Dissertação de Mestrado

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

Concepção e Implementação da Tecnologia Rádio Cognitivo e Adaptativo sobre Fibra

Egidio Raimundo Neto

Março/2014

Concepção e Implementação da Tecnologia Rádio Cognitivo e Adaptativo sobre Fibra

EGIDIO RAIMUNDO NETO

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior

Santa Rita do Sapucaí
2014

Raimundo Neto, Egidio
R153c
Concepção e Implementação da Tecnologia Rádio Cognitivo e Adaptativo Sobre Fibra. / Egidio Raimundo Neto. – Santa Rita do Sapucaí, 2014.
100p.

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior.
Dissertação de Mestrado – Engenharia de Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.
Inclui bibliografia e anexo.

1. ACRoF 2. Rádio Cognitivo 3. Rádio sobre Fibra 4. Sensoriamento Espectral 5. Alocação Dinâmica de Recursos 6. Engenharia de Telecomunicações I. Sodré Júnior, Arismar Cerqueira II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

Biblioteca Ministro Carlos Bilac Pinto

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em _____ /_____ /_____ , pela comissão julgadora:

_____

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior

INATEL

_____

Prof. Dr. Dayan Adionel Guimarães

INATEL

_____

Dr. Neil Guerrero Gonzalez

CPqD

_____

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

“Pain is temporary. Quitting lasts forever.”
— Lance Armstrong.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus e a Santa Rita de Cássia que sempre me acompanharam durante esta jornada me abençoando com os dons da ciência e da sabedoria, e me deram forças nos momentos mais difíceis desta caminhada.

Aos meus pais Elmar e Gissele pelo apoio incondicional em todos os momentos de minha vida, sempre me apoiando nas minhas decisões pessoais e profissionais. Muito obrigado por tudo. Amo vocês.

Aos meus avós maternos Gabriel e Darcilia, e aos meus avós paternos Egidio (*Im memorian*) e Rosa pelos exemplos dados aos meus pais e transmitidos a mim.

As minhas irmãs Mariana e Maria Luiza, pela paciência, apoio e carinho durante esta jornada. Amo vocês.

A minha noiva Jô, por me acompanhar durante todas as etapas deste trabalho com muito amor e carinho além de muita paciência. Te amo muito.

Ao meu orientador Prof. Dr. Arismar Cerqueira S. Jr. pela orientação, paciência e compreensão durante esta jornada. Trabalhar com um líder que acredita e investe no potencial das pessoas faz com que o nosso grupo de trabalho cresça a cada dia.

Aos meus amigos e colegas do mestrado, em especial ao Luís Gustavo, Igor e Suzanne que dividiram comigo grande parte do tempo do

mestrado e a todos os outros colaboradores que passaram pelo laboratório WOCA durante estes dois anos. Muito obrigado.

Ao time do Hardware I do Inatel Competence Center pelo apoio técnico e pelas orientações. Obrigado Tiago Reis, Brahma, Machado, André e Ricardinho. Vocês me ajudaram muito.

Ao engenheiro Carlos Henrique dos Reis, sempre prestativo ao meu trabalho e ao laboratório WOCA, que muito nos ajudou com a instalação da rede óptica do Inatel.

Aos professores Guilherme Aquino, João Scudeler e Alexandre Baratella pela oportunidade de lecionar eletrônica analógica pelo Programa de Estágio Docente, a experiência foi ótima.

Aos professores Justino, Rausley, Dayan, Brito, Arismar e Carlinhos pelos ensinamentos ministrados durante as disciplinas cursadas no mestrado que me auxiliaram muito no desenvolvimento do meu trabalho.

Aos professores Antônio Alves Ferreira Jr., André da Rocha Abbade e Carlos Nazareth pela amizade e pelos conselhos desde a época da graduação, vocês são grandes amigos.

Ao professor Alberti, ao aluno de mestrado Marco Casaroli, e ao ex-estagiário do WOCA, Jeferson Renan, pela parceria e pelo apoio durante a implementação prática do trabalho.

Ao Inatel por ter me dado a oportunidade de cursar o Mestrado em Telecomunicações e a todos os funcionários desta grande instituição que tenho certeza que de alguma maneira participaram desta conquista.

À Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (Finatel) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Egidio Raimundo Neto.

Índice

Lista de Figuras x
Lista de Tabelas xii
Lista de Abreviaturas e Siglas xiii
Publicações xvi
Resumo xvii
Abstract xviii
Capítulo 1. Introdução 1
1.1 Contextualização e Revisão Bibliográfica 1
1.2 Estrutura da Dissertação 8
Capítulo 2. Tecnologias de Telecomunicações 9
2.1. Wi-Fi 9
2.1.1. O Padrão IEEE 802.11n 10
2.2. Rádio Cognitivo 14
2.2.1. Sensoriamento Espectral 16
2.3. Rádio sobre Fibra 19
2.3.1. Aplicações da Tecnologia RoF 22
2.3.2. Ganho de RF de um Sistema RoF 27
Capítulo 3. ACRoF - Rádio Cognitivo e Adaptativo Sobre Fibra 29
3.1. Concepção 29
3.2. Sistema Proposto para Implementação 30
3.3. Implementação de Um Sistema Wi-Fi sobre Fibra 33
3.3.1. Atraso Oriundo da Propagação na Fibra Óptica 35
3.3.2. Extensão Máxima do Enlace 38
3.3.3. Cálculo dos limiares dos efeitos não-lineares 40
3.4. Antena Reconfigurável Controlada Opticamente 41
3.5. Sensoriamento Espectral sobre Fibra 44
3.5.1. Estudo do Ruído de Fundo de Escala do Analisador de Espectro 47

3.5.2. Detecção de Energia 52
Capítulo 4. Implementação e Investigação Experimental da Arquitetura ACRoF 60
4.1. Implementação de um *Front End* Cognitivo 60
4.2. Integração dos Elementos do Sistema 64
4.3. Análise de Desempenho do Sistema 68
4.3.1. Resultados para a Banda de 2,4 GHz 69
4.3.2. Resultados para a Banda de 5 GHz 70
4.3.3. Resultados para as duas Bandas 72
4.4. Premissas Para as Próximas Etapas de Implementação da Tecnologia ACRoF 75
Capítulo 5. Conclusões e Trabalhos Futuros 78
Referências 81
Apêndice I (Algoritmo Detecção de Energia Matlab) 90
Apêndice II (Algoritmo implementado em Python) 96

Lista de Figuras

Figura 1 - Projeção do crescimento de tráfego de dados na internet por tipo de dispositivo. Extraído de [1]. 1
Figura 2 - Projeção do crescimento de tráfego de dados na internet por tipo de acesso. Extraído de [1]. 2
Figura 3 - Canalização do padrão 802.11n e possibilidades de interferência entre canais com uma banda de 20 MHz. 14
Figura 4 - Ciclo Cognitivo. 15
Figura 5 - Utilização das oportunidades espectrais por um RC. 16
Figura 6- Teste de hipótese binário. 17
Figura 7 - Funções densidade de probabilidade da variável aleatória T sob as hipóteses H_0 e H_1. 19
Figura 8 - Exemplo de aplicação de um enlace RoF em um sistema de telefonia móvel celular. 21
Figura 9 - Sistema RoF. 22
Figura 10 - Aumentando a capacidade de um sistema de comunicação sem fio com a utilização de pico-células e enlaces RoF. 23
Figura 11 - Compartilhamento de infraestrutura em sistemas RoF. 24
Figura 12 - Aplicação da tecnologia RoF para distribuição de vídeo em alta definição em estádios de futebol. 25
Figura 13 - Aplicação da tecnologia RoF para distribuição de sinais de RF no interior de túneis 26
Figura 14 - Módulo RoF OZ 806 Series utilizado nos experimentos. 27
Figura 15 - Arquitetura ACRoF. 30
Figura 16 - Sistema proposto para implementação. 31
Figura 17 - Central Office, seus elementos e funcionalidades. 32
Figura 18 - (a) Sistema RoF com uso de circulador. (b) Sistema RoF sem o uso de circulador. 34
Figura 19 - Diagrama de tempo de uma transmissão bem sucedida em um sistema 802.11n. 36
Figura 20 - RSSI em função do comprimento da fibra para cada banda. 38
Figura 21 - Vazão em função do comprimento da fibra para cada banda. 38
Figura 22 - Antena "E" 41
Figura 23 - Antena "E" com a chave "ligada" 42
Figura 24 - Perda por retorno para as condições de chave “ligada” e “desligada” 42

Figura 25 - Medidas de RSSI (dBm) e PER (%) em função da corrente de alimentação do laser. 43
Figura 26 - Ganho dos módulos RoF utilizados nos experimentos. 45
Figura 27 - Ganho medido do sistema na banda de 2,4 GHz. 46
Figura 28 - Ganho do sistema na banda de 5 GHz. 46
Figura 29 - Amostras do espectro na banda de 2,4 GHz coletadas na câmara anecóica. 48
Figura 30 - Amostras do espectro na banda de 5GHz coletadas na câmara anecóica. 48
Figura 31 - Amostras do espectro na banda de 2,4 GHz coletadas na câmara anecóica com a utilização de um enlace RoF. 49
Figura 32 - Amostras do espectro na banda de 5 GHz coletadas na câmara anecóica com a utilização de um enlace RoF. 49
Figura 33 - Nível médio de ruído calculado a partir de 1000 amostras sem e com a utilização de um enlace RoF para a banda de 2,4GHz. 50
Figura 34 - Nível médio de ruído calculado a partir de 1000 amostras sem e com a utilização de um enlace RoF para a banda 5GHz. 50
Figura 35 - Diagramas de implementação do detector de energia (a) no tempo e (b) na frequência. 52
Figura 36 - Curva ROC para diferentes condições do sinal "sensoriado". 56
Figura 37 - Histograma dos valores da estatística de teste sob hipóteses H_0 e H_1 sem antenas de transmissão. 57
Figura 38 - Histograma dos valores de estatística de teste sob hipóteses H_0 e H_1 com três antenas de transmissão. 58
Figura 39 - Fluxograma do algoritmo de sensoriamento implementado. 61
Figura 40 - Ciclo cognitivo do front end impementado. 63
Figura 41 - Diagrama de blocos dos elementos do sistema implementado. 65
Figura 42 - Imagem aérea do sistema implementado. 66
Figura 43 - Antenas utilizadas na RAU. 66
Figura 44 - Elementos que compõe a RAU. 67
Figura 45 - Elementos da CO. 68
Figura 46 - Cenário de testes sistêmicos na banda de 2,4 GHz. 69
Figura 47 - Cenário de testes sistêmicos na banda de 5 GHz. 71
Figura 48 - Espectro "sensoriado" na banda de 2,4 GHz. 74
Figura 49 - Espectro "sensoriado" na banda de 5 GHz. 74

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparativo entre os principais trabalhos 7
Tabela 2 - Principais características dos padrões 802.11. 10
Tabela 3 - Taxa de transmissão para diferentes combinações de parâmetros no padrão IEEE 802.11n. 12
Tabela 4 - Canalização do Padrão 802.11n para as duas bandas 13
Tabela 5 - Medidas de vazão (em Mbps) e RSSI (dBm) com e sem a utilização de um enlace RoF para uma PER máxima de 10%. 34
Tabela 6 - Comprimento máximo da fibra em um sistema 802.11n em função da banda de transmissão 35
Tabela 7 - Extensão máxima do enlace com e sem a utilização de um sistema RoF para um enlace de fibra óptica de 1.020 m. 39
Tabela 8 - Valores típicos dos parâmetros da antena para a frequência central de cada banda de operação. 43
Tabela 9 - Relação Sinal-Ruído para cada condição de transmissão. 56
Tabela 10 - Tempo de amostragem para determinar o melhor canal em cada uma das bandas. 64
Tabela 11 - Resultados sistêmicos obtidos com o sistema operando na banda de 2,4 GHz. 70
Tabela 12 - Resultados sistêmicos obtidos com o sistema operando na banda de 5 GHz. 72
Tabela 13 - Resultados sistêmicos obtidos com o sistema operando nas duas bandas. 73

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACK	*Acknowledgment*
AD	Analógico-Digital
ACRoF	*Adaptive and Cognitive Radio over Fiber*
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AP	*Access Point*
CINR	*Carrier to Interference Plus Noise Ratio*
CO	*Central Office*
CRoF	*Cognitive Radio over Fiber*
CWLANoF	*Cognitive Wireless Local Area Network over Fiber*
DAS	*Distributed Antenna System*
DIFS	*Distributed Interframe Space*
DRA	*Dynamic Resource Allocation*
DSSS	*Direct Sequence Spread Spectrum*
EIN	*Equivalent Input Noise*
ERB	Estação Radiobase
FCC	*Federal Communications Comission*
FDP	Função Densidade de Probabilidade

FFT	*Fast Fourier Transform*
FHSS	*Frequency Hopping Spread Spectrum*
FPGA	*Field Programmable Gate Array*
FTTH	*Fiber-To-The-Home*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IG	Intervalo de Guarda
ISM	*Industrial, Scientific and Medical*
ITU	*International Telecommunications Union*
LDPC	*Low-Density Parity Check*
LNA	*Low Noise Amplifier*
MAC	*Medium Access Control*
MCS	*Modulation and Coding Set*
MIMO	*Multiple Input Multiple Output*
OCRA	*Optically Controlled Reconfigurable Antenna*
OCRAP	*Optically Controled Reconfigurable Antenna Processing*
OFDM	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OPRAS	*Optically Pumped Reconfigurable Antennas*
PER	*Packet Error Rate*
Ph-ADC	*Photonic Analog-to-Digital Converter*
PSK	*Phase Shift Keying*
QAM	*Quadrature Amplitude Modulation*
QPSK	*Quadrature Phase Shift Keying*
RAU	*Remoted Antenna Unit*
RC	Radio Cognitivo

RF	Radiofrequência
ROC	*Receiver Operating Characteristic*
RoF	*Radio over Fiber*
RRU	*Remoted Radio Unit*
RSR	Relação Sinal-Ruído
RSSI	*Received Signal Strength Indicator*
SDR	*Software Defined Radio*
SFDR	*Spurious Free Dynamic Range*
SGI	*Shorter Guard Interval*
SIFS	*Shor Interframe Space*
SISO	*Single Input Single Output*
SPTF	*Spectrum Policy Task Force*
SSSP	*Spectral and Spatial Sensing Processing*
UMTS	*Universal Mobile Telecommunications System*
UWB	*Ultra Wide Band*
VCSELs	*Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes*
Wi-Fi	*Wireless Fidelity*
WiMAX	*Worldwide Interoperability for Microwave Access*
WLAN	*Wireless Local Area Network*
WOCA	*Wireless and Optical Convergent Access*
WON	*WOCA Optical Network*

Publicações

1. E. Raimundo-Neto, M. A. F. Casaroli, J. R. G. da Rosa, I. F. Da Costa, A. M. Alberti and Arismar Cerqueira S. 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, Volume 2014, Article ID 670930, 11 pages, April, 2014.

2. E. Raimundo-Neto, M. A. F. Casaroli, J. R. G. da Rosa, I. F. Da Costa, A. M. Alberti and Arismar Cerqueira S. Jr. *"Dynamic Spectral Sensing and Resource Allocation in Optical-Wireless Networks"*, SDR WinComm 2014, Illinois-USA, March, 2014.

3. Arismar Cerqueira S. Jr., E. Raimundo-Neto, S. A. de S. Melo, D. F. Noque, J. R. G. Rosa, I. F. Da Costa and R M. Borges, *"Research Activities on Microwave Photonics, Nonlinear Optics and Optical Communications from the Lab. WOCA from Inatel",* WorkInnova - Denmark-South America Workshop on Photonics Technologies, Campinas-Brazil, November, 2013.

4. E. Raimundo-Neto, M. G. Santos, J. A. J. Ribeiro and Arismar Cerqueira S. Jr., *"Techniques for Mitigating Power Fading in mm-wave Radio over Fiber Systems"*, International Workshop on Telecommunications, Santa Rita do Sapucaí-Brazil, May, 2013.

Resumo

Este trabalho propõe o conceito e reporta a implementação da tecnologia ACRoF, do inglês *Adaptive and Cognitive Radio over Fiber* (rádio cognitivo e adaptativo sobre fibra). Esta tecnologia tem por objetivo atender as novas demandas das redes convergentes e prover simultaneamente as funcionalidades de sensoriamento espectral multibanda, alocação dinâmica de recursos e centralização do processamento de rede, bem como o uso de antenas reconfiguráveis controladas opticamente e rádio sobre fibra. O conceito baseia-se em uma central de controle, que concentra as funcionalidades de sensoriamento espectral e alocação dinâmica de recursos, e unidades remotas de antenas, compostas por uma antena reconfigurável controlada opticamente e uma antena faixa larga para "sensoriar" o espectro. O desempenho desta arquitetura foi avaliado em uma rede óptica-sem fio geograficamente distribuída sob condições reais e para diferentes comprimentos de fibra óptica. Resultados experimentais demonstram que o alcance do sistema pode ser estendido em até 40 vezes e a relação portadora interferência pode ser melhorada em mais de 30 dB em relação à um rede sem fio convencional.

Palavras-chave: Sistemas de Rádio sobre Fibra, Fotônica de Microondas, Rádio Cognitivo, Sensoriamento Espectral e Alocação Dinâmica de Recursos.

Abstract

This work proposes the concept and reports the implementation of the architecture ACRoF, which stands for Adaptive and Cognitive Radio over Fiber. It is aimed to deal with the new demands for convergent networks by means of simultaneously providing the functionalities of radiofrequency spectrum sensing, dynamic resource allocation and centralized network processing capability. Furthermore, it enables the use of optically controlled reconfigurable antennas and radio over fiber technology. This concept is based on a central office with multiband spectrum sensing and dynamic resource allocation functionalities, and simple remote antenna units composed by optically controlled reconfigurable antennas for data transmission and a broadband antenna for sensing the frequency spectrum. The architecture performance has been evaluated in a geographically distributed optical-wireless network under real conditions and for different fiber-optic lengths. Experimental results demonstrate reach extension of more than 40 times and an enhancement of more than 30 dB in the carrier to interference plus noise ratio parameter when compared to a conventional wireless network.

Keywords: Radio over Fiber systems, Microwave Photonics, Cognitive Radio, Spectrum Sensing and Dynamic Resource Allocation.

Capítulo 1. Introdução

1.1 Contextualização e Revisão Bibliográfica

A demanda por serviços de telecomunicações vem crescendo exponencialmente nos últimos anos. O surgimento das redes sociais, o aumento de serviços disponibilizados pela internet e a popularização dos *smartphones* e *tablets* permitem que os usuários utilizem as redes de dados de telefonia móvel e também redes Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) para estabelecer uma conexão. A Figura 1 apresenta a projeção de crescimento do tráfego de dados na internet por tipo de dispositivo para os anos de 2012 a 2017.

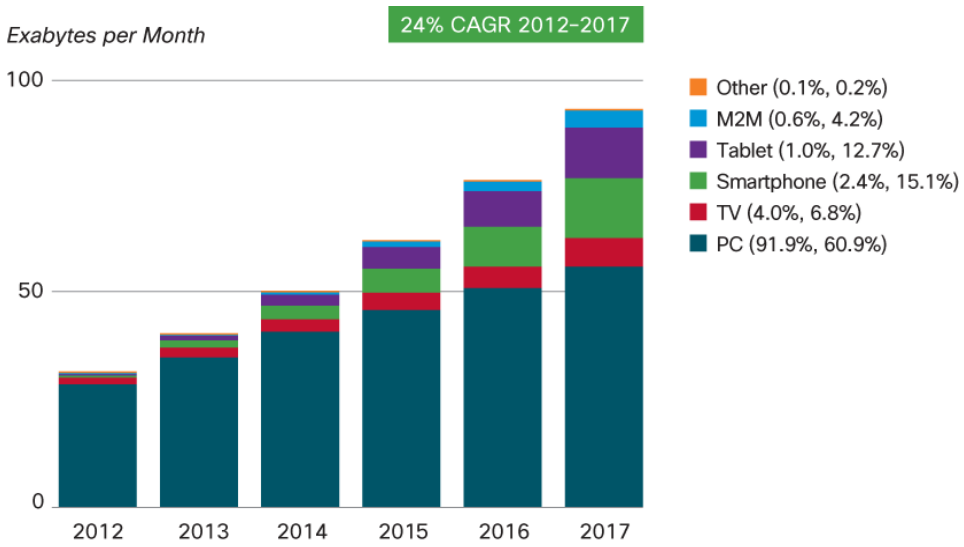


Figura 1 - *Projeção do crescimento de tráfego de dados na internet por tipo de dispositivo. Extraído de [1].*

De acordo com esta projeção o tráfego de dados por computadores apresenta uma redução de 91,9% em 2012 para 60,9% em 2017. Já o tráfego de dados por

smartphones e *tablets* apresenta uma perspectiva de crescimento de 2,4% em 2012 para 15,1% em 2017 e de 1,0% em 2012 para 12,7% em 2017, respectivamente. Outra projeção importante é apresentada na Figura 2, onde a utilização das redes fixas (cabeadas) apresenta uma redução de 48,3% para 31,7%, enquanto que as redes sem fio, considerando as conexões Wi-Fi e conexões utilizando as redes de telefonia móvel apresentam juntas uma projeção de crescimento de 51,7% para 68,3% de 2012 para 2017, ou seja, a projeção mostra que as conexões sem fio já ultrapassaram as conexões fixas há mais de dois anos e a tendência é que este crescimento continue.

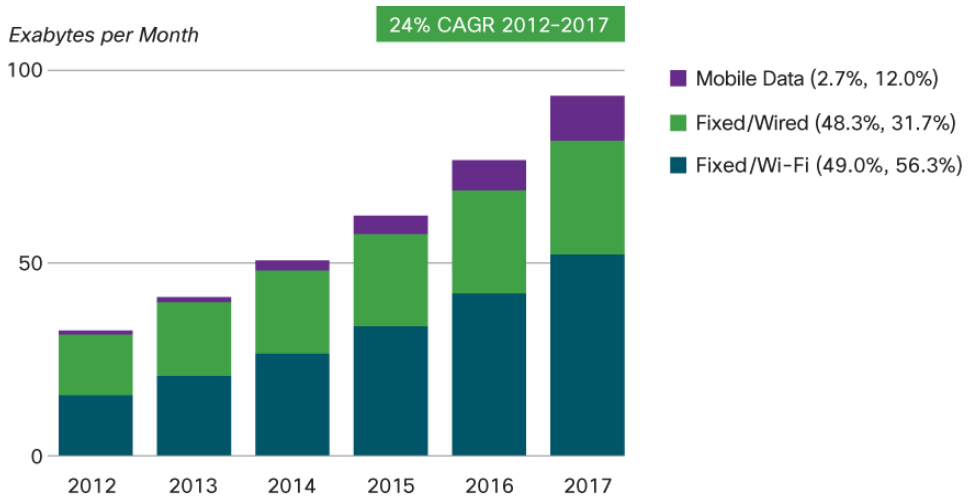


Figura 2 - *Projeção do crescimento de tráfego de dados na internet por tipo de acesso (Extraído de [1]).*

Além do crescimento do tráfego nas redes de dados sem fio, outro aspecto importante que deve ser levado em consideração para os próximos anos é a questão da eficiência de utilização do espectro eletromagnético. Devido à atual política de alocação dos recursos espectrais, estes recursos têm se tornando cada vez mais escassos. Algumas técnicas bastante difundidas podem ser utilizadas para aumentar a eficiência espectral como, por exemplo, o uso de esquemas de modulação mais eficientes, técnicas de codificação de fonte mais robustas, codificadores de canal, modulação e codificação adaptativa. Entretanto, os avanços significativos obtidos por estas técnicas chegaram a um patamar a partir do qual melhorias ficam mais difíceis de serem obtidas. Outra opção para aumentar a taxa de transmissão consiste em aumentar a largura espectral do sinal. Porém, esta opção é bastante conflitante com a atual política de alocação do espectro.

Atualmente a política de alocação do espectro é conhecida como alocação fixa, onde cada tipo de serviço possui uma banda específica deste recurso. Apesar de a ITU (*International Telecommunications Union*) ser responsável por coordenar o uso do espectro, o controle do espectro é feito de maneira independente por cada país por meio de agências reguladoras como, por exemplo, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) no Brasil e a FCC (*Federal Communications Comission*) nos Estados Unidos. A autorização para a utilização de uma banda do espectro é expedida pelas agências reguladoras de acordo com o serviço e a região em questão, e somente a concessionária que obtiver esta autorização pode operar em uma determinada banda até o final do prazo de concessão. Porém, este modelo de alocação espectral tem se mostrado um tanto ineficiente de acordo com os estudos realizados nos últimos anos por órgãos como a *Shared Spectrum Co*. e SPTF (*Spectrum Policy Task Force*), indicando que em muitos casos grande parte do espectro licenciado não é utilizada ou é parcialmente utilizada durante grande parte do tempo observado [2][3]. Neste contexto, o RC (Radio Cognitivo), que é um dispositivo inteligente capaz de adaptar seus parâmetros de operação, tais como potência de transmissão, frequência de operação e tipo de modulação baseado em informações coletadas em um determinado ambiente, surge como uma alternativa para melhorar o desempenho dos sistemas de telecomunicações futuros [4].

Os sistemas de comunicação sem fio operando na faixa de ondas milimétricas (30 a 300 GHz) têm sido propostos para solucionar o problema de largura de banda [5][6]. Porém, um fator que impacta diretamente no desempenho desses sistemas é o alcance das estações transmissoras, que é inversamente proporcional ao quadrado da frequência de operação. Outro fator que impacta no alcance nos sistemas sem fio é a necessidade do aumento da capacidade de um sistema para atender uma determinada demanda, o que faz com que o número de estações transmissoras tenha que ser aumentado para cobrir uma mesma área, impactando nos custos de implantação e infraestrutura. Neste contexto o uso de técnicas que permitam o transporte de sinais de RF (Radiofrequência) no domínio óptico, estendendo assim o alcance entre as estações transmissoras e o usuário, devido à baixa atenuação causada pela propagação da luz na fibra, apresenta-se como uma solução potencial para amenizar o problema. Além disso, estes sistemas podem ser usados para centralizar o

processamento do sistema em questão, utilizando uma arquitetura com antenas distribuídas geograficamente para reduzir os custos de infraestrutura [7].

A partir das premissas apresentadas identificam-se algumas características que podem vir a ser incorporadas aos sistemas de comunicação sem fio em um futuro próximo, que são a capacidade cognitiva e o uso da fibra óptica cada vez mais próxima do usuário final, fazendo com que somente a última milha utilize tecnologias de comunicação sem fio.

Dentre as várias áreas de pesquisa em telecomunicações, duas delas tem apresentado destaque nos últimos anos: sistemas de rádio sobre fibra, também conhecido como RoF (*Radio over Fiber*), e o Rádio Cognitivo. Estudos sobre as técnicas de geração e detecção para o transporte de sinais de RF por meio de um enlace de fibra óptica fazem parte de uma área de pesquisa conhecida como Fotônica de Microondas ou *Microwave Photonics*. De maneira geral um enlace que utiliza técnicas de fotônica de microondas baseia-se na tecnologia RoF [8]. Já o RC, proposto por Joseph Mitola e Maguire em 1999 [4], tem como um dos principais objetivos determinar oportunidades espectrais no ambiente no qual está inserido para estabelecer uma comunicação.

Durante os últimos anos, o RC e suas funcionalidades têm sido alvo de um grande número de pesquisas, incluindo a funcionalidade de sensoriamento espectral [9][10]. O objetivo do sensoriamento espectral é proporcionar ao RC as habilidades de "sensoriar", aprender e determinar se existem oportunidades espectrais para transmissão no ambiente em que o mesmo está inserido. Diversas técnicas estão sendo propostas para detectar a presença ou não de um sinal em uma determinada faixa do espectro. A técnica de sensoriamento espectral mais utilizada é a detecção de energia, devido a sua baixa complexidade de implementação. Além disso, esta é considerada ótima quando não se tem nenhum conhecimento prévio do sinal de transmissão [11]. Além da detecção de energia, outras técnicas como filtro casado [12], detecção cicloestacionária [13][14] e a detecção baseada em autovalores têm sido investigadas [15][16][45].

Paralelamente as pesquisas realizadas na área de rádio cognitivo, os estudos que envolvem tecnologias fotônicas têm crescido expressivamente [17], principalmente sobre os sistemas RoF, os quais são vistos como alternativa para aplicações em sistemas de telecomunicações atuais e de gerações futuras [18]. Quanto aos sistemas atuais já difundidos e amplamente empregados, as principais aplicações de sistemas RoF encontradas na literatura são para distribuição de sinais Wi-Fi [19] [20], WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) [21][22][23] e de telefonia móvel celular [24]. Os sistemas RoF estão comercialmente disponíveis por meio de varias empresas tais como: Linear Photonics, PPM Via Lite, Finisar, Photonics Systems Inc., Optical Zonu, FoxCom, Microwave Photonics, DAS Photonics, Pharad, COMMSCOPE e Andrews. O principal objetivo destes sistemas é promover a centralização do processamento e compartilhamento de infraestrutura para reduzir custos e proporcionar melhor eficiência de energia [25]. Esta centralização do processamento se dá a partir da utilização de um sistema RoF para distribuição dos sinais de rádio para diferentes posições geográficas, arquitetura conhecida como DAS (*Distributed Antenna System*) [26]. Um exemplo deste tipo de aplicação é a instalação de um sistema RoF com antenas distribuídas para transmissão de sinais UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) nos estádios da Copa do Mundo, em 2010 na África do Sul, realizada pela empresa COMMSCOPE. Já o compartilhamento de infraestrutura se dá por meio da utilização de um sistema RoF por dois ou mais sinais de RF de padrões de comunicação distintos, como demonstrado em [27], onde um sistema RoF é utilizado para o transporte de três sinais: Wi-Fi em 2,4 GHz, WiMAX em 5,8 GHz e um sinal em ondas milimétricas na frequência de 60 GHz.

Dentro deste contexto surgiram propostas de sistemas que fazem o uso do RC em sinergia com diferentes tecnologias fotônicas. Destacam-se a aplicação do rádio cognitivo sobre fibra, também conhecida como CRoF (*Cognitive Radio over Fiber*), em sistemas com micro-células [28], a distribuição de sinais Wi-Fi, também conhecida na literatura como CWLANoF (*Cognitive Wireless Local Area Network over Fiber*) [29], o desenvolvimento de *front ends* cognitivos com antenas reconfiguráveis controladas opticamente, também conhecidas como OPRAS

(*Optically Pumped Reconfigurable Antennas*) [30] e a utilização de conversores AD (Analógico-Digital) fotônicos em sensoriamento espectral [31].

No trabalho de Al-Dulaimi et al. [28], a utilização de enlaces RoF para conectar vários RCs é investigada. Os resultados numéricos demonstram que esta arquitetura pode melhorar o desempenho de uma rede de RCs em termos de atraso e vazão quando comparada com a arquitetura tradicional de uma rede cognitiva. Por outro lado, alguns trabalhos que consideram a arquitetura CWLANoF são apresentados em [32][33]. Esta arquitetura propõe o uso de pontos de acesso, sem nenhuma funcionalidade de processamento, conectados a um ponto de acesso cognitivo responsável por todo o processamento da rede, inclusive o sensoriamento espectral. A principal característica destes sistemas é que as habilidades cognitivas, tais como o sensoriamento espectral, estão baseadas em informações de camada MAC (*Medium Access Control*) e demonstram a utilização destas tecnologias fotônicas e cognitivas em sistemas de telecomunicações já consolidados, como é o caso do Wi-Fi, para um melhor desempenho [34][35].

Outra integração das tecnologias fotônicas com o RC consiste do desenvolvimento de antenas adaptativas e reconfiguráveis controladas opticamente [36][37]. As tecnologias fotônicas são utilizadas para reconfigurar alguma propriedade eletromagnética da antena para atender as necessidades de um sistema cognitivo. Além do desenvolvimento de dispositivos como é o caso das antenas, a sua integração com o *front end* de um RC também é o objetivo de trabalhos apresentados recentemente na literatura [38][39][40]. No trabalho de Y. Tawk et al. [30] é reportado o desenvolvimento de um *front end* cognitivo baseado no uso de duas antenas, uma de faixa larga e outra reconfigurável controlada opticamente, utilizadas para o sensoriamento espectral e para transmissão e recepção de dados, respectivamente. Finalmente, Llorente et al. [31] apresentam alguns trabalhos experimentais usando um conversor AD fotônico, também conhecido como Ph-ADC (*Photonic Analog-to-Digital Converter*), para aplicação em sistemas cognitivos operando na faixa de frequências UWB (*Ultra Wide Band*), que vai de 3,1 a 10,6 GHz. Baseado nas principais contribuições das referências pesquisadas, brevemente descritas nesta seção, esse trabalho propõe o conceito da nova tecnologia Rádio

Cognitivo e Adaptativo Sobre Fibra, também conhecida como ACRoF (*Adaptive and Cognitive Radio over Fiber*).

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre o presente trabalho e o Estado da Arte no contexto de RC aplicado em conjunto com tecnologia fotônica. Nota-se que a tecnologia ACRoF pode ser considerada inovadora, pois propõe o conceito inédito Rádio Congnitivo e Adaptativo sobre Fibra, batizado de ACRoF. Além disso, a arquitetura ACRoF viabiliza a integração de diferentes características que foram até o momento apresentados de maneira independente nos trabalhos pesquisados.

Tabela 1 - *Comparativo entre os principais trabalhos*

Característica/Referência	**Al-Dulaimi et al. [28]**	**A. Attar et al. [29]**	**Y. Tawk et al. [30]**	**Llorente et al. [31]**	**ACRoF**
Sensoriamento *Singleband*	Sensoriamento espectral baseado em parâmetros da camada MAC do padrão IEEE 802.11e na banda de 2,4 GHz	Sensoriamento espectral baseado em parâmetros da camada MAC do padrão IEEE 802.11n na banda de 2,4 GHz			
Sensoriamento *Multiband*			Sensoriamento espectral na banda de 3,0 a 11,0 GHz utilizando uma antena UWB	Sensoriamento espectral na banda UWB (3,1 até 10,6 GHz) utilizando um Ph-ADC	Sensoriamento espectral baseado em detecção de energia nas bandas de 2,4 e 5 GHz
CRoF	Utiliza enlaces RoF para interconexão de RCs em um sistema de micro-células	Utiliza enlaces RoF para conexão entre uma central (que concentra todo processamento e habilidades cognitivas do sistema) e as unidades remotas de antena		Utiliza enlaces RoF para conexão entre uma central (que concentra todo processamento e habilidades cognitivas do sistema) e as unidades remotas de antena	Utiliza enlaces RoF para conexão entre uma central (que concentra todo processamento e habilidades cognitivas do sistema) e as unidades remotas de antena
OPRAS			Utiliza uma antena com banda reconfigurável controlada opticamente		Utiliza uma antena com banda reconfigurável controlada opticamente
Alocação Dinâmica de Recursos	Análise de desempenho do sistema cognitivo por meio de simulações computacionais	Análise de desempenho do sistema cognitivo por meio de experimentos			Análise de desempenho do sistema cognitivo por meio de experimentos
Implementação		Prova de conceito realizada em laboratório	Prova de conceito realizada em laboratório	Prova de conceito realizada em laboratório	Implementação em uma rede óptica-sem fio sob condições reais

A principal contribuição desta dissertação é propor o conceito e relatar a primeira etapa de implementação da arquitetura ACRoF, a qual tem como principais objetivos a apresentação da prova de conceito e a demonstração da aplicabilidade desta tecnologia nos sistemas de telecomunicações atuais e das futuras gerações.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação apresenta a concepção e a implementação da arquitetura Radio Cognitivo e Adaptativo Sobre Fibra. O Capítulo 2 apresenta as tecnologias de telecomunicações utilizadas na implementação do ACRoF: a tecnologia Wi-Fi, sistemas RoF e o rádio cognitivo. O objetivo desse capítulo é introduzir conceitos que irão auxiliar na compreensão dos resultados fornecidos nos capítulos seguintes. No Capítulo 3 é apresentado o conceito de ACRoF e sua arquitetura geral, bem como a topologia simplificada do sistema implementado neste trabalho. São descritos os principais elementos que constituem o sistema, levando em consideração suas características e limitações. Inicialmente, a implementação de um sistema Wi-Fi *dual band* sobre fibra é apresentada. Posteriormente, uma antena reconfigurável controlada opticamente, desenvolvida por pesquisadores do laboratório WOCA (*Wireless and Optical Convergent Access*) tem seu desempenho sistêmico avaliado. Além disso, o desempenho da técnica de detecção de energia, quando da utilização de um sistema RoF entre a antena de sensoriamento e a central de processamento foi analisado experimentalmente e os resultados obtidos são expressos por meio da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*). No Capítulo 4, a implementação de um algoritmo de sensoriamento espectral baseado na técnica de detecção de energia para aplicação em redes Wi-Fi *dual band*, a integração dos elementos do sistema e os resultados sistêmicos da implementação da tecnologia ACRoF são reportados. Além disso, são apresentadas as premissas para as próximas etapas de implementação. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2. Tecnologias de Telecomunicações

Neste capítulo são abordadas as principais tecnologias de telecomunicações utilizadas na implementação do conceito de ACRoF. São apresentadas características importantes de cada uma destas tecnologias, que se fazem necessárias para compreender algumas particularidades da proposta deste trabalho.

2.1. Wi-Fi

No que diz respeito aos padrões de comunicação sem fio, a "família" 802.11, padronizada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), popularmente conhecida como Wi-Fi, vem sendo muito utilizada para comunicação de dados para acesso à *internet*. Dentre eles os mais utilizados e difundidos comercialmente são os padrões IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g e 802.11n. A popularização destes padrões se deve ao fato de que os mesmos possuem uma plataforma aberta, o que possibilita que qualquer fabricante de equipamentos e componentes de redes de telecomunicações possa desenvolver seus produtos baseados nas características destes padrões.

O padrão IEEE 802.11 foi homologado em julho de 1997 com o objetivo de prover mobilidade às redes cabeadas, que utilizavam o padrão *Ethernet*. Em sua primeira versão, a taxa máxima de dados teórica era de apenas 2 Mbps, o que o colocava em um cenário de aplicações bastante limitadas, sendo considerado apenas para uso doméstico. Em setembro de 1999 foram homologados os padrões IEEE 802.11a e 802.11b com taxas máximas de 54 Mbps e 11 Mbps, e frequência de operação nas bandas de 5 GHz e 2,4 GHz, respectivamente. Já o padrão IEEE 802.11g homologado em julho de 2003, com taxas máximas de até 54 Mbps e

frequência de operação na banda de 2,4 GHz, possui compatibilidade de operação com o padrão 802.11b. O padrão IEEE 802.11n, homologado em outubro de 2009, é visto atualmente como a melhor opção, pois é compatível com os outros padrões já citados e pode operar nas bandas de 2,4 e 5 GHz com taxas de dados de até 600 Mbps [41]. A Tabela 2 apresenta um resumo das principais características destes padrões. O padrão IEEE 802.11n é utilizado na implementação do sistema apresentado nesta dissertação. Por este motivo suas principais características de camada física apresentadas logo a diante.

Tabela 2- *Principais características dos padrões 802.11.*

	802.11	**802.11a**	**802.11b**	**802.11g**	**802.11n**
Homologação	Julho de 1997	Setembro de 1999	Setembro de 1999	Julho de 2003	Outubro de 2009
Taxa máxima de transmissão	2 Mbps	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	600 Mbps
Alcance	100 m	50 m	100 m	100 m	100 m
Frequência	2,4 GHz	5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 e 5 GHz
Número de *spatial streams*	1	1	1	1	1, 2, 3 ou 4
Canal	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 e 40 MHz
Técnica de transmissão	FHSS	OFDM	DSSS ou CCK	OFDM ou DSSS	OFDM ou DSSS ou CCK

2.1.1. O Padrão IEEE 802.11n

O padrão IEEE 802.11n tem como principais características a utilização das técnicas de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e modulação e codificação adaptativa, que permitem que diferentes esquemas de modulação e codificação, também conhecidos como MCS (*Modulation and Coding Set*), sejam utilizados [41].

Diferentes valores de taxa máxima de transmissão podem ser obtidos para o padrão 802.11n com diferentes combinações dos seguintes parâmetros: largura de faixa do canal, duração do IG (intervalo de guarda) do símbolo OFDM, taxa de

codificação, esquema de modulação e o número de *spatial streams*, este diretamente ligado à ordem (n° de entradas x n° de saídas) da técnica MIMO utilizada. Dobrando a largura de faixa do sinal de transmissão de 20 MHz para 40 MHz a vazão do sistema pode ser dobrada, o que corresponde a um aprimoramento de 100% em relação aos padrões anteriores que utilizavam um sinal com largura de faixa de 20 MHz somente. A utilização do intervalo de guarda reduzido (400 ns), também conhecido como SGI (*Shorter Guard Interval*) reduz o tempo de símbolo de 4 µs para 3,6 µs, aumentando a taxa de símbolos em 10% e, consequentemente, aumentando a vazão do sistema na mesma proporção. Já o MCS, que combina um esquema de modulação e uma taxa de codificação, depende de uma estimativa da qualidade do canal de comunicação. Quando o canal apresenta boas condições são utilizados esquemas de modulação de maior ordem e taxas de codificação maiores. Quando o canal não apresenta boas condições esquemas de modulação de ordem mais baixa e taxa de codificação menor são utilizados com o objetivo de tornar o sistema mais robusto.

Os códigos corretores de erro utilizados no padrão IEEE 802.11n são o código convolucional, que já é utilizado nos padrões anteriores IEEE 802.11a/g, e o código LDPC (*Low-Density Parity Check*), que é uma das novidades deste padrão. O código LDPC é utilizado opcionalmente, porém, vem sendo largamente adotado recentemente. Vale ressaltar que, a adaptação da taxa de codificação e do esquema de modulação impacta diretamente na vazão do sistema. Por último, o número de *spatial streams* transmitidos pode promover um aumento significativo na vazão do sistema. Este parâmetro determina a quantidade de fluxos com dados diferentes que serão transmitidos ao mesmo tempo. Vale ressaltar que o número de *spatial streams* é baseado na ordem do sistema MIMO que está sendo utilizado pelos elementos que compõe a rede. Por exemplo, se forem utilizados dois *spatial streams* ao invés de um, pode-se promover também um aumento de 100% na vazão do sistema [42]. Para que isso seja possível há a necessidade de que o sistema passe do modo de operação SISO (*Single Input Single Output*) a operação MIMO de ordem 2x2. A Tabela 3 apresenta a taxa de transmissão máxima teórica para diferentes combinações de parâmetros de transmissão.

Tabela 3 - *Taxa de transmissão para diferentes combinações de parâmetros no padrão IEEE 802.11n.*

MCS	*Spatial Streams*	Modulação	Taxa de Codificação	Taxa de Transmissão (Mbps)			
				Canal de 20 MHz		Canal de 40 MHz	
				IG=800 ns	IG=400 ns	IG=800 ns	IG=400 ns
0	1	BPSK	1/2	6,50	7,20	13,50	15
1	1	QPSK	1/2	13,00	14,40	27,00	30
2	1	QPSK	3/4	19,50	21,70	40,50	45
3	1	16-QAM	1/2	26,00	28,90	54,00	60
4	1	16-QAM	3/4	39,00	43,30	81,00	90
5	1	64-QAM	2/3	52,00	57,80	108,00	120
6	1	64-QAM	3/4	58,50	65,00	121,50	135
7	1	64-QAM	5/6	65,00	72,20	135,00	150
8	2	BPSK	1/2	13,00	14,40	27,00	30
9	2	QPSK	1/2	26,00	28,90	54,00	60
10	2	QPSK	3/4	39,00	43,30	81,00	90
11	2	16-QAM	1/2	52,00	57,80	108,00	120
12	2	16-QAM	3/4	78,00	86,70	162,00	180
13	2	64-QAM	2/3	104,00	115,60	216,00	240
14	2	64-QAM	3/4	117,00	130,00	243,00	270
15	2	64-QAM	5/6	130,00	144,40	270,00	300
16	3	BPSK	1/2	19,50	21,70	40,50	45
17	3	QPSK	1/2	39,00	43,30	81,00	90
18	3	QPSK	3/4	58,50	65,00	121,50	135
19	3	16-QAM	1/2	78,00	86,70	162,00	180
20	3	16-QAM	3/4	117,00	130,00	243,00	270
21	3	64-QAM	2/3	156,00	173,30	324,00	360
22	3	64-QAM	3/4	175,50	195,00	364,50	405
23	3	64-QAM	5/6	195,00	216,70	405,00	450
24	4	BPSK	1/2	26,00	28,80	54,00	60
25	4	QPSK	1/2	52,00	57,60	108,00	120
26	4	QPSK	3/4	78,00	86,80	162,00	180
27	4	16-QAM	1/2	104,00	115,60	216,00	240
28	4	16-QAM	3/4	156,00	173,20	324,00	360
29	4	64-QAM	2/3	208,00	231,20	432,00	480
30	4	64-QAM	3/4	234,00	260,00	486,00	540
31	4	64-QAM	5/6	260,00	288,80	540,00	600

A utilização conjunta das técnicas de transmissão OFDM, MIMO e modulação e codificação adaptativa são algumas das principais características que diferem o padrão IEEE 802.11n dos padrões IEEE 802.11a/b/g e torna atrativa a sua utilização

em redes WLAN (*Wireless Local Area Network*). Além destas características, a possibilidade de se utilizar canais em duas bandas distintas, 2,4 GHz e 5 GHz, torna-se interessante principalmente em ambientes com alto grau de congestionamento do espectro eletromagnético. A Tabela 4 apresenta os canais disponíveis e suas respectivas frequências centrais para cada uma das bandas. Os canais marcados com (*) não estão disponíveis no sistema que será considerado neste trabalho, pois o transmissor utilizado não apresenta a opção de configuração dos mesmos.

Tabela 4 – *Canalização do Padrão 802.11n para as duas bandas*

Banda de Operação			
2,4 GHz		**5 GHz**	
N° do Canal	**Frequência central (GHz)**	**N° do Canal**	**Frequência central (GHz)**
1	2,412	36	5,180
2	2,417	40	5,200
3	2,422	44	5,220
4	2,427	48	5,240
5	2,432	52*	5,260
6	2,437	56*	5,280
7	2,442	60*	5,300
8	2,447	64*	5,320
9	2,452	149	5,745
10	2,457	153	5,765
11	2,462	157	5,785
12*	2,467	161	5,805
13*	2,472	165	5,825
14*	2,484	-	-

O espaçamento entre as frequências centrais dos canais na banda de 2,4 GHz é de 5 MHz. Já na banda de 5 GHz este espaçamento é de 20 MHz. Portando, quando um determinado sistema opera com um canal de 20 ou 40 MHz de largura de faixa na banda de 2,4 GHz, há a possibilidade de ocorrência de dois tipos de interferência:

co-canal e de canal adjacente. A Figura 3 apresenta a disposição dos canais na banda de 2,4 GHz, na qual é possível visualizar as possibilidades de interferência.

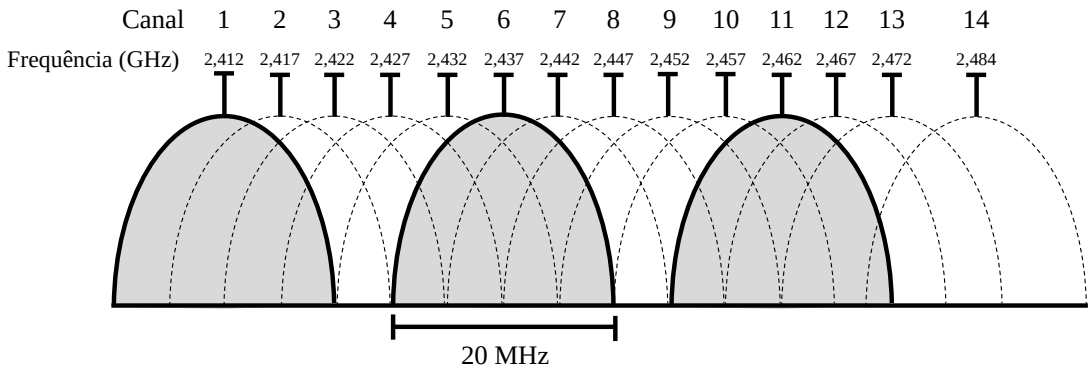


Figura 3 - *Canalização do padrão 802.11n e possibilidades de interferência entre canais com uma banda de 20 MHz.*

No caso ilustrado pela Figura 3, somente três canais pode ser utilizados simultaneamente para cobrir uma determinada área sem que haja nenhum tipo de interferência, como por exemplo, os canais 1, 6 e 11. Analogamente, se um sistema opera na banda de 5 GHz não há inferência de canal adjacente quando um canal de 20 MHz de largura de faixa é utilizado. Por outro lado, quando um sistema utiliza um canal com largura de faixa de 40 MHz há a possibilidade de ocorrência de interferência co-canal e interferência de canal adjacente. Vale ressaltar que, embora exista a possibilidade de operar com canais com largura de faixa de 20 MHz ou 40 MHz, no sistema que será proposto no próximo capítulo só são utilizados canais com largura de faixa de 20 MHz.

2.2. Rádio Cognitivo

O rádio cognitivo baseia-se na tecnologia de um rádio definido por *software*, também conhecido como SDR (*Software Defined Radio*). Sendo assim, o RC pode ser definido como um dispositivo capaz de alterar seus parâmetros de transmissão, de recepção ou ambos, com base na interação com o ambiente no qual ele esta operando. Duas características básicas deste dispositivo são a capacidade cognitiva e reconfigurabilidade [43]. A capacidade cognitiva pode ser definida como a habilidade para “sensoriar” o ambiente de RF com o objetivo de obter informações que possam ser úteis para caracterizar as condições espectrais. Obtidas estas

informações, o RC pode alterar seus parâmetros, tais como frequência de operação, largura de faixa do canal de transmissão, configuração das antenas, potência de transmissão, tipos de modulação e taxa de codificação, de acordo com o as condições do espectro "sensoriado" [44]. A Figura 4 apresenta o diagrama de um ciclo cognitivo simplificado, no qual são descritas as principais ações de um RC. A primeira fase do ciclo é o sensoriamento do espectro, que tem como objetivo monitorar uma determinada faixa de frequências. Em seguida, as medições do sensoriamento passam pelo processo de análise do espectro para que sejam determinadas as oportunidades espectrais. Na etapa de gerenciamento do espectro é definida a estratégia para alocação dos recursos baseada em informações que caracterizam as oportunidades encontradas. Finalmente, de posse destas informações, ocorre a adaptação dos parâmetros e realiza-se a transmissão do sinal de radio.

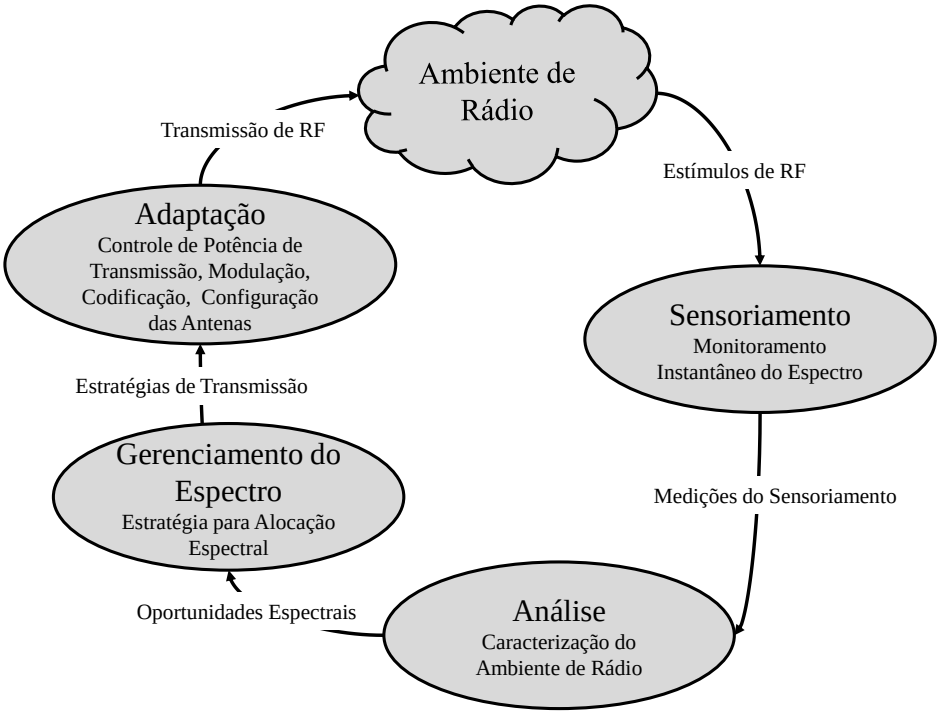


Figura 4- *Ciclo Cognitivo simplificado.*

O uso do ciclo cognitivo permite que os usuários usufruam dos recursos espectrais de maneira compartilhada com usuários primários, também conhecidos como licenciados, usuários secundários, ou com ambos. A Figura 5 ilustra a utilização das oportunidades espectrais por um RC, alterando sua posição no espectro

de forma dinâmica para que o mesmo não interfira na transmissão de um sistema primário.

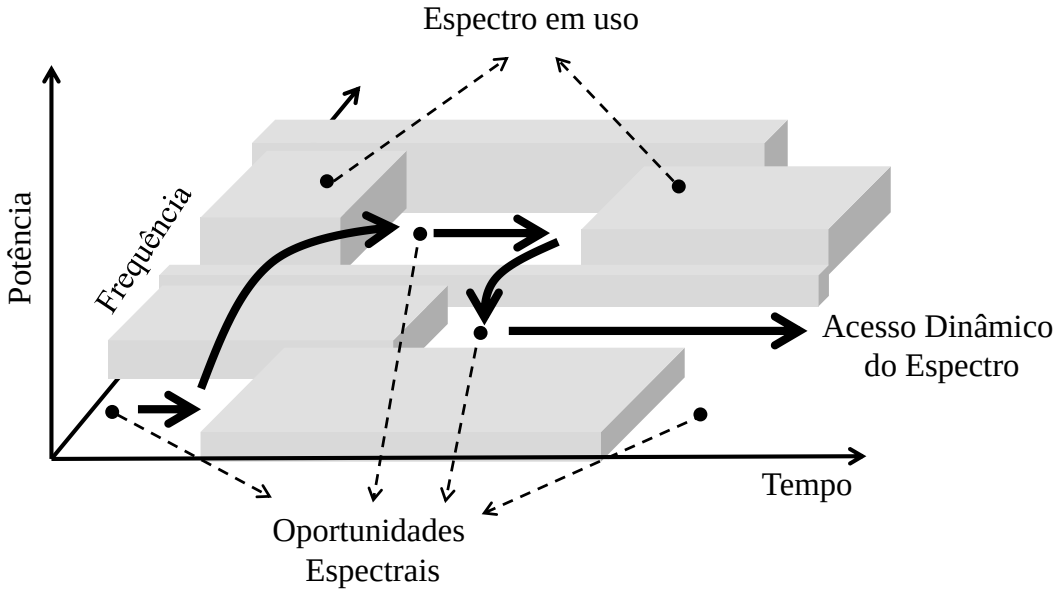


Figura 5 - *Utilização das oportunidades espectrais por um RC.*

2.2.1. Sensoriamento Espectral

O sensoriamento espectral, a primeira etapa do ciclo cognitivo ilustrado na Figura 4, pode ser definido como a habilidade do RC de medir os estímulos de RF no ambiente de rádio no qual está operando. Existem diversas técnicas de sensoriamento espectral propostas na literatura [9][10]. Independente da técnica de sensoriamento utilizada, ela pode ser modelada de maneira analítica por meio de um teste de hipóteses binário, onde o objetivo é decidir ente duas hipóteses, a hipótese H_0 e a hipótese H_1. A hipótese H_0 representa a ausência de sinal de um usuário primário e a hipótese H_1 representa a presença de sinal. Estas hipóteses podem ser descritas matematicamente como:

$$H_0 : y(t) = n(t) \tag{1}$$

$$H_1 : y(t) = h(t)x(t) + n(t) \tag{2}$$

onde $y(t)$ é o sinal a amostrado e analisado pelo RC, $n(t)$ representa o ruído do receptor, $x(t)$ representa o sinal transmitido por um usuário primário e $h(t)$ representa

os efeitos do canal que irão modificar o sinal transmitido. Quando nenhum usuário primário estiver transmitindo o sinal $y(t)$ é composto apenas pelo ruído e quando um usuário primário estiver transmitindo o sinal $y(t)$ é composto pelo ruído e pelo sinal transmitido pelo usuário primário modificado pelos efeitos do canal como, por exemplo, ganho ou atenuação. Quanto ao teste de hipótese binário, existem quatro eventos possíveis e cada um deles é associado a uma probabilidade de ocorrência, como ilustrado na Figura 6.

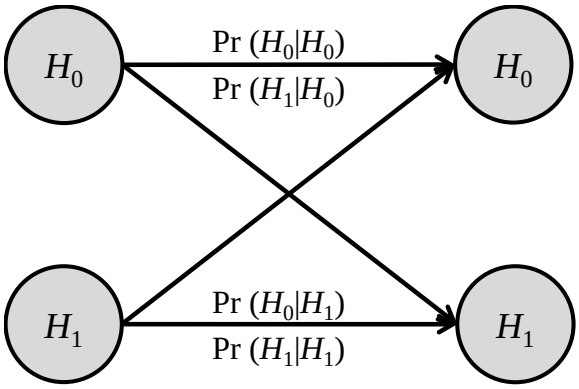


Figura 6- *Teste de hipótese binário.*

A partir da ilustração do teste de hipótese binário podem ser tomadas as seguintes decisões:

1. Decidir por H_0 quando a hipótese H_0 é verdadeira, com probabilidade Pr $(H_0 \mid H_0)$.
2. Decidir por H_1 quando a hipótese H_0 é verdadeira, com probabilidade Pr $(H_1 \mid H_0)$.
3. Decidir por H_1 quando a hipótese H_1 é verdadeira, com probabilidade Pr $(H_1 \mid H_1)$.
4. Decidir por H_0 quando a hipótese H_1 é verdadeira, com probabilidade Pr $(H_0 \mid H_1)$.

Para decidir se uma determinada faixa do espectro esta ocupada ou não, o RC utiliza uma variável de decisão T, também conhecida como estatística de teste, que baseia-se em alguma característica das amostras do sinal no espectro "sensoriado" [45]. A estatística de teste T é comparada com um limiar de decisão λ. Se $T > \lambda$ decide-se pela ocupação do espectro, caso contrário o espectro é considerado livre.

Apesar de parecer um processo simples em um primeiro momento, a decisão sobre a ocupação do espectro "sensoriado" não será determinística e cada evento terá uma probabilidade associada devido à natureza aleatória do sinal recebido $y(t)$, o que consequentemente resultará em um comportamento também aleatório da variável de decisão T.

No contexto de sensoriamento espectral, estas probabilidades recebem uma nomenclatura que expressa melhor o seu significado físico e podem ser determinadas por meio do cálculo da área das funções densidade de probabilidade condicionais da estatística de teste. A seguir são apresentadas as nomenclaturas utilizadas na literatura e suas respectivas abreviações:

1. Probabilidade de ocorrência de buraco espectral (do inglês *spectrum hole probability*): probabilidade de não detectar um sinal dado que ele não está presente. Conhecida na literatura como P_{SH}.
2. Probabilidade de alarme falso (do inglês *false alarm probability*): probabilidade de detectar um sinal dado que ele não esta presente. Conhecida na literatura como P_{FA}.
3. Probabilidade de detecção (do inglês *probability of detection*): probabilidade de detectar um sinal dado que ele está presente. Conhecida na literatura como P_D.
4. Probabilidade de falso negativo (do inglês *miss detection probability*): probabilidade de não detectar o sinal dado que ele está presente. Conhecida na literatura como P_{MD}.

Dado que a variável de decisão T é uma variável aleatória, uma FDP (Função Densidade de Probabilidade) é associada a ela para que seu comportamento estatístico possa ser descrito. Neste caso existem duas funções densidade de probabilidade condicional para descrever o comportamento da variável de decisão T, uma sob a hipótese de ocorrência de H_0 e outra sob a hipótese de ocorrência de H_1. A Figura 7 apresenta um exemplo das funções densidade de probabilidade sob as hipóteses H_0 e H_1, representadas pelas curvas $f_0(T) = f(T/H_0)$ e $f_1(T) = f(T/H_1)$ respectivamente.

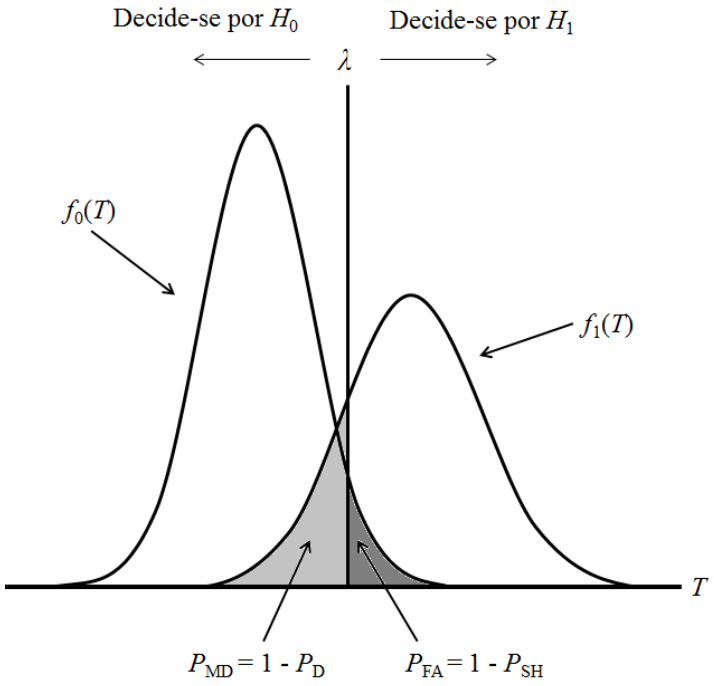


Figura 7 - *Funções densidade de probabilidade da variável aleatória T sob as hipóteses H_0 e H_1.*

O estabelecimento do valor de limiar de decisão entre as hipóteses H_0 e H_1 permite que sejam determinadas as probabilidades condicionais descritas para uma determinada condição. Observando o exemplo apresentado na Figura 7 é possível compreender o comportamento das probabilidades em função da variação do limiar de decisão. Quanto menor o valor de λ maior o valor da P_D e maior o valor de P_{FA}, e quanto maior o limiar de decisão menor é o valor de P_D e menor também o valor de P_{FA}. Portanto, a escolha do limiar de decisão impacta diretamente no desempenho do sensoriamento espectral e precisa ser feita de modo a que se obtenha uma relação de compromisso entre os valores de P_{FA} e P_D. Esta escolha pode ser feita a partir da análise da curva ROC [46] a qual relaciona as probabilidades P_{FA} e P_D em função da variação de λ.

2.3. Rádio sobre Fibra

Um sistema rádio sobre fibra consiste na utilização de um enlace de fibra óptica para o transporte de sinais de RF. A aplicação de enlaces RoF em sistemas de telecomunicações se tornou possível com a utilização de tecnologias fotônicas que permitem que um sinal de RF passe pelas conversões eletro-óptica e óptico-elétrica,

necessárias para que o transporte do mesmo por meio de uma fibra óptica seja possível. Um sistema RoF apresenta como principais vantagens a imunidade a interferência eletromagnética, baixa atenuação causada pela propagação do sinal na fibra óptica e disponibilidade de uma grande largura de faixa de operação [48]. Além disso, um enlace RoF pode ser considerado transparente para qualquer padrão de comunicação, permitindo que sinais de transmissão de diferentes tecnologias compartilhem o mesmo meio [24].

A Figura 8 exemplifica a utilização de um enlace RoF em um sistema de telefonia móvel celular. Na Figura 8 (a) é apresentado um sistema convencional no qual a ERB (Estação Radiobase) e as antenas transmissoras localizam-se no *site* remoto. Neste caso a comunicação da ERB com a estação de controle é feita por meio de um enlace de microondas ou de fibra óptica. Já a Figura 8 (b) apresenta um sistema de telefonia móvel celular baseado em um enlace RoF entre a ERB e a antena. Nos sistemas convencionais, a conexão entre ERB e as antenas é feita por meio de um cabo coaxial. A atenuação causada por estes cabos depende da frequência do sinal. Neste caso, faz-se necessária a utilização de sistemas de conversão de frequência (*upconversion e downconversion*), para que o sinal seja transmitido em uma frequência intermediária entre a ERB e a antena. Com a utilização de um sistema RoF, a transmissão é simplificada por meio da substituição do sistema de conversão de frequência por transceptores RoF. Estes transceptores são constituídos de um sistema de conversão eletro-óptico, óptico-elétrico e estágios de amplificação. Isto permite que a fibra óptica chegue até as antenas de transmissão, substituindo o cabo coaxial e os sistemas de conversão de frequência. Além disso, esta aplicação permite que a ERB seja instalada juntamente com a estação de controle, simplificando os *sites* de transmissão e reduzindo os custos de implantação e manutenção. Vale ressaltar ainda que a atenuação do sinal que se propaga na fibra óptica não depende da frequência do sinal de RF. Por exemplo, em um sistema RoF que utiliza fibras monomodo, a atenuação no domínio elétrico é de aproximadamente 0,4 dB/km. Já em um sistema convencional operando com uma frequência intermediária de 50 MHz a atenuação em um cabo coaxial é de aproximadamente 80 dB/km.

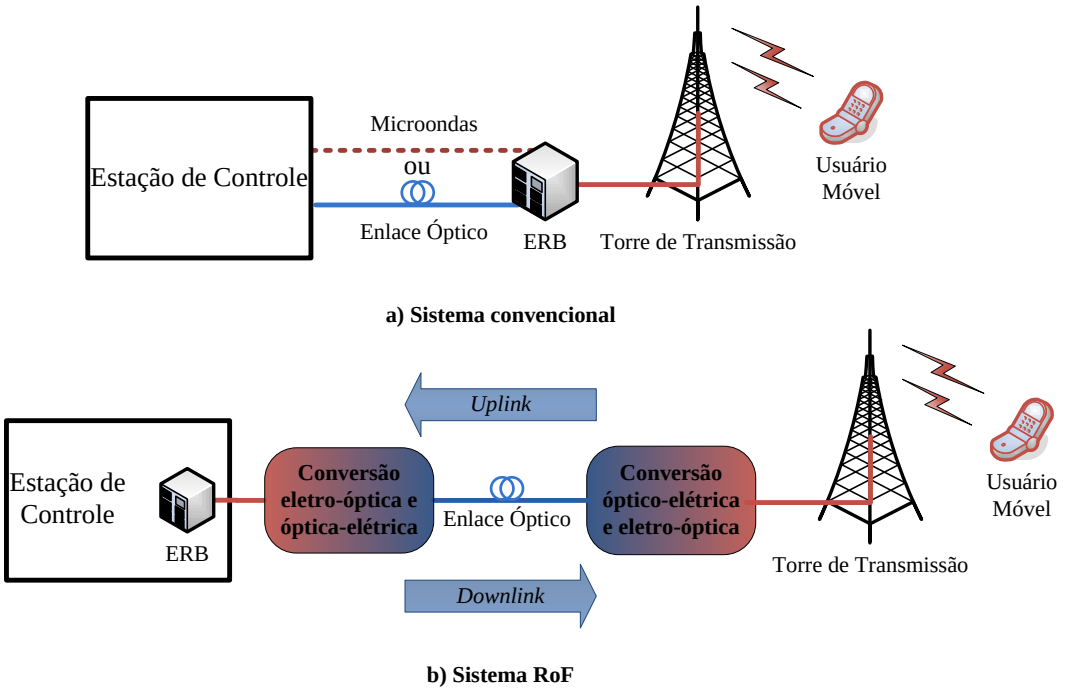


Figura 8 - *Exemplo de aplicação de um enlace RoF em um sistema de telefonia móvel celular*.

A utilização de enlaces RoF em sistemas com antenas distribuídas (DAS) pode ser vista como uma das principais propostas de aplicação para esta tecnologia. Nestes sistemas, os enlaces de RoF são utilizados para conectar uma unidade central, também conhecida como CO (*Central Office*), com unidades remotas de antena, também conhecidas como RAUs (*Remoted Antenna Units*), distribuídas geograficamente a fim de prover cobertura em uma determinada área, com qualidade e alta capacidade para comunicação com os usuários. Esta arquitetura se apresenta como uma solução para grandes centros urbanos, centros comerciais, edifícios e túneis [7].

Com a utilização da arquitetura com processamento centralizado na CO, faz-se possível o compartilhamento de equipamentos, alocação dinâmica de recursos e a redução dos custos de operação e manutenção, o que é bastante atrativo no atual contexto das redes sem fio. A Figura 9 apresenta o diagrama em blocos de um sistema que utiliza um enlace RoF entre a CO e a RAU, destacando seus principais componentes.

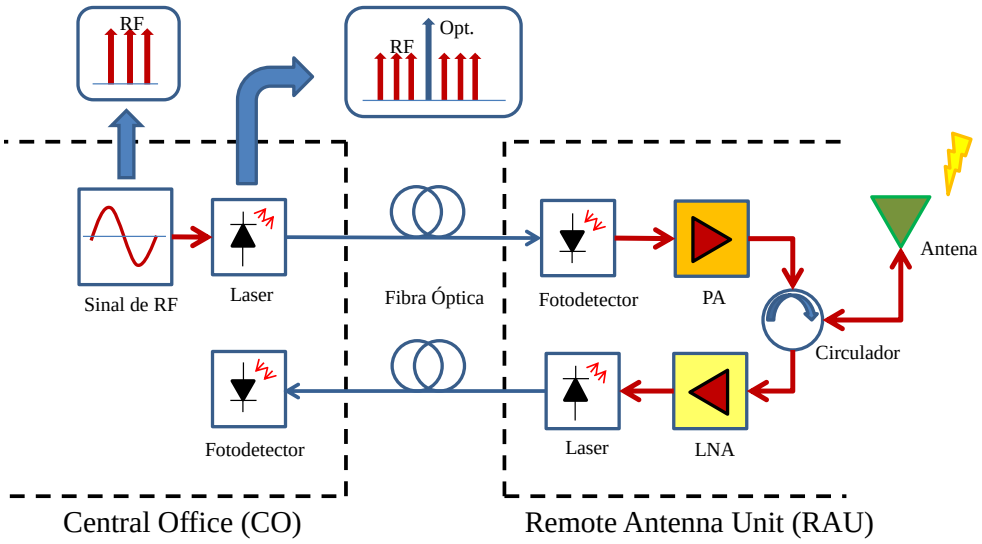


Figura 9 - *Sistema RoF.*

No *downlink* o sinal de RF modula uma portadora óptica e o sinal resultante será posteriormente transmitido por meio do enlace óptico até a RAU. Na RAU o sinal de RF é então recuperado por um fotodiodo e amplificado por um amplificador de potência PA (*Power Amplifier*), antes de ser irradiado pela antena. Analogamente, no *uplink* o sinal recebido pela antena é amplificado por um amplificador de baixo ruído LNA (*Low Noise Amplifier*). Isto se faz necessário porque o sinal recebido pela RAU apresenta uma RSR (Relação Sinal-Ruído) baixa devido às limitações de potência de transmissão do usuário e a distância que o mesmo pode se encontrar da RAU. Em seguida, o sinal é utilizado para modular uma portadora óptica que será transmitida por meio de um enlace óptico para a CO onde o sinal é recuperado também por um fotodiodo. Note que, neste caso, somente uma antena é utilizada para se estabelecer a comunicação entre o sistema e os seus usuários. Isto só é possível com a utilização de um circulador de RF que permite que um sinal aplicado em uma de suas entradas seja transmitido somente para uma das outras interfaces, seguindo apenas um sentido.

2.3.1. Aplicações da Tecnologia RoF

Com o objetivo de usufruir das vantagens oferecidas pelos sistemas RoF, diversas aplicações surgiram ao longo dos últimos anos. Com o aumento da demanda de tráfego pelos usuários dos sistemas de comunicação sem fio, faz-se necessário o

aumento da capacidade destes sistemas para cobrir uma determinada área, por exemplo, com o uso de micro-células e pico-células. Porém, em sistemas convencionais que utilizam este tipo de arquitetura o número de ERBs aumenta significativamente e, consequentemente, os custos de instalação, operação e manutenção também aumentam na mesma proporção. Neste contexto, os sistemas com antenas distribuídas se apresentam como uma solução eficiente quando a conexão entre a CO e as RAUs é feita por meio de um enlace RoF. A Figura 10 (a) apresenta um sistema convencional onde somente uma ERB é utilizada para cobrir uma determinada área. Já a Figura 10 (b) apresenta um sistema onde são utilizadas pico-células com o objetivo de aumentar a capacidade do mesmo; note que neste caso o número de ERBs aumenta significativamente. Finalmente, na Figura 10 (c) é apresentada a arquitetura de um sistema onde se utilizam enlaces RoF, promovendo a simplificação das RAUs e centralizando todo o processamento na CO. Esta arquitetura provê uma redução significativa nos custos de instalação, operação e manutenção [49].

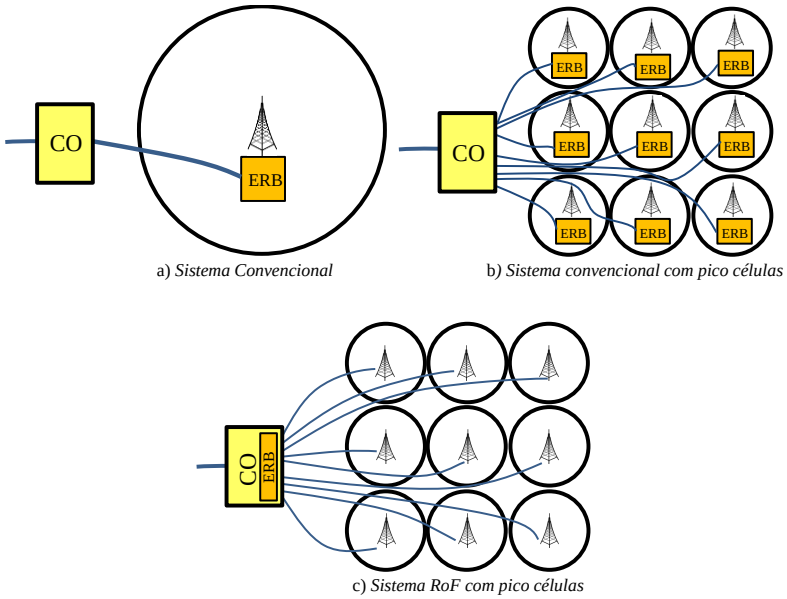


Figura 10 - *Aumentando a capacidade de um sistema de comunicação sem fio com a utilização de pico-células e enlaces RoF.*

Como um enlace RoF pode ser considerado transparente ao padrão de comunicação que será transportado por ele [50], sinais de diferentes padrões de comunicação sem fio podem compartilhar a mesma infraestrutura, reduzindo custos

de implantação, operação e manutenção e promovendo a centralização do processamento. Neste contexto foram propostas diversas aplicações de sistemas RoF. Em algumas delas a CO também é conhecida como hotel de ERBs, por abrigar os equipamentos das diferentes tecnologias. A Figura 11 apresenta um exemplo deste cenário, onde a mesma infraestrutura é utilizada por redes locais, redes de telefonia móvel e para interconexão de ERBs. Neste caso, diferentes padrões de comunicação podem ser multiplexados tanto no domínio elétrico quanto no domínio óptico.

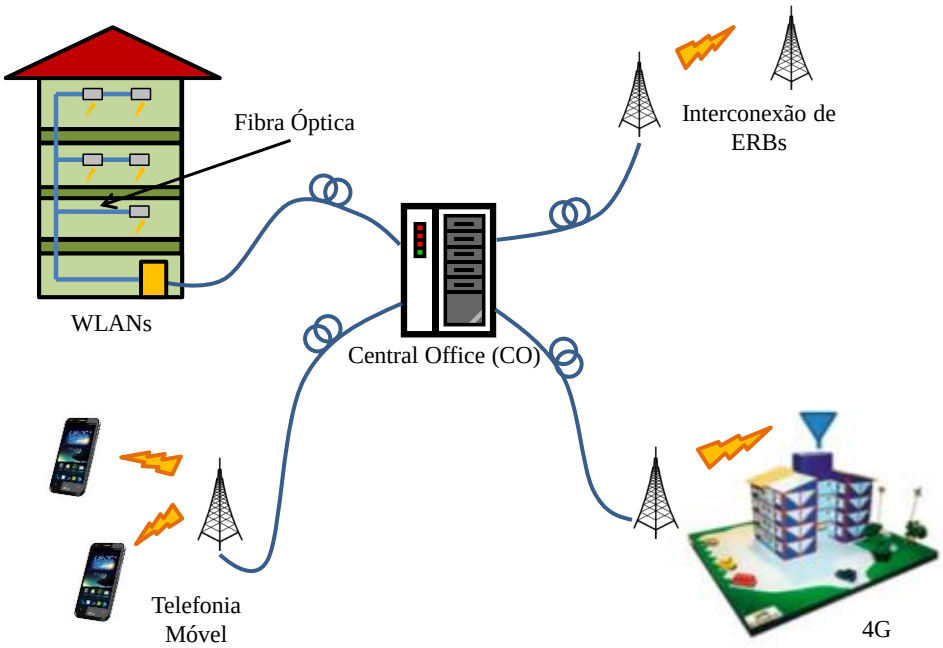


Figura 11 – *Compartilhamento de infraestrutura em sistemas RoF.*

Em [51], um sistema RoF para a distribuição de múltiplos padrões de comunicação sem fio em ambientes *indoor* foi proposto e analisado. Neste caso foram utilizados seis padrões diferentes, sendo quatro de telefonia móvel celular entre 700 MHz e 2,1 GHz, um padrão Wi-Fi em 2,4 GHz e um padrão de 60 GHz em ondas milimétricas para comunicação em altas taxas e curtas distâncias. Já em [52] um enlace RoF é utilizado para a transmissão de um sinal Wi-Fi, um sinal WiMAX e um sinal UWB simultaneamente. Neste caso o uso de lasers VCSELs (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes*) e transceptores de eletro-absorção foi proposto a fim de reduzir os custos de implantação e tornar o sistema ainda mais atrativo.

A disponibilidade de uma grande largura de faixa de operação torna os sistemas RoF atrativos para distribuição de sinais UWB e sinais em ondas milimétricas em ambientes *indoor*, o que possibilita que altas taxas de dados sejam experimentadas pelos usuários. Neste caso, a distribuição de vídeo em alta definição sem compressão se torna possível, podendo ser utilizada tanto em residências e edifícios quanto em locais de grande concentração de pessoas, como centros comerciais, estádios de futebol e em locais de grandes eventos. Em [53], por exemplo, um enlace RoF foi utilizado para distribuição de sinais UWB por meio da infraestrutura de uma rede FTTH (*Fiber-To-The-Home*), proporcionando taxas de até 1,25 Gbps aos usuários. Portanto, esta tecnologia apresenta potencial para ser utilizada em eventos como a Copa do Mundo de Futebol e os Jogos Olímpicos para distribuição de conteúdos interativos e vídeo em alta definição. A Figura 12 apresenta um exemplo de aplicação em um estádio de futebol. Neste caso, um ou mais padrões de comunicação podem ser utilizados para transmissão destes conteúdos compartilhando a mesma infraestrutura. Além disso, os cabos ópticos podem ser usados para distribuição de vídeo em alta resolução (*full HD*) em tempo real.

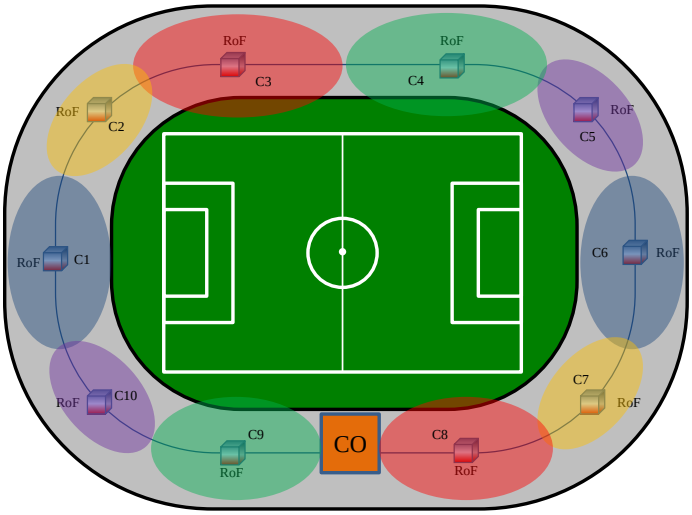


Figura 12 - *Aplicação da tecnologia RoF para distribuição de vídeo em alta definição em estádios de futebol.*

Outra aplicação potencial é a utilização de um enlace RoF para distribuição de sinais de RF em áreas de sombra tais como o interior de túneis, estações subterrâneas de trem e de metrô. A Figura 13 apresenta um exemplo desta aplicação

para distribuição de sinais ao longo do túnel de uma rodovia, com o objetivo de proporcionar uma cobertura uniforme para que a comunicação com os usuários que se encontram no interior do mesmo não seja prejudicada. Neste caso, há a possibilidade de se utilizar apenas uma fibra óptica para comunicação entre os usuários e a CO, utilizando diferentes comprimentos de onda para os sinais de *downlink* e *uplink*.

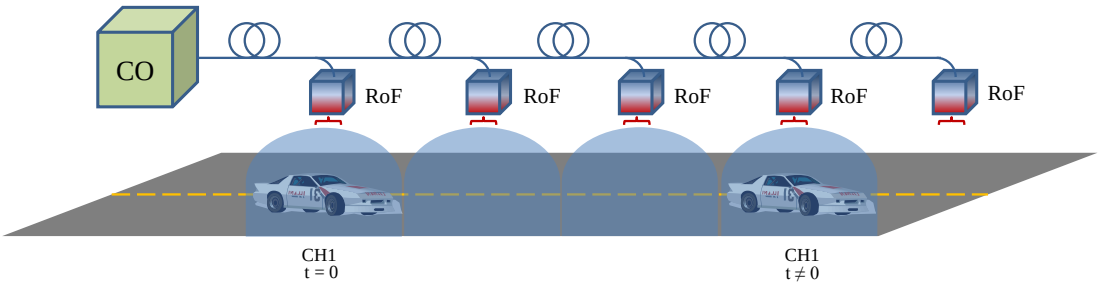


Figura 13 - *Aplicação da tecnologia RoF para distribuição de sinais de RF no interior de túneis*.

Y. Hsueh et al relataram um sistema RoF capaz de transmitir de sinais de RF nas faixas de 2,4 , 5,8 e 60 GHz, com a finalidade de prover serviços a taxas maiores que 1 Gbps aos usuários [27]. Os sistemas que operam em ondas milimétricas, especialmente em 60 GHz tem despertado grande interesse de pesquisa por oferecerem grande largura de faixa aos usuários [54][55]. Portanto, os sistemas RoF se apresentam como uma potencial solução para integração das redes óptica e sem fio com o objetivo de aumentar a capacidade, a cobertura, a largura de faixa e a mobilidade na rede para atender tanto aos usuário fixos quanto aos usuários móveis de diferentes tecnologias, compartilhando a mesma infraestrutura.

Os sistemas RoF apresentam diversos parâmetros particulares, como a frequência de operação, a faixa dinâmica de operação, a figura de ruído, o ganho de RF, entre outros [56]. A seção a seguir apresenta a definição de ganho de RF de um sistema RoF bem como o mesmo pode ser determinado. Este entendimento se faz necessário para que considerações feitas nos próximos capítulos sejam compreendidas.

2.3.2. Ganho de RF de um Sistema RoF

A maioria dos equipamentos que compõem um enlace RoF utilizam amplificadores para compensar as perdas oriundas dos processos de conversão eletro-óptica e óptica-elétrica, o que faz com que o ganho destes sistemas se torne positivo. Para implementar um sistema RoF é muito importante que se tenha conhecimento deste parâmetro que é informado no manual do fabricante. Na prática este ganho pode ser obtido de maneira simples a partir da diferença entre as potências de saída e entrada do sinal de RF:

$$G_{\mathrm{ROF}} = 10\log(P_{\mathrm{out}}/P_{\mathrm{in}}) \text{ , dB} \tag{3}$$

Em um sistema onde não são utilizados amplificadores o ganho do sistema RoF torna-se negativo e nestes casos tem-se uma penalidade de potência. Por exemplo, o ganho de RF dos módulos utilizados na implementação a que se refere este trabalho, os quais operam de 30 MHz até 6 GHz, é de 15 dB, podendo apresentar uma variação de ±2 dB ao longo da faixa de frequências de operação. O fabricante desses módulos também fornecem módulos sem estágios de amplificação de RF. Neste caso o ganho é de 0 dB, podendo apresentar uma variação de ±2 dB para a mesma faixa de frequências de operação. O modelo utilizado neste trabalho é o OZ 816 Series da Optical Zonu [57]. Os dados foram fornecidos pelo fabricante no manual e as medidas foram realizadas utilizando um enlace de fibra óptica de 1 m de comprimento. No Capítulo 3 o ganho medido destes módulos será apresentado. A Figura 14 mostra um dos módulos RoF utilizados nos equipamentos e suas interfaces ópticas e elétricas.

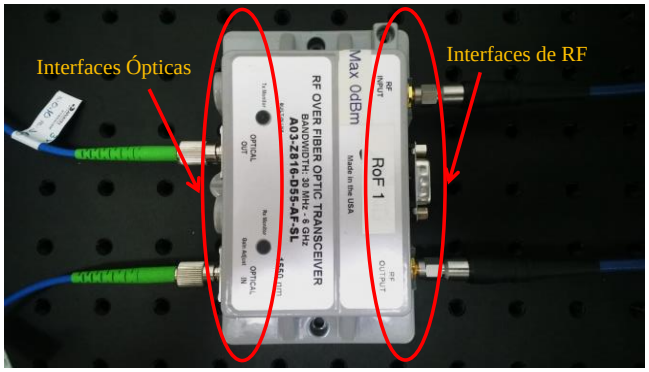


Figura 14 - *Módulo RoF OZ 806 Series utilizado nos experimentos.*

Além de depender das perdas que são oriundas dos processos de conversão do sinal e que estão diretamente ligadas a eficiência de conversão do laser (s_l) e do receptor (s_r), o ganho depende também da perda óptica do enlace de fibra (L_0) e das impedâncias de entrada (R_{in}) e de saída do sistema (R_{out}), podendo ser determinado por:

$$G_{\text{ROF}} = 20\log(s_l)\,(s_r) - 2L_0 + 10\log(R_{\text{out}}/R_{\text{in}}) \quad (4)$$

Em um caso ideal, considerando que as impedâncias de entrada e de saída são iguais a 50 Ω, e que as eficiência de conversão do laser e do receptor são iguais a 1, o ganho do sistema fica dependente apenas da perda óptica L_0, e pode-se observar que para cada 1 dB de perda óptica o ganho é penalizado em 2 dB.

Vale ressaltar que no transmissor a impedância do laser precisa ser casada com a impedância da entrada de RF para evitar perda por reflexões. Por outro lado, no receptor a resistência do fotodiodo também precisa estar casada com a saída de RF [58]. Para realizar o casamento de impedância os módulos RoF podem apresentar dois tipos de circuito de casamento, o resistivo e o reativo. A principal vantagem do casamento resistivo é que o ganho de RF é limitado somente pela banda de modulação do laser. Por outro lado, o casamento resistivo degrada significativamente o sinal de RF e é sensível ao ruído térmico. Já o casamento reativo utiliza indutores e capacitores que criam estágios de amplificação e aumentam o ganho de RF, porém os circuitos reativos são sensíveis a frequência da portadora de RF, tornando estreita a banda de operação do sistema [59][60].

Capítulo 3. ACRoF - Rádio Cognitivo e Adaptativo Sobre Fibra

3.1. Concepção

O Rádio Cognitivo e Adaptativo sobre Fibra (ACRoF) foi proposto com o objetivo de integrar as tecnologias de rádio sobre fibra e de rádio cognitivo e usufruir simultaneamente das suas vantagens. As principais vantagens de utilizar esta tecnologia são o compartilhamento de infraestrutura, a centralização do processamento e a alocação dinâmica de recursos. Vale destacar também a capacidade de adaptação dos dispositivos de RF com a utilização de tecnologias fotônicas, como é o caso das antenas reconfiguráveis controladas opticamente. A Figura 15 apresenta a arquitetura deste conceito com seus principais elementos e funcionalidades. O sistema proposto consiste de uma CO e de algumas RAUs. A CO concentra os seguintes elementos: i) RRU (*Remoted Radio Unit*), que é um rádio capaz de prover a transmissão e recepção de dados para diferentes RAUs; ii) OCRAP (*Optically Controled Reconfigurable Antenna Processing*), responsável pela reconfiguração das características eletromagnéticas da antena a partir de informações do SSSP (*Spectral and Spatial Sensing Processing*); iii) SSSP, que é o elemento responsável por receber as amostras de espectro do ambiente "sensoriado", processar esta informação e disponibilizá-la ao DRA (*Dynamic Resource Allocation*); e iv) ,DRA que é responsável por realizar a alocação dinâmica do espectro com base nas informações do SSSP.

Já as RAUs baseiam-se nas OCRAs (*Optically Controlled Reconfigurable Antennas*), as quais são responsáveis pela transmissão e recepção de dados e também

por realizar o sensoriamento do espectro em uma faixa de frequências específica. Estas antenas serão apresentadas com maiores detalhes na Seção 3.4 deste capítulo.

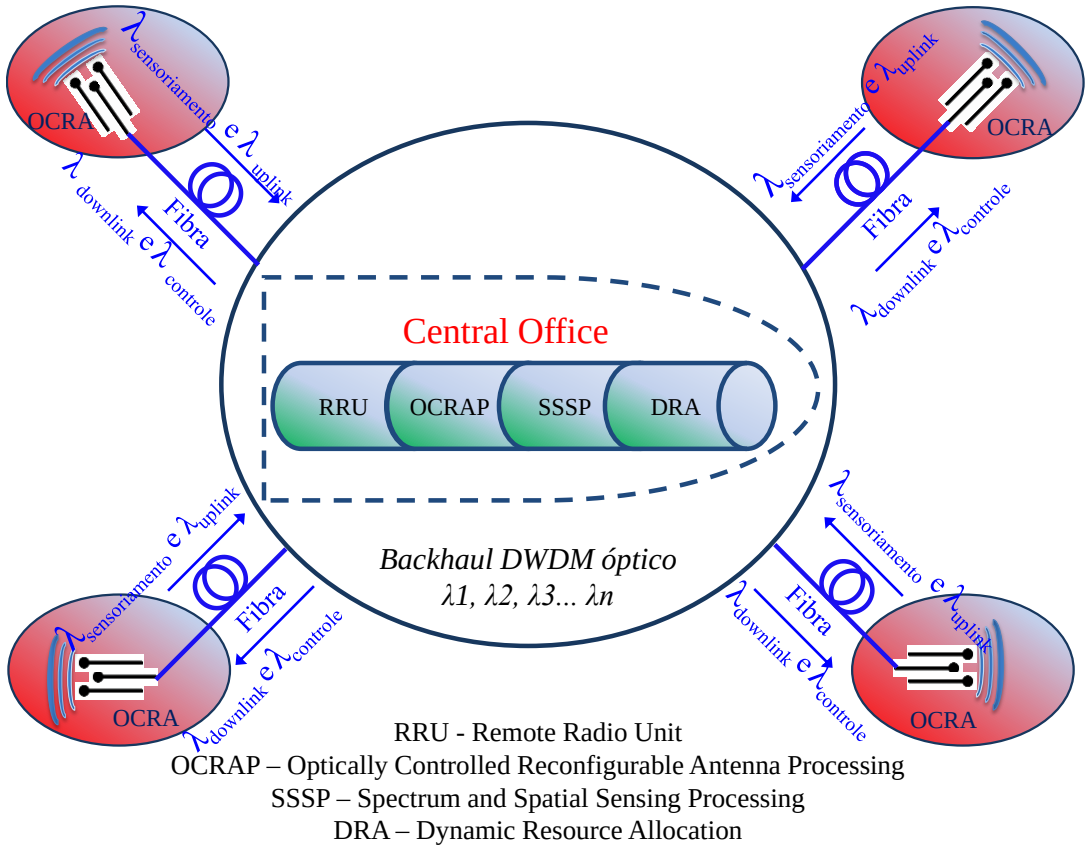


Figura 15 - *Arquitetura ACRoF.*

3.2. Sistema Proposto para Implementação

A arquitetura ACRoF implementada e descrita nesta dissertação consiste dos seguintes componentes: uma CO, uma RAU, um enlace RoF bidirecional para o transporte dos sinais de RF e um enlace óptico que transporta os sinais de controle enviados para a RAU. A Figura 16 apresenta o diagrama de blocos do sistema proposto para implementação e seus principais elementos e funcionalidades.

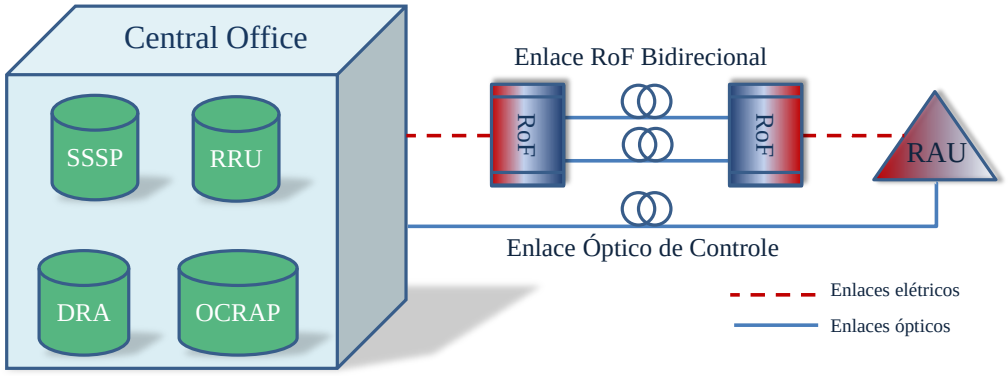


Figura 16 - *Sistema proposto para implementação.*

O sistema foi implementado em uma versão simplificada e, neste caso, algumas funções não estão totalmente incorporadas como idealizado no conceito inicial. Quanto à CO, a funcionalidade OCRAP não foi implementada nesta primeira etapa devido às limitações de camada física que serão descritas posteriormente na Seção 4.2. Neste caso o controle óptico da antena de transmissão foi feito manualmente na RAU. Quanto ao enlace RoF bidirecional, foram utilizadas duas fibras para se estabelecer a comunicação pois os módulos operam no mesmo comprimento de onda, o que impossibilitou que os sinais no *downlink* e no *uplink* fossem transmitidos por meio da mesma fibra óptica. Para utilizar apenas uma fibra óptica no enlace RoF é necessário que os módulos operem em comprimentos de onda distintos. Além disso, a funcionalidade SSSP foi parcialmente implementada, visto que não há sensoriamento espacial (somente sensoriamento espectral), pois, tem-se apenas uma RAU e a mesma não possui antenas controladas por um sistema de direcionamento de feixe.

A CO é composta por um AP (*Access Point*) Wi-Fi, um analisador de espectro e um computador portátil, responsável pelo processamento de dados, controle e tomada de decisões. O AP Wi-Fi opera em duas bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) não licenciadas, uma banda em 2,4 GHz e outra em 5 GHz, o que permite aumento significativo das oportunidades espectrais para transmissão de dados. Portanto, o AP desempenha a função chamada na arquitetura de RRU. O analisador de espectro é responsável por receber as amostras do espectro e disponibilizá-las ao computador portátil em tempo real. O computador portátil, por sua vez, de posse das amostras de espectro coletadas, executa um algoritmo de

sensoriamento espectral e determina qual o melhor canal para se estabelecer a conexão com os usuários. Tomada esta decisão, o computador envia um comando de reconfiguração de canal, banda ou ambos para o AP e um sinal de controle para que a antena de transmissão localizada na RAU seja configurada, desempenhando assim as funções de SSSP, DRA e OCRAP. A Figura 17 apresenta os elementos que compõem a CO e suas respectivas funcionalidades.



Figura 17 - *Central Office, seus elementos e funcionalidades.*

O princípio de funcionamento do ACRoF pode ser descrito da seguinte maneira: i) o espectro é "sensoriado" pela RAU e as amostras de espectro coletadas são enviadas para a CO utilizando o enlace óptico de subida; ii) os valores das amostras do espectro são digitalizados pelo analisador de espectro e disponibilizados para o computador; iii) no computador, um algoritmo baseado na técnica de detecção de energia decide qual o melhor canal para se transmitir; iv) com base nas decisões tomadas pelo algoritmo de sensoriamento espectral o computador envia um comando de controle para o AP, alterando as configurações de RF (número do canal), e um sinal óptico de controle para a antena determinando a banda de operação da mesma (2,4 GHz ou 5 GHz); iv) finalmente, o sistema opera no canal escolhido até que a próxima estimativa seja realizada.

3.3. Implementação de Um Sistema Wi-Fi sobre Fibra

Por se tratar de um sistema *dual band*, algumas limitações foram encontradas durante este processo. A indisponibilidade de circuladores de RF que operem nas duas bandas e diferentes valores de atraso máximo admitido pela camada MAC do padrão IEEE 802.11n para cada uma das bandas de operação, impactam diretamente na ordem do sistema MIMO e no comprimento máximo do enlace de fibra óptica, respectivamente e, por estes motivos, precisaram ser investigadas.

O AP Wi-Fi utilizado nos experimentos, o TP-Link WR2543ND, possui três interfaces de RF, o que torna possível configurações MIMO de ordem até 3x3 em um sistema convencional. Como mostrado anteriormente na Figura 9, o uso de circuladores de RF é bastante comum em sistemas RoF. Isto é feito para que apenas uma interface de RF e uma antena sejam utilizadas na transmissão e recepção do sinal de RF. Devido à indisponibilidade de circuladores de RF que operam nas duas bandas ISM, para implementar uma configuração onde a mesma interface de RF do AP fosse utilizada para transmissão e recepção de dados, a solução foi utilizar duas das três interfaces de RF, uma somente para transmissão e outra somente para recepção do sinal, eliminado a necessidade de se utilizar um circulador. Já a terceira interface foi desabilitada nesta aplicação. A Figura 18 ilustra estas situações. Na Figura 18 (a) é apresentado um sistema RoF que opera somente em uma banda e, portanto, pode utilizar apenas uma interface de RF para transmissão e recepção do sinal. Já na Figura 18 (b) é apresentado um sistema RoF *dual band*, onde duas interfaces de RF são utilizadas, uma para transmissão e outra para recepção do sinal, eliminando o circulador. Além disso, faz-se necessário também o uso de duas antenas.

Esta configuração limita a máxima taxa de transmissão do sistema, pois apesar do sistema possuir fisicamente duas antenas ele opera na configuração SISO e, consequentemente, só é possível a transmissão de 1 spatial stream. Além disso, para análise de desempenho do sistema implementado a largura de faixa do canal de transmissão utilizada é de 20 MHz e o intervalo de guarda do símbolo OFDM é de

800 ns. Portanto, a máxima taxa de transmissão possível com esta combinação de configurações é de 65 Mbps, de acordo com a Tabela 3 apresentada na Seção 2.1.

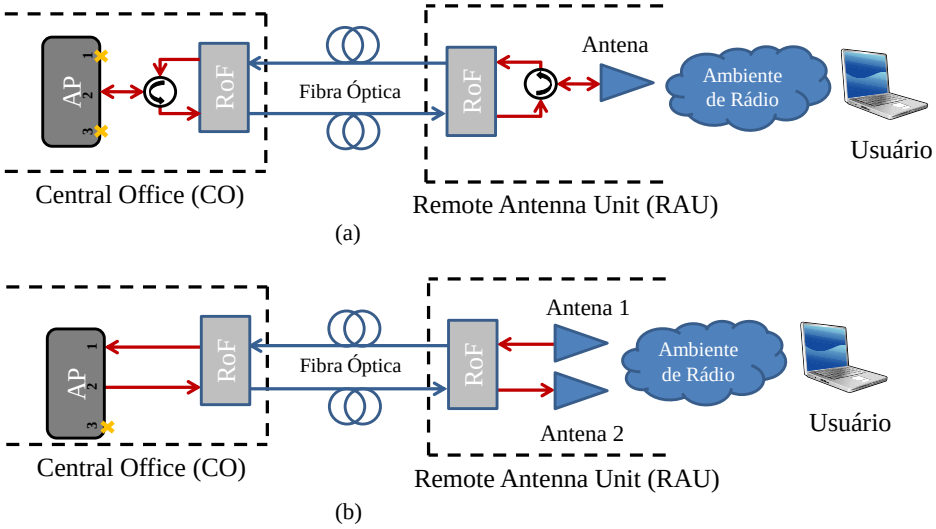


Figura 18 - *(a) Sistema RoF com uso de circulador. (b) Sistema RoF sem o uso de circulador.*

O primeiro teste de desempenho foi a medida da vazão máxima do sistema operando com as configurações descritas anteriormente, sem a utilização do enlace RoF entre o AP e as antenas de transmissão e com a utilização do mesmo na configuração *back-to-back*, via cordão óptico de 2 m. Nos dois casos a distância entre o usuário móvel e a RAU foi de 2 m. A Tabela 5 apresenta as medidas da máxima vazão (em Mbps) e RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) (em dBm) para o sistema operando em cada uma das bandas com uma PER (*Packet Error Rate*) de no máximo 10%.

Tabela 5 – *Medidas de vazão (em Mbps) e RSSI (dBm) com e sem a utilização de um enlace RoF para uma PER máxima de 10%.*

Parâmetros de Desempenho	**Condição de Teste**			
	Sem RoF		**Com RoF**	
	2,4 GHz	**5 GHz**	**2,4 GHz**	**5 GHz**
RSSI (dBm)	-48	-52	-48	-50
Vazão (Mbps)	51,2	48,3	30,8	32,8

A partir destes resultados, as vazões máximas no *downlink* serão de 30,8 Mbps para o sistema operando em 2,4 GHz e de 32,8 Mbps operando em 5 GHz. Uma das justificativas para a queda no desempenho do sistema é que um

enlace RoF insere um ruído adicional ao sistema. O ruído equivalente de entrada, também conhecido como EIN (*Equivalent Input Noise*) é um parâmetro fornecido pelos fabricantes de equipamentos RoF. Este ruído é composto pelo ruído de intensidade relativa do laser, pelo ruído *shot* do fotodetector e pelo ruído térmico [60]. Além do EIN, outros parâmetros importantes de um enlace RoF são a figura de ruído e a faixa dinâmica de operação, também conhecida como SFDR (*Spurious Free Dynamic Range*) [20]. Vale ressaltar que a potência do sinal de transmissão do sistema nas duas condições, com e sem a utilização do RoF, foi ajustada para garantir as potências de transmissão fossem aproximadamente iguais. Para a banda de 2,4 GHz a potência média de transmissão foi de 11 dBm, já para a banda de 5 GHz a potência média de transmissão foi de 6 dBm. A transmissão de sinais com potências de transmissão aproximadas nas duas bandas não foi possível devido a limitações de configuração do AP.

3.3.1. Atraso Oriundo da Propagação na Fibra Óptica

Um dos principais fatores que afetam o desempenho dos sistemas Wi-Fi sobre fibra é o atraso de propagação na fibra óptica devido ao comprimento da mesma [61]. Particularmente no sistema proposto, esta análise é de fundamental importância devido à operação em duas bandas ISM. O padrão IEEE 802.11n operando em 2,4 GHz possui um atraso máximo de camada MAC, conhecido como *Slot Time*, maior que o atraso máximo permitido quando o padrão IEEE 802.11n opera em 5 GHz. Com o padrão IEEE 802.11n operando em 2,4 GHz o *Slot Time* tem duração de 20 µs, já operando em 5 GHz a duração do *Slot Time* é de 9 µs. Considerando uma fibra monomodo em que a luz se propaga com uma velocidade de $2x10^8$ m/s, o comprimento máximo teórico da fibra para cada uma das situações é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - *Comprimento máximo da fibra em um sistema 802.11n em função da banda de transmissão.*

Banda de Operação	***Slot Time* (µs)**	**Comprimento Máximo (km)**
2,4 GHz	20	4
5 GHz	9	1,8

Para melhor compreensão desta limitação, a Figura 19 apresenta o diagrama de tempo de uma transmissão bem sucedida utilizando o padrão 802.11n. A estação transmissora inicialmente monitora o meio de transmissão. Se o canal for considerado livre a estação transmissora espera por um período DIFS (*Distributed Interframe Space*) e inicia a transmissão de um pacote de dados de duração t_{data}. Finalizada a transmissão do pacote de dados, a estação transmissora irá iniciar a contagem de um *time out* e aguardar a confirmação da estação receptora. Já a estação receptora irá aguardar por um período SIFS (*Shor Interframe Space*) e iniciar a transmissão de um pacote de confirmação ACK (*Acknowledgment*) de duração t_{ack}. Da mesma maneira que a estação transmissora precisa esperar um período DIFS antes de iniciar a transmissão, o canal está implicitamente reservado para que a estação receptora envie a confirmação durante um período DIFS, ou seja, o *time out* da estação transmissora é igual a um período DIFS. Portanto, observando o diagrama de tempo apresentado, o período DIFS pode ser descrito por:

$$t_{\text{DIFS}} = \delta + 2t_{\text{prop}} \tag{5}$$

onde δ representa o atraso de processamento na estação receptora. De acordo com protocolo de acesso ao meio o período DIFS também pode ser definido como:

$$t_{\text{DIFS}} = t_{\text{SIFS}} + 2t_{\text{Slot Time}} \tag{6}$$

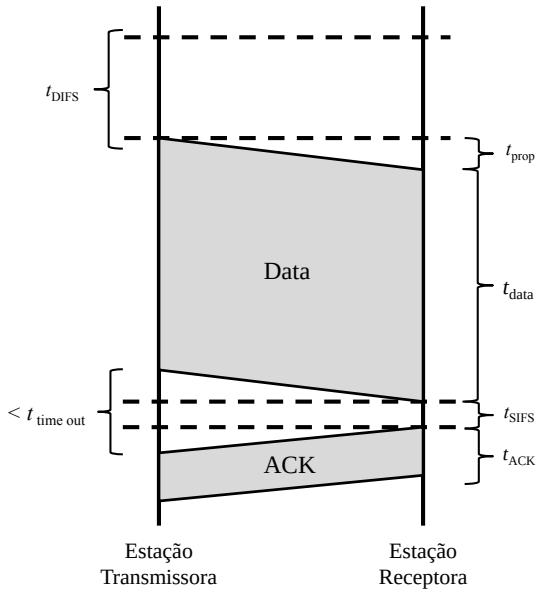


Figura 19 - *Diagrama de tempo de uma transmissão bem sucedida em um sistema 802.11n.*

Portanto, comparando as duas expressões conclui-se que o atraso de propagação adicional causado pela fibra (t_{prop}) é limitado pela duração do *Slot Time*, ou seja, em um sistema Wi-Fi sobre fibra, devido ao atraso adicional causado pela fibra, o pacote de ACK pode não chegar à estação transmissora antes do final da contagem do *time out*. Consequentemente a estação transmissora irá retransmitir o pacote. Estas retransmissões irão ocorrer até que a estação transmissora alcance o limite de retransmissões. Isto faz com que a vazão do sistema caia drasticamente [62].

O desempenho do sistema foi analisado experimentalmente para diferentes comprimentos de fibra óptica. A Figura 20 e a Figura 21 apresentam os resultados obtidos em termos de RSSI (em dBm) e vazão (em Mbps). Pode-se observar que o comprimento do enlace de fibra óptica se apresenta como um dos parâmetros que limitam a implementação de um sistema Wi-Fi sobre fibra que opera nas duas bandas ISM. Como mostrado na Figura 20, o nível de RSSI diminuiu com o aumento do comprimento da fibra, pois a perda óptica é inversamente proporcional ao seu comprimento. Portanto, com o aumento do comprimento do enlace, a redução do nível de sinal recebido pelo usuário já era esperada. Neste caso é possível observar que as curvas para cada uma das bandas apresentam o mesmo comportamento. Apesar de apresentar um nível de sinal recebido aceitável para se estabelecer uma conexão, quando o sistema utiliza um canal na banda de 5 GHz a vazão do sistema não pôde ser medida para um comprimento de 1.370 m devido a falhas na conexão ocasionadas pelo atraso inserido pela fibra. Sendo assim, o comprimento máximo da fibra que pode ser utilizada neste sistema ficou limitado em 1.020 m, pois neste caso a conexão entra o usuário e o AP foi bem sucedida com o sistema operando nas duas bandas. Vale ressaltar que operando na banda de 2,4 GHz o estabelecimento de uma conexão com o usuário móvel foi possível com um enlace de fibra de até 2.880 m.

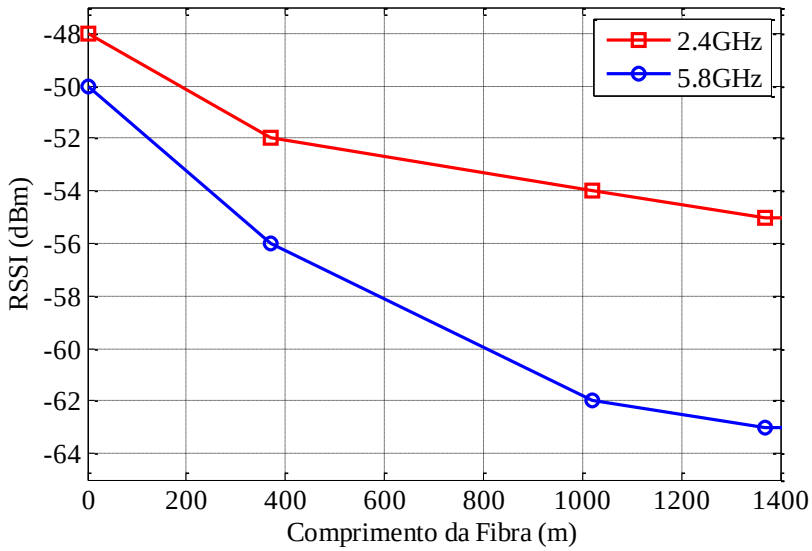


Figura 20 - *RSSI em função do comprimento da fibra para cada banda.*

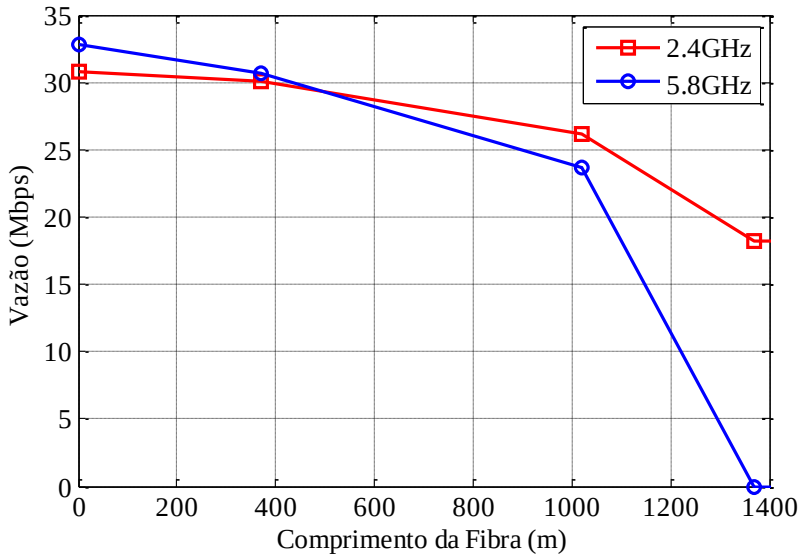


Figura 21 - *Vazão em função do comprimento da fibra para cada banda.*

3.3.2. Extensão Máxima do Enlace

Após a realização das medidas de referência apresentadas na Tabela 5, a extensão máxima do enlace do sistema implementado em que uma conexão de dados pôde ser realizada com sucesso entre a CO e um usuário móvel foi determinada para cada uma das bandas, sem a utilização de um sistema RoF e com a utilização de um

sistema RoF. A Tabela 7 apresenta os resultados e ainda a extensão máxima teórica para as duas condições, considerando um enlace de fibra óptica de 1.020 m.

Tabela 7 *– Extensão máxima do enlace com e sem a utilização de um sistema RoF para um enlace de fibra óptica de 1.020 m.*

Condição	**Extensão máxima medida (m)**		**Extensão máxima teórica (m)**	
	2,4 GHz	5 GHz	2,4 GHz	5 GHz
Sem RoF	45	25	100	50
Com RoF	1.045	1.035	1.120	1.170

Pode-se observar que a extensão máxima do enlace pode ser aumentada de maneira significativa com a utilização de um sistema Wi-Fi sobre fibra. Vale ressaltar que, a extensão máxima do enlace determinada nesta seção representa a máxima distância física entre a CO e um usuário móvel e é obtida por meio da soma da extensão do enlace óptico e do enlace sem fio do sistema implementado. A extensão máxima do enlace não pode ser confundida com o alcance máximo da arquitetura ACRoF que será obtido quando da implementação do sistema utilizando diversas RAUs, como proposto na Figura 15, com o objetivo de aumentar a capacidade do sistema para uma determinada área de cobertura.

Operando na banda de 2,4 GHz a extensão máxima do enlace foi de 45 para 1.045 m utilizando uma fibra de 1.020 m de comprimento o que representa um enlace 23 vezes maior, e operando na banda de 5 GHz a extensão máxima do enlace foi de 25 para 1.035 m o que representa um enlace 41 vezes maior. Vale ressaltar que, como a atenuação da fibra óptica é constante e não depende da frequência do sinal de radio, o uso de um sistema RoF para sinais de frequências mais altas se apresenta como uma grande vantagem. No sistema implementado foi possível observar este comportamento, pois o sinal transmitido na banda de 5 GHz apresentou um alcance de apenas 10 m menor em relação ao sinal transmitido na banda de 2,4 GHz.

3.3.3. Cálculo dos limiares dos efeitos não-lineares

Com o objetivo de assegurar que o enlace RoF utilizado no sistema está operando livre dos efeitos não-lineares os limiares de potência foram calculados para o Espalhamento Estimulado de Raman e o Espalhamento Estimulado de Brillouin [63]. Estes limiares podem ser calculados a partir da expressão geral dada por:

$$P_{\text{th}} = \frac{C.A_{\text{eff}}}{g.L_{\text{eff}}} \tag{7}$$

onde A_{eff}, L_{eff}, g e C são respectivamente, a área efetiva, o comprimento efetivo, o coeficiente de ganho e a constante que depende de qual efeito não-linear está sendo analisado.

As fibras ópticas que compõe os enlaces do sistema proposto são monomodo. Neste caso foram consideradas uma A_{eff} de 80 μm^2 e uma perda óptica típica de 0,20 dB/km, que corresponde a um fator de atenuação $\alpha = 5x10^{-5}$ m^{-1}. Para o cálculo do limiar de potência do Espelhamento Estimulado de Raman os valores da constante e do coeficiente de ganho são $C = 16$ e $g = 1x10^{-13}$ m/W. Já para o cálculo do limiar de potência do Espalhamento Estimulado de Brillouin, os valores da constante e do coeficiente de ganho são $C = 21$ e $g = 5x10^{-11}$.

O comprimento efetivo, L_{eff}, utilizado para o cálculo dos limiares de potência é dado por:

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - e^{-\alpha.L}}{\alpha} \tag{8}$$

onde α e L são respectivamente, o fator de atenuação e o comprimento físico do enlace de fibra óptica. Para o sistema implementado $L = 1020$ m e $\alpha = 5x10^{-5}$ m^{-1}, o que resulta em $L_{\text{eff}} = 994,42$ m.

A partir destas considerações o limiar de potência para o Espelhamento Estimulado de Raman é de aproximadamente 8 W (39 dBm). Já o limiar de potência para o Espalhamento Estimulado de Brillouin é de aproximadamente 21,12 mW (13,25 dBm). Dado que a potência óptica de transmissão dos lasers utilizados para transmissão nos enlaces de fibra óptica é de 4 mW, conclui-se que os sistema

implementado não é afetado pelos efeitos não-lineares considerados, ou seja, o sistema óptico pode ser considerado linear.

3.4. Antena Reconfigurável Controlada Opticamente

As antenas de microlinha (*patch*) têm sido muito estudadas nos últimos anos devido a sua pequena estrutura, baixo custo, peso e volume reduzidos, processo de fabricação simples e fácil integração com circuitos integrados de micro-ondas [64]. Recentemente uma antena *patch* reconfigurável com polarização circular que utiliza dois diodos PIN foi proposta em [65]. Com base nesta antena controlada eletricamente o grupo de pesquisa do laboratório WOCA desenvolveu uma antena controlada opticamente conhecida como antena "E" devido ao formato de sua estrutura [66][67]. Quando comparada com as antenas controladas eletricamente, as principais vantagens de se utilizar uma antena reconfigurável controlada opticamente são a facilidade de integração com sistemas ópticos, não necessidade de uma linha de alimentação para a mesma, comportamento linear, além de ser controlada sem a produção de harmônicos e intermodulação. Uma chave fotocondutiva de silício intrínseco fixada a *probe* da antena permite que a faixa de frequência de operação da antena seja reconfigurada em função da potência óptica que incide sobre a chave. A Figura 22 apresenta as duas faces desta antena e o laser utilizado para iluminar uma chave fotocondutiva. Já a Figura 23 ilustra a antena utilizada operando com a chave fotocondutiva ligada.

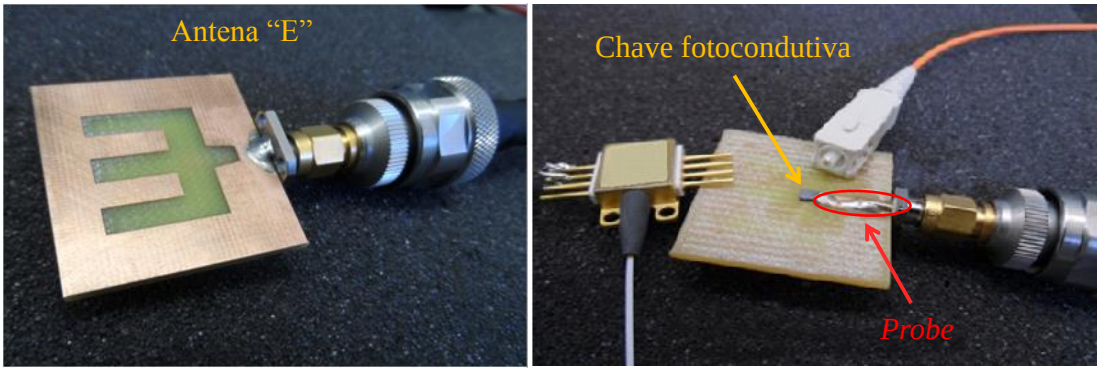


Figura 22 - *Antena "E".*

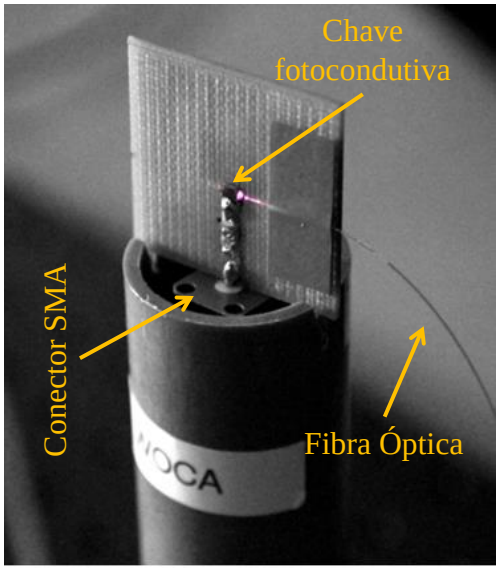


Figura 23 - *Antena "E" com a chave "ligada".*

A Figura 24 apresenta a perda por retorno da antena para as condições chave ligada e chave desligada. Com a chave ligada a antena opera na banda de 2,4 GHz e com a chave desligada a antena opera na banda de 5 GHz. A antena apresenta uma largura de faixa que vai de 2,407 até 2,524 GHz com a chave ligada e uma largura de faixa que vai de 5,033 até 6 GHz com a chave desligada. Estas faixas correspondem a perdas por retorno menores de -10 dB. A Tabela 8 apresenta os valores típicos dos parâmetros da antena "E" para a frequência central de cada uma das bandas.

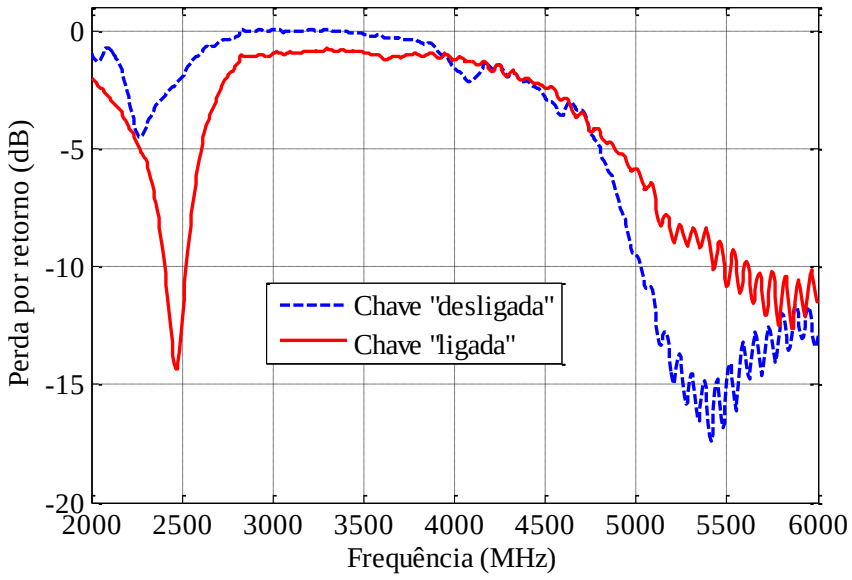


Figura 24 - *Perda por retorno para as condições de chave "ligada" e "desligada".*

Tabela 8 - *Valores típicos dos parâmetros da antena para a frequência central de cada banda de operação.*

Frequência (GHz)	Estado da chave	Perda por retorno (dB)	Ganho (dBi)
2,47GHz	Desligada	-2,18	1,42
	Ligada	-14,37	3,28
5,41GHz	Desligada	-17,42	5,22
	Ligada	-9,51	3,21

Para comprovar o funcionamento desta antena de maneira sistêmica foram realizados experimentos que mediram a RSSI (em dBm) e a PER (em %) de um usuário a 2 metros de distância da RAU. A Figura 25 apresenta estes resultados obtidos variando-se a corrente de alimentação do laser com o sistema operando em um canal na banda de 2,4 GHz.

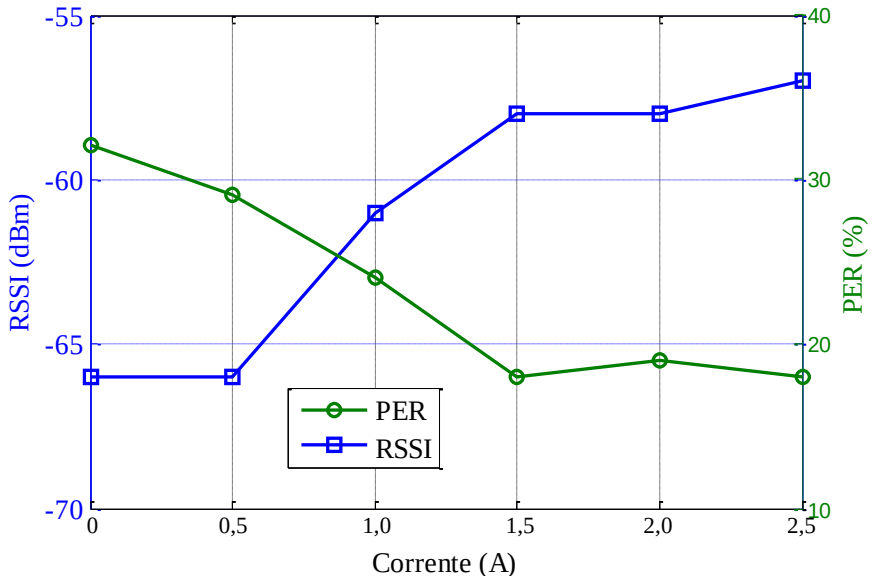


Figura 25 - *Medidas de RSSI (dBm) e PER (%) em função da corrente de alimentação do laser.*

Percebe-se que o desempenho da comunicação entre a RAU e o usuário melhora significativamente com o aumento da corrente de alimentação do laser. A RSSI aumenta de -66 dBm para -57 dBm e a PER diminui de 32% para 18%, considerando a corrente de alimentação do laser aumentando de 0 A para 2,5 A. Como já observado em [66] por meio de outros parâmetros e agora comprovado com

testes sistêmicos a corrente ótima de alimentação do laser para um bom desempenho da antena fica entre 2 e 2,5 A.

3.5. Sensoriamento Espectral sobre Fibra

No sistema proposto o sensoriamento espectral é realizado pelas antenas que compõe a RAU. As amostras do espectro de uma determinada faixa de frequências, capturadas pelas antenas da RAU, são enviadas por meio de um enlace RoF diretamente para CO. Neste caso, tem-se uma maior facilidade na implementação de uma técnica de sensoriamento espectral, visto que não há necessidade de um canal de controle para que as informações sobre as condições espectrais sejam enviadas dos usuários para a CO. Além disso, quando várias RAUs forem conectadas a uma CO por meio de enlaces RoF, há a possibilidade da implementação de técnicas de sensoriamento espectral cooperativo e centralizado, onde a CO irá operar como centro de fusão. Por outro lado, quando o sensoriamento espectral é realizado por uma RAU as decisões sobre as oportunidades espectrais serão tomadas com base em informações espectrais obtidas por ela e não pelos usuários do sistema. Estes usuários estão localizados em diferentes posições no espaço, sob diferentes condições espectrais e, portanto, não terão suas condições espectrais estimadas e reportadas a CO que é responsável por tomar as decisões sobre as mesmas, influenciando no desempenho do sistema. Além disso, devem-se levar em consideração as alterações que o enlace RoF irá causar nas amostras espectrais capturadas na RAU e enviadas para CO, tais como ganho e atenuação.

Os módulos RoF utilizados nos experimentos para estabelecer a comunicação entre a CO e a RAU apresentam estágios de amplificação e, neste caso, apresentam ganho tanto no *uplink* quanto no *downlink*. Por este motivo, o ganho de RF em função da frequência de operação do sistema nos dois enlaces foi medido. A Figura 26 mostra o ganho em função da frequência para cada um dos enlaces. Apesar dos módulos RoF operarem de 30 MHz até 6 GHz, o ganho foi medido a partir de 400 MHz devido à limitação do equipamento utilizado para realizar as medidas.

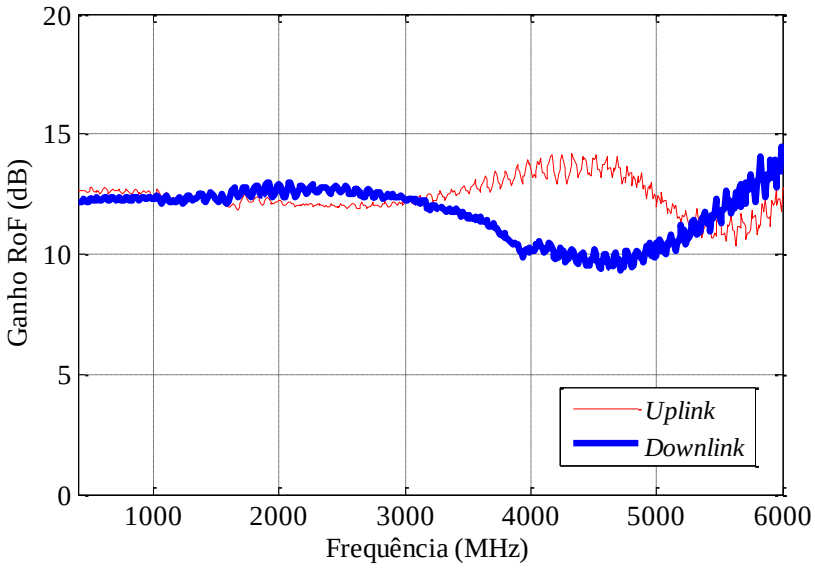


Figura 26 - *Ganho dos módulos RoF utilizados nos experimentos.*

A curva em vermelho (mais fina) representa o ganho dos módulos no *uplink* e a curva azul (mais grossa) representa o ganho dos módulos no *downlink*. As medidas foram realizadas com o sistema RoF na configuração *back-to-back* somente utilizando um cordão óptico de 2 m entre os módulos. Pode-se observar que o comportamento das curvas de ganho em cada um dos sentidos do enlace apresentam um comportamento diferente entre 3 GHz e 5,2 GHz.

Como no sistema implementado o espectro é ““sensoriado”” pela mesma antena que recebe o sinal enviado dos usuários para a CO, os ganhos e atenuações inseridos por todos os elementos do sistema precisam ser considerados para garantir a melhor estimativa possível da energia contida nas amostras de espectro coletadas. Por este motivo foram obtidas as curvas de ganho ou atenuação de cada um dos elementos do sistema que estão entre a RAU e a CO, onde as amostras do espectro são processadas. A Figura 27 e a Figura 28 apresentam o ganho ou atenuação destes elementos em função da frequência, bem como a curva de ganho do sistema como um todo para as bandas de 2,4 e 5 GHz respectivamente. O ganho da antena em função da frequência foi fornecido pelo fabricante [68]. Trata-se de uma antena log-periódica (*Hyperlog*) que opera de 680 MHz até 10 GHz. Já as demais curvas foram obtidas experimentalmente com a utilização de um analisador de redes vetorial. Como pode ser observado na Figura 27 e na Figura 28, as curvas de ganho ou

atenuação dos dispositivos na banda de 2,4 GHz se apresentam de forma mais plana. Já as curvas de ganho dos dispositivos na banda de 5 GHz se apresentam de forma menos plana em função da variação do ganho da antena de sensoriamento para cada frequência.

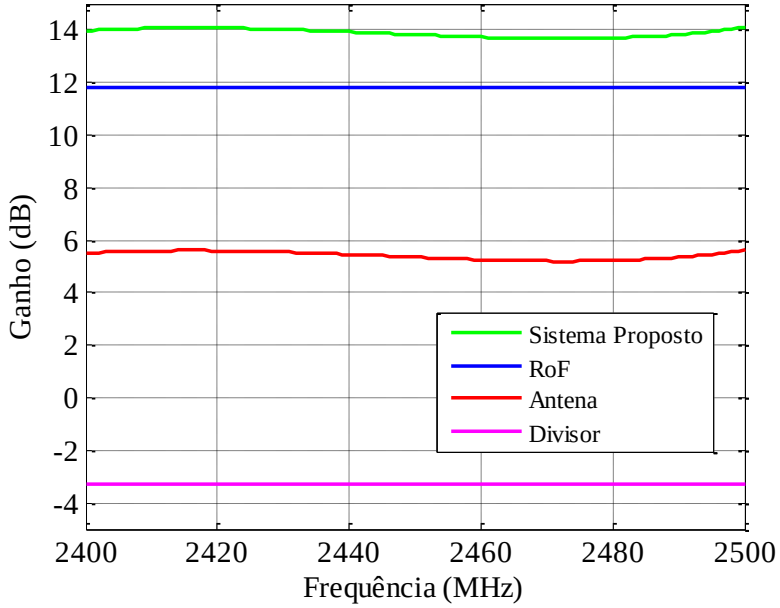


Figura 27 - *Ganho medido do sistema na banda de 2,4 GHz.*

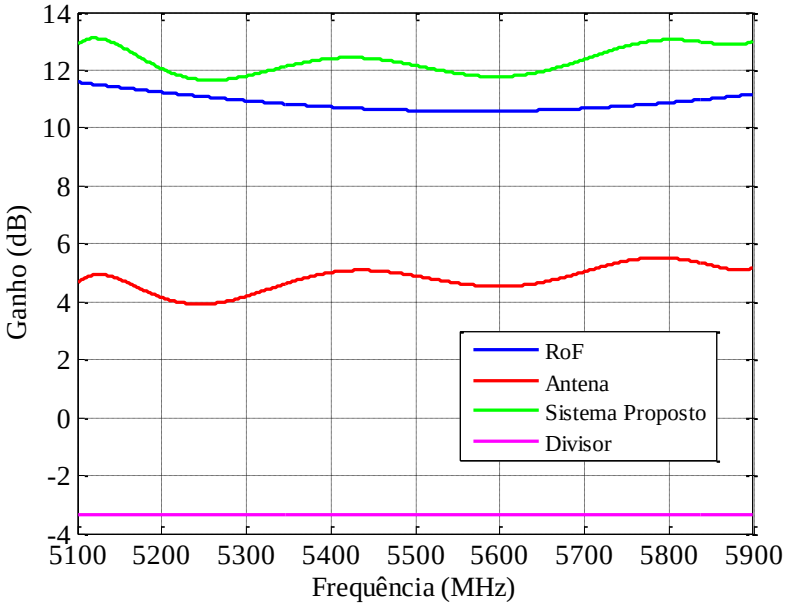


Figura 28 - *Ganho do sistema na banda de 5 GHz.*

Para cada uma das bandas o ganho do sistema em dB foi calculado a partir da seguinte expressão:

$$G_S = G_{RoF} + G_{Ant} + A_{Div}\ ,\ \text{dB} \tag{9}$$

onde G_S é o ganho do sistema, G_{RoF} é o ganho de RF do sistema RoF na condição *back-to-back*, G_{Ant} é o ganho da antena de sensoriamento e A_{Div} é a atenuação no divisor de RF utilizado no sistema e que terá sua utilização justificada posteriormente. Adicionalmente, quando o sistema de sensoriamento espectral sobre fibra for implementado em um enlace de fibra óptica, a perda óptica inserida pelo enlace, dada por L_0, deverá ser considerada e neste caso tem-se a seguinte expressão:

$$G_S = G_{RoF} + G_{Ant} - 2.L_0 - A_{Div}\ ,\ \text{dB} \tag{10}$$

Em cada uma das bandas sensoriadas foram coletadas amostras espaçadas de 1 MHz. Portanto, na banda de 2,4 GHz foram coletadas 101 amostras entre as frequências de 2,4 GHz e 2,5 GHz. Já na banda de 5 GHz foram coletadas 801 amostras entre as frequências de 5,1 GHz e 5,9 GHz. As amplitudes das amostras que são disponibilizadas pelo analisador de espectro ao computador foram amplificadas ou atenuadas pelos elementos que compõe o sistema, e por este motivo o ganho final do sistema deve ser subtraído para que se estime corretamente o valor real das amostras capturadas pela antena de sensoriamento.

3.5.1. Estudo do Ruído de Fundo de Escala do Analisador de Espectro

Algumas técnicas de sensoriamento espectral necessitam do conhecimento prévio do nível de ruído sob a hipótese H_0 para que a estatística de teste seja calculada, como é o caso da detecção de energia. Além disso, o conhecimento do nível de ruído do analisador de espectro utilizado para coletar as amostras de sensoriamento é importante para que se possa estimar qual o menor nível de potência que pode ser detectado pelo mesmo. Com o objetivo de obter o nível médio de ruído de fundo de escala do analisador de espectro utilizado nos experimentos, o mesmo foi levado para o interior da câmara anecóica do laboratório de ensaios e calibração do Inatel. Para cada uma das bandas de sensoriamento foram coletadas 1.000

amostras no tempo. A Figura 29 e a Figura 30 apresentam as medidas realizadas para as bandas de 2,4 e 5 GHz, respectivamente, ainda sem a utilização de um enlace RoF. Vale ressaltar que o ganho da antena de sensoriamento foi compensado para cada amostra, a fim de tornar mais corretas as estimativas dos valores das amostras.

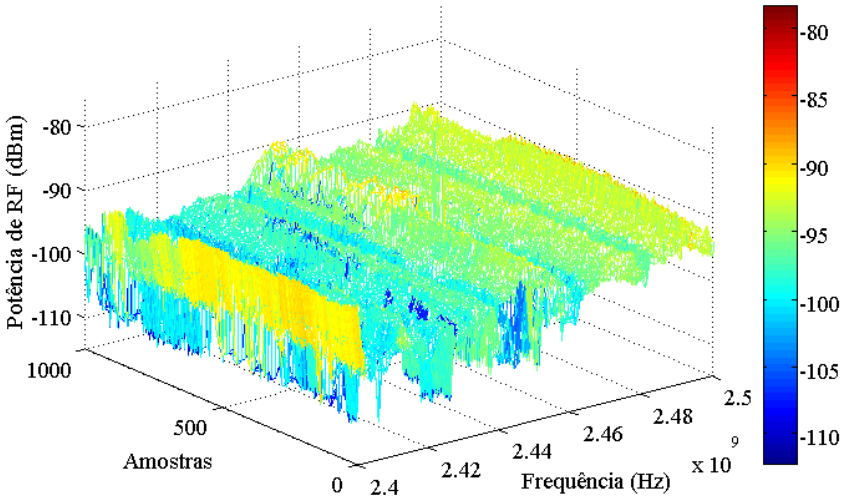


Figura 29 *- Amostras do espectro na banda de 2,4 GHz coletadas na câmara anecóica.*

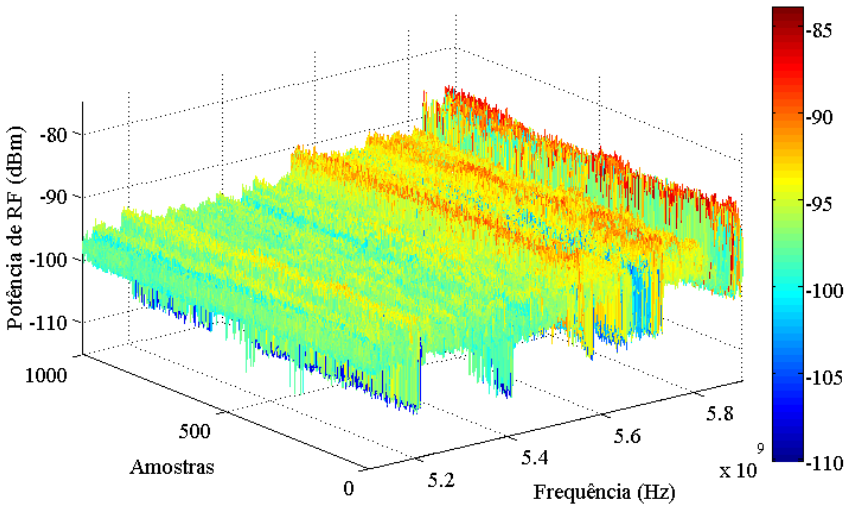


Figura 30 *- Amostras do espectro na banda de 5GHz medidas na câmara anecóica.*

Como se pode observar, para os dois casos o nível de ruído para cada componente de frequência se comporta de maneira distinta, o que irá influenciar no

desempenho das técnicas de sensoriamento. Após esta análise de ruído, um enlace RoF na configuração *back-to-back* foi inserido entre o analisador de espectro e a antena de sensoriamento para que os efeitos causados pela sua inserção no sistema sejam considerados. A Figura 31 e a Figura 32 apresentam as medidas realizadas nas bandas de 2,4 GHz e 5GHz, respectivamente. Vale ressaltar que o ganho do sistema, G_S, foi compensado para cada amostra na frequência com o objetivo de tornar mais precisa a estimativa dos valores das amostras.

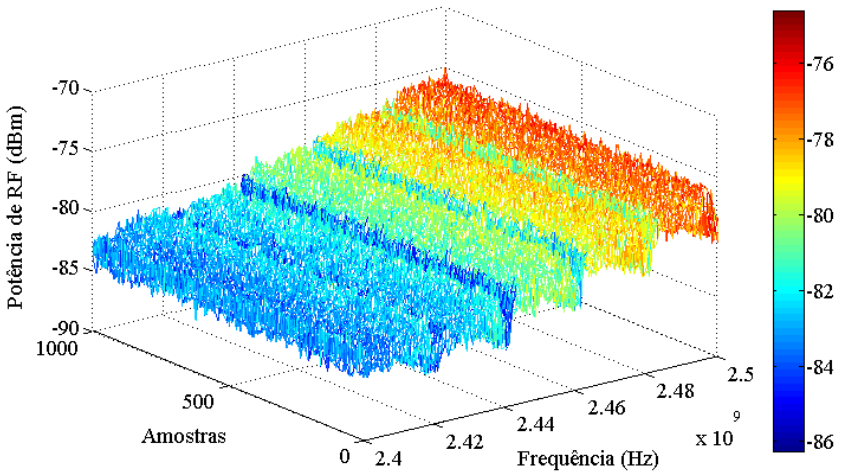


Figura 31 - *Amostras do espectro na banda de 2,4 GHz medidas na câmara anecóica com a utilização de um enlace RoF.*

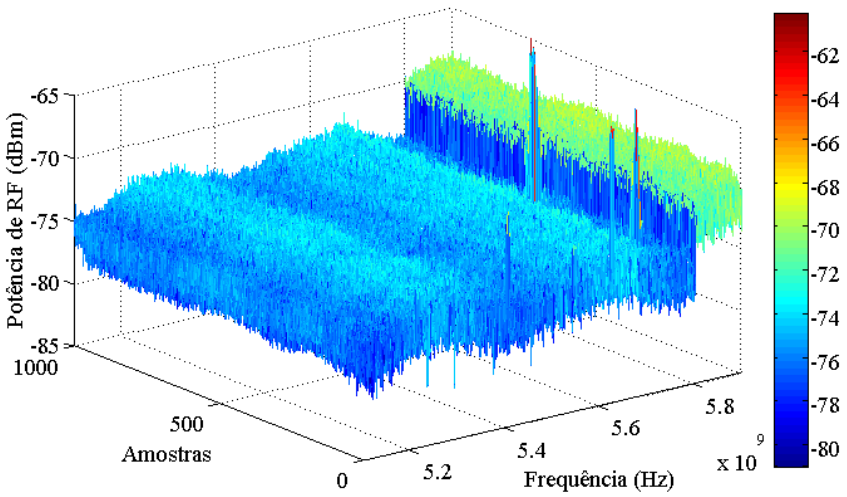


Figura 32 - *Amostras do espectro na banda de 5 GHz medidas na câmara anecóica com a utilização de um enlace RoF.*

Observando os resultados obtidos sem a utilização do enlace RoF e com a utilização do mesmo, é possível concluir que o nível de ruído do sistema de sensoriamento aumentou significativamente com a utilização de um enlace RoF entre a antena de sensoriamento e o analisador de espectro. A Figura 33 e a Figura 34 apresentam o nível médio de ruído calculado a partir das amostras coletadas sem a utilização do enlace RoF e com a utilização do mesmo para as bandas de 2,4 GHz e 5 GHz, respectivamente.

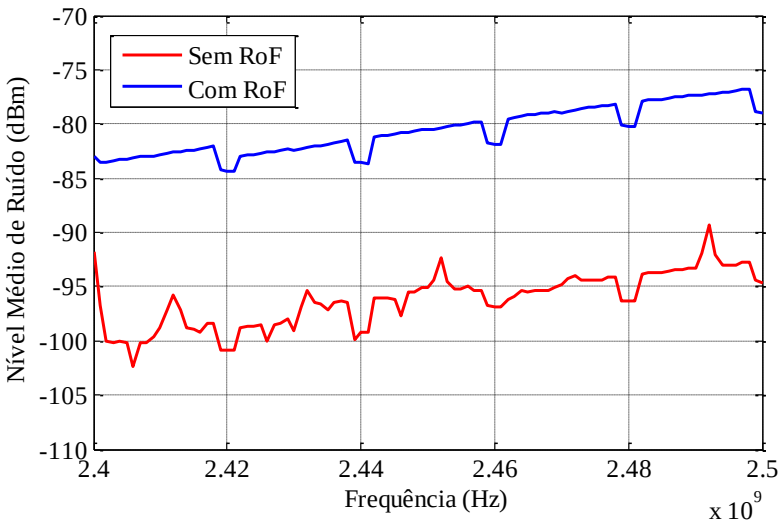


Figura 33 - *Nível médio de ruído calculado a partir de 1.000 amostras sem e com a utilização de um enlace RoF para a banda de 2,4GHz.*

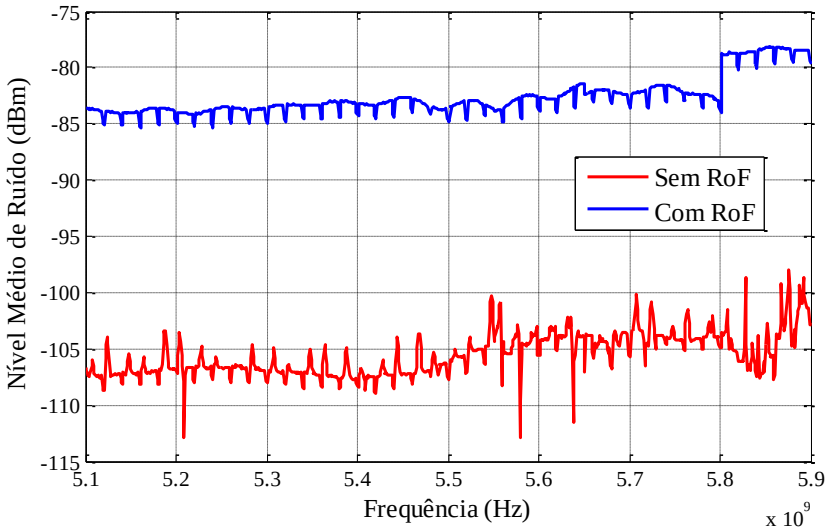


Figura 34 - *Nível médio de ruído calculado a partir de 1.000 amostras sem e com a utilização de um enlace RoF para a banda 5GHz.*

Quanto aos resultados obtidos na banda de 2,4 GHz, pode-se observar que tanto sem a utilização do enlace RoF quanto com a utilização do mesmo, o nível médio das amostras do ruído aumenta em função do aumento da frequência. Este aumento se deve a uma limitação imposta pelo analisador de espectro utilizado e não pelo enlace RoF, visto que este aumento pode ser observado nas duas condições. Já quanto aos resultados obtidos na banda de 5 GHz, pode-se observar que o nível médio das amostras do ruído também apresenta uma variação em função da variação da frequência. Além disso, pode-se observar o surgimento de um "degrau" a partir da frequência de 5,8 GHz quando da utilização do enlace RoF, o qual pode ser justificado por estar muito próximo da frequência máxima de operação dos módulos RoF, que operam de 30 MHz até 6 GHz.

Nos dois casos é possível observar que a inserção do enlace RoF entre o analisador e a antena de sensoriamento irá impactar no desempenho do sistema de sensoriamento, visto que o mínimo sinal detectável em cada uma das bandas será maior do que o mínimo sinal detectável sem a utilização do enlace RoF. Tomando como exemplo o nível médio de ruído na frequência de 2,45 GHz (ver Figura 33), o nível mínimo de sinal detectável sem a utilização do enlace RoF é de -95,03 dBm, enquanto com a utilização do enlace RoF o nível mínimo de sinal detectável é de -80,57 dBm, o que resulta em uma diferença de 14,46 dB. Já na banda de 5 GHz, tomando como exemplo o nível médio de ruído na frequência de 5,5 GHz (ver Figura 34), o nível mínimo de sinal detectável pelo sistema de sensoriamento sem a utilização do enlace RoF é de -107,8 dBm. Já com a utilização do enlace RoF, o nível mínimo de sinal detectável é de -84,68 dBm, o que resulta em uma diferença de 23 dB. Já no "degrau" identificado no final da banda de 5 GHz, esta diferença chega a aproximadamente 29 dB. Portanto a inserção do sistema RoF entre o analisador de espectro e antena de sensoriamento impacta no sistema de sensoriamento impondo a limitação, aqui denominada de nível mínimo de sinal detectável, para uma determinada frequência. Isto significa que, mesmo que uma amostra do espectro seja capturada pela antena de sensoriamento, ela só será detectada pelo analisador caso ela apresente um nível maior do que o mínimo detectável. Caso contrário esta amostra será tratada pelo detector como uma amostra de ruído.

3.5.2. Detecção de Energia

A detecção de energia é a técnica de sensoriamento espectral mais difundida devido a sua baixa complexidade de implementação [69]. O detector de energia pode ser classificado como não-coerente e não-paramétrico, pois não requer sincronismo e opera sem conhecimento algum sobre as características do sinais monitorados. O espectro ““sensoriado””, em grande parte dos cenários práticos, é ocupado por diferentes tipos de usuários primários, tornando-a potencial para aplicações de RC.

A detecção é feita baseada no teste de hipóteses binário, onde as hipóteses são:

$$H_0 : y\,(n) = n\,(n) \tag{11}$$

$$H_1 : y(n) = h(n)\,x\,(n) + n\,(n) \tag{12}$$

Na hipótese H_0 tem-se a ausência do sinal primário e o sinal recebido $y(n)$ é formado apenas por amostras do ruído. Na hipótese H_1 o sinal do usuário primário está presente juntamente com o ruído. O detector de energia pode ser implementado de duas maneiras principais, as quais são ilustradas pela Figura 35.

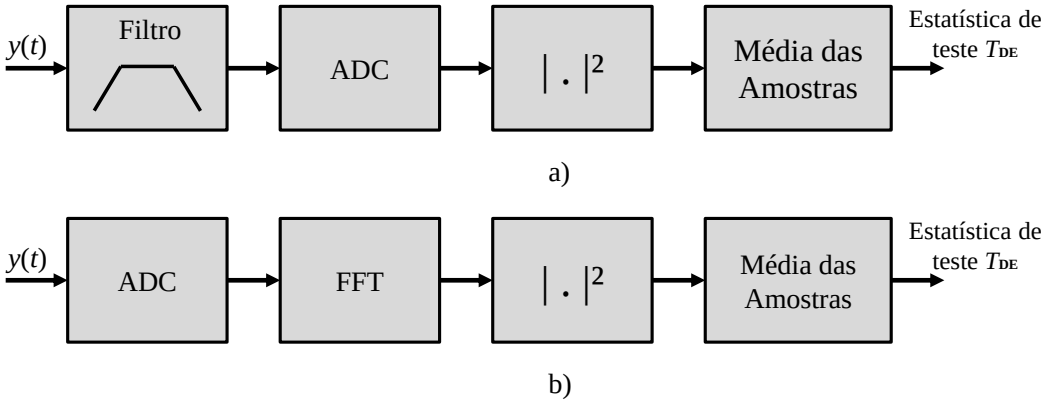


Figura 35 - *Diagramas de implementação do detector de energia (a) no tempo e (b) na frequência.*

Na Figura 35 (a), um filtro sintonizado na frequência do canal de interesse é utilizado para selecionar a banda a ser “sensoriada”. Após o filtro de entrada, o sinal passa por um conversor analógico-digital e um dispositivo de elevação quadrática,

para que a média das amostras seja calculada, finalmente a estatística de teste, T_{DE}, é calculada.

$$T_{DE} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} |y(n)|^2 \tag{13}$$

Já na Figura 35 (b) o processamento das amostras é realizado no domínio da frequência. Neste caso, há flexibilidade em processar bandas maiores e múltiplos sinais simultaneamente, pois o filtro de seleção é substituído pelo processamento das faixas correspondentes da FFT (*Fast Fourier Transform*). Esta arquitetura apresenta dois graus de liberdade na detecção: a resolução em frequência da FFT e a quantidade de amostras, *N*, utilizada para o cálculo da estatística de teste T_{DE}. Na prática é comum a escolha de um tamanho fixo de FFT e a quantidade de amostras utilizadas se torna um parâmetro ajustável para melhorar o desempenho do detector. Como o limiar de decisão depende da relação sinal-ruído do sinal ““sensoriado””, a estatística de utilizada na detecção de energia é dada por:

$$T_{DE}' = \frac{T_{DE}}{{\sigma_n}^2} \tag{14}$$

onde ${\sigma_n}^2$ é a potência do ruído e T_{DE} é a potência do sinal “sensoriado”. Determinada a estatística de teste, a decisão do detector de energia entre as hipóteses H_0 e H_1 é tomada de acordo com os conceitos já apresentados. Se o valor de T_{DE}' estiver acima do limiar estabelecido para detecção de energia, λ_{DE}, decide-se pela hipótese H_1 (canal ocupado). Caso contrário, quando $T_{DE}' < \lambda_{DE}$, decide-se pela hipótese H_0 (canal livre).

Apesar da baixa complexidade de implementação da detecção de energia, o que torna-a bastante atrativa, esta técnica depende de dois pressupostos fundamentais para que se obtenha o desempenho esperado: i) a potência do ruído é conhecida *a priori*; e ii) as estatísticas de teste podem ser modeladas como variáveis aleatórias Gaussianas independentes e identicamente distribuídas. Porém, em ambientes reais a potência do ruído varia de tempos em tempos. Isto torna difícil que estimativa da potência do ruído seja confiável causando uma imprecisão na modelagem da estatística de teste [70]. Além disso, as amostras espectrais coletadas por um sistema

cognitivo passam por vários processos tais como, filtragem, amplificação, amostragem, quantização e codificação. Estes processos fazem com que tais amostras não sejam mais independentes e identicamente distribuídas, e consequentemente, as estatísticas de teste não irão mais apresentar esta característica, impactando também no desempenho do detector. Portanto, as principais desvantagens da detecção de energia são a sensibilidade à incerteza do ruído do canal "sensoriado" e o impacto causado pelos processos envolvidos no detector implementado.

Apesar das limitações práticas de implementação, o detector de energia ganhou popularidade como técnica de sensoriamento espectral e é alvo de um grande número de pesquisas que tem com objetivo avaliar sua aplicabilidade e analisar seu desempenho em sistemas de RC. Neste contexto, os principais trabalhos de pesquisa encontrados na literatura que tratam das limitações dos aspectos práticos apresentam sugestões para diminuir a incerteza do ruído e consequentemente melhorar a escolha de um limiar de decisão que apresente um desempenho satisfatório do detector. Com o objetivo de diminuir esta incerteza, sugere-se que a potência do ruído seja medida em um canal de referência que esteja desocupado [71] [72]. Já em [73], o detector de energia foi implementado e resultados de simulação foram comparados com experimentos. Neste caso, os resultados práticos mostram como a incerteza do ruído impacta na escolha de um limiar de decisão que resulte em um desempenho satisfatório. Adicionalmente, as referências [73] e [74] demonstram que o desempenho do detector é diferente para cada tipo de usuário primário, e depende do número de amostras da banda de interesse tomadas no tempo para formar a estatística de teste. Em outras palavras, quanto maior o número de amostras coletadas na banda de interesse, mais confiável é a estimativa da estatística de teste. Por outro lado, a opção de se utilizar um grande número de amostras torna a estimativa da estatística de teste mais demorada.

Nesta dissertação, a técnica de detecção de energia foi implementada na arquitetura ACRoF e o seu desempenho foi avaliado a partir análise da curva ROC sob diferentes condições. Para isso, o espectro foi "sensoriado"e as amostras disponibilizadas pelo analisador de espectro foram armazenadas em arquivos CSV

(*Comma Separated Values*). Depois estes arquivos foram convertidos para extensão ".dat", para que pudessem ser lidos e processados por um algoritmo desenvolvido no *software* MATLAB®. Isto torna possível que a análise de um ambiente de sensoriamento real seja realizada por meio de uma simulação computacional, sendo este arquivo utilizado como dado de entrada do algoritmo. Vale ressaltar que, neste caso optou-se pelo processamento *off-line* para que diferentes faixas de limiar de decisão e diferentes intervalos entre estes limiares pudessem ser considerados, avaliando o comportamento da curva ROC para cada caso.

Para que a energia do canal "sensoriado"possa ser calculada, com o objetivo de formar a estatística de teste, a expressão de T_{DE} foi adequada às condições do analisador de espectro, ou seja:

$$T_{\mathrm{DE}} = \frac{1}{N.L} \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{L} |\mathrm{y}(n,m)|^2 \tag{15}$$

onde N é a quantidade total de amostras no tempo e L é a quantidade de amostras tomadas na frequência, no canal "sensoriado". Neste caso o valor de L é fixo e o valor de N pode ser alterado. Vale ressaltar que a escolha do valor de N interfere diretamente no desempenho do detector. Dado que as amostras possuem um espaçamento de 1 MHz e que cada canal "sensoriado" possui uma largura de faixa de 22 MHz, a quantidade de amostras na frequência foi L = 22. Já o número de amostras no tempo escolhido foi N = 5.

Para obter a curva ROC é necessário que o canal que se quer avaliar seja "sensoriado" sob as hipóteses H_0 e H_1. A potência do ruído sob a hipótese H_0, σ_n^2, foi obtida previamente estimando-se a potência do ruído de fundo do sistema em um canal de referência (desocupado). Quanto à hipótese H_1, foram criadas situações reais de transmissão de um usuário primário, que foi "sensoriado", com o objetivo de formar a estatística de teste sob a hipótese H_1. De posse das amostras do espectro "sensoriado" sob as duas hipóteses, a estatística de teste $T_{\mathrm{DE}}{}'$ foi estimada para cada caso. Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema de sensoriamento foi criado um cenário onde a antena de sensoriamento foi colocada a dois metros de distância de um transmissor primário, no caso um AP Wi-Fi que possui três

interfaces de RF, transmitindo em um canal de 22 MHz de largura de faixa com frequência central de 2,437 GHz (Canal 6). Para criar diferentes condições de transmissão para realizar o sensoriamento foram considerados quatro cenários: i) AP transmitindo com três antenas; ii) AP transmitindo com duas antenas; iii) AP transmitindo com uma antena; e iv) AP transmitindo sem nenhuma antena. Estas situações proporcionaram diferentes valores de RSR do sinal "sensoriado", visto que a potência de transmissão foi mantida e o número de antenas foi sendo alterado e permitiu avaliar o desempenho da técnica para estas situações. A Figura 36 apresenta curvas ROC para estes casos. Para cada uma das condições analisadas a RSR média do sinal "sensoriado" foi estimada. Vale lembrar que o nível médio de ruído utilizado para esta estimativa é o ruído medido na câmara anecóica. A Tabela 9 apresenta estes valores.

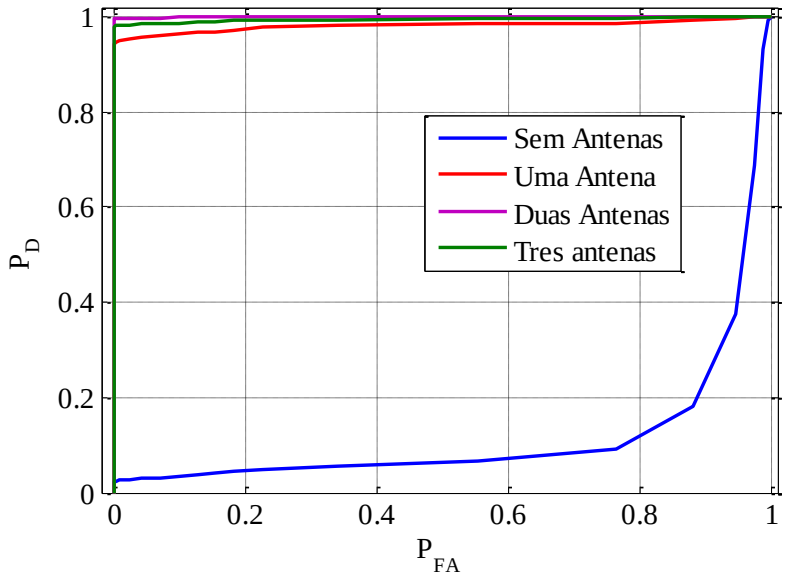


Figura 36 - *Curva ROC para diferentes condições do sinal "sensoriado".*

Tabela 9 - *Relação Sinal-Ruído para cada condição de transmissão.*

Condição de Transmissão	RSR (dB)
Sem Antenas	-1,25
Uma Antena	3,98
Duas Antenas	5,46
Três Antenas	5,63

Analisando os resultados obtidos a partir das curvas ROC apresentadas na Figura 36 e na Tabela 9, pode-se observar que para valores RSR próximos de 0 dB o desempenho da técnica é afetado pela limitação do nível médio de ruído do analisador de espectro utilizado. Pois, para o caso onde de usuário primário transmitindo sem nenhuma antena, quando as três interfaces de RF estão descasadas, a potência do sinal transmitido pelo mesmo é muito baixa. Consequentemente as amostras coletadas pela antena de sensoriamento apresentam um nível menor do que o nível do ruído médio de ruído de fundo do sistema de sensoriamento. Neste caso, mesmo que um usuário primário esteja transmitindo o sistema de sensoriamento não será capaz de detectar a presença do mesmo. Além disso, fica claro que a incerteza da potência do ruído afeta o desempenho do detector, pois, no sistema implementado a potência do ruído é medida apenas uma vez em um canal de referência e seu valor não é atualizado.

A Figura 37 e a Figura 38 apresentam os histogramas das estatísticas de teste sob as hipóteses H_0 e H_1 para as condições sem antena de transmissão e com três antenas de transmissão, respectivamente.

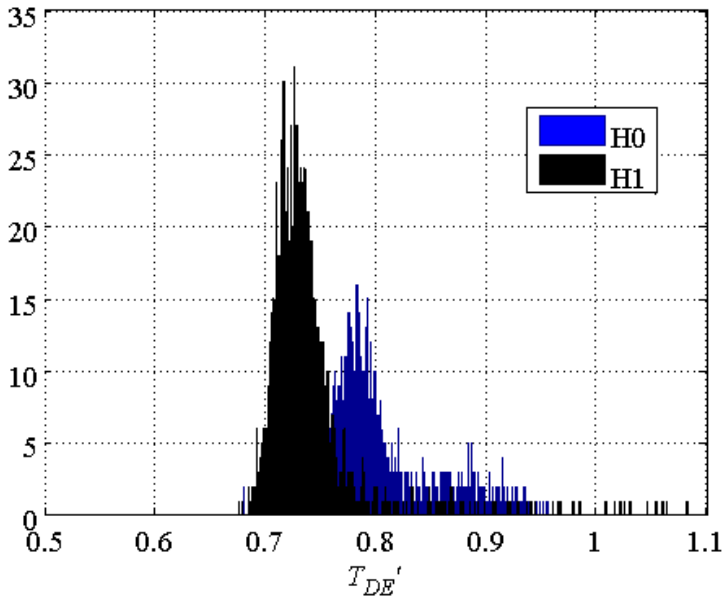


Figura 37 - *Histograma dos valores da estatística de teste sob hipóteses H_0 e H_1 sem antenas de transmissão.*

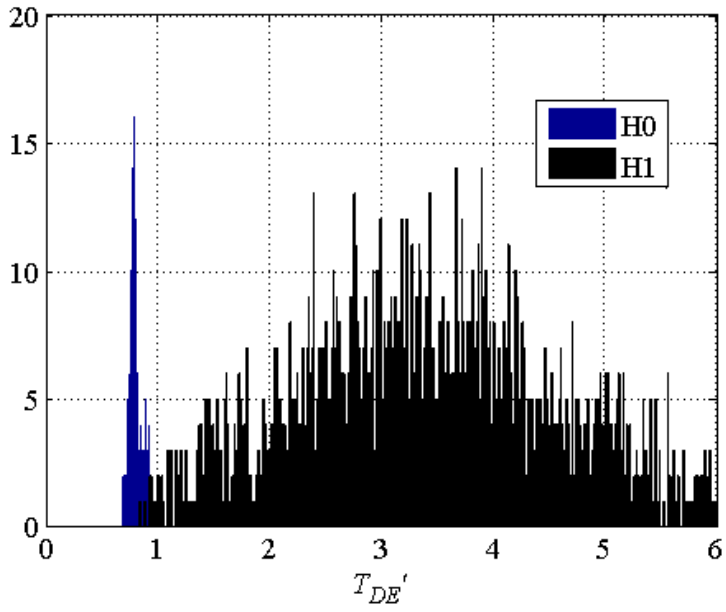


Figura 38 - *Histograma dos valores de estatística de teste sob hipóteses H_0 e H_1 com três antenas de transmissão.*

A partir dos histogramas apresentados para as duas condições descritas, é possível notar que o desempenho da técnica de detecção de energia no sistema em questão é afetado quando a RSR é baixa. Note que para o caso da Figura 37 os valores da estatística de teste sob a hipótese H_1 apresentam valores menores que os encontrados sob a hipótese H_0. Esta "inversão" de posição entre os valores da estatística de teste sob as hipóteses H_0 e H_1 pode ocorrer quando há uma variação do nível médio do ruído de fundo do sistema. Esta variação esta ligada às questões práticas de implementação como temperatura ambiente, raio de curvatura das fibras ópticas utilizadas no enlace RoF e calibração do analisador de espectro. Como os valores da estatística de teste sob hipótese H_0 são calculados a partir de amostras do espectro coletadas no interior de uma câmara anecóica, estes valores não são atualizados para cada experimento, consequentemente, caso haja uma variação da potência do ruído de fundo do sistema, mesmo que sob a hipótese H_1 o detector implementado pode apresentar uma estimativa da estatística de teste com valores menores que os encontrados para hipótese H_0 que são tomados como referência. Já no caso apresentado na Figura 38, onde se tem uma RSR média de 5,628 dB, os valores da estatística de teste sob a hipótese H_1 são na maioria das vezes maiores que os valores encontrado sob a hipótese H_0. Consequentemente não há "inversão" de

posição dos valores da estatística de teste sob as hipóteses H_0 e H_1 para este caso. Além disso, nota-se certa sensibilidade do detector quanto a variação do limiar de decisão, trazendo um aspecto quadrado a curva ROC para altos valores de RSR.

A partir dos resultados apresentados conclui-se que a utilização da técnica de detecção de energia no sistema proposto apresenta limitações para sinais com valores de RSR menores que 0 dBm. Tais limitações estão ligadas a aspectos práticos de implementação o que justifica a diferença de desempenho entre o sistema apresentado e os trabalhos encontrados na literatura. Além disso, percebe-se certo grau de sensibilidade no que diz respeito a variação do valor do limiar de decisão quando esta técnica é utilizada, o que cria um aspecto "quadrado" da curva ROC. Portanto, as limitações encontradas durante a implementação desta técnica foram a existência de uma barreira de RSR abaixo da qual a detecção fica prejudicada, a incerteza sobre a potência do ruído sob a hipótese H_0 e uma alta sensibilidade a variação do limiar de decisão para altos valores de RSR.

Capítulo 4. Implementação e Investigação Experimental da Arquitetura ACRoF

Este capítulo apresenta os resultados dos experimentos realizados na primeira etapa de implementação da tecnologia ACRoF. São abordadas a implementação de um *front end* cognitivo que utiliza um algoritmo de sensoriamento espectral baseado na técnica de detecção de energia em redes Wi-Fi, a integração dos elementos do sistema e as premissas para auxiliar na implementação das próximas etapas do projeto.

4.1. Implementação de um *Front End* Cognitivo

Além da análise de desempenho *off-line* da técnica de sensoriamento por detecção de energia apresentada no capítulo anterior, um algoritmo de sensoriamento espectral baseado na técnica de detecção de energia foi proposto e implementado em um *front end* cognitivo que tem como objetivo determinar o melhor canal entre as duas bandas ISM para se estabelecer uma conexão com o terminal do usuário. A Figura 39 apresenta o fluxograma com os passos realizados pelo algoritmo proposto. De posse das amostras do espectro disponibilizadas pelo analisador, o algoritmo calcula a estatística de teste $T_{DE}{}'$ para cada canal e escolhe o canal com menor valor de estatística de teste em cada banda. Dentre estes dois canais, o canal que apresentar menor valor de $T_{DE}{}'$ é escolhido para se estabelecer a comunicação com o terminal do usuário móvel.

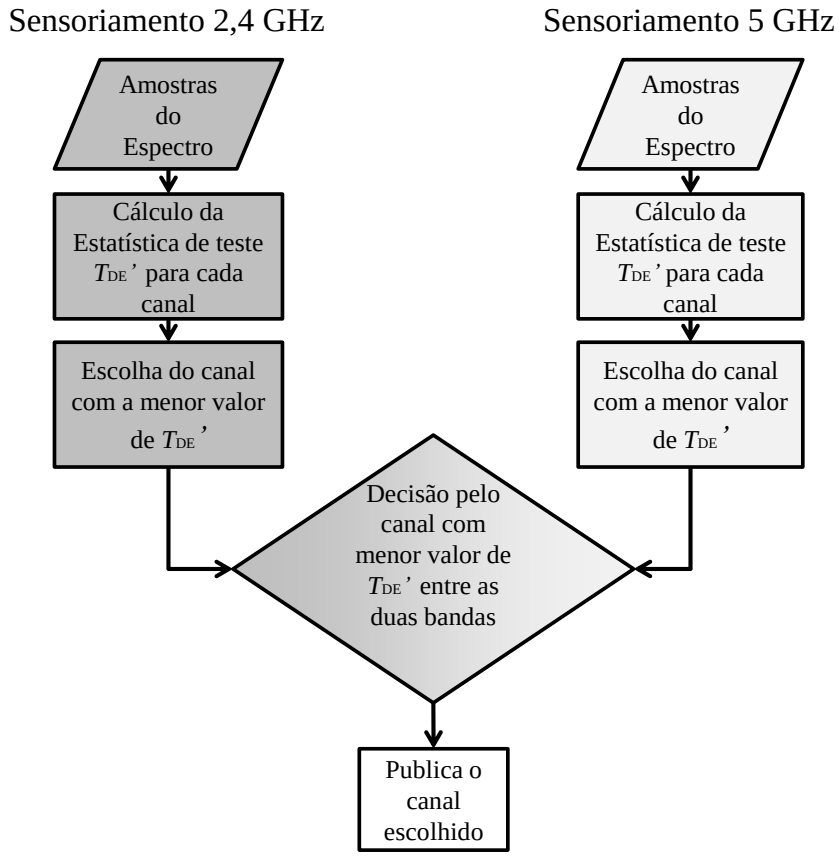


Figura 39 - *Fluxograma do algoritmo de sensoriamento implementado.*

Nota-se que nesta técnica a estatística de teste não é comparada com um limiar de decisão para tomar uma decisão a respeito da ocupação do canal como é feito nas técnicas já apresentadas. Consequentemente não há aqui a distinção entre as hipóteses H_0 e H_1 e, portanto, não faz sentido definir as probabilidades de detecção e falso alarme. Em outras palavras, este algoritmo não tem como objetivo decidir se o canal está livre ou ocupado, mas sim escolher o canal com menor nível de interferência para estabelecer uma conexão. Porém, o cálculo da estatística de teste T_{DE}' é realizado da mesma maneira que na técnica de detecção de energia convencional, por meio da relação da energia média das amostras coletadas pela potência média do ruído medida quando não há ninguém transmitindo no canal. Esta potência de ruído de fundo foi obtida com o sistema operando no interior da câmara anecóica do Inatel, como descrito no capítulo anterior. Outra observação importante é que neste caso não faz sentido considerarmos o usuário do ACRoF como um usuário secundário, visto que o sistema opera em uma banda não licenciada.

Portanto, o objetivo do sensoriamento espectral é detectar o canal com o menor nível de interferência para proporcionar melhor desempenho do sistema.

Diferente dos resultados apresentados no capítulo anterior, onde o processamento das amostras era realizado de maneira *off-line* com a utilização do *software* MATLAB®, no sistema implementado o algoritmo de sensoriamento é realizado em tempo real. Como visto na Seção 3.2. o *front end* é composto por três elementos: um analisador de espectro, um computador portátil e um AP Wi-Fi Dois programas em Python executados em uma plataforma Linux® no computador portátil foram desenvolvidos para controlar as ações destes elementos. Um programa chamado *Sensing.py* é responsável por determinar a banda a ser sensoriada pelo analisador de espectro, processar as amostras provenientes sensoriamento e determinar o melhor canal para se transmitir. Já o outro programa, chamado *Muda.py*, recebe as informações publicadas pelo programa *Sensing.py* (número do canal e banda de transmissão) e envia um sinal de controle para o AP Wi-Fi que altera suas características de transmissão. A Figura 40 apresenta um ciclo cognitivo que mostra a sequência de ações deste *front end*. O uso destes dois programas possibilitou que as amostras obtidas via uma interface USB entre o analisador de espectro e o computador fossem processadas em tempo real. Já o comando enviado do computador para o AP para alterar os parâmetros de rádio utiliza uma interface *ethernet*. Vale ressaltar que, por limitações impostas pelo analisador de espectro, o sensoriamento das duas bandas não é realizado simultaneamente. Primeiro o sistema colhe amostras do espectro na banda de 2,4 GHz, depois colhe amostras na banda de 5 GHz.

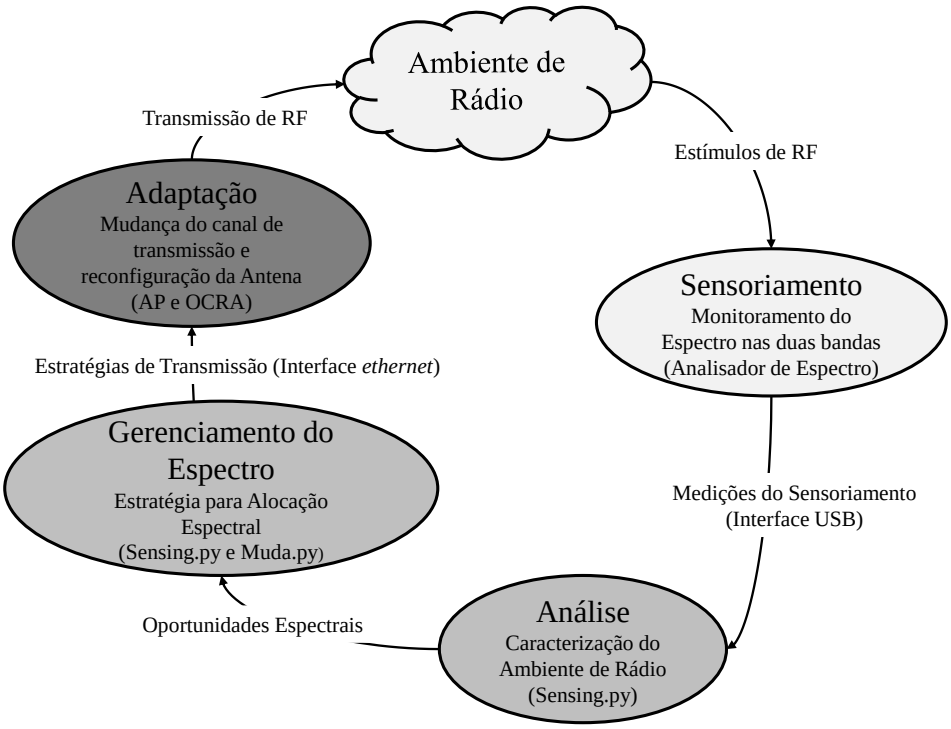


Figura 40 - *Ciclo cognitivo do front end impementado.*

Quanto à periodicidade com que as ações descritas no ciclo cognitivo são realizadas pelos dois programas como, o monitoramento do espectro, processamento das amostras, definição das oportunidades espectrais e a adaptação dos parâmetros do rádio, ainda existem algumas limitações nesta primeira etapa de implementação. O programa *Sensing.py* realiza o processamento das amostras em tempo real e publica o melhor canal. Porém, o programa *Muda.py* só é acionado manualmente e, portanto, o *front end* cognitivo só altera suas configurações quando se deseja realizar algum teste de desempenho. Já no que diz respeito ao tempo gasto para que o programa *Sensing.py* publique o melhor canal depende da quantidade de amostras tomadas na banda de sensoriamento e a quantidade de amostras tomadas ao longo do tempo, dadas por L e N respectivamente. O tempo de amostragem do analisador de espectro é de 1ms. A Tabela 10 apresenta o tempo aproximado para que o algoritmo determine o canal com o menor valor de T_{DE}' em cada uma das bandas de sensoriamento e publique o melhor canal para diferentes valores de N. Vale lembrar que na banda de 2,4 GHz são tomadas L = 101 amostras entre 2,4 GHz e 2,5 GHz, e na banda de 5 GHz são tomadas L = 801 amostras entre 5,1 GHz e 5,9 GHz.

Tabela 10 - *Tempo de amostragem para determinar o melhor canal em cada uma das bandas.*

N (n° de amostras no tempo)	Tempo de amostragem por banda (s)		Tempo total (s)
	2,4 GHz	5 GHz	
1	0,101	0,801	0,902
10	1,01	8,01	9,02
50	5,05	40,05	45,1
100	10,1	80,1	90,2

Nos experimentos descritos nas seções a seguir foram tomadas $N = 50$ amostras no tempo. Além do tempo total gasto para realizar o sensoriamento nas duas bandas, é necessário considerar o tempo durante o qual o sistema fica inoperante para que o canal do AP seja reconfigurado, neste caso o tempo médio é de aproximadamente dois segundos. Uma das principais limitações encontradas no desenvolvimento prático de um RC é agilidade do mesmo em colher as mostras do espectro "sensoriado" e trata-se de uma limitação de *hardware*. Esta limitação ficou evidente durante a implementação do *front end* cognitivo.

4.2. Integração dos Elementos do Sistema

Após a análise de desempenho dos elementos que compõem o sistema de maneira separada, foi realizada a integração dos mesmos com o objetivo de obter a primeira versão da arquitetura ACRoF. Assim, um sistema composto por uma CO, uma RAU e um enlace RoF bidirecional para conexão entre os mesmos foi implementado. Já o enlace óptico de controle da antena reconfigurável não foi implementado nesta etapa, sendo este controle feito por um laser localizado na RAU e não na CO como havia sido proposto anteriormente. Esta implementação não foi possível pois, o laser utilizado para controlar a antena "E" opera em 808 nm utilizando uma fibra multimodo que possui núcleo de 105 µm e a rede óptica real é composta por fibras monomodo com núcleos de 9 µm. Neste caso uma conexão ou fusão entre as mesmas apresentaria uma perda de potência muito alta, tornando o controle ineficiente. A Figura 41 apresenta um diagrama de blocos com todos os elementos que compõem o sistema implementado e a localização dos mesmos.

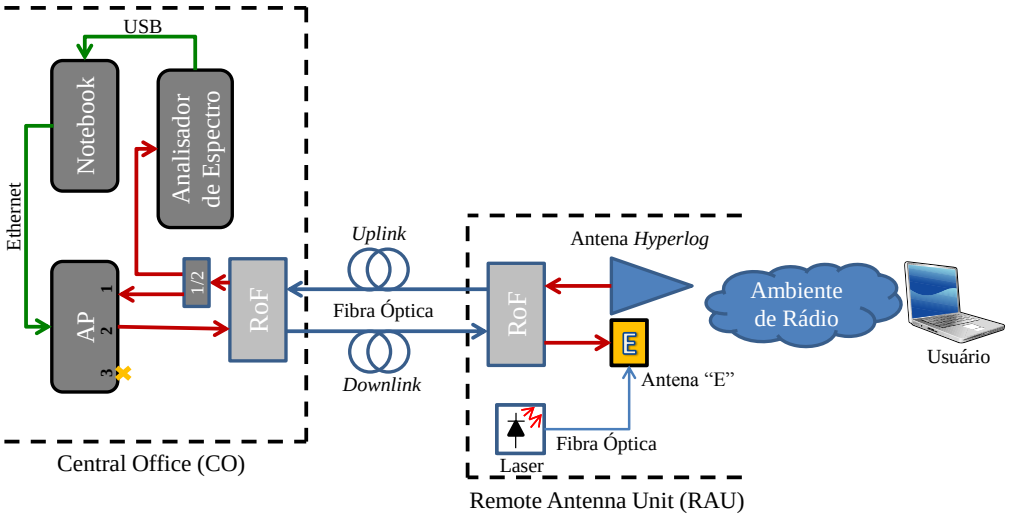


Figura 41 - *Diagrama de blocos dos elementos do sistema implementado.*

No *downlink* o sinal de RF transmitido pelo AP passa por uma conversão eletro-óptica no módulo RoF localizado na CO, é transmitido por meio do enlace de fibra óptica, passa pela conversão óptico-elétrica no módulo RoF localizado na RAU e é transmitido pela antena "E" para o terminal do usuário. Já no *uplink*, o sinal de RF transmitido pelo terminal do usuário e as amostras do espectro capturadas pela antena Hyperlog compõem o sinal de subida. Este sinal passa pela conversão eletro-óptica no módulo RoF localizado na RAU, é transmitido por um enlace de fibra óptica, passa pela conversão óptico-elétrica no módulo RoF localizado na CO e então é aplicado a entrada de um divisor de potências com uma perda de inserção de aproximadamente 3,31 dB na banda de 2,4 GHz e de 3,43 dB na banda de 5 GHz. O divisor se faz necessário para que tanto o AP quanto o analisador de espectro recebam o sinal de subida. No analisador de espectro as amostras passam por um processo de conversão AD e são disponibilizadas ao computador portátil para serem processadas. Já o AP recebe o sinal de RF que contém as informações enviadas pelo terminal do usuário.

O sistema foi implementado utilizando uma rede óptica real localizada dentro do campus do Inatel também conhecida como WON (*WOCA Optical Network*) sob condições reais de temperatura, umidade e pressão [75]. A CO foi instalada no segundo andar do Prédio V onde há um ponto de acesso à rede óptica e a RAU foi instalada no laboratório WOCA onde também há um ponto de acesso à rede. A

Figura 42 mostra uma imagem aérea obtida por meio da ferramenta Google Earth™, onde estão indicados a CO, a RAU, o enlace óptico e o ambiente de sensoriamento.

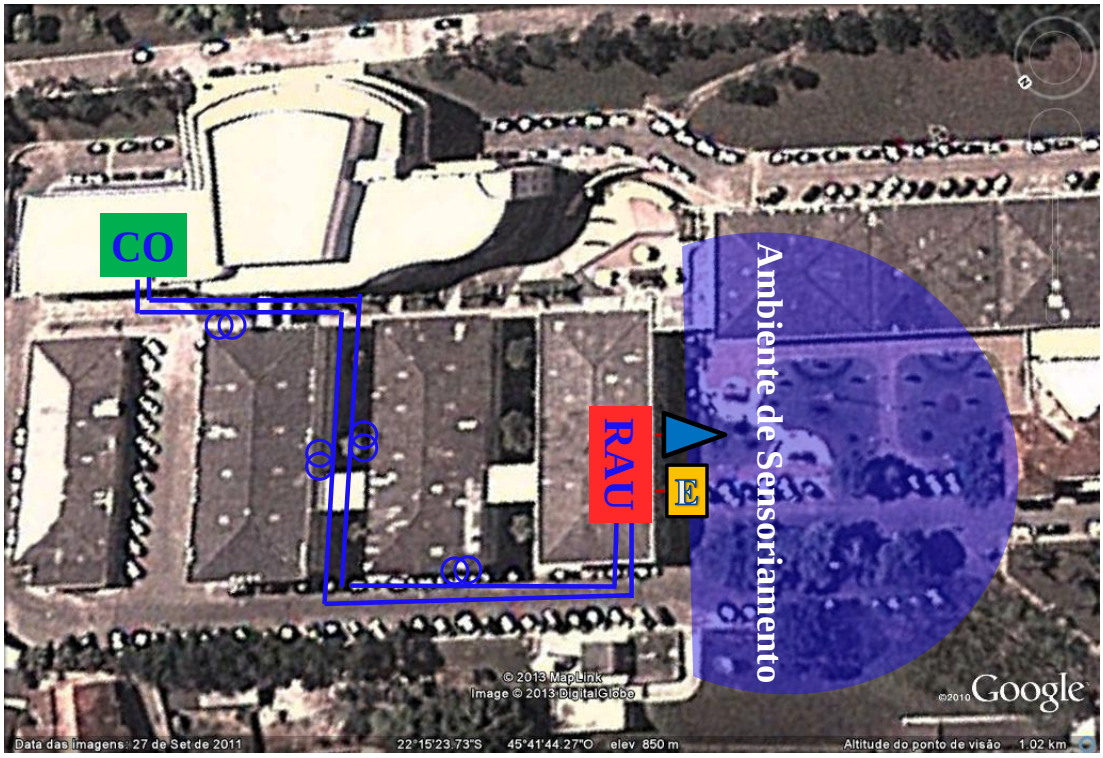


Figura 42 - *Imagem aérea do sistema implementado.*

A Figura 43 e a Figura 44 apresentam as antenas utilizadas na RAU e integração dos elementos que compõe a mesma, respectivamente.



Figura 43 - *Antenas utilizadas na RAU.*

A Figura 45 apresenta a CO e seus elementos. É possível observar as três interfaces de RF do AP, onde uma é utilizada para transmissão do sinal e outra para recepção, sendo que a terceira foi desabilitada.

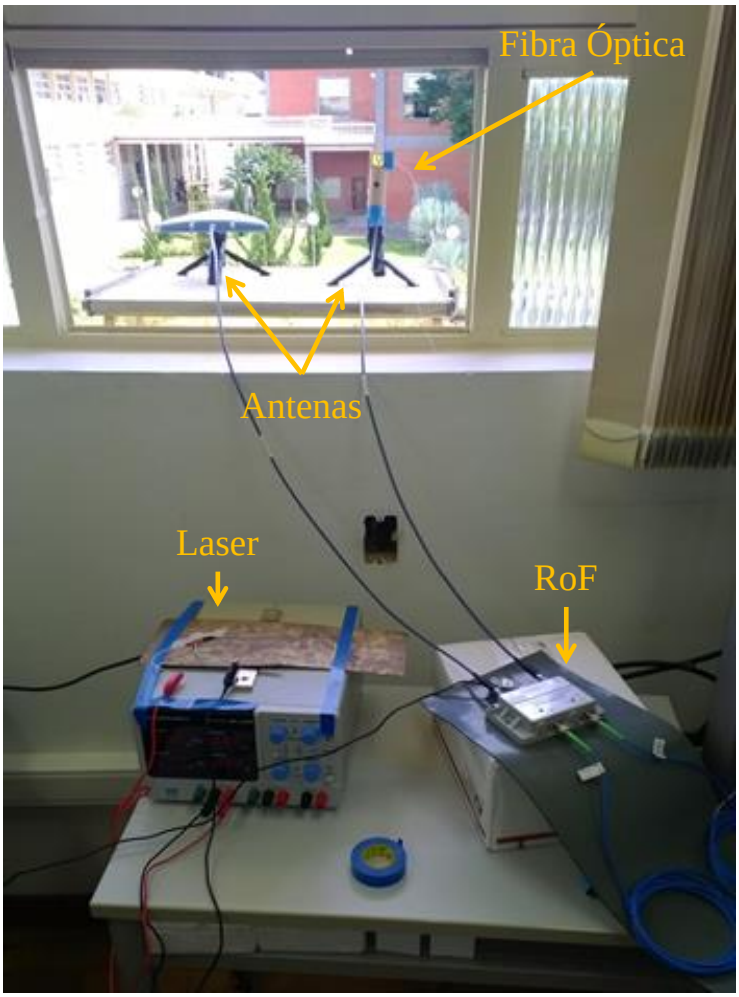


Figura 44 - *Elementos que compõe a RAU.*



Figura 45 - *Elementos da CO.*

4.3. Análise de Desempenho do Sistema

Com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo de sensoriamento utilizado no sistema proposto foram realizados experimentos que demonstram o efeito causado pela interferência co-canal proveniente de outras redes sem fio que estejam operando no mesmo ambiente e que impactam diretamente na experiência dos usuários. As métricas utilizadas para analisar o desempenho do sistema em cada uma das situações foram a CINR (*Carrier to Interference Plus Noise Ratio*) (em dB), a PER (em %), e a vazão (em Mbps) medidas no *downlink*. Os testes foram divididos em três etapas: i) análise de desempenho do sistema operando somente na banda de 2,4 GHz; ii) análise de desempenho do sistema operando na banda de 5 GHz; e iii) análise de desempenho do sistema operando nas duas bandas. As subseções a seguir apresentam os cenários de teste criados e os resultados obtidos em cada uma das situações.

4.3.1. Resultados para a Banda de 2,4 GHz

Para realização dos testes de desempenho foram considerados quatro cenários de transmissão: i) interferência co-canal de três redes; i) interferência co-canal de duas redes; iii) interferência co-canal de uma rede; e iv) transmissão de dados no canal escolhido pelo algoritmo proposto com o objetivo de reduzir a interferência. Estas situações foram criadas ligando e desligando APs de acordo com o número desejado de canais interferentes. A Figura 46 ilustra o cenário utilizado para a realização dos testes. Neste caso o usuário ficou localizado a uma distância de 1,5 m da RAU e os APs das redes interferentes foram distribuídos a uma distância de aproximadamente 3 metros do usuário.

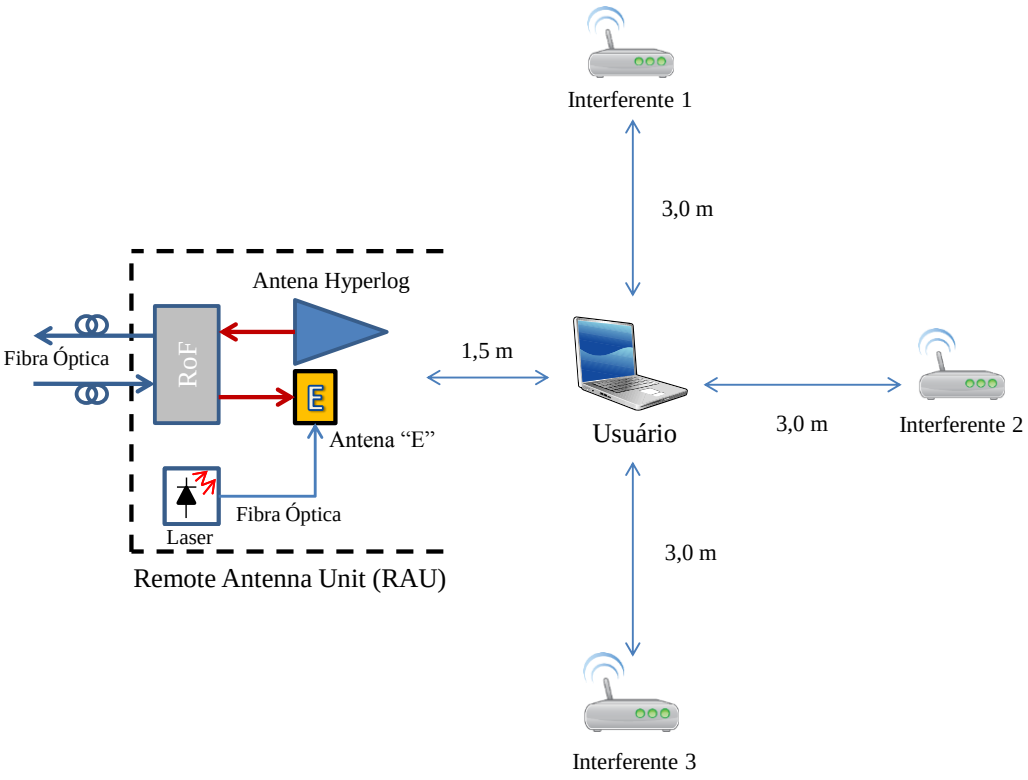


Figura 46 - *Cenário de testes sistêmicos na banda de 2,4 GHz.*

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos com o sistema operando na banda de 2,4 GHz. Observa-se que o desempenho pode ser melhorado de maneira significativa em termos de CINR, PER e vazão quando o nível de interferência co-canal é reduzido. Os valores de CINR e vazão apresentaram um aumento de 0,5 dB para 39,6 dB e de 20,5 Mbps para 29,6 Mbps, respectivamente. Já a PER apresentou

uma redução de 25 para 11% do pior caso para o melhor caso. Vale ressaltar que a CINR foi medida com o auxílio do *software* CommView for Wi-Fi® instalado no terminal do usuário do sistema e, portanto, retrata a qualidade do sinal recebido pelo usuário e não pode ser confundida com a estatística de teste T_{DE}' que é calculada pelo algoritmo de sensoriamento.

Tabela 11 - *Resultados sistêmicos obtidos com o sistema operando na banda de 2,4 GHz.*

Condições de Teste	CINR (dB)	Vazão (Mbps)	PER (%)
3 Interferentes co-canal	0,5	20,5	25
2 Interferentes co-canal	10	23,3	23
1 Interferente co-canal	20	25,5	18
Melhor Canal	39,6	29,6	11

Observa-se que, apesar de estar operando somente na banda de 2,4 GHz, que geralmente apresenta maior número de sinais interferentes, tanto de outras redes Wi-Fi quanto de dispositivos de outras tecnologias, o desempenho do sistema pode ser melhorado quando se utiliza a alocação dinâmica de canais.

4.3.2. Resultados para a Banda de 5 GHz

Da mesma maneira que os testes realizados na banda de 2,4 GHz, os testes realizados na banda de 5 GHz consideraram os quatro cenários de transmissão já mencionados. Porém, neste caso os sinais interferentes gerados eram de diferentes tecnologias. Foram utilizados um AP Wi-Fi, uma estação radiobase WiMAX e um sinal PSK (*Phase Shift Keying*) transmitido pelo equipamento BTS Master Test MT 8221B da Anritsu. A Figura 47 ilustra o cenário utilizado para realização dos testes. Como no caso da banda de 2,4 GHz, as diferentes situações foram criadas ligando e desligando os equipamentos geradores dos sinais interferentes. A ordem de desligamento se deu sempre de maneira decrescente, ou seja, do interferente 3 para o interferente 1.

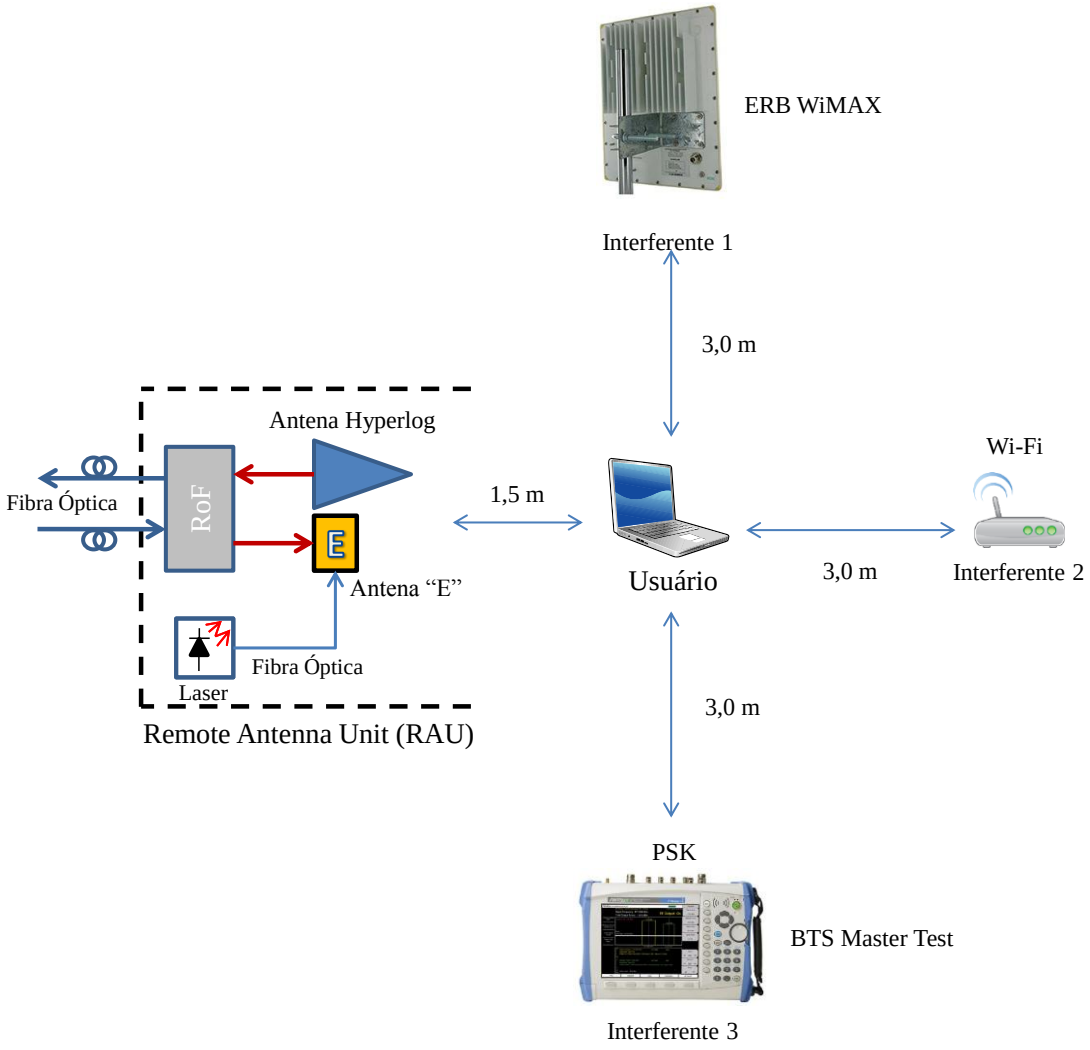


Figura 47 - *Cenário de testes sistêmicos na banda de 5 GHz.*

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos com o sistema operando na banda de 5 GHz. Observa-se que o desempenho pode ser melhorado de maneira significativa em termos de CINR, PER e vazão quando o nível de interferência co-canal é reduzido. Os valores de CINR e vazão apresentaram um aumento de -3 para 30 dB e de 0,252 para 22,7 Mbps respectivamente. Já a PER apresentou uma redução de 23 para 7% do pior para o melhor caso.

Se forem comparados estes resultados com aqueles obtidos com o sistema operando na banda de 2,4 GHz pode-se perceber que neste caso há uma diferença maior entre os valores de vazão entre o pior e o melhor caso. Este comportamento pode ser justificado devido ao fato do sistema apresentar maior sensibilidade a

interferências na banda de 5 GHz. Para se chegar a esta conclusão estes testes foram repetidos várias vezes para comprovar sua confiabilidade.

Tabela 12 - *Resultados sistêmicos obtidos com o sistema operando na banda de 5 GHz.*

Condições de Teste	CINR (dB)	Vazão (Mbps)	PER (%)
3 Interferentes co-canal	-3	0,252	23
2 Interferentes co-canal	7	1,087	22
1 Interferente co-canal	17	2,28	18
Melhor Canal	30	22,7	7

4.3.3. Resultados para as duas Bandas

Após os testes realizados em cada uma das bandas de transmissão para avaliar o impacto causado pela interferência co-canal, foram realizados testes para avaliar o sistema nas seguintes situações: i) transmissão de dados utilizando o canal padrão em 2,4 GHz; ii) transmissão de dados no canal escolhido pelo algoritmo proposto na banda de 2,4 GHz; e iii) transmissão de dados no canal escolhido pelo algoritmo proposto, considerando as duas bandas de sensoriamento. O sistema foi inicialmente configurado para operar na frequência de 2,437 GHz, no canal 6, que é considerado o canal padrão pela maioria dos fabricantes de dispositivos Wi-Fi e, portanto, é o mais utilizado principalmente nas redes domésticas que são instaladas sem nenhum conhecimento técnico para sua configuração. Em um segundo momento o sistema foi configurado para operar na banda de 2,4 GHz utilizando o algoritmo de sensoriamento para escolha do canal a ser utilizado e em um terceiro momento o sistema foi configurado para operar nas duas bandas utilizando o algoritmo de sensoriamento.

A Tabela 13 apresenta o gráfico de desempenho do sistema para estas três situações. Pode-se observar que o desempenho do sistema pode ser significativamente melhorado com a utilização da alocação dinâmica do canal quando comparado com um sistema que opera em canal padrão na banda de 2,4

GHz. Durante os experimentos foi possível observar que na maioria das vezes o espectro na banda de 2,4 GHz se apresenta muito mais congestionado, pois a maioria dos equipamentos de transmissão disponíveis no mercado ainda opera somente nesta banda. Consequentemente, a maioria dos dispositivos móveis e computadores portáteis também operam nesta banda.

Tabela 13 - *Resultados sistêmicos obtidos operando nas duas bandas de frequência.*

Condições de teste	CINR (dB)	Vazão (Mbps)	PER (%)
Canal Padrão	10	16,7	35
Melhor canal em 2,4 GHz	25	28,7	14
Melhor canal entre as duas bandas	40	21,8	9

A Figura 48 e a Figura 49 apresentam as medidas do espectro realizadas no ambiente de sensoriamento indicado na Figura 42. Nota-se claramente que o espectro "sensoriado" na banda de 5 GHz apresenta maior possibilidade de oportunidades espectrais do que o espectro "sensoriado" na banda de 2,4 GHz. Por este motivo, o sistema proposto apresenta uma tendência a priorizar a utilização canais na banda de 5 GHz. Por outro lado, o desempenho do sistema no que diz respeito à vazão apresentou uma redução de 28,7 Mbps para 21,8 Mbps quando o sistema proposto estava operando nas duas bandas. Esta diminuição da vazão é justificada pelo fato do sistema passar a operar na banda de 5 GHz, pois, como a distância entre o usuário e a RAU foi mantida durante os experimentos, o nível do sinal recebido pelo usuário quando o sistema opera na banda de 5 GHz sofre uma atenuação maior do que quando o sistema opera em 2,4 GHz (a diferença é de aproximadamente 7 dB). Além disso, as condições do ambiente de propagação dos testes varia com o tempo, o que causa a alteração dos parâmetros de transmissão, tais como modulação e codificação, de maneira dinâmica, influenciando na vazão do sistema.

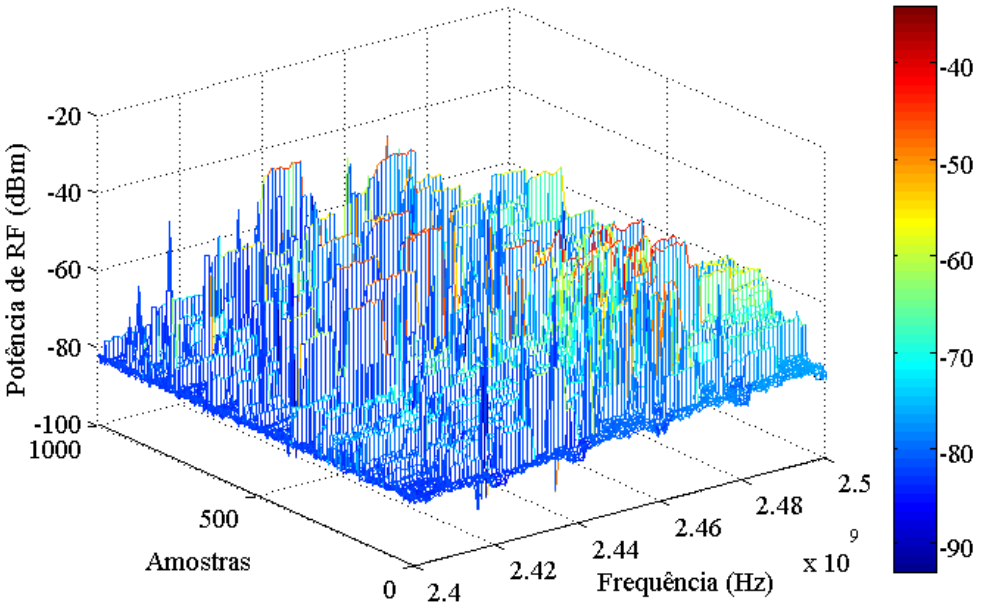


Figura 48 - *Espectro "sensoriado" na banda de 2,4 GHz.*

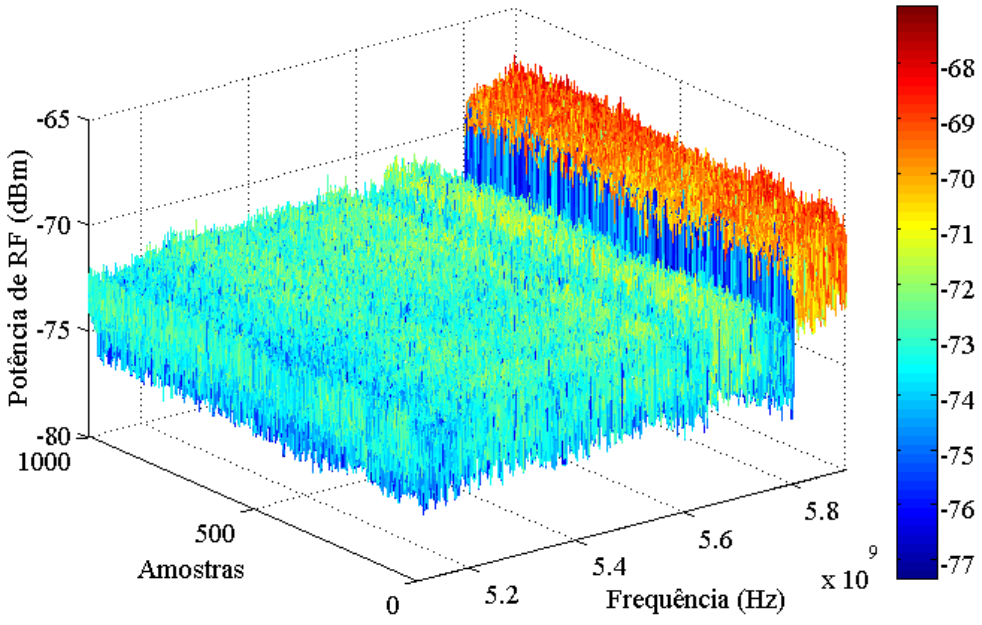


Figura 49 - *Espectro "sensoriado" na banda de 5 GHz.*

4.4. Premissas Para as Próximas Etapas de Implementação da Tecnologia ACRoF

A implementação prática de um sistema traz consigo vários desafios. Com o objetivo de auxiliar as próximas etapas de implementação da tecnologia ACRoF, algumas premissas importantes serão descritas a seguir.

A partir da concepção da tecnologia ACRoF e a definição de sua arquitetura, cada um dos elementos do sistema e suas funcionalidades precisam ser analisados sistematicamente com o objetivo de compreender seu funcionamento e suas limitações. Para que a primeira etapa de implementações fosse possível, os elementos que compõem a arquitetura proposta nesta dissertação foram investigados separadamente antes da integração dos mesmos. São eles: um sistema Wi-Fi *dual band* sobre fibra, uma antena reconfigurável controlada opticamente e a inserção de um enlace RoF entre a antena de sensoriamento e o analisador de espectro utilizado para digitalização das amostras espectrais.

A arquitetura ACRoF oferece diversas opções de configuração, pois proporciona o compartilhamento de infraestrutura por vários padrões de comunicação diferentes. Cada padrão de comunicação sem fio apresenta diferentes características de camada física e MAC que impõem limitações ao sistema e precisam ser avaliadas quando os mesmos são utilizados em um sistema RoF. Neste trabalho foram destacadas as limitações impostas pelo atraso máximo que pode ser inserido pelo enlace de fibra óptica quando se utiliza um sistema Wi-Fi *dual band* sobre fibra sob o padrão 802.11n. Portanto, caso se deseje utilizar mais de um padrão de comunicação, uma análise do comprimento máximo do enlace de fibra óptica precisa ser feita, sendo que o comprimento máximo ficará limitado pelo padrão que admitir o menor atraso adicional.

Como visto nas seções 3.3 e 3.5, um sistema RoF insere ruído adicional ao sistema, além do atraso produzido pelo enlace de fibra óptica. O ruído equivalente de entrada, também conhecido como EIN, é um parâmetro fornecido pelos fabricantes de equipamentos RoF. O EIN é composto pelo ruído de intensidade relativa do *laser*,

pelo ruído *shot* do fotodetector e pelo ruído térmico. Além do EIN, outros parâmetros importantes são a figura de ruído e a faixa dinâmica de operação, também conhecida como SFDR. Portando, o desempenho do sistema de comunicação quando se utiliza um enlace RoF entre a CO e a RAU precisa ser avaliado. Um exemplo desta limitação no trabalho apresentado foi a redução da vazão do sistema quando da utilização de um enlace RoF. Além disso, o ruído adicional e o atraso produzido pelo enlace de fibra óptica limitam o desempenho do detector utilizado para realizar o sensoriamento espectral.

Quanto às antenas do sistema, é necessário o conhecimento dos parâmetros que permitam avaliar a possibilidade de utilização das mesmas. Tratando-se de um sistema que opera em mais de uma faixa de frequências, é interessante que sejam utilizadas antenas com grande largura de faixa para realizar a captura das amostras do espectro que se deseja "sensoriar". Já as antenas de transmissão, que possivelmente serão antenas com banda de operação reconfigurável opticamente, precisam ser avaliadas para que se encontre uma condição ótima para cada estado do controle, como mostrado na Seção 3.4.

Além das antenas é necessário avaliar a disponibilidade de outros dispositivos de RF necessários para a implementação do sistema, como é o caso dos circuladores, divisores e combinadores. Neste trabalho foi demonstrada a impossibilidade de se utilizarem circuladores de RF para que apenas uma antena e uma interface de RF do AP fossem utilizadas para transmissão e recepção de dados. Muitas vezes estes dispositivos não são projetados para serem utilizados em uma faixa de frequência muito grande devido a limitações pelos matérias utilizados em sua construção. No caso do circulador, seu projeto é limitado por características ferromagnéticas dos núcleos de ferrite utilizados na sua fabricação.

Nesta primeira etapa de implementações a CO foi composta de um computador portátil, um AP Wi-Fi e um analisador de espectro portátil, sendo o último responsável pelo processo de conversão AD das amostras colhidas. Neste caso foi possível realizar o sensoriamento de duas faixas de frequências relativamente largas, uma de 2,4 GHz até 2,5 GHz e outra de 5,1 GHz até 5,9 GHz. Além disso, observou-se que quanto maior a banda de sensoriamento maior a

variação do piso de ruído do analisador. Possivelmente, nas próximas etapas de implementação do sistema parte dos equipamentos utilizados na CO sejam substituídos por um FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Neste caso é necessário que algumas características sobre os mesmos sejam obtidas, tais como largura de faixa máxima possível de ser sensoriada, número de pontos da FFT, frequência de amostragem, etc. A maioria dos FPGAs apresenta uma largura de faixa de dezenas de mega-hertz, o que pode inviabilizar o sensoriamento de vários canais ao mesmo tempo, por exemplo, e, portanto, será necessário que a amostragem de uma banda de interesse seja feita por partes. Além disso, é necessário conhecer o piso de ruído desses dispositivos para que se possa definir o nível mínimo de sinal detectável.

As premissas supramencionadas são importantes para que se tenha sucesso nas próximas etapas de implementação da tecnologia ACRoF. Resumidamente, as premissas são listadas a seguir:

- Definição dos padrões de comunicação a serem utilizados.
- Análise das limitações impostas pela utilização de um sistema RoF entre a CO e as RAUs, levando em consideração as características das camadas física e MAC dos padrões de comunicação utilizados.
- Análise da influência do ruído gerado pelo enlace RoF no desempenho da comunicação entre a CO e os usuários, bem como sua influência no desempenho do sensoriamento espectral.
- Conhecimento dos principais parâmetros das antenas utilizadas, bem como o seu comportamento quando da utilização de algum sinal de controle para sua reconfiguração ou adaptação.
- Avaliação da disponibilidade de dispositivos de RF necessários para implementação do sistema em função da faixa de frequência de operação.
- Conhecimento dos principais parâmetros do dispositivo que irá realizar a conversão AD do sinal de RF recebido pela CO, onde será realizado o processamento das amostras de espectro captadas.

Capítulo 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram apresentados a concepção e os resultados obtidos na primeira etapa de implementação da arquitetura Rádio Cognitivo e Adaptativo sobre Fibra, ACRoF em uma rede óptica-sem fio real. O Capítulo 1 apresentou a contextualização sobre o cenário atual dos sistemas de comunicação sem fio, os desafios impostos aos sistemas de futuras gerações e os estudos que vem sendo realizados para vencer estes desafios. Esta contextualização se concentrou principalmente em trabalhos que propõem a integração de duas tecnologias potenciais para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio: o rádio cognitivo e o rádio sobre fibra. Além disso, o estado da arte destes sistemas foi apresentado, assim como as principais contribuições do presente trabalho. O Capítulo 2 apresentou a definição e os principais conceitos das três tecnologias de telecomunicações utilizadas na implementação do sistema: a tecnologia Wi-Fi, o rádio cognitivo e o rádio sobre fibra. Este capítulo teve como principal objetivo promover o entendimento dos conceitos necessários para compreensão dos resultados obtidos nos capítulos seguintes. No Capítulo 3 foram apresentados o conceito de ACRoF e sua arquitetura, bem como o sistema implementado na primeira etapa. Foram descritas a implementação dos principais elementos que constituem o sistema e suas limitações. Inicialmente foi descrita a implementação de um sistema Wi-Fi *dual band* sobre fibra. Depois, a antena reconfigurável controlada opticamente que foi previamente desenvolvida por pesquisadores do laboratório WOCA, também conhecida como antena “E”, teve seu desempenho avaliado. Além disso, a técnica de detecção de energia foi utilizada para realizar o sensoriamento espectral sobre fibra e o seu desempenho foi avaliado utilizando a curva ROC. No Capítulo 4 a integração dos elementos do sistema e a implementação de um algoritmo de sensoriamento

espectral baseado na técnica de detecção de energia para aplicação em redes Wi-Fi *dual band* foram apresentados. Finalmente, os resultados obtidos na análise de desempenho na primeira etapa de implementação da arquitetura ACRoF foram apresentados e algumas premissas importantes para as próximas etapas de implementação do sistema foram listadas.

As principia contribuições deste trabalho são as seguintes:

- Implementação de um sistema Wi-Fi *dualband* sobre fibra e a investigação das limitações impostas por este tipo de sistema que podem ser resumidas no máximo comprimento de fibra que pode ser utilizado devido a características de camada MAC e configurações que não exijam o uso de circuladores de RF devido à indisponibilidade dos mesmos no mercado.
- Análise de desempenho de uma antena reconfigurável controlada opticamente, previamente desenvolvida por pesquisadores do laboratório WOCA.
- Análise de desempenho da técnica de detecção de energia em um sistema que utiliza um enlace RoF entre a antena de sensoriamento, localizada na RAU, e a CO responsável pelo processamento das amostras do espectro "sensoriado" por meio do processamento *off-line* das mesmas, apresentando suas principais características e limitações.
- Implementação de um algoritmo de sensoriamento espectral *online* baseado na técnica de detecção de energia, com o objetivo de determinar o melhor canal para o estabelecimento da comunicação com os usuários.
- Integração dos elementos e funcionalidades do sistema tanto na CO quanto na RAU com o objetivo de avaliar o desempenho dos mesmos operando em conjunto.
- Elaboração de premissas para auxiliar nas próximas etapas de implementação da tecnologia ACRoF.

O conceito ACRoF abre novas possibilidades a serem exploradas em diversos segmentos de telecomunicações. As nossas sugestões de trabalhos futuros são:

- Desenvolver e implementar as funcionalidades da CO em uma plataforma única com a utilização de um FPGA.
- Desenvolver uma estratégia para que o laser utilizado para o reconfiguração das antenas possa ser controlado pela CO.
- Implementar e avaliar de uma CO que abrigue pelo menos três unidades remotas de rádio que utilizem padrões de comunicação diferentes.
- Desenvolver e implementar arranjos de antenas reconfiguráveis controlados opticamente.
- Utilizar o sistema implementado na primeira etapa para análise de desempenho de novos dispositivos de RF controlados opticamente que estão sendo desenvolvidos por pesquisadores do laboratório WOCA.
- Analisar o desempenho de outras técnicas de sensoriamento espectral como, por exemplo, as técnicas de detecção baseadas em autovalores. Além de algumas delas não dependerem do conhecimento prévio da variância do ruído, são muito utilizadas em sistemas de rádio cognitivos que possuem sensoriamento cooperativo.
- Implementar a arquitetura ACRoF com múltiplas células de sensoriamento faixa larga, cobrindo desde UHF até a faixa de ondas milimétricas.
- Promover a sinergia entre os diferentes grupos de pesquisa do curso de Mestrado em Telecomunicações do Inatel com o objetivo de agregar mais funcionalidades ao ACRoF. Como exemplo podem ser destacadas iniciativas que já estão sendo realizados para integrar o Laboratório WOCA e o projeto Nova Genesis com o objetivo utilizar a infraestrutura do ACRoF para realizar testes com *internet* do futuro [76].

Referências

[1] Cisco Systems, Inc., *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012-2017*, White Paper, 2013.

[2] FCC. (2002, Nov.). *Spectrum Policy Task Force Report*. Federal Communications Commission, Tech. Rep. 02-135. [Online]. Available: http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-228542A1.pdf

[3] M. McHenry. (2005, Aug.). NSF Spectrum Occupancy Measurements Project Summary. Shared Spectrum Co., Tech. Rep. [Online]. Available: http://www.sharedspectrum.com/.

[4] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", *IEEE Personal Communications*, vol.6, no. 4, p. 13-18, Aug. 1999.

[5] A. Caballero, D. Zibar, R. Sambaraju, J. Marti and I. Tafur Monroy, "High-Capacity 60 GHz and 75-110 GHz Band Links Employing All-Optical OFDM Generation and Digital Coherent Detection", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol.30, no. 1, p. 147-155, Jan. 2012.

[6] H. Chun-Hung, J. Wen-Jr, R. Sambaraju, L. Wei-Yuan, L. Tsung-Hung, W. Chih-Yun, Y. Hejie, L. Chun-Ting, W. Chia-Chien, C. Shien and A. Ngoma, "Performance Evaluation of a 60 GHz Radio-over-Fiber System Employing MIMO and OFDM Modulation", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no 12, pp 780-787, Dec. 2013.

[7] A. Attar, H. Li and V. C. M. Leung, "Applications of Fiber-connected Distributed Antenna Systems in Broadband Wireless Access", *IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, p. 623-627, Maui, HI, January, 2012.

[8] J. Capmany and D. Novak, “Microwave Photonics Combines Two Worlds”, *Nature Photonics*, vol.1, p 319-330, Jun. 2007.

[9] E. Axell, G. Leus, E. G. Larsson, and H. V. Poor, “Spectrum Sensing for Cognitive Radio State of the Art and Recent Advances”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 29, no. 3, p. 101-116, May 2012.

[10] P. Pawelczak , K. Nolan , L. Doyle , S. Oh and D. Cabric, “Cognitive radio: Ten Years of Experimentation and Development”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 3, p. 90 -100, Mar. 2011.

[11] H. Urkowitz, “Energy Detection of Unknown Deterministic Signals”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, no. 4, p. 523–531, Apr. 1967.

[12] B. Farhang-Boroujeny, “Filter Bank Spectrum Sensing for Cognitive Radios”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no.5, p. 1801–1811, May 2008.

[13] W. A. Gardner, “Cyclostationarity: Half a Century of Research”, *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 86, pp. 639–697, Apr. 2006.

[14] J. Lundén, V. Koivunen, A. Huttunen, and H. V. Poor, “Collaborative Cyclostationary Spectrum Sensing for Cognitive Radio Systems”, *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 57, no. 11, p. 4182–4195, Nov. 2009.

[15] Y. Zeng and Y.-C. Liang, “Eigenvalue-Based Spectrum Sensing Algorithms For Cognitive Radio”, *IEEE Transaction on Communication*, vol. 57, no. 6, p. 1784–1793, Jun. 2009.

[16] E. Axell and E. G. Larsson, “A Unified Framework for GLRT-Based Spectrum Sensing of Signals With Covariance Matrices with Known Eigenvalue Multiplicities”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, p. 2956–2989, Prague, Czech Republic, May 2011.

[17] A. J. Seeds and K. J. Willians, “Microwave Photonics”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, p. 4628 – 4641, Dec. 2006.

[18] D. Wake, A. Nkansah and N. J. Gomes, “Radio Over Fiber Link Design for Next Generation Wireless Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, p. 2456 – 2464, Aug. 2010.

[19] S. Deronne, V. Moeyaert, and S. Bette, “Wi-Fi transmission in Radio-over-Fiber Systems: Performance of the IEEE 802.11n Aggregation Mechanism”, *17th International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Brest, p. 167 – 172, Apr. 2013.

[20] D. G. Lona, R. M. Assumpção, O. C. Branquinho, M. L. F. Abbade, H. E. Hernandez Figueroa and Arismar Cerqueira S. Jr., “Investigation of Noise Sources in Radio-over-Fiber Systems for Wi-Fi Applications”, *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, p. 97 – 101, Natal, 2011.

[21] M. Yee, A. Ng’Oma amd M. Sauer, “Performance Analysis of IEEE 802.16e WiMAX Radio-over-fiber Distributed Antenna System”, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, p. 197-200, Boston, MA, Jun. 2009.

[22] C.H. Yeh, C.W. Chow, F.Y. Shih, C.H. Wang, Y.F. Wu, Y.L. Liu, D.Z. Hsu, A. Lin, D. Mai and S. Chi, “Performance and Limitation of Radio-Over-Fiber Network Using Standard WiMAX Signal”, *International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*, 2009, p. 1-4, Cairo, Apr. 2009.

[23] C.H. Yeh, C. W. Chow, Y. L. Liu, S. K. Wen, S. Y. Chen, C. R. Sheu, M. C. Tseng, J. L. Lin, D. Z. Hsu, and S. Chi, “Theory and Technology for Standard WiMAX Over Fiber in High Speed Train Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, p. 2327 – 2336, Aug. 2010.

[24] M. J. Crisp , S. Li , A. Wonfor , R. V. Penty and I. H. White, “Demonstration of a Radio over Fibre Distributed Antenna Network for Combined In-Building WLAN and 3G Coverage”, *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference*, p. 1-3, Anaheim, CA, Mar. 2007.

[25] Y. Josse, B. Fracasso, and P. Pajusco, “Model for Energy Efficiency in Rradio over Fiber Distributed Indoor Antenna Wifi Network”, *14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, p. 131-135, Oct. 2011.

[26] H. Li, J. Hajipour, A. Attar and V. C. M. Leung, “Efficient HetNet Implementation Using Broadband Wireless Access with Fibre-Connected

Massively Distributed Antennas Architecture", *IEEE Wireless Communication Magazine, Special Issue on HetNets*, vol. 18, no. 3, pp. 72-78, June 2011.

[27] Y. Hsueh, Z. Jia, H. Chien, A. Chowdhury, J. Yu, G. Chang, "Generation and Transport of Independent 2.4GHz(Wi-Fi), 5.8GHz(WiMAX), and 60-GHz Optical Millimeter-wave Signals on a Single Wavelength for Converged Wireless over Fiber Access Networks", *Conference on optical Fiber Communication (OFC)*, p.1-3, San Diego, CA, Mar. 2009.

[28] A. Al-Dulaimi, H. Al-Raweshidy, J. Cosmas and J. Loo, "Cognitive Mesh Networks", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.5, no.3, pp.54,60, Sept. 2010.

[29] A. Attar, H. Li, V. C. M. Leung and Q. Pang, "Cognitive Wireless Local Area Network over Fibers: Architecture, Research Issues and Testbed Implementation", *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no.6, pp.107-113, Jun. 2012.

[30] Y. Tawk, J.Costantine, S. Hemmady, G. Balakrishnan, K. Avery, and Christos G. Christodoulou, "Demonstration of a Cognitive Radio Front End Using an Optically Pumped Reconfigurable Antenna System (OPRAS)", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 2, Feb. 2012.

[31] R. Llorente, M. Morant, T. Tokle, T. Quinlan, M. Thakur and S. Walker, "UWB Radio-over-Fiber and Photonic Sensing for Cognitive Optical Access Networks", *IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings*, p.733-734, Belek-Antalya, Oct. 2009.

[32] H. Li, Q. Pang, and V. C. M. Leung, "Cognitive Access Points for Dynamic Radio Resource Management in Wireless LAN over Fiber", in Proc. *WWRF 20th meeting*, Ottawa, Canada, Apr. 2008.

[33] H. Zhang, H. Ji and X. Li, "RAU Allocation for Secondary Users in Cognitive WLAN over Fiber System: A HMM Approach", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, p. 1416-1421, Shanghai, Apr. 2012.

[34] B. Shan, H. Ji and Y. Li, "Centralized Compressed Sensing with Structurally Random Matrix in Cognitive WLAN over Fiber", *IEEE Wireless*

Communications and Networking Conference (WCNC), p. 106-111, Shanghai, April, 2013.

[35] W. Ge, H. Ji, X. Li and V.C.M. Leung, "Secondary User Access Based on Stochastic Link Estimation in Cognitive Radio with Fibre-Connected Distributed Antennas", *IET Communications*, vol. 7, no. 8, p. 731-737, May 2013.

[36] V. Sittakul and M. J. Cryan, "Photonic Active Integrated Antennas (PhAIAs) Using Lossless Matching for 2.4-GHz Wireless-over-Fibre Systems", *Conference on Lasers and Electro-Optics and 2 Conference on Quantum Electronics and Laser Science*, p. 1-2, San Jose, CA, May 2008.

[37] C. G. Christodoulou, Y.Tawk, S.A.Lane and S.R.Erwin "Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, p. 2250-2261, Jul. 2012.

[38] M. J. Cryan, M. Dragas, J. Kung, V. Jain, F. Fornetti, T. Houle, R. Varrazza, andM. Hill, "A 2.4 GHz wireless-over-fibre transceiver using photonic active integrated antennas (PhAIAs)", *Microwave and Optics Technology Letters*, vol. 48, no. 2, pp. 233–237, Feb. 2006.

[39] V. Sittakul, and M. J. Cryan, "A Fully Bidirectional 2.4 Ghz Wireless over Fibre System Using Photonic Active Integrated Antennas (PhAIAs)", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 11, p. 3358-3365, Nov. 2007.

[40] Y. Tawk, M. Bkassiny, G. El-Howayek, S. K. Jayaweera, and C. G. Christodoulou, "Reconfigurable Front-End Antennas for Cognitive Radio Applications", *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 5, no. 8, p. 985–992, Jun. 2011.

[41] IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications— Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. October, 2009.

[42] Wi-Fi CERTIFIED™ 802.11n draft 2.0: Longer-Range, Faster-Throughput, Multimedia-Grade Wi-Fi® Networks. Wi-Fi Aliance. 2007.

[43] I. F. Akyildiz, “NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey”, *Elsevier Computer Networks*, vol. 50, p. 2127-2159, Sep. 2006.

[44] S. Haykin, “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 23, no. 2, p. 201−220, Feb. 2005.

[45] W. Wang, “Spectrum Sensing for Cognitive Radio”, *Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops*, 2009.

[46] T. Fawcett, “An Introduction to ROC Analysis”, *Pattern Recognition Letters 27*, 861−874, Dec. 2006.

[47] R. A. A. Souza, A. A. Anjos, and D. A. Guimarães, “Simulation Platform for Performance Analysis of Cooperative Eigenvalue Spectrum Sensing with a Realistic Receiver Model under Impulsive Noise”. Book Chapter, *Vehicular Technologies – Deployment and Applications*, ISBN 978-953-51-0992-1. Intech, 2013.

[48] A. J. Cooper, “Fibre/Radio for the Provision of Cordless/Mobile Telephony Services in the Access Network”, *Electronics Letters*, vol. 26, no.24, p. 2054–2056, Nov. 1990.

[49] A. M. J. Koonen, and E. Tangdiongga, “Photonic Home Area Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 4, Feb. 2014.

[50] N. J. Gomes, M. Morant, A. Alphones, B. Cabon, J. E. Mitchell, C. Lithien, M. Csornyei, A. Stohr, and S. Iezekiel, “Radio-over-Fiber Transport for the Support of Wireless Broadband Services”, *Journal of Optical Networks*, vol. 8, no. 2, p. 156-177, Feb. 2009.

[51] A. Chowdhury, C. Hung-Chang, F. Shu-Hao, Y. Jianjun, and C. Gee-Kung, "Multi-Band Transport Technologies for In-Building Host-Neutral Wireless Over Fiber Access Systems", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, p. 2406-2415, 2010.

[52] M. P. Thakur, T. Quinlan, S. B. Ahmad Anas, D. K. Hunter, S. D. Walker, D. W. Smith, A. Borghesani and D. Moodie, “Triple-Format, UWB-WiFi-WiMax, Radio-Over-Fiber Co-Existence Demonstration Featuring Low-Cost 1308/1564

nm VCSELs and a Reflective Electro-Absorption Transceiver", *Conference on Optical Fiber Communication*, p. 1-3, San Diego, CA, Mar. 2009.

[53] R. Llorente, T. Alves, M. Morant, M. Beitran, J. Perez, A. Cartaxo and J. Marti "Ultra-Wideband Radio Signals Distribution in FTTH Networks", *IEEE Photononics Technology Letters*, vol. 20, no. 11, p. 945 -947, Jun. 2008.

[54] J. Guillory, S. Meyer, I. Siaud, A. Ulmer-moll, B. Charbonnier, A. Pizzinat, and C. Algani, "Radio-over-Fiber Architectures", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 30 -38, 2010.

[55] K. Xu, X. Sun, J. Yin, H. Huang, J. Wu, X. Hong, J. Lin, "Enabling ROF Technologies and Integration Architectures for In-Building Optical-Wireless Access Networks", *IEEE Photonics Journal*, vol. 2, no. 2, p. 102-112, 2010.

[56] D. G. Lona, "Implementação e Análise de Desempenho de Sistemas Rádio Sobre Fibra em Redes WSN e Wi-Fi", Dissertação de Mestrado, Unicamp, Março. 2012.

[57] "Optical Zonu OZ 816 Series". [Online]. Available at: http://www.opticalzonu.com/wp-content/uploads/downloads/2013/05/OZ816-V1.3.pdf/. [Accessed: 15-Feb-2014].

[58] C. H. Cox III, E. I. Ackerman, G. E. Betts and J. L. Prince, "Limits on the Performance of RF-over-Fiber Links and their Impact on Device Design", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 2, p. 906-920, Feb. 2006.

[59] E. I. Ackerman, and C. H. Cox, "RF Fiber-Optic Link Performance", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 2, no. 4, p. 50-58, Dec. 2001.

[60] C. H. Cox, III, "Analog Optical Link: Theory and Practice", Cambridge, U. K., Cambridge University Press, 2004.

[61] A. Das, M. Mjeku, A. Nkansah, and N. J. Gomes, "Effects on IEEE 802.11 MAC Throughput in Wireless LAN Over Fiber Systems", *Journal Of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 11, Nov. 2007.

[62] B. L. Dang and I. Niemegeers, "Analysis of IEEE 802.11 in Radio over Fiber Home Networks", *Proceedings of the IEEE Conference on Local Computer Networks, 30th Anniversary*, p. 744-747, Nov. 2005.

[63] J. Toulouse, “Optical Nonlinearities in Fibers: Review, Recent Examples, and Systems Applications”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no 11, Nov. 2005.

[64] W. C. Mok, S. H. Wong, K. M. Luk and K. F. Lee, “Single-Layer Single-Patch Dual-Band and Triple-Band Patch Antennas”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 8, p. 4341-4344, Aug. 2013.

[65] A. Khidre, Kai-Fong Lee, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, “Circular Polarization Reconfigurable Wideband E-Shaped Patch Antenna for Wireless Applications”, *IEEE Transactions on Antennas And Propagation*, vol. 61, no. 2, Feb. 2013.

[66] Arismar Cerqueira S. Junior, I. F. da Costa, L. T. Manera, and J. A. Diniz, “Optically Controlled E-Antenna for Cognitive and Adaptive Radio over Fiber Systems”, *IEEE Wireless Day*, p. 1-3, Valencia, Spain, Nov. 2013.

[67] Arismar Cerqueira S. Junior, I. F. da Costa, L. T. Manera, and J. A. Diniz, “Optically Controlled Reconfigurable Antenna Array based on E-shape elements”, to be published in the *International Journal of Antennas and Propagation*, April, 2014.

[68] “Hyperlog Antenna”. [Online]. Available at: http://www.aaronia.com/Datasheets/Antennas/LogPer_Antennas_HyperLOG6000.pdf/. [Accessed: 15-Feb-2014].

[69] A. Ghasemi and E. S. Sousa “Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges and design trade-offs”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, p.32 -39, Apr. 2008.

[70] K. Kim, Y. Xin, and S. Rangarajan, “Energy Detection Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio: An Experimental Study”, *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, p. 1-5, Miami, Dec. 2010.

[71] P. P. Hoseini, and N. C. Beaulieu, “Optimal Wideband Spectrum Sensing Framework for Cognitive Radio Systems”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 3, March 2011.

[72] Z. Ye, G. Memik, and J. Grosspietsch,“Energy detection using estimated noise variance for spectrum sensing in cognitive radio networks”, *Proceedings of*

IEE Wireless Communications and Networkings Conference, Las Vegas, Mar 2008.

[73] M. López-Benítez and F. Casadevall, "Improved Energy Detection Spectrum Sensing for Cognitive Radio", *IET Communications*, vol. 6, no. 8, May 2012.

[74] M. López-Benítez, F. Casadevall, and C. Martella, "Performance of spectrum sensing for cognitive radio based on field measurements of various radio technologies", *Proceedings of the 16th European Wireless Conference*, April 2010.

[75] "Laboratório WOCA". [Online]. Available at: http:// http://www.inatel.br/woca/. [Accessed: 15-Feb-2014].

[76] "NovaGenesis". [Online]. Available at: http://www.inatel.br/novagenesis/. [Accessed: 15-Feb-2014].

Apêndice I (Algoritmo Detecção de Energia Matlab)

Algoritmo de Sensoriamento para canais na banda de 2,4 GHz

```
%% Alogoritmo de Sensoriamento Espectral de Detecção de Energia
2,4GHz

wifi=zeros(12000,101); %incializando a matriz de amostras
wifi=dlmread ('C:\Users\Egidio Neto\Documents\MATLAB\\Medidas do
Espectro\Canal6_rofn.dat');
GdBwifi=zeros(1,101);
GdBwifi=dlmread ('C:\Users\Egidio
Neto\Documents\MATLAB\GanhoSistema2400.dat');
Noise=dlmread('C:\Users\Egidio
Neto\Documents\MATLAB\Ruido2400.dat');
f=0; %amostras na frequência
t=0; %amostras no tempo
l=0; %linhas da matriz wifi
c=0; % colunas da matriz wifi
bw=22; % amostras por canal
na=100; % n° total de amostras na frequência
nt=10000; % n° de amostras no tempo
ch = [1:1:11;2:5:52]; % canais e suas repectivas frequências
ch_ocup = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; % Canais wifi considerados livres
ou ocupados
f= wifi (1:1,1:(na+1)); % amostras na frequência
t=[0:1:nt]; %amostras no tempo 1001
lambida=0; %limiar de decisão

%% Subtraindo o ganho do sistema RoF e somando a atenuação do
Splitter

for l=2:1:nt+2
    for c=1:1:(na+1)
        wifi(l,c)=wifi(l,c)- GdBwifi(1,c);
    end
end

%% Plotando o gráfico tridimensional (Frequência, Tempo e Amplitude)

mesh (f,t,wifi(2:nt+2,1:(na+1)));

%% Criando a matriz de Potência das amostras em Watts

pw=zeros(nt+1,(na+1));

for l=2:1:nt+2% varrendo as linhas (Tempo)
    for c=1:1:(na+1) % varrendo as colunas (Frquência)
        pw(l-1,c)=((10.^(wifi(l,c)/10))*1e-3);
    end
end


%% Criando a matriz de Potência do ruído em Watts
```

```
pwn=zeros((nt+1),(na+1));


    for c=1:1:11 % varrendo as colunas (Frquência)
        pwn(1,c)=((10.^(Noise(1,c)/10))*1e-3);
    end

%% Calculando a potência média em cada canal em cada amostra

l=0;
c=0;

pwch=zeros(nt+1,11); %Potência em Watts de cada canal
pwchdbm=zeros(nt+1,11); %Potência em dBm de cada canal

for l=1:1:nt+1
    for c=1:1:11
        cch=ch (2,c);
        pwch (l,c) = mean (pw(l:l,cch:cch+21));
        pwchdbm (l,c) = 10*log10(pwch(l,c)/1e-3);
    end
end

%% Calculando a Potência média em cada canal tomando N amostras no
tempo

N=5; %quantidade de amostras tomadas no tempo
N_pts=1000;%Numero de pontos de limiar
limiar_max=15;%limiar máximo
limiar_min=0;%limiar minimo
pwch2=zeros((nt/N),11);% Potência media em watts do canal tomando N
amostras no tempo para tomada de decisão
pwch2dbm=zeros((nt/N),11);% Potência media em dBm do canal tomando N
amostras no tempo para tomada de decisão
Tde=zeros((nt/N),11);% Estatística de teste
chstatus_final=zeros((nt/N),11); %Matriz de ocupação do canal
(0=livre e 1=ocupado)
Pfa=zeros(N_pts,11); %Probabilidade de Falso Alarme
Pd=zeros(N_pts,11); %Probabilidade de Detecção
Pmd=zeros(N_pts,11); %Probabilidade de falha na detecção
Psh=zeros(N_pts,11); %Probabilidade de "spectrum hole"
chstatus_count=zeros(1,11); %Contador de eventos, conta o número de
vezes que o canal foi considerado ocupado

%% Calculando os novos valores de limiar (Escala linear)

for i=1:N_pts

    limiar2(i)=limiar_max-((limiar_max-limiar_min)/N_pts)*i;

end

%% Calculando os valores de limiar utilizados (Escala logarítimica)

for i = 1 : N_pts
```

```
    limiar(i) = log(i) / log(N_pts) * (limiar_min - limiar_max) +
limiar_max;

end

%% Calculando para cada valor de limiar o status do canal

for lb=1:1:N_pts
    lambida=limiar2(lb);
for s=2:1:((nt/N)+1)
    for chn=1:1:11
        pwch2(s-1,chn)=mean(pwch((((s-2)*N)+1):(((s-2)*N)+N),chn));
        Tde(s-1,chn)=pwch2(s-1,chn)/pwn(1,chn);
        if (Tde(s-1,chn)<=lambida)
            chstatus_final(s-1,chn)=0;
        else
            chstatus_final(s-1,chn)=1;
        end
    end
end

%% Calculando as Probabilidades
for s=2:1:((nt/N)+1)
    for chn=1:1:11
        chstatus_count (1,chn) = sum (chstatus_final(:,chn));
        if (ch_ocup(1,chn)==1) % Dado que o canal esta ocupado
determina-se Probabilidade de detecção e Probabilidade de falha na
detecção
            Pd (lb,chn) = (chstatus_count (1,chn))/(nt/N);
            Pmd (lb,chn)= (((nt/N)-(chstatus_count
(1,chn)))/(nt/N));

        else %Dado que o canal está livre determina-se a
probabilidade de Falso alarme e a probabilidade de spectrum hole
            Pfa (lb,chn)= (chstatus_count (1,chn))/(nt/N);
            Psh (lb,chn)= (((nt/N)-(chstatus_count
(1,chn)))/(nt/N));

        end
    end
end
end
```

Algoritmo de Sensoriamento para canais na banda de 5 GHz

```
%% Alogoritmo de Sensoriamento Espectral de Detecção de Energia 5
GHz

wimax=zeros(12000,801); %incializando a matriz de amostras
wimax=dlmread ('C:\Users\Egidio Neto\Documents\MATLAB\Medidas do
Espectro\Canal48_Rof_n.dat');
GdBwimax=zeros(1,801);
GdBwimax=dlmread ('C:\Users\Egidio
Neto\Documents\MATLAB\GanhoSistema5100.dat');
Noise=dlmread('C:\Users\Egidio Neto\Documents\MATLAB\Medidas do
Espectro\Ruido5100.dat');
f=0; %amostras na frequência
t=0; %amostras no tempo
l=0; %linhas da matriz wifi
c=0; % colunas da matriz wifi
bw=22; % amostras por canal
bw=22; % amostras por canal
na=800; % n° total de amostras na frequência
ch= [34 36 38 40 42 44 46 48 52 56 60 64 100 104 108 112 116 120 124
128 132 136 140 149 153 157 161 165; 61 71 81 91 101 111 121 131 151
171 191 211 391 411 431 451 471 491 511 531 551 571 591 636 656 676
696 716; 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1];
ch_ocup = [0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
% Canais wifi considerados livres ou ocupados
f= wimax (1:1,1:801); % amostras na frequência
t=[0:1:10000]; %amostras no tempo 10001
lambida=0;

%% Subtraindo o ganho do sistema RoF e somando a Atenuação do
Splitter

for l=2:1:10002
    for c=1:1:(na+1)
        wimax(l,c)=wimax(l,c)- GdBwimax(1,c);
    end
end

%% plotando o gráfico tridimensional (Frequência, Tempo e Amplitude)

mesh (f,t,wimax(2:10002,1:(na+1)));

%% Criando a matriz de Potência em Watts

l=0; %linhas da matriz
c=0; % colunas da matriz
pw=zeros(10001,801);

for l=2:1:10002% varrendo as linhas (Tempo)
    for c=1:1:801 % varrendo as colunas (Frquência)
        pw(l-1,c)=((10.^(wimax(l,c)/10))*1e-3);
    end
end
```

```
%% Criando a matriz de Potência do ruído em Watts

pwn=zeros(10001,(na+1));


    for c=1:1:11 % varrendo as colunas (Frequência)
        pwn(1,c)=((10.^(Noise(1,c)/10))*1e-3);
    end

%% Calculando a potência média em cada canal em cada amostra

l=0;
c=0;

% Inicializando as matrizes de potência média dos canais wifi

pwch=zeros(10001,28);%Potência em Watts
pwchdbm=zeros(10001,28); %Potência em dBm

for l=1:1:10001
    for c=1:1:28
        cch=ch (2,c);
        pwch (l,c) = mean (pw(l:l,cch:cch+21));
        pwchdbm (l,c) = 10*log10(pwch(l,c)/1e-3);
    end
end

%% Calculando a Potência média em cada canal tomando N amostras no
tempo

N=5; %quantidade de amostras tomadas no tempo
N_pts=1;%Numero de pontos de limiar
limiar_max=-70;%limiar máximo
limiar_min=-75;%limiar minimo
pwch2=zeros((10000/N),28); %Potência media em watts do canal tomando
N amostras no tempo para tomada de decisão
pwch2dbm=zeros((10000/N),28); % Potência media em dBm do canal
tomando N amostras no tempo para tomada de decisão
chstatus_final=zeros((10000/N),28); %Matriz de ocupação do canal
Tde=zeros((10000/N),28);% Estatística de teste
Pfa=zeros(N_pts,28); %Probabilidade de Falso Alarme
Pd=zeros(N_pts,28); %Probabilidade de Detecção
Pmd=zeros(N_pts,28); %Probabilidade de falha na detecção
Psh=zeros(N_pts,28); %Probabilidade de "spectrum hole"
chstatus_count=zeros(1,28); %Contador de eventos, conta o número de
vezes que o canal foi considerado ocupado

%% Calculando os novos valores de limiar (Escala linear)

for i=1:N_pts

    limiar2(i)=limiar_max-((limiar_max-limiar_min)/N_pts)*i;

end
```

```
%% Calculando os valores de limiar utilizados (Escala logaritimica)

for i = 1 : N_pts

    limiar(i) = log(i) / log(N_pts) * (limiar_min - limiar_max) +
limiar_max;

end

%% Calculando para cada valor de limiar o status do canal

for lb=1:1:N_pts
    lambida=limiar2(lb);
for s=2:1:((10000/N)+1)
    for chn=1:1:28
        pwch2(s-1,chn)=mean(pwch((((s-2)*N)+1):(((s-2)*N)+N),chn));
        Tde(s-1,chn)=pwch2(s-1,chn)/pwn(1,chn);
        if (Tde(s-1,chn)<=lambida)
            chstatus_final(s-1,chn)=0;
        else
            chstatus_final(s-1,chn)=1;
        end
    end
end

%% Calculando as probabilidades

for s=2:1:((100000/N)+1)
    for chn=1:1:28
        chstatus_count (1,chn) = sum (chstatus_final(:,chn));
        if (ch_ocup(1,chn)==1) % Dado que o canal esta ocupado
determina-se Probabilidade de detecção e Probabilidade de falha na
detecção
            Pd (lb,chn) = (chstatus_count (1,chn))/(10000/N);
            Pmd (lb,chn)= (((10000/N)-(chstatus_count
(1,chn)))/(10000/N));

        else %Dado que o canal está livre determina-se a
probabilidade de Falso alarme e a probabilidade de spectrum hole
            Pfa (lb,chn)= (chstatus_count (1,chn))/(10000/N);
            Psh (lb,chn)= (((10000/N)-(chstatus_count
(1,chn)))/(10000/N));

        end
    end
end
end
```

Apêndice II (Algoritmo implementado em Python)

Programa Sensing.py

```
#!/bin/env python
#### CONFIG ####
SPECTRAN_LOC = "/opt/aaronia/bin/spectran"
SWEEP_SIZE = 10

## 2.4GHz
SWEEP_SIZE_24GHZ = SWEEP_SIZE
GAIN_DATA_24GHZ = "GanhoSistema2400.csv"
#NOISE_DATA_24GHZ = "Ruido2400.csv"
NOISE_FLOOR_24GHZ = -100

## 5.8GHz
SWEEP_SIZE_58GHZ = SWEEP_SIZE
GAIN_DATA_58GHZ = "GanhoSistema5100.csv"
#NOISE_DATA_58GHZ = "Ruido5100.csv"
NOISE_FLOOR_58GHZ = -110
BW_58GHZ = 20 # set to 20 or 40
CHANN_58GHZ = [36, 40, 44, 48, 120, 124, 128, 149, 153, 157, 161,
165]
CHANF_58GHZ = [5180, 5200, 5220, 5240, 5600, 5620, 5640, 5745, 5765,
5785, 5805, 5825]

#### END CONFIG. Do not touch below! ####
import os
import sys
import subprocess
from math import log
from time import ctime
import zmq

CMD_CONFIG_24GHZ = SPECTRAN_LOC + " set AntennaType=-1 CableType=-1
Preamplifier=1 ResolutionBandwidth=1 VideoBandwidth=1
StartFrequency=2400 StopFrequency=2499.999756 SweepTime=200
SweepFrequencyPoints=100"
CMD_SWEEP_24GHZ = SPECTRAN_LOC + " sweep " + str(SWEEP_SIZE_24GHZ)
NCHAN_24GHZ = 11
#lambida24 = -80

CMD_CONFIG_58GHZ = SPECTRAN_LOC + " set AntennaType=-1 CableType=-1
Preamplifier=1 ResolutionBandwidth=1 VideoBandwidth=1
StartFrequency=5100 StopFrequency=5900 SweepTime=200
SweepFrequencyPoints=800"
CMD_SWEEP_58GHZ = SPECTRAN_LOC + " sweep " + str(SWEEP_SIZE_58GHZ)
NCHAN_58GHZ = len(CHANN_58GHZ)
#lambida58 = -80

try:
    fg = file(GAIN_DATA_24GHZ, "r")
    sg = fg.readline()
    gstrdata = sg.replace("\r", "").replace("\n", "").split(";")
    g24dbmdata = [float(d) for d in gstrdata] # convert to float
except IOError:
    print "ERROR: Could not open " + GAIN_DATA_24GHZ
```

```
    sys.exit()

try:
    fg = file(GAIN_DATA_58GHZ, "r")
    sg = fg.readline()
    gstrdata = sg.replace("\r", "").replace("\n", "").split(";")
    g58dbmdata = [float(d) for d in gstrdata] # convert to float
except IOError:
    print "ERROR: Could not open " + GAIN_DATA_58GHZ
    sys.exit()

try:
    fg = file(NOISE_DATA_24GHZ, "r")
    sg = fg.readline()
    nstrdata = sg.replace("\r", "").replace("\n", "").split(";")
    n24dbm = [float(d) for d in nstrdata] # convert to float
except IOError:
    print "ERROR: Could not open " + NOISE_DATA_24GHZ
    sys.exit()
except NameError:
    n24dbm = [NOISE_FLOOR_24GHZ for i in range(NCHAN_24GHZ)]

try:
    fg = file(NOISE_DATA_58GHZ, "r")
    sg = fg.readline()
    nstrdata = sg.replace("\r", "").replace("\n", "").split(";")
    n58dbm = [float(d) for d in nstrdata] # convert to float
except IOError:
    print "ERROR: Could not open " + NOISE_DATA_58GHZ
    sys.exit()
except NameError:
    n58dbm = [NOISE_FLOOR_58GHZ for i in range(NCHAN_58GHZ)]


FNULL = open(os.devnull, 'w')

context = zmq.Context()
socket = context.socket(zmq.PUB)
socket.bind("tcp://*:5556")

try:
    while True:
        print "Sensing 2.4GHz..."
        subprocess.check_call(CMD_CONFIG_24GHZ, shell=True,
stderr=FNULL, stdout=FNULL)
        lines = subprocess.check_output(CMD_SWEEP_24GHZ, shell=True,
stderr=FNULL)
        flines = []
        chanpwr = [0 for d in range(NCHAN_24GHZ)] # zero channel
power data
        freqdata = False
        for line in lines.split("\n"):
            if len(line) and line[0] != "#":
                if not freqdata:
                    freqdata = True
                    continue
                strdata = line.split(';')[:-1]
                dbmrawdata = [float(d) for d in strdata] # convert
to float
```

```
                dbmdata = [s-g for s,g in zip(dbmrawdata,
g24dbmdata)]
                lindata = [0.001*10**(d/10) for d in dbmdata] #
convert to linear
                for chan in range(NCHAN_24GHZ):
                    chanpwr[chan] += reduce(lambda x, y: x + y,
lindata[(1+5*chan):][:23]) / 23
        chanpwr = [p/SWEEP_SIZE_24GHZ for p in chanpwr]
        chandb = [10*log(p/0.001)/log(10) for p in chanpwr]
#         chanfree = [False for d in range(NCHAN_24GHZ)] # init
channel "freedom" data
#         for i in range(NCHAN_24GHZ):
#             if chandb[i] < lambida24:
#                 chanfree[i] = True;
        best_ch = min(xrange(len(chanpwr)), key=chanpwr.__getitem__)
        best_pwr = chanpwr[best_ch]

        best_ch_index_24 = best_ch

        print ctime()
        for c in chandb:
            print("%.2f" % c),
        print ""
#         print chanfree
        print "Best channel is", str(best_ch+1), "with power",
"%.2f" % chandb[best_ch], "dBm."
        best_ch24 = best_ch+1
        power_ch24 = chandb[best_ch]
        print ""

        print "Sensing 5.8GHz..."
        subprocess.check_call(CMD_CONFIG_58GHZ, shell=True,
stderr=FNULL, stdout=FNULL)
        lines = subprocess.check_output(CMD_SWEEP_58GHZ, shell=True,
stderr=FNULL)
        flines = []
        chanpwr = [0 for d in range(NCHAN_58GHZ)] # zero channel
power data
        freqdata = False
        for line in lines.split("\n"):
            if len(line) and line[0] != "#":
                if not freqdata:
                    freqdata = True
                    continue
                strdata = line.split(';')[:-1]
                dbmrawdata = [float(d) for d in strdata] # convert
to float
                dbmdata = [s-g for s,g in zip(dbmrawdata,
g58dbmdata)]
                lindata = [0.001*10**(d/10) for d in dbmdata] #
convert to linear
                for chan in range(NCHAN_58GHZ):
                    chanpwr[chan] += reduce(lambda x, y: x + y,
lindata[CHANF_58GHZ[chan]-5101-BW_58GHZ/2:][:BW_58GHZ+3]) /
(BW_58GHZ+3)
        chanpwr = [p/SWEEP_SIZE_58GHZ for p in chanpwr]
        chandb = [10*log(p/0.001)/log(10) for p in chanpwr]
#         chanfree = [False for d in range(NCHAN_58GHZ)] # init
channel "freedom" data
```

```
#         for i in range(NCHAN_58GHZ):
#             if chandb[i] < lambida58:
#                 chanfree[i] = True;
        best_ch = min(xrange(len(chanpwr)), key=chanpwr.__getitem__)
        best_pwr = chanpwr[best_ch]

        print ctime()
        for c in chandb:
            print("%.2f" % c),
        print ""
#         print chanfree
        print "Best channel is", str(CHANN_58GHZ[best_ch]), "with
power", "%.2f" % chandb[best_ch], "dBm."
        print ""
        best_ch58 = CHANN_58GHZ[best_ch]
        power_ch58 = chandb[best_ch]

        best_ch_index_58 = best_ch

#         if (power_ch24 - NOISE_FLOOR_24GHZ) < (power_ch58 -
NOISE_FLOOR_58GHZ):
        if (power_ch24 - n24dbm[best_ch_index_24]) < (power_ch58 -
n58dbm[best_ch_index_58]):
            best_of_them_all = best_ch24
        else:
            best_of_them_all = best_ch58

        print "Best channel is", str(best_of_them_all)
        print ""

#         socket.send("channel %d" % (best_ch24)) # use only 2.4GHz
band
        socket.send("channel %d" % (best_of_them_all)) # use both
bands

except subprocess.CalledProcessError:
    print "ERROR: Spectran not found!"
```

Programa Muda.py

```
import sys
import zmq
import subprocess
import time
import os

IP_AP = "192.168.60.27"
IP_CLIENT = "192.168.1.231"

NPINGS = 5

NTESTS = 5

#  Socket to talk to server
context = zmq.Context()
socket = context.socket(zmq.SUB)
socket.connect ("tcp://localhost:5556")
socket.setsockopt(zmq.SUBSCRIBE, "channel")

print "Aguardando publicacao do canal..."
string = socket.recv()
data = string.split()
ch = int(data[1])
if ch > 11:
    mode = 'a'
else:
    mode = 'g'
print "Recebido canal %d, mode %c. Aplicando..." % (ch, mode)

try:
    subprocess.check_call("sshpass -p 123 ssh root@" + IP_AP + "
/chanset %d %c" % (ch, mode), shell=True)
except subprocess.CalledProcessError:
    print "ERROR: Cannot reach AP!"
    sys.exit()

print "Aguardando cliente..."

for i in range(NPINGS):
    ret = os.system("ping -c 1 " + IP_CLIENT)
    if ret == 0:
        break

if ret:
    print "Cliente morreu."
    sys.exit()

print "Cliente reconectado, rodando iperf..."

for i in range(NTESTS):
    ret = os.system("iperf -c "  + IP_CLIENT +" -u -b 100000000 |
grep -A 1 Report ")
```