the first kind, connections are managed by a central node, which carries out the needed computing. Since it needs to receive localization information from each node, it is considered an overhead as it conveys no sensing data. Moreover, routing data will be transmitted back to each sensor, adding to the overhead. However, knowledge of the whole cluster enables the central node to calculate a quasi-optimal routing solution, whereas distributed proposals may only achieve local decisions that do not add up to that effectiveness. Thus, centralized solutions will be considered in this work.

Regarding the connectivity of the WSN while keeping each node transmission power at a minimum, two approaches will be compared. Applying artificial intelligence, the first one uses Particle Swarm Optimization (PSO) [3] to calculate the transmission power for each sensor. Conversely, the second approach is based on the formation of a Minimum Spanning Tree through the use of the Prim's algorithm

[4] while sweeping sets of transmission power. The main objective of this work is to compare the calculation time and the percentage of network power reduction — as opposed to using the same transmission power for all the nodes — achieved by each proposal.

The remainder of the work is organized as follows. In Section II, the considered network model is presented and its variables are explained. Then, the PSO- and Prim's algorithm-based approaches are proposed in Section III. Section IV shows and discusses the achieved results and, finally, the conclusions are drawn in Section V.

II. MODELING AND FORMULATION OF THE PROBLEM

Consider a wireless sensor network an indirect graph G made up of a set of nodes N and a set of indirected links L connecting these nodes such that $G = (N, L)$. All sensor nodes have the objective to send their packets to a *sink* node, responsible for re-transmitting the network local data to an external network or environment [4], [5].

The receiver sensitivity ρ_{min} is the threshold signal strength needed for reception and is assumed to be an a priori known constant, same for all nodes. In particular, for successful reception, it is required that

$$\gamma_i - \lambda(d_{ij}) \geq \rho_{min}, \forall (i, j) \in L, i \in N. \quad (1)$$

We assume that λ is a monotonically increasing function of the geographical distance d_{ij} between nodes i and j , which is generally true for free space propagation or when environmental clutter causes the same amount of signal degradation in all directions [6]. Combining γ and λ into ρ_{ij} , connections between nodes can be calculated as a function of the transmitted power vector $\vec{\gamma}$ according to

$$L_{ij}(\gamma_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho_{ij} < \rho_{min}, \\ 1 & \text{if } \rho_{ij} \geq \rho_{min} \end{cases} \forall (i, j) \in L, i \in N \quad (2)$$

where ρ_{ij} is the received power level at node j when i transmits with power γ_i . A valid link connection can only exist if ρ_{ij} is greater than a minimum receiver sensitivity ρ_{min} [7].

According to Friis [8], the received power level is a function of the physical distance d between nodes and the transmission power, such that it decreases proportionally to d^2 . In other words, a wireless sensor network can save energy if it chooses shorter multi-hop communication links rather

than longer direct links [9]. Moreover, deciding for many short hops can decrease energy consumption, but only to a certain degree, since other problems can rise such as delay, processing energy and control overhead. These restrictions, however, will not be treated in this paper.

There are other important considerations regarding the energy consumption in sensor nodes [10] but this work will be restricted to node transmission power. Therefore, adding the transmission power of all nodes, it is possible to calculate the total energy consumption of the network.

$$\Gamma_{total} = \sum_{i \in N} \gamma_i. \quad (3)$$

Finding the minimum distance path connecting all nodes to the *sink*, it is possible to adjust a minimum transmission power for all nodes, reducing the total energy consumption in the network Γ_{total}^* . The goal is to construct a wireless sensor network connect to the *sink* node with minimal total transmission power.

III. PROPOSED ALGORITHMS

In this section the proposed algorithms for power saving optimization are presented.

A. Prim's Algorithm-Based Approach

The proposed approach can be separated in three main phases: *Discover*, *Rebuild* and *Optimize*. It is important to define some terms in order to facilitate the discussion. Considering the network topology $G = (N, L)$, each node k can be reached by a set of neighbor nodes i , denoted by β_{ik} , using the maximum transmission power γ_i^{max} such that $\beta_{ik} = \{i, k \in N : \rho_{ik} \geq \rho_{min}\}$.

The first phase, *Discover*, is responsible for building the network topology using neighborhood information β_{ik} . For this purpose, the *sink* node can start a discovery process, periodically, sending a broadcast message in the network. As soon as a node receives a broadcast message, it is retransmitted using the maximum power. So, this broadcast message is used by each node k to discover its neighborhood and inform *sink* which nodes i are in its range and what are their related power level ρ_{ik} . The periodicity of the broadcast message was discussed in other work [11] and is not the objective of this paper.

Once the network topology is known by the *sink*, second phase, *Rebuild*, is initiated. This phase is responsible for constructing a new network topology using Prim's Algorithm [13], a greedy algorithm that runs in polynomial time. Prim's algorithm will not be detailed in this paper since it has been used in different approaches for network topology control and more details can be found in other works [12], [13]. The main idea is to find the minimum cost path that connects all nodes in the network, representing the minimum spanning tree $F = N, L^F$ of G , where N denotes the set of nodes and ($L^F \subseteq L$) the subset of links. As the received power level is inversely proportional to distance, the highest received level represents the nearest neighbor node which demands lower power for communication. In that case, a minimum spanning

tree is built, in fact, considering the maximum power level ρ .

As the network topology represents a wireless sensor network, if node i is connected to node j , both radio power γ_i and γ_j must be enough to allow the communication in both directions, which means $\rho_{ij} \geq \rho_{min}$ and $\rho_{ji} \geq \rho_{min}$.

The third phase, named *Optimize*, is responsible for decreasing the radio power of each node to a new level according to its farthest neighbor between neighbors that are in the minimum tree F . The procedure is summarized below.

Optimize Procedure:

Input: minimum tree $F = (N, L^F)$ resulted from *Rebuild*, radio power vector $\vec{\gamma}$, and number of nodes N .

Output: An optimal radio power vector $\vec{\gamma}^*$.

1. For $i = 1, 2, \dots, N$:

- a. Loop over all links (i, j) connecting i to other nodes j and pickup the link with larger weight.
- b. calculate the minimum power γ_i such that its farthest node j can still be reached, $\rho_{ij} \geq \rho_{min}$.

During *Optimize* procedure, if a link connection is not in F , it will disappear when $\rho_{ij} < \rho_{min}$.

B. Particle Swarm Optimization Based Approach

The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was introduced by Kennedy and Eberhart [3] for the purpose of treating optimization problems of non-linear functions. The algorithm, inspired by the studies of social behavior in flocks of birds, runs through an iterative process to search for an optimal solution of a given problem with a d-dimensional space.

Most problems found in WSN are related to energy and memory constraints, bandwidth unavailability and communication failure between nodes and others. These problems can be modeled as multidimensional optimization problems where PSO algorithm can be applied [14], [15]. The PSO approach used in this paper was proposed by Fré *et al.* [7] and its procedure is summarized below:

PSO Procedure:

Input: learning factors c_1 and c_2 ; inertia factors $[\omega_{min}; \omega_{max}]$; maximum time t_{max} ; number of particles M ; fitness function $f(\vec{x})$ and constraints $[x_{min}; x_{max}]$ and $[v_{min}; v_{max}]$

Output: The optimal radio power vector $\vec{\gamma}^* = gbest$.

1. Initialize each particle $m \in M$ with random values for position \vec{x}_m and velocity \vec{v}_m , where \vec{x}_m represents a candidate solution $\vec{\gamma}$.
2. Evaluate each particle $m \in M$ and do $pbest_m = \vec{x}_m$, if $f(\vec{x}_m) < f(pbest_m)$.
3. Find $gbest = pbest_m$ where $f(gbest) = \min_{\forall m \in M} \{f(pbest_m)\}$.
4. for $t = 1, 2, \dots, t_{max}$:
 - a. Update particles velocity \vec{v}_m and position \vec{x}_m based on $pbest_m$ and $gbest$, $\forall m \in M$.
 - b. Evaluate each particle $m \in M$ and do $pbest_m = \vec{x}_m$, if $f(\vec{x}_m) < f(pbest_m)$.

$$\text{c. Find } \vec{g_{best}} = \vec{p_{best}_m} \text{ where } f(\vec{g_{best}}) = \min_{\forall m \in M} \{f(\vec{p_{best}_m})\}.$$

The fitness function $f(\vec{x})$ checks if all nodes are connected according to their transmission power values. If all nodes are connected, the fitness function will return the sum of the nodes power according to Eq. (3). Otherwise, it will return an infinite value representing an invalid solution.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

This experiment was outlined with the aim of comparing the performance of the proposed algorithms according to the metrics *Power Reduction* and *Time*. The proposed algorithms were evaluated using simulated scenarios, designed in Scilab, where each simulation was created based on network graph, generated varying nodes density, total area and algorithm, according to the values presented in Table I. *Algorithm 1* represents the Prim's-based procedure and *Algorithm 2* the PSO-based one. *Density* represents the number of nodes per area unit, assuming that there cannot be more than one node per area unit [4]. In order to evaluate the density impact for each algorithm, three different areas were considered in the experiment. Frequency operation was fixed to 933 MHz and the maximum communication radius distance was calculated using the free-space path loss equation

$$FSPL(dB) = 32.45 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (4)$$

where d is the distance in km and f the frequency in MHz, and considering a receiver signal threshold of -80 dBm. Minimum and maximum transmission power rates were fixed to -15 and 27 dBm respectively [16].

TABLE I
CONTROL FACTORS AND RESPECTIVE LEVELS.

ID	Control Factors	Levels		
AI	Algorithm	1	2	
De	Density (%)	10	30	60
Ar	Area (m^2)	100,000	225,000	400,000

A. Numerical Results

As the purpose of this work is to compare the proposed algorithms, a general full factorial design matrix was defined in order to analyze how *Power reduction* and *Time* responses are affected by nodes density (*Density*), total area size (*Area*), algorithm (*Algorithm*) and their interactions. The factorial design was replicated 5 times resulting a total of 120 different experiments, where each experimental run resulted in a measurement of *Power Reduction* and *Time*, summarized in Table II.

Using adjusted sum of squares for tests, a statistical Analysis of Variance (ANOVA) was applied in order to verify which control factors and interactions are significant. Analysis was performed considering the statistical significance level of 0.05. According to Table III, all factors (*Area*, *Density* and *Algorithm*) and their interactions showed to be statistically significant for both *Power Reduction* and *Time*, since the corresponding P-Values were lower than 5%.

TABLE II
TEST RESULTS WITH THE AVERAGE OF 5 REPLICAS.

Alg.	Density (%)	Area (m^2)	Power Red. (%)	Time (s)
1	10	100,000	30%	0.02
1	10	225,000	27%	0.07
1	10	400,000	29%	0.40
1	30	100,000	47%	0.19
1	30	225,000	48%	2.21
1	30	400,000	47%	12.19
1	60	100,000	60%	1.72
1	60	225,000	59%	18.36
1	60	400,000	59%	111.58
1	80	100,000	66%	4.14
1	80	225,000	64%	45.86
1	80	400,000	64%	261.86
2	10	100,000	32%	10.44
2	10	225,000	26%	21.09
2	10	400,000	22%	40.82
2	30	100,000	44%	26.28
2	30	225,000	39%	132.70
2	30	400,000	32%	391.69
2	60	100,000	49%	112.86
2	60	225,000	42%	487.63
2	60	400,000	38%	1,563.63
2	80	100,000	53%	143.40
2	80	225,000	42%	752.31
2	80	400,000	40%	3,618.54

TABLE III
ANALYSIS OF VARIANCE FOR POWER REDUCTION AND TIME, USING ADJUSTED SS FOR TESTS.

Source	Power Reduction	Time
Algorithms	7872.57¹	8817.43
Density	6091.84	3649.82
Area	3705.08	5164.41
Algorithms*Density	1312.16	2660.65
Algorithms*Area	1393.27	3702.88
Density*Area	689.37	1718.39
Algorithms*Density*Area	217.23	1208.91

¹ Bold values represent the significant terms in the models (P-Value < 5%). We are unable to reject the null hypothesis of equal variances for P-value > 5%.

² F-test is calculated by the sum of the squares between groups divided by the sum of the square within a group.

B. Factorial Analysis

For a better understanding of how *Power Reduction* and *Time* are affected by each algorithm, it is necessary to understand how those responses are affected according to each scenario. So, interaction plots were generated from the ANOVA models, crossing the control factors *Area*, *Density* and *Algorithm*. Interaction plot for *Power Reduction* (solid lines) and *Time* (dashed lines) are displayed in Figures 1 and 2.

It is possible to notice in Figure 1 that an increase in nodes density results an increase in *Power Reduction* response, which is achievable since nodes are closer to each other helping algorithms find better connections using lower transmission power levels. On the other hand, an increase in area size produces a negative effect in *Power Reduction*, which could be explained by larger distance between nodes requiring higher transmission power levels to keep the network connected (see Figure 2).

Also, Prim's-based algorithm (*Algorithm 1*) presents better

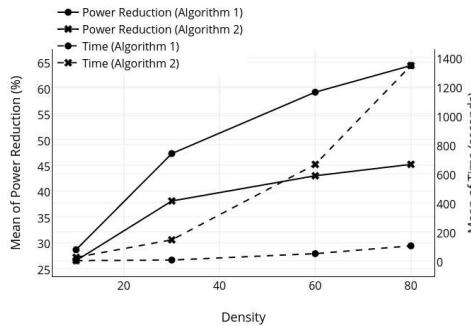


Fig. 1. Interaction plot for *Power Reduction* and *Time* crossing *Density*.

performance compared to the PSO based algorithm (*Algorithm 2*) achieving higher power reduction rates. Such difference is increased for scenarios with higher nodes density, as presented in Figure 1. *Algorithm 1* is also less affected by area size than *Algorithm 2* as shown in Figure 2.

The total computational time spent by each algorithm was also analyzed through interaction plots, as displayed in Figures 1 and 2, which evaluated different scenarios with varying area size and nodes density. On average, *Algorithm 2* spent more time to find an optimal network configuration than *Algorithm 1*. Moreover, scenarios with higher nodes density and larger area size result more computational time for both algorithms since there are more routes to be evaluated. Nevertheless, *Algorithm 2* is more affected by such variations than *Algorithm 1*.

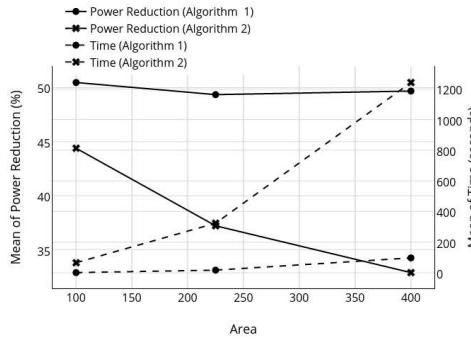


Fig. 2. Interaction plot for *Power Reduction* and *Time* crossing *Area*.

V. CONCLUSIONS

Two techniques were proposed for transmission power optimization in Wireless Sensor Networks — one based on Prim's algorithm and another based on Particle Swarm Optimization (PSO). Both approaches were evaluated considering total power reduction and computational time. Different

scenarios were generated with varying nodes density and total area size and results showed that Prim's-based approach achieved better power reduction rates with lower computational time when compared to PSO technique. Another important point is that Prim's-based technique is also less affected by scenario variation such as nodes density and area increase.

REFERENCES

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] A. A. Aziz, Y. A. Sekercioglu, P. Fitzpatrick, and M. Ivanovich, "A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 121–144, 2013.
- [3] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 1942–1948, 1995.
- [4] S. Upadhyayula and S. K. S. Gupta, "Spanning tree based algorithms for low latency and energy efficient data aggregation enhanced convergecast (dac) in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 5, pp. 626–648, 2007.
- [5] W. M. Aioffi, G. R. Mateus, and F. P. Quint, "Optimization issues and algorithms for wireless sensor networks with mobile sink," in *International Network Optimization Conference 2007 (INOC 2007)*, 2007, pp. 1–6.
- [6] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, vol. 2. IEEE, 2000, pp. 404–413.
- [7] G. Lobão, F. A. Reis, J. D. C. Silva, L. Dias, and P. Mendes, "Particle swarm optimization implementation for minimal transmission power providing a fully-connected cluster for the internet of things," in *International Workshop on Telecommunications - IWT*. IEEE, 6 2015, pp. 1–7.
- [8] H. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
- [9] E. I. Oymen and C. Ersoy, "Overhead energy considerations for efficient routing in wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 46, no. 4, pp. 465–478, 2004.
- [10] I. Akyildiz and J. Jornet, "The internet of nano-things," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, 2010.
- [11] N. Li, J. Hou, and L. Sha, "Design and analysis of an mst-based topology control algorithm," in *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*, vol. 3, no. C. IEEE, 2003, pp. 1702–1712.
- [12] K.-T. Yang, W. K. Lai, S.-M. Li, and Y.-C. Lin, "Event-based clustering architecture for power efficiency in wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, no. 1, pp. 1–12, 2014.
- [13] J. Qiao, S. Liu, and W. Duan, "A topology control algorithm for sensor networks based on robust optimization," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2015, pp. 1–8, 2015.
- [14] R. V. Kulkarni and G. K. Venayagamoorthy, "Particle swarm optimization in wireless-sensor networks: A brief survey," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 41, no. 2, pp. 262–267, 2011.
- [15] N. M. A. Latiff, C. C. Tsimenidis, B. S. Sharif, and U. Kingdon, "Energy-aware clustering for wireless sensor networks using particle swarm optimization," *The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07)*, pp. 5–9, 2007.
- [16] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with rf energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, 2015.

Optical Engineering

OpticalEngineering.SPIEDigitalLibrary.org

Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter

Ramon Maia Borges
Daniel Mazzer
Tiago Reis Rufino Marins
Arismar Cerqueira Sodré, Jr.

SPIE.

Optical Engineering 55(3), 031118 (March 2016)

Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter

Ramon Maia Borges, Daniel Mazzer, Tiago Reis Rufino Marins, and Arismar Cerqueira Sodré Jr.*
 Brazilian National Institute of Telecommunications (Inatel), Laboratory WOCA (Wireless and Optical Convergent Access),
 João de Camargo Avenue, 510, Santa Rita do Sapucaí-MG 37540-000, Brazil

Abstract. This paper is regarding the concept and development of a photonics-based tunable and broadband radio frequency converter (PBRC). It employs an external modulation technique to generate and reconfigure its output frequency, a digital circuit to manage the modulators' bias voltages, and an optical interface for connecting it to optical-wireless networks based on radio-over-fiber technology. The proposed optoelectronic device performs photonics-based upconversion and downconversion as a function of the local oscillator frequency and modulators' bias points. Experimental results demonstrate a radiofrequency (RF) carrier conversion with spectral purity over the frequency range from 750 MHz to 6.0 GHz, as well as the integration of the photonics-based converter with an optical backhaul based on a 1.5-km single-mode fiber from a geographically distributed optical network. Low phase noise and distortion absence illustrate its applicability for convergent and reconfigurable optical wireless communications. A potential application relies on the use of PBRC in convergent optical wireless networks to dynamically provide RF carriers as a function of the telecom operator demand and radio propagation environment. © 2015 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) [DOI: 10.1117/1.OE.55.3.031118]

Keywords: external modulation; frequency reconfigurability; microwave photonics; optical wireless communications; radio frequency converter.

Paper 151109SS received Aug. 12, 2015; accepted for publication Oct. 29, 2015; published online Dec. 7, 2015.

1 Introduction

With the fast growth of global mobile data traffic and broadband services, new and challenging requirements become essential for the next wireless generations, including efficient spectral allocation, convergence of different technologies, and operation at higher frequencies for providing a high bit rate.¹ As an example, a data rate of 100 Gb/s in the air has been demonstrated in W-band experiments.² The current radio transceivers are not able to transmit and receive signals over several bands; thus, each communication mobile standard imposes the use of some specific hardware. Moreover, digital signal processing is limited to low frequencies due to the response of electronic components. In addition, radio frequency (RF) generation complexity increases at higher frequencies, such as millimeter waves. As an alternative, microwave photonics (MWP) has been shown as a potential candidate for upgrading microwave systems. Many simple and efficient photonics-based techniques for generating, detecting, distributing, and processing microwave and millimeter wave (mm-wave) signals have been recently proposed.^{3–8} Furthermore, MWP techniques benefit from the optical fiber advantages—such as wide bandwidth, flexibility, electromagnetic interference immunity, cost effectiveness, size, and consumption reduction—to overcome the limitations of electrically based techniques. MWP has also been applied to advanced radar systems,⁹ cognitive and innovative radio-over-fiber (RoF) architectures, and convergent optical-wireless networks.¹⁰ We have successfully reported the implementation of a fully photonics-based and reconfigurable multiband RF transceiver for future optical wireless

communication in a recent work.¹¹ The proposed device, based on frequency multiplication using an optical external modulation technique, has been experimentally evaluated in two different scenarios: a convergent and reconfigurable optical wireless network for long term evolution and Wi-Fi offloading applications, and an implementation in a real optical wireless network from the Telecom Italia Mobile telecom operator.

In this work, we propose the concept of and experimentally demonstrate a simple photonics-based tunable and broadband RF converter. The proposed device applies an external modulation technique in order to achieve a combination of photonics-based upconversion (PBU) and downconversion (PBD) without any hardware modifications. The frequency reconfigurability is enabled for different frequency bands. Additional contributions are the use of a digital circuit for enabling remote management and control and RF signal phase noise measurements. A potential application relies on the use of a photonics-based tunable and broadband radio frequency converter (PBRC) in convergent optical wireless networks to dynamically provide RF carriers as a function of the telecom operator demand and radio propagation environment. High-capacity optical backhauls based on RoF technology can be used to efficiently transport high data rates at high frequencies to remote radio units. Using this method, the aim is to develop a tunable transceiver capable of generating microwave and mm-wave signals for the current standards, such as 2G, 3G and 4G, and 5G next-generation cellular mobile communications.

This paper is structured in five sections. Section 2 presents the photonics-based frequency conversion principle,

*Address all correspondence to: Arismar Cerqueira Sodré Júnior, E-mail: arismar@inatel.br

while Sec. 3 provides a detailed description of the proposed photonics-based converter. The experimental results are reported in Sec. 4. Finally, Sec. 5 presents the relevant conclusions.

2 Photonics-Based Frequency Conversion Principle

This section elucidates the photonics-based frequency conversion principle, which is the most important physical phenomenon behind the photonics-based tunable and broadband RF converter. The photonics-based upconversion (PBU) and downconversion (PBD), which are strongly dependent on the modulators' bias points, will be described in detail in Secs. 2.1 and 2.2, respectively.

2.1 Photonics-Based Upconversion

An efficient way to implement PBU is the use of optical frequency multiplication (OFM) based on external modulation techniques.⁴ This consists of increasing an RF signal according to the multiplication factor (k) in order to generate high-quality gigahertz or even terahertz RF carriers. Its main advantages are spectral purity, low phase noise without light phase control, and tunability.

A simple architecture for developing tunable PBU using external modulation was proposed in Ref. 12 for $k = 2$. A 36 GHz carrier had been generated from an 18 GHz reference signal and the system was used for remotely providing video services. This approach requires the following pieces of equipment: a distributed feedback (DFB) laser, an LiNbO₃ Mach-Zehnder modulator (MZM), and a photodetector (PD). Since the MZM optical and electrical inputs are fed by an optical wave at λ_0 (optical carrier wavelength) and an RF-driven signal at f_m , respectively, the modulated field is composed of an optical carrier and sidebands equally spaced by f_m . Therefore, the electrical field is described by¹²

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_{m_1} \cos(\omega_{RF_1} t) + V_{\text{bias}_1}}{V_\pi} \right], \quad (1)$$

where V_π is the MZM half-wave voltage, V_{bias_1} is the modulator bias voltage, V_{m_1} and ω_{RF_1} are the amplitude and angular frequency of the RF input signal, respectively, and $E_{\text{in}}(t)$ refers to the laser (LD) electrical field, which is given by

$$E_{\text{in}}(t) = E_0 \cos(2\pi f t). \quad (2)$$

From Eq. (2), E_0 and f are the LD amplitude and frequency terms, respectively. The optical carrier can be suppressed if the modulator bias voltage (V_{bias}) is set to V_π , which inserts a 180-deg phase shift between the MZM arms. Therefore, the modulated electrical field in the optical domain is now composed mainly of the first-order sidebands, which are spaced by $2f_m$, yielding OFM. A detailed experimental investigation of frequency doubling is presented in our previous publication.¹³

A possible and relevant variation of the previous architecture uses two cascaded modulators (MZM₁ and MZM₂) in order to achieve higher multiplication factors. In this configuration, the electrical field from the second modulation stage can be written as

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_{m_1} \cos(\omega_{RF_1} t) + V_{\text{bias}_1}}{V_\pi} \right] \times \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_{m_2} \cos(\omega_{RF_2} t) + V_{\text{bias}_2}}{V_\pi} \right], \quad (3)$$

where the terms with subscripts 2 refer to the RF-driven signal and the bias applied to MZM₂. In order to set $k = 4$, both MZMs should be biased at the minimum transmission point to allow the field at the MZM₂ output to be composed of the optical carrier and second-order sidebands, since the first-order components are highly suppressed. Thus, two procedures can be used to fulfill the frequency quadrupling. The first one is inserting a phase difference of 90 deg between the RF-driven signals with the aim of further suppressing the optical carrier.¹⁴ The second option relies on the use of a fiber Bragg grating as a notch filter centered at λ_0 and fixed at the MZM₂ output.¹⁵ Both procedures ensure that the optical field at the PD input will mainly be composed of the second-order sidebands spaced by $4f_m$, which corresponds to the PD output frequency. Additionally, two cascaded MZMs can be applied to enable a k factor greater than four, which requires proper bias voltage combinations and tunable phase shifters.

2.2 Photonics-Based Downconversion

Downconverters are essential for several applications, such as wireless communication systems, cellular networks, phased-array antennas, radar, and electronic warfare systems. Particularly, in point-to-point microwave minilinks, the data signal modulates the intensity of a microwave signal at a few gigahertz, before transmitting it through the air. Downconversion is then required, where an electrical local oscillator at f_{LO} is mixed with the electrical signal at f_H , resulting in an intermediate frequency, $f_{\text{IF}} = f_H \pm f_{\text{LO}}$, within the bandwidth of the analog-to-digital converter (ADC). Conventionally, a microwave downconversion can be realized using an electrical mixer, which suffers from the limitations of narrow bandwidth operation, low isolation, severe distortion, and low conversion efficiency.

Photonics-based downconverters using an external modulation technique have been recently reported in the literature.¹⁶ One of their possible topologies refers to a single laser with quadrature biased MZMs in series and a PD followed by an electrical filter.^{17,18} The photonics-based techniques are typically applied to convert a high-frequency RF signal to baseband or an intermediate frequency (f_{IF}). The main advantages of PBD are high isolation between the RF and local oscillator (LO) ports, large operational bandwidth provided by the electro-optic modulators, and high stability and low jitter of optical-pulsed sources. Additionally, the use of PBD enables the detection of high-frequency RF signals, which eventually exceed the ADC bandwidth. In conclusion, PBD has been recognized as an efficient way to extend the frequency range of digital coherent receivers beyond a few gigahertz.¹⁹

Figure 1 shows the two-cascaded MZMs' scheme for PBD. An LO and a high-frequency RF signal (f_H), which is going to be downconverted, are applied to the two modulators to perform the frequency mixing in the optical domain. The photodetection results in four RF components: f_{LO} , f_H , $f_H + f_{\text{LO}}$, and $f_H - f_{\text{LO}}$. A low-pass electrical

Borges et al.: Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter

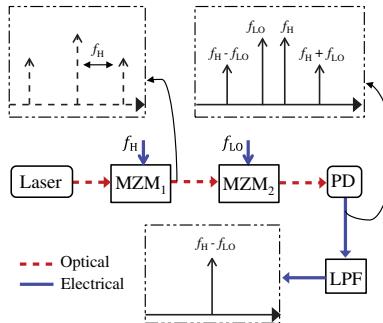


Fig. 1 Photonic downconversion scheme based on two MZMs: MZM, Mach-Zehnder modulator; PD, photodetector; LPF, low-pass filter; f_H , RF signal frequency; f_{LO} , local oscillator frequency.

filter (LPF) selects the lower-frequency component ($f_H - f_{LO}$) and the microwave signal is downconverted. This approach represents a tunable PBD technique since it is possible to adjust f_{LO} as a function of the desired frequency band.

3 Photonics-Based Radiofrequency Converter

We propose to simultaneously apply the techniques presented in the previous sections, PBU and PBD, in order to develop a PBRC. The PBRC has two RF signals and two bias voltages as input parameters. A modulated electrical field in the optical domain and an RF signal composes the PBRC outputs. Figure 2 presents the PBRC schematic based on the following components: a DFB laser, two cascaded MZMs, a p-intrinsic-n diode (PIN) PD, and a control block. MZM₁ is driven by the RF_{in_1} signal, resulting in the lower and upper sidebands in the optical domain. Next, the field from the first modulation stage is modulated by RF_{in_2} in MZM₂. The resulting electrical field might be accessed by the output optical port (O_{out}), which is an interface to connect the proposed device to RoF systems. In case there are no optical links, an external optical patch cord must connect

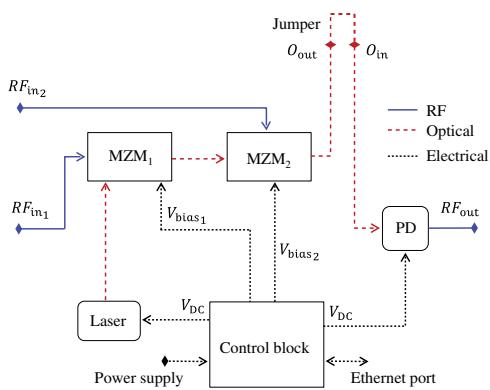


Fig. 2 The proposed photonics-based tunable and broadband radio frequency converter scheme.

O_{out} to the input optical port (O_{in}), which would be directly connected to the PD. Finally, the photodetection process generates the desired RF spectrum (RF_{out}). It is worth mentioning that the electrical field from the second modulation stage and the RF_{out} characteristics strongly depend on the electrical input parameters.

The control block manages the MZM bias voltages (V_{bias_1} and V_{bias_2}) according to external commands received through its Ethernet port, and provides the supply voltages (V_{dc}) to the LD and PD. The controller board is composed of a model B Raspberry Pi, filters, and dc-dc converters. This board is used to run a piece of software written in Python that controls the pulse-width modulation (PWM) duty-cycle. The controller board provides two independent and configurable PWM outputs that are filtered to create the variable dc voltage, V_{bias} . The PWM signal is generated at 1 kHz and the duty-cycle may be adjusted as needed, varying from 0 to 100%. The dc-dc converters are used to adapt the power supply voltage for all components. According to the configured duty-cycle, the resulting dc signal varies from 0 to 5 V after being filtered. The PWM filter is a low-pass Sallen-Key with a cut-off frequency at 1 Hz. The resultant ripple is below 50 μ V, which has not caused any perceived instability on the modulator's behavior. The proposed code controls the two PWM outputs' duty-cycle by using an Ethernet port, which allows the PBRC to be remotely controlled, even from mobile devices such as smartphones. Finally, the duty-cycle resolution is 0.03%, representing steps of 1.67 mV.

The PBRC performs PBU and PBD without any hardware modifications, so that each operation mode is selected according to RF-driven frequencies and modulator bias point configurations. The latter can even be manipulated remotely using a computer and/or cellphone Internet access. All the proposed functions are feasible since RF filters are not used; thus, its bandwidth is only limited by the modulators' and PD's frequency responses, which are currently commercially available for frequencies of up to 100 GHz.^{20,21} The PBU function of our device, which enables the settings $k = 2$ or $k = 4$, requires the use of two RF-driven signals at the same frequency. Adjusting the MZM bias voltages in such a way that $V_{bias_1} + V_{bias_2} = 2V_{\pi}$ implies a multiplication factor equal to two. On the other hand, adjusting both bias voltages to V_{π} and adding a phase difference of 90 deg between the RF-driven signals enables the PBRC to be configured to operate with $k = 4$, i.e., quadruplicating the LO frequency. Finally, the PBRC can be configured as a photonics-based downconverter by imposing the following two conditions: RF-driven signals at distinct frequencies [a higher frequency (f_H) and an LO frequency (f_{LO})] and modulators biased to the quadrature point ($V_{bias_1} = V_{bias_2} = V_{\pi}/2$). Figure 3 shows photographs of the PBRC prototype: top view [Fig. 3(a)], front view [Fig. 3(b)], side view [Fig. 3(c)], and inside view [Fig. 3(d)]. The PBRC is compact, easily handled, and enables simple integration with optical wireless networks. The used components are specified as follows: 4.5 dBm continuous laser at 1551 nm, single drive MZMs with V_{π} equal to 3.1 V and insertion loss of 5.5 dB, and PD with responsivity equal to 0.8 A/W.

4 Experimental Results

This section aims to experimentally and numerically validate the proposed PBRC. The numerical investigation was carried

Borges et al.: Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter

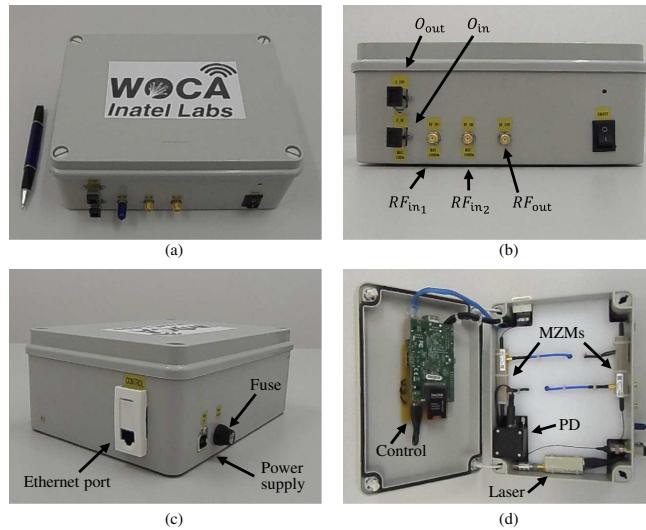


Fig. 3 The photonics-based tunable and broadband radio frequency converter (PBRC) prototype: (a) top view, (b) front view, (c) side view, and (d) inside view.

out with frequencies up to 40 GHz in order to illustrate its applicability for mm-wave applications. Its implementation has been deployed in a geographically distributed optical network covering up to 6.0 GHz. Initially, the PBRC frequency doubling function has been experimentally evaluated by setting $V_{bias_1} = 1.4$ V and $V_{bias_2} = 4.8$ V in order to obtain a sum of $2V_\pi$. A tunable local oscillator with 12 dBm power and a signal-to-noise ratio (SNR) of 50 dB, measured using a resolution bandwidth of 10 kHz, and a 3 dB splitter have been used to provide two equal RF-driven signals. Moreover, the optical ports have been connected by using an optical patch cord. Figure 4 reports the measured electrical spectrum at the RF_{out} port for $k = 2$ as a function of the local oscillator frequency at 0.9, 1.5, 2.6, and 3.0 GHz. All

generated doubled RF carriers present spectral purity with a maximum power variation of 2.0 dB due to the MZM electro-optic frequency response. This feature yields frequency reconfigurability as a function of the available spectral windows and radio mobile propagation aspects. It is worth mentioning that the noise level at 2.6 GHz is due to the frequency response of our spectrum analyzer, i.e., there is no relation to the physical mechanism for the optical frequency multiplication.

The photonics-based upconverter function has been numerically analyzed using OptiSystem for validating frequency quadruplication ($k = 4$), which is suggested to be a PBRC upgrade. Basically, two adjustments have been made compared to the previous configuration: a 90 deg phase difference between the RF-driven signals at 10 GHz has been added by using an external phase shifter and both modulator bias voltages have been set to 3.1 V (V_π). Figure 5(a) shows the optical spectrum at the PD input, which comprises second-order sidebands at higher optical power levels, and the suppression of the original optical carrier and the first-order sidebands, yielding the optical frequency quadruplication as presented in Fig. 5(b). The generated 40 GHz carrier at RF_{out} presents spectral purity and an SNR of 18 dB, obtained using a resolution bandwidth of 1 MHz.

We have also experimentally evaluated the PBRC operating as a photonics-based downconverter using an additional -3 dBm RF generator at 6.0 GHz. This new signal has been connected to RF_{in2}, while RF_{in1} has been excited by the 12 dBm tunable local oscillator used in the previous experiment. Once again, the optical ports have been connected using an optical patch cord. Figure 6 presents the experimental results of the PBD as a function of f_{LO} : 3.4, 3.6, 3.9, 4.2, 4.8, and 5.25 GHz. Each spectral component is individually available at the RF_{out} port and its frequency corresponds to the difference between the 6.0 GHz carrier and that of the

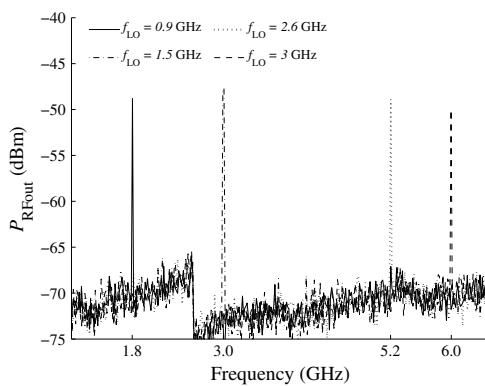


Fig. 4 PBRC as a photonics-based upconverter: demonstration of frequency reconfigurability for $k = 2$.

Borges et al.: Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter

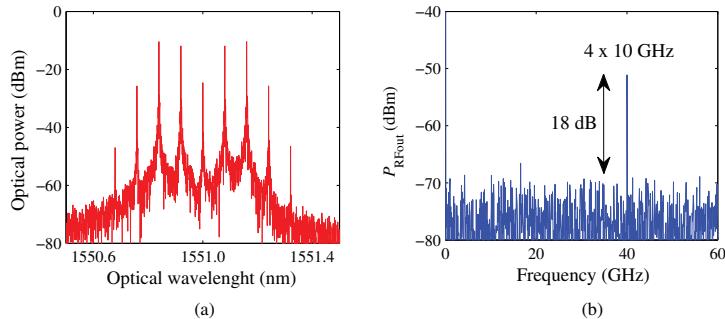


Fig. 5 Numerical results of optical frequency quadruplication ($k = 4$): (a) optical spectrum at PD input and (b) generated 40 GHz carrier.

local oscillator (f_{LO}). We have obtained high-quality down-converted RF signals for all frequencies and a maximum power variation of 2.5 dB between them due to the MZMs electro-optic frequency response.

We have also performed phase noise measurements of the generated RF carriers in order to further characterize the performance of the proposed PBRC. The PBU and PBD results are presented in Figs. 7(a) and 7(b), respectively, as well as the residual phase noise of the system and those for the LO and an additional RF generator. All cases have presented low levels of phase noise, namely -84.1 dBc/Hz at 100 Hz and -97.2 dBc/Hz at 10 kHz for the upconverted signal at 5.2 GHz, and -68.1 dBc/Hz at 100 Hz and -80.5 dBc/Hz at 10 kHz for the downconverted signal at 2.4 GHz.

Theoretically, the power spectrum of phase noise in RF signals, generated using external modulation techniques, is described by²²

$$10 \log_{10}[S(f)] = 10 \log_{10}[S_d(f)] + 20 \log_{10}k + 10 \log_{10}[S_r(f)], \quad (4)$$

where k is the multiplication factor, and $S_d(f)$ and $S_r(f)$ are the power spectra of the driven signal and system residual phase noise, respectively. From Eq. (4), one can note the frequency doubled carrier has a phase noise increment of

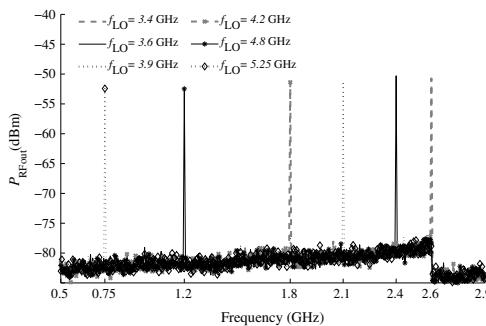


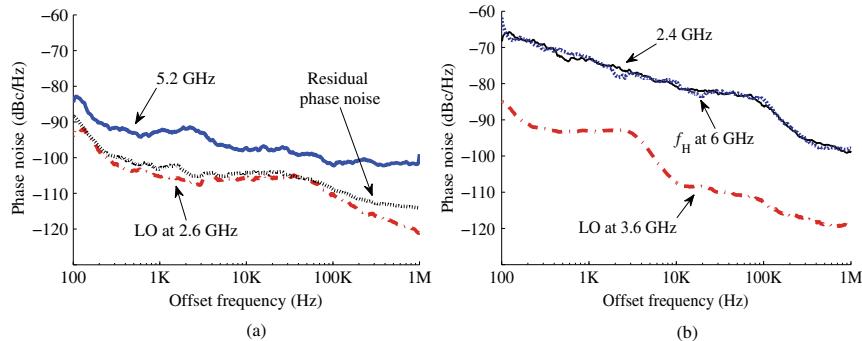
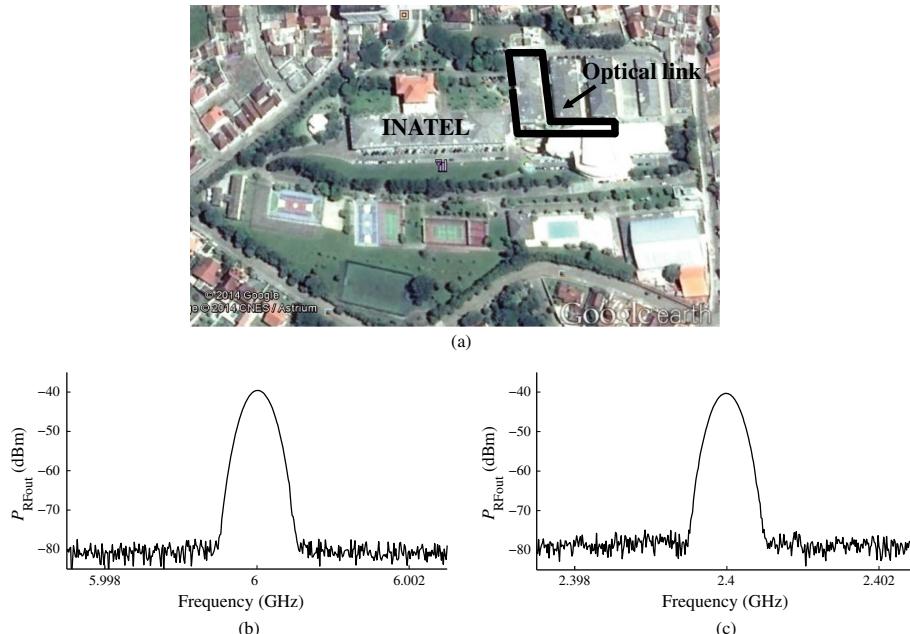
Fig. 6 PBRC as a photonics-based downconverter: demonstration of radio frequency (RF) reconfigurability as a function of f_{LO} .

$\sim 8.3 \text{ dB}$, which corresponds to the sum of the contribution predicted by $20 \log_{10} 2 \approx 6$ and the measured residual phase noise contribution of 2.3 dB . The predicted total phase noise increment at 5.2 GHz is in good qualitative agreement with the measured result, which has been shown to be approximately 10 dB higher than that of the 2.6 GHz signal, as illustrated in Fig. 7(a).

In the downconversion results, the noise level seems to be higher, but this is not so, since it is very close to that of the additional RF generator at 6.0 GHz, which is a low-cost one. According to Eq. (4), if $k = 1$ (downconversion condition) and $S_d(f) \gg S_r(f)$, the total phase noise of the downconverted signal is mainly due to the microwave noise sources. Therefore, the phase noise of the 2.4 GHz signal is limited by the RF generator performance. The use of high-performance microwave sources and dc suppliers can further reduce the phase noise levels. In conclusion, the PBRC provides high-quality and low phase noise RF carriers generated either by PBU or PBD.

Finally, we have implemented the PBRC in the geographically distributed optical network of the Brazilian National Institute of Telecommunications (Inatel) in the city of Santa Rita do Sapucaí-MG, Brazil. Our main goal was to experimentally evaluate the PBRC performance under real conditions of temperature, pressure, and humidity. Figure 8(a) refers to a Google Earth image of the Inatel campus and identifies the 1.5 km optical link, composed of underground optical cables, which has been used in the experiments. Figures 8(b) and 8(c) present the PBRC output signals operating in the PBU ($3.0 \text{ GHz} \times 2 = 6.0 \text{ GHz}$) and PBD ($6.0 - 3.6 \text{ GHz} = 2.4 \text{ GHz}$) functions, respectively. In both cases, the photodetected optical power has been kept at 0 dBm in order to obtain RF signals of approximately -40 dBm . Again, distortion absence has been observed at 6.0 and 2.4 GHz, demonstrating the PBRC applicability for future optical wireless networks. In other words, the PBRC used in conjunction with high-capacity optical backhauls based on RoF technology can be used for efficiently transporting high data rates to remote radio units. In this way, the proposed tunable and broadband PBRC can be applied to generate microwave and mm-wave signals for the current standards, such as 2G, 3G and 4G, and 5G next-generation cellular networks.

Borges et al.: Photonics-based tunable and broadband radio frequency converter

**Fig. 7** Phase noise measurements of the PBRC: (a) photonics-based upconversion and (b) photonics-based downconversion.**Fig. 8** PBRC implementation in a geographically distributed optical network: (a) Google earth image, (b) converted RF signal using the photonics-based upconversion function, and (c) converted RF signal using the photonics-based downconversion function.

5 Conclusions

A PBRC has been proposed and numerically and experimentally evaluated. It uses an external modulation technique to enable a combination of PBU and PBD. This outstanding feature allows a simple tuning of the RF components over different spectrum bands according to the input parameters without requiring any hardware modifications. Due to the MZM and PD wide bandwidths, the converter can be applied

to numerous wireless applications. Additional contributions rely on the use of a digital circuit for remotely managing and controlling the modulator bias voltages and for measurements of the RF signal phase noise.

Experimental results have demonstrated frequency reconfigurability from 750 MHz to 6.0 GHz range with spectral purity. The phase noise of the upconverted and downconverted signals were -97.2 and -80.5 dBc/Hz at a 10-kHz

offset, respectively. In addition, distortion absence has been observed in experiments using a 1.5 km real optical link under real conditions of temperature, pressure, and humidity.

A potential application relies on the use of the PBRC in convergent optical wireless networks to dynamically provide RF carriers as a function of the telecom operator demand and radio propagation environment. High-capacity optical back-hauls based on RoF technology can be used to efficiently transport high data rates to remote radio units. Therefore, the PBRC can be applied to the development of a tunable transceiver capable of generating microwave and mm-wave signals for the current standards, such as 2G, 3G and 4G, and next-generation cellular mobile communications, including 5G.

Acknowledgments

This work was partially supported by the Finep/Funtel Grant No. 01.14.0231.00, under the Radiocommunications Reference Center (Centro de Referência em Radiocomunicações) project of the National Institute of Telecommunications (Instituto Nacional de Telecomunicações—Inatel), Brazil. Authors also thank FINEP, CNPq, CAPES, MCTI, FAPEMIG for financial support and Mini-Circuits and Prysmian-Draka for technical support.

References

- T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!," *IEEE Access* **1**, 335–349 (2013).
- X. Pang et al., "100 Gb/s hybrid optical fiber-wireless link in the W-band (75–110 GHz)," *Opt. Express* **19**(25), 24944–24949 (2011).
- J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nat. Photonics* **1**, 319–330 (2007).
- J. Yao, "Microwave photonics (invited tutorial)," *J. Lightwave Technol.* **27**(3), 314–335 (2009).
- J. Seregiyi et al., "Highly tunable microwave and millimeter wave filtering using photonic technology," *Opt. Eng.* **54**(5), 057102 (2015).
- T. R. Clark and R. Wetherhouse, "Photonics for RF front ends," *IEEE Microwave Mag.* **12**(3), 87–95 (2011).
- T. M. Fortier et al., "Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division," *Nat. Photonics* **5**, 425–429 (2011).
- J. Li, H. Lee, and K. J. Vahala, "Microwave synthesizer using an on-chip Brillouin oscillator," *Nat. Commun.* **4**, 2097 (2013).
- P. Ghelfi et al., "A fully photonics-based coherent radar system," *Nature* **507**, 341–345 (2014).
- E. R. Neto et al., "Implementation of an optical-wireless network with spectral sensing and dynamics resource allocation using optically controlled reconfigurable antennas," *Int. J. Antennas Propag.* **2014**, 11 (2014).
- R. M. Borges, T. N. Rodovalho, and S. Arismar Cerqueira Jr., "Reconfigurable multi-band radio-frequency transceiver based on photonics technology for future optical wireless communications," *IET Optoelectron.* **9**(5), 257–262 (2015).
- J. J. O'Reilly et al., "Optical generation of very narrow linewidth wave signals," *Electron. Lett.* **28**(25), 2309–2311 (1992).
- R. M. Borges and S. Arismar Cerqueira Jr., "Convergent and reconfigurable optical-wireless network for LTE and Wi-Fi offloading applications," in *IEEE Latin American Conf. on Communications*, pp. 1–4 (2014).
- T. Kawanishi et al., "Quadruple frequency double sideband carrier suppressed modulation using high extinction ratio optical modulators for photonic local oscillators," in *Int. Topical Meeting on Microwave Photonics*, pp. 1–4 (2005).
- J. Yao, "A tutorial on microwave photonics," *IEEE Photonics Soc. Newslett.* **26**(2), 4–12 (2012).
- T. Zhang et al., "High-spectral-efficiency photonic frequency down-conversion using optical frequency comb and SSB modulation," *IEEE Photonics J.* **5**(2), 7200307 (2013).
- G. Gopalakrishnan, W. K. Burns, and C. H. Bulmer, "Microwave-optical mixing in LiNbO₃ modulators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **41**, 2383–2391 (1993).
- J. T. Gallo and J. K. Godshall, "Comparison of series and parallel optical modulators for microwave down-conversion," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **10**(11), 1623–1625 (1998).
- T. R. Clark, S. R. O'Connor, and M. L. Dennis, "A phase-modulation I/Q-demodulation microwave-to-digital photonic link," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **58**(11), 3039–3058 (2010).
- L. Alloati et al., "100 GHz silicon-organic hybrid modulator," *Light: Sci. Appl.* **3**, e173 (2014).
- Finisar, "100 GHz single high-speed photodetector," <https://www.finisar.com/optical-components/xpdv412xr> (November 2015).
- W. Li and J. Yao, "Investigation of phototonically assisted microwave frequency multiplication based on external modulation," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **58**(11), 3259–3268 (2010).

Ramon Maia Borges received his BSc degree in electrical engineering and MSc degree in telecommunications from the Brazilian National Institute of Telecommunications (Inatel) in 2012 and 2015, respectively. He is currently working as a researcher for the Radiocommunications Reference Center Project at Inatel. His fields of interest include optical communications, wireless systems, and microwave photonics, which is the topic in which he has published scientific papers.

Daniel Mazzer received his BSc degree in electrical engineering from the Brazilian National Institute of Telecommunications (Inatel) in 2004. He is currently working as a researcher in the Wireless and Optical Convergent Access Laboratory at Inatel. His fields of interest include digital signal processing, wireless communications, embedded devices, smart IoT devices and protocols for mesh networks.

Tiago Reis Rufino Marins received his BSc degree in electrical engineering and MSc degree in telecommunications from the Brazilian National Institute of Telecommunications (Inatel) in 2008 and 2012, respectively. He is currently a PhD student at State University of Campinas (Unicamp) and is working as a project leader from the Hardware Laboratory at Inatel. His fields of interest include digital communications, wireless systems, and channel modeling, which is the topic in which he has published scientific papers.

Arismar Cerqueira Sodré, Jr. received his PhD from Scuola Superiore Sant'Anna, Italy, in 2006. He has been an invited researcher from the University of Bath, United Kingdom, Max-Planck Institute, Germany, and Technical University of Denmark, and is currently an associate professor at the Brazilian National Institute of Telecommunications (Inatel). He is the holder of 5 international patents, has transferred 14 products to the industry, and has published 127 scientific papers in international journals or conferences.