



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Microondas e Óptica

**Implementação e Análise de Desempenho de Sistemas Rádio Sobre
Fibra em Redes WSN e Wi-Fi**

Autor: Daniel Grandin Lona

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa

Co-orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

Campinas, SP

Março de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE – UNICAMP

L84i	<p>Lona, Daniel Grandin Implementação e Análise de Desempenho de Sistemas Rádio Sobre Fibra em Redes WSN e Wi-Fi / Daniel Grandin Lona. - -Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientadores: Hugo Enrique Hernández Figueroa, Arismar Cerqueira Sodré Junior. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Redes de sensores sem fio. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Fotônica. 4. Comunicação por fibra óptica. 5. Microondas - Sistemas de comunicação. I. Hernández Figueroa, Hugo Enrique. II. Sodré Junior, Arismar Cerqueira. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.</p>
------	---

Título em Inglês: Implementation and Performance Analysis of Radio over Fiber Systems in WSN and Wi-Fi networks

Palavras-chave em Inglês: Wireless sensor networks, Wireless communication systems, Photonics, Optical fiber communication, Microwaves - Communication systems

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Antonio Justino Ribeiro, Júlio César Rodrigues Fernandes de Oliveira

Data da defesa: 20-03-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Daniel Grandin Lona

Data da Defesa: 20 de março de 2012

Título da Tese: "Implementação e Análise de Desempenho de Sistemas Rádio Sobre Fibra em Redes WSN e Wi-Fi"

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior (Presidente):

Prof. Dr. José Antonio Justino Ribeiro:

Dr. Júlio César Rodrigues Fernandes de Oliveira:

The image shows three horizontal lines representing signature lines. The first line has a blue ink signature that appears to be 'Arismar Sodré Junior'. The second line has a blue ink signature that appears to be 'José Antonio Justino Ribeiro'. The third line has a blue ink signature that appears to be 'Júlio César Rodrigues Fernandes de Oliveira'. The signatures are written in a cursive, stylized font.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades de ensinamento em minha vida. A sabedoria é um grande presente e devemos sempre ser gratos pelos desafios e superações que vivemos diariamente.

Agradeço a minha família, minha mãe Carmen e meu pai Flávio, que sempre me educaram com muito carinho e me ensinaram os verdadeiros valores da vida.

Agradeço a minha namorada, Juliana, por todo o apoio, carinho e atenção nesta fase tão importante de nossas vidas. Ju, você é um anjo que está na minha vida e sempre irei te amar e respeitar. Te amo!

Agradeço ao Prof. Hugo Enrique Hernández Figueroa pela oportunidade de trabalhar com os renomados grupos do FOTONICOM e CePOF na elaboração de diversas pesquisas, principalmente com as fibras de cristais fotônicos. Forte abraço Prof. Hugo!

Ao Prof. Dr. Hugo L. Fragnito por ceder gentilmente o Laboratório de Fibras Ópticas no Departamento de Eletrônica Quântica no Instituto de Física Gleb Wataghin. Forte abraço Prof. Fragnito!

Agradeço a toda equipe do FOTONICOM e CePOF pelo apoio e colaboração ao longo destes anos de mestrado. Um forte abraço a todos!

Agradeço ao Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Jr. pelos vários conselhos, ensinamentos e oportunidades oferecidas nesta longa jornada da minha forma o profissional, tornando-se um exemplo de líder, profissional e determina o. Obrigado por tudo Prof. Arismar!

Agradeço ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho pelas oportunidades oferecidas de trabalhar com redes de sensores sem-fio e os conselhos motivadores, mostrando que sempre devemos ser otimistas. Forte abraço Prof. Branquinho!

Agradeço a empresa R4F Tecnologia em Telecomunicações LTDA por disponibilizar gentilmente os equipamentos de rádio sobre fibra e a infraestrutura para a realização dos experimentos desta dissertação.

Agradeço ao grande amigo e conselheiro, Raphael Montali Assumpção, pela ajuda nos experimentos com redes de sensores sem-fio e Wi-Fi na PUC-Camp. Forte abraço Montali!

Agradeço toda ajuda financeira oferecida pela CAPES e FOTONICOM ao longo destes anos de mestrado.

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade da tecnologia Radio sobre Fibra (*Radio over Fiber – RoF*) em redes de sensores sem-fio (*Wireless Sensor Networks – WSNs*) e Wi-Fi. Inicialmente, realizou-se uma detalhada análise analítica de desempenho dos sistemas em função dos parâmetros típicos de equipamentos RoF, tais como: frequência de operação, figura de ruído, ruído de intensidade relativa do laser, ruído *shot* do fotodetector, ruído térmico e modulação óptica. Os sistemas analisados foram então implementados em laboratório nas faixas de frequência de 915 MHz e 2,4 GHz para WSN e Wi-Fi, respectivamente. Os parâmetros de desempenho medidos foram a indicação de intensidade de sinal recebida (*Received Signal Strength Indication – RSSI*), taxa de perda de pacotes (*Packet Error Rate – PER*) e vazão (*Throughput*).

Palavras chaves: Rede de sensores sem-fio, Sistemas de comunicação sem fio, Fotônica, Comunicação por fibra óptica e Microondas – Sistemas de comunicação.

Abstract

This work aims to evaluate the applicability of Radio over Fiber (RoF) technology in Wireless Sensor Networks (WSNs) and Wi-Fi networks. Initially, the system performance has been analytically evaluated as a function of diverse parameters from RoF pieces of equipment, such as: operation frequency, noise figure, relative intensity noise, *shot* noise of photodetector, thermal noise and optical modulation. Furthermore, the proposed RoF systems were experimentally implemented in laboratory at 915 MHz and 2.4 GHz bands for WSN and Wi-Fi, respectively. The performance metrics were Received Signal Strength Indication (RSSI), Packet Error Rate (PER) and throughput.

Keywords: Wireless sensor networks, Wireless communication systems, Photonics, Optical fiber communication and Microwaves - Communication systems

Lista de Publicações

Periódicos

- [1] D. G. Lona, R. M. Assumpção, O. C. Branquinho, M. L. F. Abbade, H. E. Hernandez Figueroa, and Arismar Cerqueira S. Jr., “Implementation and Performance Investigation of Radio-over-Fiber Systems in Wireless Sensor Networks”. Submetido à *Microwave and Optical Technology Letters*, Feb, 2012.
- [2] D. G. Lona, Arismar Cerqueira S. Jr., H. E. Hernandez Figueroa, G. Stefanini, and H. L. Fragnito, “Applicability of low macrobending loss hollow-core PCF to FTTH applications”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, vol. 10, pp. 251-258, Jun. 2011.
- [3] Arismar Cerqueira S. Jr., D. G. Lona, I. de Oliveira, H. E. Hernandez Figueroa, and H. L. Fragnito, “Broadband single-polarization guidance in hybrid photonic crystal fibers”, *Optics Letters*, vol. 36, p. 133, Jan. 2011.

Congressos

- [1] Arismar Cerqueira S. Jr. A. R. do Nascimento Jr., D. G. Lona, H. E. Hernandez Figueroa, Marcos A. R. Franco, and H. L. Fragnito, “Polarization analysis across different photonic bandgaps of Hybrid Photonic Crystal Fibers”, *IQEC/CLEO Pacific Rim 2011, 2011, Sydney. Proceedings of IQEC/CLEO Pacific Rim 2011*, 2011.
- [2] D. G. Lona, Arismar Cerqueira S. Jr., R. M. Assumpção, O. C. Branquinho, M. L. Abbade, and H. E. Hernandez Figueroa, “Investigation of noise sources in radio-over-fiber system for Wi-Fi applications”, *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference 2011 IMOC 11’*, Natal – Brasil, Oct. 2011.
- [3] R. M. Assumpção, D. G. Lona, O. C. Branquinho, M. L. F. Abbade, and Arismar Cerqueira S. Jr., “Impact Evaluation of Radio-over-Fiber Technology in Wireless Sensor Networks,” *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference 2011 IMOC 11’*, Natal – Brasil, Oct. 2011.

- [4] D. G. Lona, G. Stefanini, Arismar Cerqueira S. Jr., H. E. Hernandez Figueroa, and H. L. Fragnito, “Macrobends effects in single-mode guidance for hollow-core fibers”, *MOMAG 2010 14º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, Vila Velha – Brasil, Aug. 2010.
- [5] D. G. Lona, Arismar Cerqueira S. Jr., G. Stefanini, H. E. Hernandez Figueroa, and H. L. Fragnito, “Polarization Dependent Loss in Hybrid Photonic Crystal Fibers”, *MOMAG 2010 14º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, Vila Velha – Brasil, Aug. 2010.
- [6] Arismar Cerqueira S. Jr. D. G. Lona, L. M. Fontes, and H. L. Fragnito, “Single-polarization State Hybrid Photonic Crystal Fiber”, *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2010)*, Turin - Italy, Sep. 2010.

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de publicações	vii
Sumário	ix
Glossário	xi
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xv
CAPÍTULO 1 Introdução	1
CAPÍTULO 2 Sistemas rádio sobre fibra	5
2.1 Arquitetura e aplicações	5
2.2 Transmissores ópticos	9
2.3 Técnicas de modulação em sistemas RoF.....	11
2.3.1 Modulação direta.....	11
2.3.2 Modulação externa	14
2.4 Técnicas de multiplexação em sistemas RoF	17
2.4.1 Multiplexação por subportadoras de RF	17
2.4.2 Multiplexação por divisão de comprimento de onda	18
2.5 Fibras ópticas.....	20
2.6 Receptores ópticos	22
CAPÍTULO 3 Análise de desempenho em sistemas RoF	24
3.1 Frequência de operação	24
3.2 Ganho de RF	25
3.3 Fontes de ruído	28
3.3.1 Ruído de intensidade relativa do laser.....	29
3.3.2 Ruído de <i>shot</i> do fotodetector	30
3.3.3 Ruído térmico.....	31
3.4 Faixa dinâmica de operação	33
3.5 Metodologia de projeto RoF	37
CAPÍTULO 4 Implementação de sistemas RoF em redes de sensores sem-fio	41
4.1 Redes de sensores sem-fio	41

4.2	Arquitetura WSN-RoF	43
4.3	Implementação	45
4.3.1	Raio de cobertura da nuvem.....	51
4.4	Resultados experimentais	53
CAPÍTULO 5	Implementação de sistemas RoF em redes Wi-Fi.....	59
5.1	Redes Wi-Fi	59
5.2	Arquitetura Wi-Fi-RoF	61
5.3	Setup e análise de desempenho	63
5.4	Resultados experimentais	67
CAPÍTULO 6	Conclusões e trabalhos futuros.....	71
	Referências bibliográficas.....	74

Glossário

3G	<i>3rd Generation of Mobile Communication</i> – 3º geração de comunicação móvel
4G	<i>4th Generation of Mobile Communication</i> – 4º geração de comunicação móvel
APD	<i>Avalanche Photodiode</i> – fotodetector do tipo avalanche
BER	<i>Bit Error Rate</i> – taxa de erro de bits
CATV	<i>Cable Television</i> – TV a cabo
CW	<i>Continuous Wave</i> – onda contínua
DCF	<i>Dispersion Compensating Fiber</i> – fibra compensadora de dispersão
DFB	<i>Distributed Feedback laser</i> – laser de realimentação distribuída
DO	Divisor óptico
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EAM	<i>Electro-absorption modulator</i> – modulador de eletro-absorção
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> – amplificador de fibra dopada a érbio
EIN	<i>Equivalent Input Noise</i> – ruído equivalente de entrada
ERB	Estação de Rádio Base
ESA	<i>Electrical Spectrum Analyzer</i> – analisador de espectro elétrico
Fi-Wi	<i>Fiber-Wireless</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> – chaveamento por desvio de frequência
FTTH	<i>Fiber-to-the-Home</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communication</i>
IMD3	<i>3rd order intermodulation</i> – intermodulação de 3º ordem
IOT	<i>Internet of Things</i> – internet das coisas
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i> – amplificador de baixo ruído
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i> – controle de acesso ao meio
MEMS	<i>Microelectromechanical systems</i> – sistemas Micro-Eleto-Mecânicos
MMF	<i>Multimode optical fiber</i> – fibra multimodo
MWP	<i>MicroWave Photonics</i> – fotônica de microondas
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i> – modulador Mach-Zehnder
NF	<i>Noise Figure</i> – figura de ruído

OIL	<i>Optical Injection Locking</i> – travamento por injeção óptica – radio frequência
PA	<i>Power Amplifier</i> – amplificador de potência
PER	<i>Packet Error Rate</i> – taxa de perda de pacotes
POF	<i>Plastic Optical Fiber</i> – fibra óptica polimérica
RAU	<i>Remote Antenna Unit</i> – unidade de antena remota
RIN	<i>Relative Intensity Noise</i> – ruído de intensidade relativa do laser
RoF	<i>Radio over Fiber</i> – rádio sobre fibra
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i> – indicação de intensidade do sinal recebido
SCM	<i>Subcarrier Multiplexing</i> – multiplexação por subportadoras
SFDR	<i>Spurious-free dynamic range</i> – faixa dinâmica de operação livre de espúrios
SMF	<i>Singlemode optical fiber</i> – fibra monomodo
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> – relação sinal-ruído
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VCSEL	<i>Vertical-cavity surface-emitting laser</i> – laser com cavidade vertical de emissão
VoIP	<i>Voice over IP</i> – voz sobre IP
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i> – rede de sensores sem-fio

Lista de figuras

Fig. 2.1: Sistema RoF.....	pág. 6
Fig. 2.2: Distribuição e aplicações da tecnologia RoF.....	pág. 7
Fig. 2.3: Modulação direta.....	pág. 11
Fig. 2.4: Banda de modulação x corrente de alimentação.....	pág. 13
Fig. 2.5: Parâmetros em lasers semicondutores.....	pág. 14
Fig. 2.6: Modulação externa.....	pág. 15
Fig. 2.7: Estrutura do modulador Mach-Zehnder.....	pág. 16
Fig. 2.8: Multiplexação por subportadoras em sistemas RoF.....	pág. 18
Fig. 2.9: Sistemas DWDM-RoF.....	pág. 19
Fig. 2.10: Fibras ópticas em sistemas RoF.....	pág. 20
Fig. 2.11: Corrente de saturação x frequência de operação em fotodiodos.....	pág. 23
Fig. 3.1: Casamento de impedância resistivo do laser semiconductor em sistemas RoF com modulação direta.....	pág. 26
Fig. 3.2: Casamento de impedância resistivo do fotodetector em sistemas RoF com modulação direta.....	pág. 27
Fig. 3.3: EIN x perda óptica em sistemas RoF resistivos.....	pág. 29
Fig. 3.4: Circuito equivalente das fontes de ruído em sistemas RoF.....	pág. 32
Fig. 3.5: Variação das harmônicas conforme a potência de RF na entrada do sistema.....	pág. 34
Fig. 3.6: Técnica de duas portadoras: medição da IMD3 e SFDR.....	pág. 35
Fig. 3.7: Gráfico da SFDR por meio da IMD3.....	pág. 36
Fig. 3.8: Metodologia de projeto RoF.....	pág. 38
Fig. 3.9: Solução para o exemplo descrito.....	pág. 40
Fig. 4.1: Rede de sensores sem-fio.....	pág. 42
Fig. 4.2: Sensor sem-fio alimentado por bateria.....	pág. 42
Fig. 4.3: Arquitetura WSN-RoF.....	pág. 44
Fig. 4.4: Sistema WSN-RoF: monitoramento de energia eólica.....	pág. 45
Fig. 4.5: Equipamentos RoF: a) OpticalZonu OZ810; b) PPM ViaLite.....	pág. 46
Fig. 4.6: Variação da NF conforme o RIN nos RoF em 915 MHz.....	pág. 47
Fig. 4.7: EIN x perda óptica no RoF 1.....	pág. 48
Fig. 4.8: EIN x perda óptica no RoF 2.....	pág. 48

Fig. 4.9: Ganho de RF no RoF 1	pág. 50
Fig. 4.10: Ganho de RF no RoF 2	pág. 50
Fig. 4.11: EIN x Pr x raio de cobertura	pág. 52
Fig. 4.12: Setups experimentais WSN-RoF	pág. 54
Fig. 4.13: Setup experimental: 1-Câmara de isolamento, 2-Carretel de fibra, 3-Câmara de isolamento, 4-Sistema RoF, 5-Sensor sem-fio, 6-Atenuador variável.....	pág. 55
Fig. 4.14: Resultados experimentais WSN-RoF	pág. 56
Fig. 4.15: Raio de cobertura dos sistemas WSN-RoF.....	pág. 57
Fig. 5.1: Crescimento de <i>hotspots</i> no mundo.....	pág. 60
Fig. 5.2: Acesso por dispositivos em <i>hotspots</i>	pág. 61
Fig. 5.3: Aplicação da arquitetura Wi-Fi-RoF em ambientes <i>indoor</i>	pág. 62
Fig. 5.4: Setup experimental Wi-Fi-RoF.....	pág. 63
Fig. 5.5: Setup experimental: 1-Cliente, 2- Câmara de isolamento, 3-Sistema RoF, 4- Roteador, 5-Servidor, 6-Analisador de espectro.....	pág. 64
Fig. 5.6: NF x RIN em 2.4 GHz.....	pág. 65
Fig. 5.7: EIN x perda óptica no RoF 1	pág. 66
Fig. 5.8: EIN x perda óptica no RoF 2	pág. 67
Fig. 5.9: PER x RSSI nos sistemas Wi-Fi-RoF.....	pág. 68
Fig. 5.10: Vazão x RSSI nos sistemas Wi-Fi-RoF	pág. 69

Lista de tabelas

Tabela 4.1: Parâmetros dos sistemas RoF em 915 MHz.....	pág.46
Tabela 4.2: RSSI dos setups WSN-RoF em 915 MHz.....	pág.53
Tabela 5.1: Parâmetros dos sistemas RoF em 2.4 GHz.....	pág.64

CAPÍTULO 1

Introdução

Nas últimas décadas, as comunicações ópticas têm evoluído de forma significativa, impulsionando o crescimento das telecomunicações e da internet. O marco inicial desta evolução foi à invenção do laser em 1960 [1] e posteriormente a fabricação da primeira fibra óptica com baixa atenuação [2] em 1970. Essas tecnologias viabilizaram o desenvolvimento de novos dispositivos e técnicas de transmissão, tais como os amplificadores ópticos a fibra dopada a érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifiers* – EDFAs) [3] e a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM), os quais permitiram o aumento de capacidade e alcance das redes ópticas, resultando em maiores taxas de transmissão e expansão da rede mundial de computadores [4].

Em paralelo, a evolução da eletrônica também tem sido importante na difusão da internet, principalmente após a invenção dos microprocessadores [5], o que possibilitou a criação dos computadores pessoais. Atualmente, são mais de um bilhão de computadores no mundo e espera-se que este número dobre até 2014 [6]. No Brasil, calcula-se que existirão mais de 98 milhões em 2012, chegando aos 140 milhões até 2014 [7]. Em 2010, segundo o ministério das comunicações, o Brasil tinha pelo menos um computador em 39% das residências em áreas urbanas; dentre os quais, 31% possuíam acesso à internet [8]. O acesso à internet tornou-se um importante indicador de desenvolvimento de um país, como mostra um estudo realizado pelo Banco Mundial, o qual afirma que para cada acréscimo de dez pontos percentuais no número de conexões, o Produto Interno Bruto (PIB) é elevado em 1,3 % [9].

Neste contexto, em 2010, o governo brasileiro lançou o Plano Nacional de Banda Larga (PNBL) que tem como objetivo expandir o acesso à internet para mais de 39,8 milhões de domicílios até 2014, oferecendo velocidade de conexão de 1 Mbps [8]. Além disso, serão

investidos mais de R\$ 70 bilhões no setor de telecomunicações até 2016, sendo grande parte destinada à criação de novas infraestruturas para atender a demanda da Copa do Mundo e Jogos Olímpicos em 2014 e 2016, respectivamente [10].

Por outro lado, sistemas de comunicação móvel estão crescendo rapidamente graças à miniaturização dos processadores, permitindo a fabricação de celulares pequenos, multifuncionais e com conectividade à internet, o que tem transformado-os em importantes dispositivos assim como os computadores pessoais [11]. No Brasil, em 2000, existiam 23 milhões de celulares, enquanto que em 2011 este número aumentou para 243 milhões, um crescimento de 1056% em apenas dez anos [12]. Adicionalmente, recentemente, a Ericsson afirmou que o fluxo de dados nestas redes será dez vezes maior até 2016, igualando-se ao tráfego dos computadores pessoais [13].

Para suportar toda esta demanda, tanto nas redes móveis como fixas, o governo brasileiro pretende oferecer conectividade em banda larga por meio de diferentes tecnologias, como 3G, 4G e estender o *backbone* óptico com a reativação da Telebrás [8]. Até 2014, todas as doze cidades sedes da Copa do Mundo terão conectividade 4G [14]. A tecnologia 4G utiliza portadoras em altas frequências para realizar a transmissão em banda larga, o que reduz a área de cobertura quando comparado com as redes atuais de telefonia celular. Ou seja, torna-se necessário a instalação de diversas estações rádio base (ERBs) para cobrir-se à mesma região, o que eleva o custo operacional e a interferência eletromagnética entre as estações.

Uma possível e eficiente solução para estes problemas é o uso da tecnologia de rádio sobre fibra [15-17] (*Radio over Fiber - RoF*), a qual realiza a convergência entre as redes ópticas e sem-fio. Sistemas RoF ou ainda Fi-Wi (*Fiber-Wireless* [18]) compõem uma das vertentes da área de *MicroWave Photonics* (MWP) [15, 16], área intensamente explorada, a qual visa realizar a distribuição de sinais em microondas [19,20] e ondas milimétricas [21] por meio de enlaces ópticos. A transmissão de informação nestes sistemas baseia-se na modulação da portadora óptica com os sinais de radiofrequência (RF) oriundos de um ou mais sistemas de comunicação [17,22]. Sistemas RoF caracterizam-se pela simplificação das ERBs, centralização do processamento e gerenciamento da rede, sendo estas realizadas em uma estação central (EC). Além disso, a utilização da fibra óptica trás consigo inúmeras vantagens, tais como: baixa atenuação (0,2

dB/km), grande largura de banda (50 THz), imunidade a interferência eletromagnética, fácil instalação e manutenção, redução no consumo de energia, capacidade de operar com multi-operadoras (compartilhamento de infraestrutura) e multisserviços em uma única fibra [17]. Algumas aplicações da tecnologia RoF incluem a implementação de redes de sensores sem-fio [23], distribuição de redes Wi-Fi em ambientes *indoor* e *outdoor* [24], redes WiMAX [25-29] e radioastronomia [30-32]. Entretanto, a área que mais movimentou o mercado de sistemas RoF é a de telefonia móvel com frequências de até 6 GHz.

Por outro lado, os transmissores ópticos utilizados em sistemas RoF são, em sua maioria, constituídos por lasers semicondutores de realimentação distribuída (*Distributed Feedback Lasers* - DFBs), pois estes apresentam uma ótima combinação entre potência de emissão, banda de modulação e linearidade [33]. No entanto, esforços estão sendo conduzidos no desenvolvimento de transmissores ópticos de baixo custo, com desempenho igual ou superior aos DFBs, principalmente nas janelas de 1300 e 1500 nm. Lasers semicondutores sem controle de temperatura [34] e com cavidade vertical de emissão foram demonstrados [35], o que pode viabilizar a aplicação da tecnologia RoF na distribuição de sinais em redes de acesso, tanto em ambientes *indoor* como *outdoor*. Apesar destes avanços, ainda existe muita dúvida sobre qual será a tecnologia usada nas redes de acesso do futuro. Uma interessante alternativa é a distribuição de mini ERBs, proposta pela Alcatel-Lucent em parceria com os Laboratórios Bell, chamada LightRadio. Tais ERBs apresentam formato de um pequeno “cubo”, os quais possuem baixo consumo de energia e custo de instalação, permitindo a comunicação de sinais em banda larga para telefonia móvel [36].

O objetivo desta dissertação é avaliar a aplicabilidade da tecnologia RoF em redes de sensores sem-fio (*Wireless Sensor Networks* – WSNs) e Wi-Fi. Inicialmente, realizou-se uma detalhada análise analítica de desempenho dos sistemas em função dos parâmetros típicos de equipamentos RoF, tais como: frequência de operação, figura de ruído, ruído de intensidade relativa do laser, ruído *shot* do fotodetector, ruído térmico e tipo de modulação óptica. Os sistemas analisados foram então implementados em laboratório nas faixas de frequência de 915 MHz e 2,4 GHz para WSN e Wi-Fi, respectivamente. Os parâmetros de desempenho utilizados foram: indicação de

intensidade de sinal recebida (*Received Signal Strength Indication* – RSSI), taxa de perda de pacotes (*Packet Error Rate* – PER) e vazão (*Throughput*).

A dissertação está organizada em seis capítulos. O Capítulo 2 apresenta as recentes aplicações da tecnologia RoF e descreve as técnicas de modulação, multiplexação e os dispositivos utilizados na criação de sistemas RoF. Já o Capítulo 3 apresenta a análise de desempenho para sistemas com modulação direta e externa e uma metodologia de projeto para especificação de um sistema RoF. Em seguida, o Capítulo 4 descreve as WSNs e demonstra a aplicabilidade do sistema RoF nestas redes utilizando quatro diferentes arquiteturas WSN-RoF operando em 915 MHz. No Capítulo 5, a arquitetura Wi-Fi-RoF é avaliada analiticamente e experimentalmente na banda de 2,4 GHz por meio de dois setups. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e discute os trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Sistemas rádio sobre fibra

2.1 Arquitetura e aplicações

Em sistemas de comunicação sem-fio convencionais, como os de telefonia celular, as funções de processamento, conversão de frequência, modulação e multiplexação são realizadas na ERB. Por outro lado, em sistemas RoF [15-17,22], enlaces ópticos são utilizados para distribuir os sinais da EC até uma unidade de antena remota (*Remote Antenna Unit* – RAU), o que permite a centralização das funções de processamento e gerenciamento. Além disso, a ERB é simplificada, uma vez que ela fica somente responsável pela conversão opto - elétrica e amplificação do sinal de RF. [15,16,22]. A figura 2.1 mostra a configuração típica de um sistemas RoF. Primeiramente, no canal de *downlink*, o sinal de RF é usado para modular a portadora óptica, a qual é posteriormente transmitida por um enlace de fibra até a ERB. Na ERB, o sinal é então recuperado por um fotodiodo PIN e amplificado por um amplificador de potência (*Power Amplifier* - PA) antes de ser irradiado pela antena.

No canal de *uplink*, o sinal recebido pela antena é amplificado por um amplificador de baixo ruído (*Low Noise Amplifier* - LNA), uma vez que o sinal produzido pelo usuário apresenta relação sinal ruído (*Signal Noise Ratio* – SNR) muito inferior ao canal de *downlink* devido às limitações de potência de transmissão e distância da ERB. Em seguida, o sinal recebido pela antena é utilizado para modular outra portadora óptica, transmitindo o sinal de volta para a EC. É importante ressaltar que fotodiodos do tipo avalanche (*Avalanche Photodiode* – APD) não são aplicados em sistemas RoF devido ao grande ruído gerado durante o processo de fotodeteção, o que pode distorcer o sinal, afetando o desempenho do sistema de comunicação.

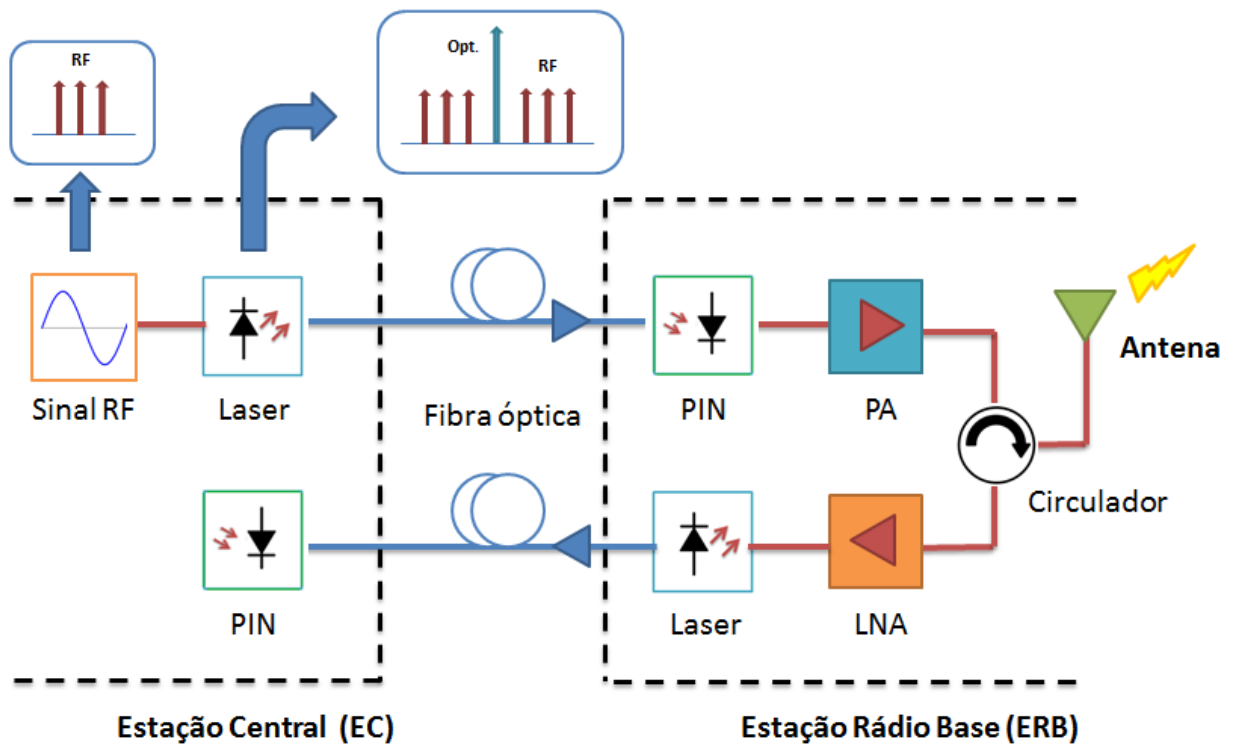


Fig. 2.1: Sistema RoF.

Sistemas RoF podem ser aplicados em soluções de última milha, expansão da área de cobertura, redução de regiões de sombra, distribuição de sinais Wi-Fi em ambientes *indoor* e *outdoor* [17,18,23], interconexão de ERBs e na distribuição de internet banda larga sem-fio [17, 25-29], figura 2.2.

As principais vantagens desta tecnologia é o compartilhamento de infraestrutura e a simplificação da ERB, o que permite a instalação de várias antenas remotas. A instalação de várias antenas juntamente com a arquitetura centralizada permite a alocação dinâmica de recursos [17]. Ou seja, é possível redirecionar recursos ociosos de uma região para outra com alta demanda. Como exemplo, no período da manhã, a banda ociosa em residências pode ser direcionada para regiões empresariais e vice-versa [37]. Além disso, o sistema RoF é transparente aos padrões de comunicação sem-fio, sendo compatível com as tecnologias GSM [38], UMTS [39], rede de sensores sem-fio [23], Wi-Fi [40-43] e WiMAX [25-29].

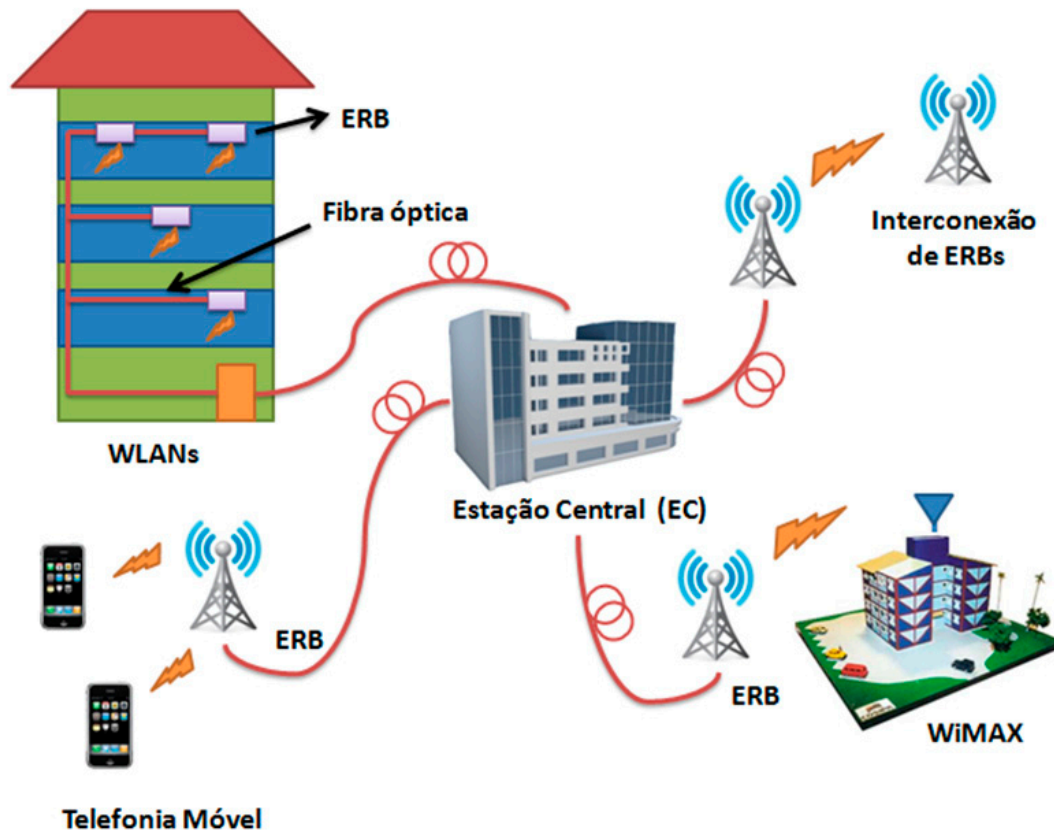


Fig. 2.2: Distribuição e aplicações da tecnologia RoF.

Entretanto, sistemas RoF são fundamentalmente analógicos. Portanto, penalidades no sinal geradas por ruídos e distorções são importantes e devem ser consideradas, sendo elas responsáveis pela figura de ruído e faixa dinâmica de operação. Como exemplo, a faixa dinâmica de operação é um importante parâmetro em sistemas celulares, uma vez que a potência de RF que chega até a ERB apresenta variações de potência que podem atingir até 80 dB. Desta forma, o sistema RoF deve ser o mais linear possível. Além disso, sistemas RoF apresentam fontes de ruído, as quais incluem o ruído de intensidade relativa do laser, ruído *shot* de fotodetector e ruído térmico. A soma destas fontes define a figura de ruído do sistema RoF. Por fim, deve-se também considerar a dispersão cromática da fibra, uma vez que ela é responsável por limitar a distância máxima de transmissão conforme a frequência da portadora de RF [40]. Estas desvantagens serão novamente abordadas e descritas no capítulo 3.

Sistemas RoF estão comercialmente disponíveis por meio de várias empresas, tais como: Linear Photonics, MaxCom, PPM ViaLite, Finisar, PhotonicsSystems, OpticalZonu, FoxCom, MicrowavePhotonics System, Fiber-Span, DAS Photonics, Pharad, Zinwave e COMMSCOPE. Como exemplo de aplicação, recentemente, a empresa COMMSCOPE realizou o projeto e a instalação de um sistema de antenas distribuídas para a transmissão de sinais UMTS em 900/1800 MHz nos estádios de futebol da Copa do Mundo de 2010, sendo este sistema também compatível com os padrões de comunicação sem-fio LTE e WiMAX [44].

Além deste projeto, outras duas importantes aplicações em andamento no âmbito mundial são o WEIRD [27] e o ALMA [31]. O projeto WEIRD (*WiMAX Extension to Isolated Research Data Networks*) tem por objetivo realizar a distribuição de sinais WiMAX com frequências entre 3,4 e 3,6 GHz para monitoramento de erupções vulcânicas, aplicações em tele medicina e testes de comunicação com Voz-sobre-IP (VoIP). Já o projeto ALMA (*Atacama Larger Millimeter/submillimeter Array*) visa à criação de um arranjo de antenas para aplicação em radioastronomia, o qual está sendo construído no deserto do Atacama, no Chile. Este projeto é uma cooperação internacional, envolvendo diversos centros de pesquisas espalhados em quatro continentes. O objetivo é monitorar partículas e moléculas presentes no sistema solar e em outras galáxias, obtendo informações importantes sobre a formação das estrelas e planetas. No total, serão 66 antenas operando na faixa de ondas milimétricas interconectadas por meio da tecnologia RoF.

No contexto brasileiro, a tecnologia RoF foi recentemente aplicada no projeto *Brazilian Decimetric Array* (BDA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [32]. O projeto BDA, localizado em Cachoeira Paulista – SP é financiado pela FAPESP, está em fase final e tem a finalidade de observar e estudar o comportamento do sol e de grandes estrelas da galáxia. O arranjo é um interferômetro em forma de “T” composto atualmente por 26 antenas parabólicas com cerca de 4,0 metros de altura, as quais estão conectadas a uma central de controle através da tecnologia RoF.

2.2 Transmissores ópticos

O transmissor óptico tem a função de converter o sinal de RF para o domínio óptico por meio da conversão eletro-óptica (E/O). Geralmente, sistemas RoF utilizam laser semicondutores que operam na região de 1300 e 1500 nm, devido às vantagens de transmissão na fibra nestas regiões, tais como: baixa dispersão e atenuação, respectivamente. Aplicações na janela de 850 nm também são possíveis, porém a alta atenuação (cerca de 3 dB/km) limita sua aplicação para a distribuição de sinais em ambientes *indoor* por meio de lasers de baixo custo [45].

A maioria dos transmissores RoF comerciais utilizam a técnica de modulação direta no processo de conversão em virtude da simplicidade, eficiência e baixo custo [46]. Além disso, lasers semicondutores são a principal fonte de luz em sistemas RoF, uma vez que estes dispositivos são pequenos, operam em temperatura ambiente, possuem estreita largura de linha, níveis ideais de potência óptica e linearidade e disponibilidade nas três principais janelas transmissão (800, 1300 e 1500 nm). Dentre as estruturas de laser semicondutor, a com realimentação distribuída (DFB) é a mais utilizada, uma vez que ela apresenta ótima combinação das características descritas anteriormente [47]. No entanto, lasers DFB são relativamente caros devido ao processo de fabricação e encapsulamento [48].

Desta forma, novas estruturas estão sendo desenvolvidas visando à criação de lasers mais eficientes e com baixo custo de fabricação. Neste contexto, lasers semicondutores com cavidade vertical de emissão (*Vertical Cavity Surface Emitting Lasers* - VCSELs) [35] têm evoluído significativamente nas últimas décadas, tornando-se uma solução atraente para transmissores RoF. No entanto, ainda existem algumas limitações que impedem o seu uso, tais como: pequena banda de modulação, baixa potência óptica de emissão, poucos dispositivos capazes de operar em 1300 e 1500 nm, baixa linearidade e elevado ruído de intensidade relativa do laser (*Relative Intensity Noise* – RIN) [35].

Tais características são importantes em transmissores ópticos com modulação direta, como será visto no Capítulo 3. Por exemplo, a linearidade define a máxima potência de RF que pode ser inserida junto à corrente de alimentação do laser sem que o processo de modulação crie produtos de intermodulação ou harmônicas no canal de RF. Por outro lado, o RIN define a figura

de ruído em sistemas RoF sem amplificação. Apesar destas limitações, pesquisadores acreditam que o VCSEL será uma das principais fontes ópticas em transmissores do futuro, graças as suas vantagens, tais como: baixo custo de fabricação, baixo consumo de energia e maior eficiência de acoplamento com a fibra [35].

Atualmente, lasers DFB podem ser modulados diretamente com frequências de até 37 GHz em 1550 nm, enquanto VCSELS a banda de modulação é de até 7 GHz [16]. No entanto, a utilização da técnica de travamento por injeção óptica (*Optical Injection Locking – OIL*) [40,49] permite aprimorar vários parâmetros do laser, transformando fontes ópticas de baixo custo, como VCSELS, em dispositivos com maior banda de modulação, RIN reduzido e com estreita largura de linha [40,50-52]. Porém, esta técnica apresenta algumas desvantagens. Primeiramente, é necessário o uso de dois lasers, sendo um denominado de mestre e o outro de escravo. O mestre é um laser com estreita largura de linha e alta potência de emissão, enquanto o escravo apresenta baixa potência óptica de emissão e grande largura de linha. Desta forma, a OIL consiste em utilizar um circulador óptico para acoplar a potência de saída do laser mestre na cavidade do laser escravo, aumentando a população de fótons coerentes na região ativa e alterando a fase e frequência do laser escravo para igual ao do laser mestre [39,50]. O principal problema da OIL é que o travamento óptico entre os lasers ocorre somente em uma estreita faixa de sintonia, portanto a frequência de emissão entre os lasers deve se próxima [38]. Experimentos demonstraram a extensão da banda de modulação em lasers DFB de 37 GHz para 72 GHz [53], enquanto no VCSEL este valor foi de 7 GHz para 50 GHz, todos operando na banda de 1500 nm [54].

Portanto, transmissor óptico é um dos dispositivos mais importantes em sistemas RoF, uma vez que diferentes fontes ópticas podem ser aplicadas na sua construção. A escolha do diodo laser irá depender das características de desempenho desejadas para o sistema de comunicação sem-fio, tais como: linearidade e frequência de operação. Na prática, transmissores RoF comerciais são, em sua maioria, compostos por lasers DFB que operam com modulação direta, possuem bandas de modulação de até 12 GHz, potência óptica de emissão de 6 dBm e RIN variando entre -130 e -155 dB/Hz.

2.3 Técnicas de modulação em sistemas RoF

Em sistemas RoF, duas técnicas são amplamente utilizadas em transmissores ópticos na conversão do sinal elétrico para o domínio óptico: a modulação direta [20,22,34,55] e a modulação externa [56,57]. O estudo da modulação em sistema RoF é importante porque cada técnica apresenta diferentes penalidades no sistema [56]. A seguir, são definidos os principais parâmetros para cada tipo de modulação.

2.3.1 Modulação direta

Na modulação direta, o sinal de RF é diretamente aplicado à corrente de alimentação do laser, modulando em intensidade a potência óptica de saída [56,58-60]. A principal vantagem desta técnica é a simplicidade, o que permite a criação de transmissores ópticos de baixo custo, sendo amplamente aplicada em dispositivos comerciais. Entretanto, sistemas que operem com esta modulação são limitados pela banda de modulação do laser semiconductor [56,58-60] e o efeito de alargamento espectral ou *chirp* [51,61].

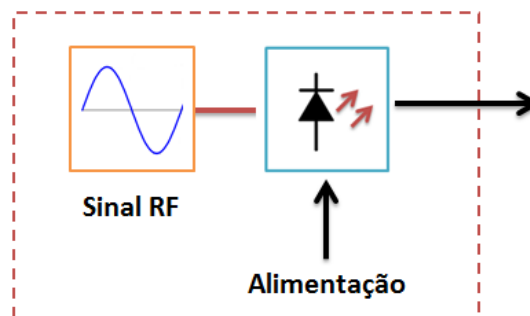


Fig. 2.3: Modulação direta.

Em lasers semicondutores, a modulação direta produz uma modulação de fase indesejada, chamado de *chirp*. Este efeito ocorre devido à variação no fluxo de elétrons, o que altera o índice de refração do material, produzindo diferentes componentes no domínio óptico e alargando o espectro. Este efeito quando combinado com a dispersão cromática da fibra reduz a capacidade do sistema de comunicação [51,61].

O *chirp* é proporcional ao fator de acoplamento amplitude-fase α_{eff} . Valores elevados de α_{eff} resultam em lasers com grande largura de linha, sendo que este parâmetro depende das propriedades do material e da estrutura do laser. Por exemplo, para um laser semiconductor do tipo Fabry-Perot (FP) operando sem modulação, a largura de linha é dada por [61]:

$$\Delta\nu = \frac{1}{4\pi P} n_{sp}(1 + \alpha_{eff}^2) h\nu \frac{\log(1/R)}{\tau_p \tau_{rt}} \quad (2.1)$$

onde P é a potência óptica de emissão, n_{sp} é o fator de emissão espontânea, α_{eff} é o fator de acoplamento de amplitude-fase do laser, h é a constante de Planck, ν é a frequência óptica de emissão, R é a refletividade das faces no diodo laser, τ_p é o tempo de vida do fóton na cavidade e τ_{rt} é a atraso de ida e volta do fóton na região ativa. No entanto, quando o laser é diretamente modulado, a variação da largura de linha é obtida por [61]:

$$\Delta\nu_{max} = \frac{\alpha_{eff} m f_m}{2} \quad (2.2)$$

onde $\Delta\nu_{max}$ é a variação máxima na largura de linha do laser, m é o índice de modulação de intensidade e f_m é a frequência do sinal de RF. Tipicamente, m varia entre 0 a 1 e f_m de 0 a 20 GHz [61]. Outros parâmetros importantes em transmissores RoF com modulação direta são: banda de modulação do laser, janela óptica de transmissão, RIN, corrente de alimentação, eficiência de conversão e potência óptica de saída [56,58-60]. Para exemplificar, a figura 2.4 ilustra a variação da banda de modulação do laser conforme a corrente de alimentação, mostrando que quanto maior a corrente de alimentação maior é a banda de modulação. Entretanto, esta relação implicada em duas penalidades: maior consumo de energia e redução da vida útil do laser [62].

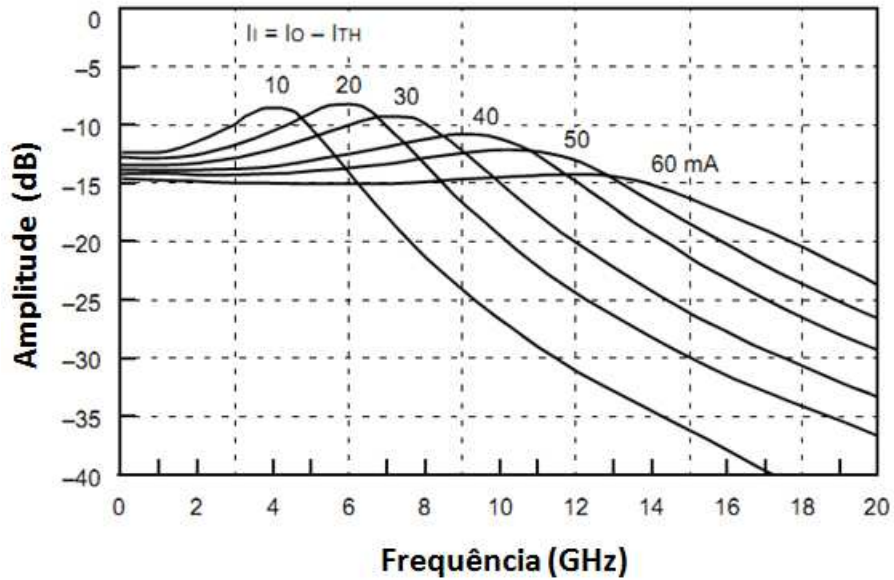


Fig. 2.4: Banda de modulação x corrente de alimentação (extraído de [62]).

Por outro lado, a eficiência de conversão do laser determina a capacidade do diodo em converter elétrons em fótons, parâmetro o qual é dado em W/A e sendo facilmente calculada por [22,58-60]:

$$s_l = \frac{P_{opt}}{I_{LD}} \quad (2.3)$$

onde P_{opt} é a potência óptica na saída do laser em watts (W) e I_{LD} é a corrente de alimentação em ampères (A). O cálculo da eficiência de conversão do laser é ilustrado pela figura 2.5a, enquanto a figura 2.5b ilustra a variação deste parâmetro conforme a temperatura do diodo. Lasers DFB estão comercialmente disponíveis com eficiências que variam entre 0,1 a 0,32 W/A [58], sendo que foi demonstrado experimentalmente eficiências acima de 0,4 W/A em 1310 nm [63]. Já os VCSELs oferecem alta eficiência de conversão devido à redução da região ativa, o que permite a criação de diodos com baixa corrente de alimentação [35,55]. Tipicamente, VCSELs apresentam corrente de alimentação entre 2-5 mA [35,55,64], enquanto em DFBs este valor é de 40-60 mA [62]. Apesar desta vantagem, VCSELs apresentam baixa potência óptica de emissão, chegando a níveis 1 mW em 1550 nm [35,55,64]. Entretanto, recentes avanços na eficiência de

conversão, banda de modulação e RIN, podem transformar VCSELs em fontes ópticas para sistemas RoF em um futuro próximo [65].

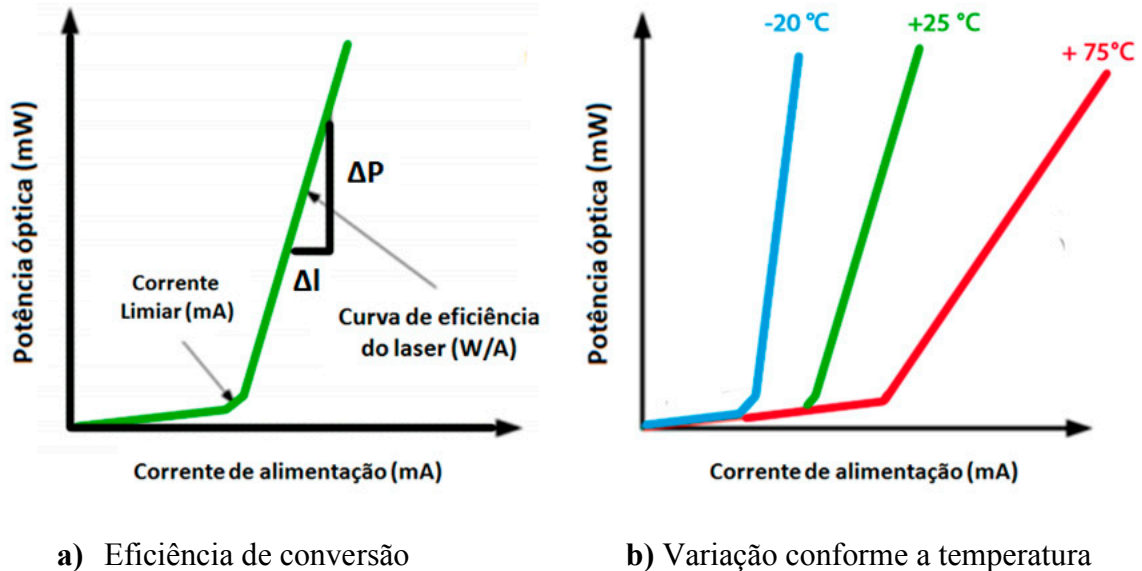


Fig. 2.5: Parâmetros em laser semicondutores.

A máxima eficiência obtida em VCSELs é de 0,61 W/A [66], existindo modelos comercialmente disponíveis na faixa de 1500 nm com eficiência de 0,3 W/A e corrente de alimentação de 5 mA [64]. A maior banda de modulação obtida nestes lasers é de 36 GHz em 997 nm [67], enquanto que em 1500 nm, estes diodos estão disponíveis com bandas de até 3 GHz [64]. Portanto, os principais fatores que devem ser considerados no desenvolvimento de um transmissor RoF com modulação direta são: eficiência de conversão, corrente de alimentação, RIN, banda de modulação e largura de linha [58,60].

2.3.2 Modulação externa

A técnica de modulação externa [56-59] consiste em utilizar um modulador externo para realizar a conversão eletro-óptica (E/O) do sinal de RF. Esta técnica tem sido amplamente aplicada em sistemas RoF que trabalham em altas frequências, como exemplo, em aplicações de ondas milimétricas. Nestes transmissores, a fonte óptica é mantida em regime de onda contínua (*Continuous Wave – CW*), ou seja, a corrente de alimentação do laser é fixa, enquanto o

dispositivo externo realiza o processo de modulação da portadora óptica por meio do sinal de RF, figura 2.6. As principais vantagens desta técnica são: maior banda de modulação, eficiência de conversão, linearidade e suporte a altos níveis de potência óptica. Ao contrário da modulação direta, a eficiência de conversão neste transmissor depende do nível de potência óptica do laser semiconductor [58-60]. Além disso, uma vez que a fonte óptica opera em modo CW, a banda de modulação do laser, importante parâmetro em transmissores ópticos com modulação direta, torna-se desprezível, sendo a potência óptica e o RIN os principais fatores a serem considerados [58].

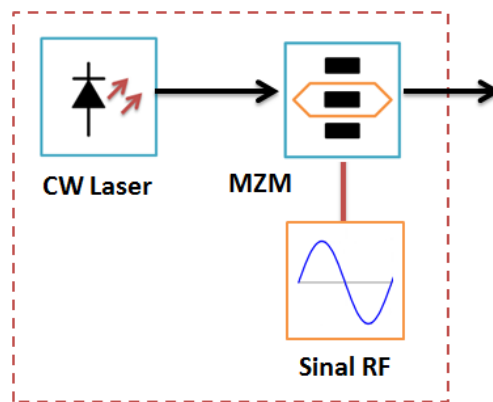


Fig. 2.6: Modulação externa.

Transmissores ópticos com modulação externa também podem utilizar lasers de estado-sólido, os quais apresentam estreita largura de linha, alta potência óptica e baixo RIN (-165 dB/Hz), sendo considerados uma fonte ideal para este tipo de modulação [68]. Entretanto, a janela de transmissão, tamanho e preço destes lasers inviabilizam o seu uso em escala comercial, preferindo-se os lasers semicondutores, principalmente os DFB com alta potência de emissão [69]. Moduladores externos também apresentam diferentes estruturas, sendo o modelo baseado no interferômetro de Mach-Zehnder o mais aplicado [57-60]. Entretanto, moduladores que utilizam o efeito de eletro-absorção (*Electro-Absorption Modulators* - EAMs) também podem ser aplicados. A principal vantagem dos EAMs é que eles podem ser integrados ao laser semiconductor, criando transmissores ópticos compactos com modulação externa [57-60].

Moduladores Mach-Zehnder (MZM) são feitos com niobato de lítio [57], material inorgânico, o qual apresenta ótima combinação entre perda de inserção, sensibilidade eletro-óptica, potência de saturação e linearidade [59,60]. O princípio de funcionamento deste dispositivo baseia-se na aplicação de um campo elétrico, o qual altera o índice de refração do niobato de lítio. Na entrada do modulador, o sinal da fonte óptica CW é igualmente dividido por meio de um guia de onda monomodo composto por dois “braços” que estão paralelamente dispostos. Em seguida, o eletrodo, próximos a um dos guias, gera um campo elétrico que altera o índice de refração do material, alterando a velocidade de propagação no guia e induzindo a mudança de fase do sinal óptico em relação ao outro guia, fig. 2.7 [59,60].

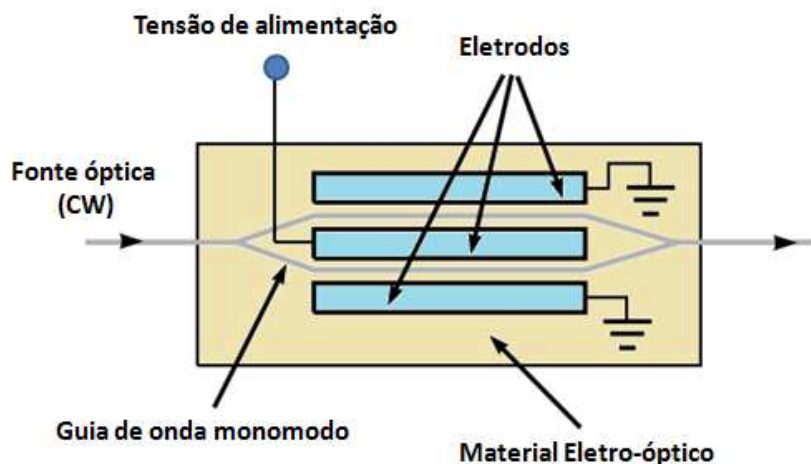


Fig. 2.7: Estrutura do modulador Mach-Zehnder.

Para a condição de nenhuma tensão aplicada, o sinal óptico obtido na saída do modulador não apresenta padrão de interferência construtiva e destrutiva, pois não existe diferença de fase. No entanto, quando um determinado valor de tensão é aplicado em um dos “braços”, a fase é alterada, criando uma interferência construtiva e destrutiva na saída do modulador e a variação de intensidade da portadora óptica. A tensão necessária para criar uma diferença de fase de 180° ou π radianos é chamada de V_π , sendo este um dos parâmetros mais importantes no MZM [58-60]. Além disso, este parâmetro é utilizado no cálculo de eficiência de conversão em transmissores ópticos com modulação externa. Como exemplo, dispositivos comerciais apresentam valores de V_π entre 2 e 15V, sendo que o recorde experimental é de 0,35V [59,60].

A eficiência de conversão do modulador externo é dada por [58-60]:

$$s_m = \frac{\pi T_{FF} P_o R_m}{2V_\pi} \quad (2.4)$$

onde T_{FF} é a perda óptica de inserção, P_o é a potência óptica na entrada do modulador e R_m é a impedância de entrada. A equação 2.4 mostra que altos valores de eficiência podem ser obtidos utilizando-se lasers com alta potência de emissão e baixos valores de V_π . Tipicamente, estes moduladores apresentam perda de inserção de 3 a 5 dB, sendo grande parte oriunda do acoplamento entre o guia monomodo e a fibra óptica, cerca de 2 a 4 dB. Adicionalmente, a eficiência destes transmissores varia entre 0,06 a 70 W/A [60] e com banda de modulação de até 70 GHz [59]. Resumindo, os principais parâmetros que devem ser considerados na criação destes transmissores são: potência óptica do laser, RIN, largura de linha, perda de inserção do modulador e o V_π [58-60].

2.4 Técnicas de Multiplexação em sistemas RoF

2.4.1 Multiplexação por subportadoras de RF

A multiplexação por subportadoras (*Sub Carrier Multiplexing* - SCM) [70,71] tem por objetivo combinar diferentes subportadoras de RF em uma única portadora óptica. A vantagem da SCM é que ela permite o aumento de capacidade do sistema de forma simples e eficiente, pois um único laser pode transmitir simultaneamente vários sinais de RF, os quais podem ser analógicos e/ou digital. Uma aplicação de sucesso da SCM é a distribuição de sinais em sistemas de TV a cabo (CATV) [72]. Nestes sistemas, as frequências das subportadoras, após a modulação estão localizadas em $f_0 \pm f_{SPn}$, onde f_0 é a frequência da portadora óptica e f_{SPn} a frequência da subportadora de número n , figura 2.8.

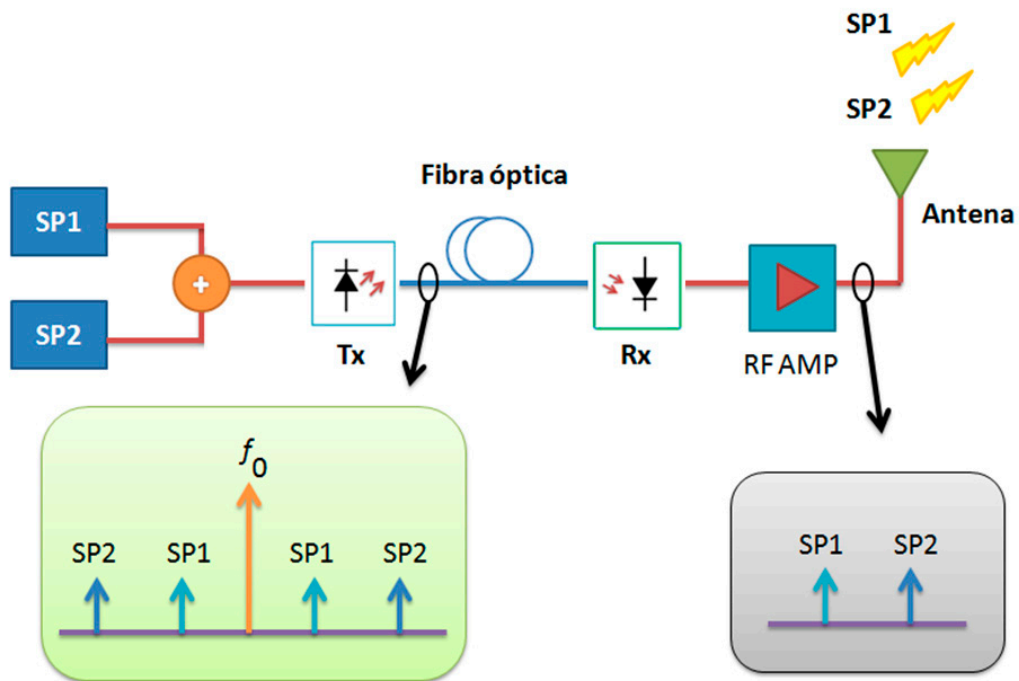


Fig. 2.8: Multiplexação por subportadoras em sistemas RoF.

No transmissor (Tx), os sinais de RF das subportadoras SP1 e SP2 são multiplexados por meio de um acoplador de RF. O sinal multiplexado é então utilizado para modular diretamente ou externamente uma portadora óptica. Em seguida, o sinal modulado é enviado pela fibra até o receptor (Rx), o qual converte o sinal óptico novamente para o domínio elétrico por meio de um fotodetector. O sinal detectado e convertido para o domínio de elétrico é então amplificado e transmitido por um enlace de cabo coaxial ou sem-fio. Em sistemas RoF, a SCM pode ser aplicada na distribuição de sinais UMTS e Wi-Fi utilizando fibras multimodo para aplicações em ambientes *indoor* [24].

2.4.2 Multiplexação por divisão de comprimento de onda

A multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing – WDM*) [23,37,73] visa multiplexar diferentes portadoras ópticas, permitindo a transmissão de vários lasers em uma única fibra, o que aumenta significativamente a capacidade do sistema [32,73]. A figura 2.9 ilustra a aplicação da tecnologia WDM na distribuição de antenas remotas em sistemas RoF. Nestes sistemas, cada sinal de RF é usado para modular diretamente ou

externamente em uma fonte óptica. Em seguida, todas as fontes são multiplexadas (MUX) e transmitidas através de um enlace óptico até uma central de distribuição. Na central de distribuição, o sinal óptico é então demultiplexado (DEMUX) e transmitido para cada antena remota (RAU) conforme o comprimento de onda pré-estabelecido. O espaçamento entre os canais WDM depende da técnica de modulação utilizada e da frequência do sinal de RF. Atualmente, com o advento da tecnologia DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), o espaçamento entre os canais pode variar entre 200 a 50 GHz. Além disso, a tecnologia DWDM pode ser combinada com a SCM, criando uma plataforma centralizada, de alta capacidade e multisserviço [74].

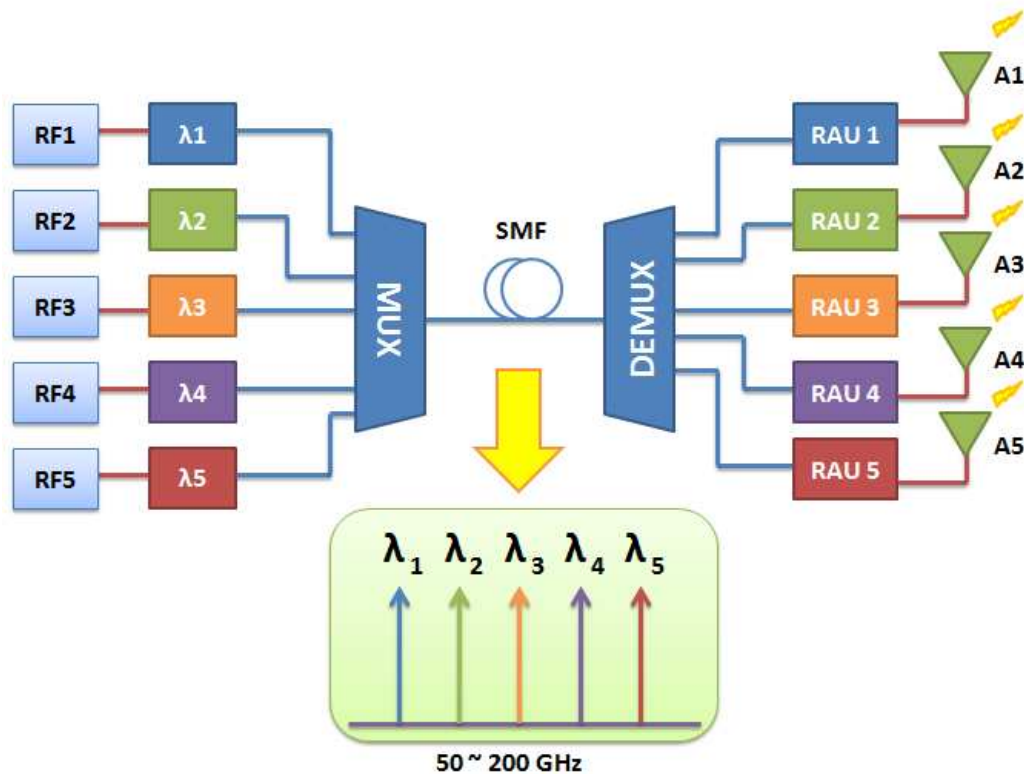


Fig. 2.9: Sistemas DWDM-RoF

2.5 Fibras ópticas

A fibra óptica é responsável pela interconexão do transmissor com o receptor óptico. Existem basicamente três tipos de fibra óptica que podem ser aplicadas em sistemas RoF: multimodo (MMF) [24,41,75], monomodo (SMF) [29,75] e polimérica (POF) [76,77]. A principal diferença entre essas fibras é o tamanho do núcleo, sendo que este pode ser de $9\mu\text{m}$ (SMF), $50\mu\text{m}$ ou $62,5\mu\text{m}$ (MMF) e $500\mu\text{m}$ (POF) [75,76], figura 2.10.

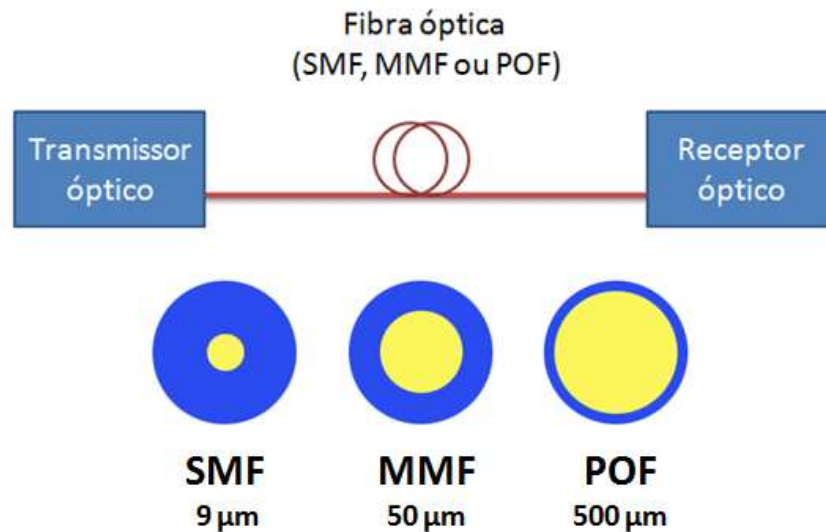


Fig. 2.10:Fibras ópticas em sistemas RoF

Fibras monomodo são utilizadas em sistemas de longa distância, pois apresentam baixa atenuação e dispersão cromática [29]. Por outro lado, fibras multimodo são comumente aplicadas em soluções de curta distância [24,41,75], um vez que estão presentes na maioria das construções, tais como: aeroportos, shoppings e prédios comerciais. Desta forma, existe um grande interesse na reutilização dessas infra-estruturas juntamente com a tecnologia RoF para distribuir sinais Wi-Fi e de telefonia móvel [24,50]. No entanto, o principal problema de sistemas RoF com MMF é o alcance de transmissão. Isso ocorre porque a MMF permite a propagação de múltiplos modos ópticos, o que produz o efeito de descorrelação de fase no processo fotodeteção [75]. A descorrelação de fase é responsável por degradar a potência do sinal de RF, sendo ela semelhante ao desvanecimento em sistemas de comunicação sem-fio [75, 78]. Além disso, este

efeito é intensificado em sistemas RoF com modulação direta devido ao efeito de alargamento espectral. Como visto anteriormente, o *chirp* varia conforme a frequência do sinal de RF modulado. Portanto, o desempenho de sistemas RoF com modulação direta e fibra multimodo depende fortemente da largura de linha do laser [75]. Como exemplo, foi demonstrada experimentalmente a distribuição de sinais Wi-Fi e UMTS utilizando VCSELs em 850 nm por distâncias de até 600 metros [24] em fibras MMF.

Já as fibras poliméricas são recentes em sistemas RoF [76,77]. A vantagem deste tipo de fibra é que ela é feita de acrílico, plástico termo sensível que apresenta baixa temperatura de fusão, o que torna o processo de fabricação fácil e permite a criação de fibras recicláveis. Outra vantagem é que o núcleo desta fibra é muito superior ao das fibras monomodo e multimodo, aproximadamente 500 μm , facilitando o acoplamento óptico. A maioria dos estudos visa aplicar esta fibra na distribuição de sistemas RoF em ambientes *indoor*. Como exemplo, foi demonstrado a aplicação 50 metros juntamente com a tecnologia *Fiber-To-The-Home* (FTTH) na transmissão de sinais WiMAX com 20 Mbps em 5,8 GHz e 70 Mbps em 10 GHz [77].

Do mesmo modo, as fibras monomodo estão evoluindo rapidamente. Como exemplo, hoje existem fibras que são insensíveis a perda por curvatura [79], sendo elas compatíveis com as redes atuais, o que tem permitido a expansão da tecnologia FTTH [4,77,80]. A fibra óptica apresenta várias vantagens de transmissão em relação aos cabos coaxiais, tais como: baixa atenuação, tamanho reduzido, imunidade à interferência eletromagnética, grande largura de banda, atenuação constante para diferentes frequências de RF e compatibilidade com as tecnologias atuais e da próxima geração [81]. Além disso, cabos coaxiais estão cada vez mais ineficientes e caros conforme a frequência aumenta nas redes de acesso para obtenção de maiores taxas de transmissão. Como exemplo, uma fibra óptica transmitindo em 2 GHz pesa aproximadamente 1,7 kg/km e apresenta atenuação de apenas 0,5 dB/km, enquanto um cabo coaxial possui 567 kg/km e 360 dB/km, respectivamente [16]. Portanto, a fibra óptica é um dispositivo chave na distribuição de sinais em sistemas RoF, permitindo a criação de redes eficientes e com menor consumo de energia. Sistemas Wi-Fi-RoF operando em 2,4 GHz podem atingir até 4 km de distância [82], enquanto que com a tecnologia WiMAX e WSN foram demonstrado enlaces de 118 km [28] e 160 km [83], respectivamente.

2.6 Receptores ópticos

O receptor óptico tem como objetivo realizar a conversão opto - elétrica (O/E), recuperando o sinal de RF por meio de um fotodetector. A maioria dos receptores RoF utiliza um fotodiodo PIN, os quais são fabricados através da heterojunção de arseneto de gálio índio (InGaAs). Fotodiodos PIN apresentam ótima responsividade nas janelas de 1300 e 1500 nm [58-60], sendo os principais parâmetros: a responsividade, corrente de saturação e banda de operação [58-60].

Idealmente, fotodiodos devem apresentar alta responsividade, grande banda de operação e produzir altos valores de corrente. Entretanto, a combinação de todos estes parâmetros varia conforme a banda de aplicação, pois existe um equilíbrio entre banda de operação e corrente de saturação [58,59]. A banda de operação do fotodiodo é limitada pela presença de capacitâncias parasitas na heterojunção, ou seja, o aumento da região fotossensível diminui a resposta em frequência do fotodiodo [58]. Entretanto, altos valores de correntes de saturação são obtidos através do aumento da área fotossensível. Tipicamente, fotodiodos PIN usados em sistemas RoF com modulação direta apresentam responsividade de 0,85 e 0,9 A/W em 1310 e 1550 nm, respectivamente, suportam potências ópticas entre 0 e 10 dBm e operam na faixa de 10 MHz a 12 GHz. Por outro lado, a responsividade do fotodiodo é dada por [60,61]:

$$S_{PD} = \frac{I_{PD}}{P_{opt}} \quad (2.5)$$

Onde, I_{PD} é a corrente na saída do fotodetector em ampère (A) e P_{opt} é a potência óptica em watts (W). A unidade de medida da responsividade é A/W. Fotodiodos que trabalham no regime de corrente de saturação apresentam oscilações na corrente de saída, o que pode criar distorções no sinal de RF e degradar o desempenho do sistema [22]. Nos últimos anos, estudos estão sendo conduzidos no desenvolvimento de fotodiodos que apresentem altas correntes de saturação em altas frequências.

A figura 2.11 ilustra os recentes avanços destes dispositivos na faixa de 100 MHz a 100 GHz [58]. O desenvolvimento destes fotodiodos está permitindo a criação de sistemas RoF com maior linearidade e menor NF [58]. Portanto, todos os sistemas RoF discutidos nesta dissertação, consideram receptores ópticos utilizando fotodiodos PIN. Como exemplo, foi experimentalmente demonstrado corrente de saturação de 90 e 50 mA em 20 e 55 GHz, respectivamente em fotodiodos PIN. Além disso, a banda de operação destes dispositivos pode chegar até 375 GHz e obter responsividade de até 0,94 A/W.

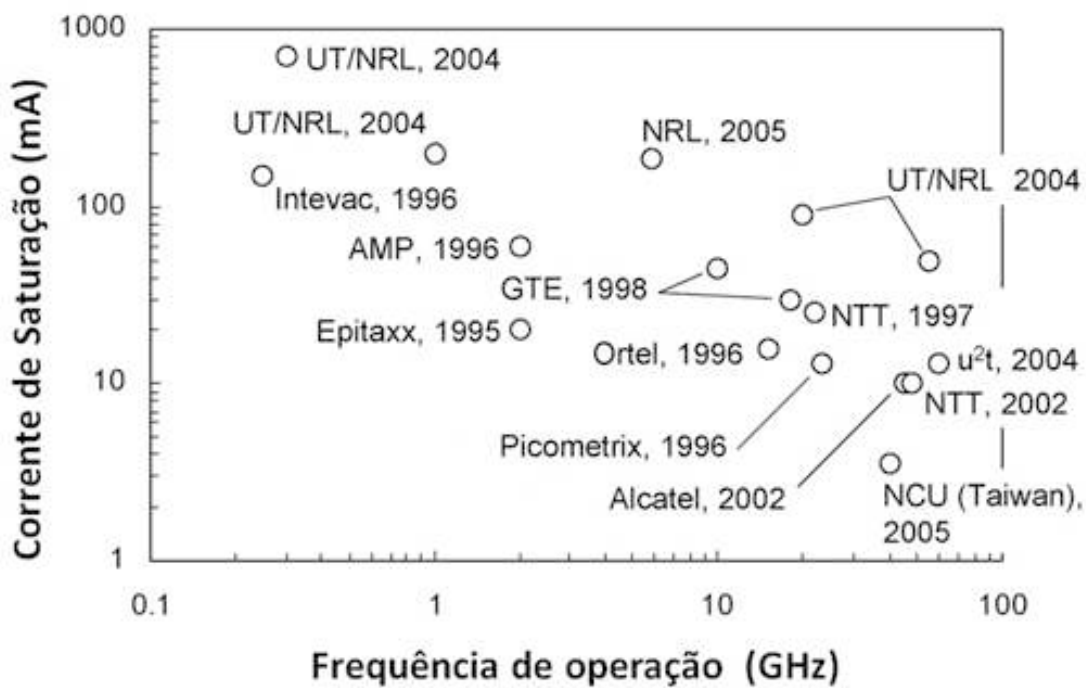


Fig. 2.11: Corrente de saturação x frequência de operação em fotodiodos [extraído de 106].

CAPÍTULO 3

Análise de desempenho em sistemas RoF

Em sistemas RoF, vários parâmetros de desempenho devem ser verificados na escolha do transmissor e receptor óptico conforme a frequência do sinal de RF e sistema de comunicação sem-fio. Neste capítulo, as principais métricas de desempenho em sistemas RoF são abordadas, discutindo a contribuição de cada componente no transmissor e receptor óptico. As principais métricas de desempenho apresentadas são: frequência de operação, ganho de RF, figura de ruído, ruído equivalente de entrada (*Equivalent Input Noise* – EIN) e faixa dinâmica de operação livre de espúrios (*Spurious-Free Dynamic Range* - SFDR) [22,58-60,62]. Por fim, é apresentada uma metodologia de projeto para a especificação de sistemas RoF com base em dispositivos comerciais.

3.1 Frequência de operação

Em sistemas RoF, a frequência da portadora de RF esta diretamente relacionada com o alcance máximo de transmissão do enlace óptico. Isto ocorre porque cada componente do espectro óptico viaja pela fibra com velocidade e fase diferentes. Quando a portadora de RF é modulada em uma fonte óptica, bandas laterais são criadas, as quais estão localizadas nas frequências de $f_{opt} \pm f_{RF}$, onde f_{opt} é a frequência da portadora óptica e f_{RF} é a frequência da portadora de RF. Estas bandas laterais sofrem o efeito de dispersão cromática, produzindo o efeito de descorrelação de fase no processo de fotodetecção [78], ou seja, cada componente óptica é detectada em intervalos de tempo diferentes, criando padrões de interferência destrutivos e construtivos na fotocorrente. Este padrão é periódico [22, 29] e depende da frequência da portadora de RF. O problema deste efeito é que os dados transmitidos pela portadora de RF são perdidos já na primeira distância de extinção, a qual é dada por [83]:

$$L_1 = \frac{c}{2\lambda_0^2 D f_{RF}^2} \quad (3.1)$$

onde c é a velocidade da luz, λ_0 é o comprimento de onda da portadora óptica em nm, D é a dispersão da fibra óptica em ps/nm.km e f_{RF} é a frequência de modulação em Hz. Como exemplo, para $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$, $D = 16 \text{ ps/nm.km}$ e $f_{RF} = 900 \text{ MHz}$ ou $f_{RF} = 2.4 \text{ GHz}$ a primeira distância de extinção ocorre em 4000 e 600 km, respectivamente [83]. Uma solução é utilizar fibras ópticas compensadoras de dispersão (*Dispersion Compensation Fibers – DCFs*) para reduzir o efeito da dispersão cromática sobre o sinal óptico. Como exemplo, foi demonstrado a expansão de um enlace óptico de 180 para 410 km transmitindo o padrão WiMAX à 54 Mbit/s na banda de 3,5 GHz [29]. Além disso, recomenda-se o uso de lasers com estreita largura de linha, minimizando assim o efeito *chirp* [51,61].

3.2 Ganho de RF

O ganho de RF é outro importante parâmetro em sistemas RoF, o qual é informado pela maioria dos fabricantes [22, 58-60, 62]. Em sistemas RoF sem amplificação, o ganho de RF é negativo, ou seja, existe perda de potência após a transmissão do sinal, a qual é dada em dB. No entanto, a maioria dos equipamentos utilizam amplificadores de RF para suprir as perdas oriundas do processo de conversão E/O e O/E, tornando positivo este parâmetro. Na prática, o ganho de RF pode ser facilmente medido através da diferença de potência de RF na saída e entrada do sistema RoF [58,62]:

$$G_{ROF} = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (3.2)$$

Vale ressaltar que o ganho de RF diminui conforme a frequência da portadora de RF aumenta, pois ele está diretamente relacionado com a banda de modulação do laser semiconductor e a banda de operação do fotodiodo, como mostra a equação 3.3, a qual é uma análise mais detalhada para sistemas RoF sem amplificação e com modulação direta [22,58-60,62]:

$$G_{ROF} = 20\log(s_l)(s_R) - 2L_o + 10\log\left(\frac{R_{OUT}}{R_{IN}}\right) \quad (3.3)$$

onde s_l e s_R são os valores de eficiência de conversão do laser semiconductor e do receptor, respectivamente, L_o é a perda óptica e R_{OUT} e R_{IN} são os valores da impedância na entrada e saída do sistema RoF. Além disso, no transmissor RoF, a impedância do laser semiconductor precisa ser casada com a impedância de entrada da porta de RF para evitar perdas por reflexões. Para isso, um circuito resistivo pode ser colocado em série ao diodo laser, o qual apresenta baixa impedância (cerca de 5Ω), elevando este valor para igual ao da entrada do sistema (50Ω), figura 3.1. O problema neste tipo de casamento de impedância é a alta atenuação do sinal de RF. No entanto, em sistemas RoF esta não é a única opção, sendo possível realizar tal tarefa por meio de componentes reativos como indutores e capacitores [58-60, 62].

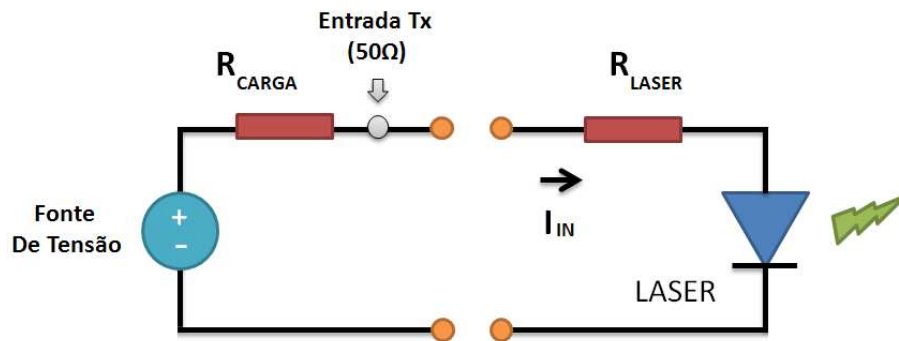


Fig. 3.1: Casamento de impedância resistivo do laser semiconductor em sistemas RoF com modulação direta.

Para a condição de impedâncias iguais na entrada e saída do sistema RoF, a equação 3.3 pode ser simplificada:

$$G_{ROF} = 20\log(s_l)(s_R) - 2L_o \quad (3.4)$$

Por outro lado, no receptor, a resistência do fotodiodo também precisa ser casada com a saída do sistema RoF. No entanto, ao contrário do diodo laser, fotodiodos apresentam elevada impedância (dezenas de $k\Omega$). Portanto, o circuito de casamento é colocado em paralelo ao fotodiodo, como mostra a figura 3.2.

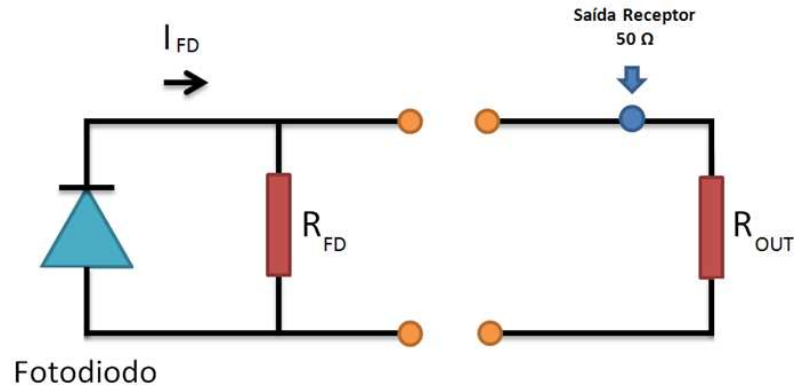


Fig. 3.2: Casamento de impedância resistivo do fotodetector em sistemas RoF com modulação direta.

Neste circuito, a resistência colocada paralelamente ao fotodiodo faz com que a corrente de saída do sistema, I_{OUT} , seja menor que a corrente produzida pelo fotodiodo I_{PD} . Ou seja, a eficiência de conversão do receptor s_R é menor que a do fotodiodo s_{PD} , a qual é dada por [62]:

$$s_R = \left(\frac{R_{CC}}{R_{CC} + R_{OUT}} \right) s_{PD} \quad (3.5)$$

onde R_{CC} é a resistência do circuito de casamento de impedância, R_{OUT} é a impedância na saída do receptor e s_{PD} é a responsividade do fotodiodo. Para um sistema perfeitamente casado resistivamente, R_{CC} é igual a R_{OUT} , o que resulta em [62]:

$$s_R = \frac{s_{PD}}{2} \quad (3.6)$$

Portanto, observa-se que mesmo para um casamento resistivo perfeito a eficiência de conversão é igual à metade da responsividade do fotodiodo. Analogamente, o ganho máximo de RF ocorre quando a eficiência de conversão do laser e fotodiodo são iguais a 1, produzindo um ganho de RF de 0 dB [22,58-60,62]. Desta forma, a principal vantagem do casamento resistivo é que o ganho de RF apresenta comportamento banda larga, ficando somente limitado pela banda de modulação do laser semiconductor. Entretanto, o casamento resistivo degrada significativamente o sinal de RF e é sensível ao ruído térmico [58-60]. Sistemas RoF com

casamento resistivo e modulação direta foram demonstrados experimentalmente com ganho de RF igual a 3,78 dB [87], enquanto para a modulação externa este valor foi de 7,5 dB [57].

Já o casamento reativo utiliza capacitores e indutores, criando estágios de amplificação que aumentam o ganho de RF. Apesar desta vantagem, circuitos reativos são sensíveis à frequência da portadora de RF devido à frequência de corte dos componentes, o que torna estreita a banda de operação [58-60]. Experimentalmente, foram demonstrados casamentos reativos para modulação direta e externa com ganhos de 12 dB [88] e 31 dB [89], respectivamente.

A atenuação óptica L_o é outro importante termo no ganho de RF, como mostra a equação 3.3, onde observa-se que para cada dB de perda óptica o ganho de RF é penalizado em 2 dB. Isto ocorre porque a corrente elétrica é diretamente proporcional à potência óptica, porém a potência de RF é igual ao quadrado da corrente elétrica. Desta forma, o termo ao quadrado quando convertido para a escala logarítmica, transforma-se no fator 2 na equação 3.4 [62]. Em sistemas RoF com modulação externa, o ganho de RF é calculado utilizando-se a eficiência do transmissor óptico s_m , dado pela equação 2.4 [58-60]. O valor calculado é então substituindo na equação 3.4 no lugar da eficiência do laser.

3.3 Fontes de ruído

Em sistemas de comunicação, os componentes utilizados nos módulos de transmissão e recepção não são perfeitos, ou seja, a potência de RF sofre atenuação, convertendo o sinal em fontes de ruído indesejadas [58-60]. Sistemas RoF sem amplificação apresentam fundamentalmente três fontes de ruído: ruído de intensidade relativa do laser, ruído *shot* do fotodetector e ruído térmico [22,42,58-60,62,90]. A soma de todas as fontes de ruído é especificada pela maioria dos fabricantes pelo termo chamado ruído equivalente de entrada (*Equivalent Input Noise – EIN*), o qual é dado em dBm/Hz [42,62]:

$$EIN_{ROF \text{ dBm/Hz}} = EIN_{RIN \text{ dBm/Hz}} + EIN_{SHOT \text{ dBm/Hz}} + EIN_{TERM \text{ dBm/Hz}} \quad (3.7)$$

Geralmente, o EIN varia entre -130 e -150 dBm/Hz para sistemas RoF com modulação direta. Além disso, o comportamento de cada fonte de ruído muda conforme a perda óptica no enlace. Basicamente, a RIN é constante, o ruído *shot* varia proporcionalmente enquanto o térmico

aumenta quadraticamente [62,42], como ilustra a figura 3.3. É importante ressaltar que a perda óptica determina qual será a fonte principal de degradação do sistema RoF.

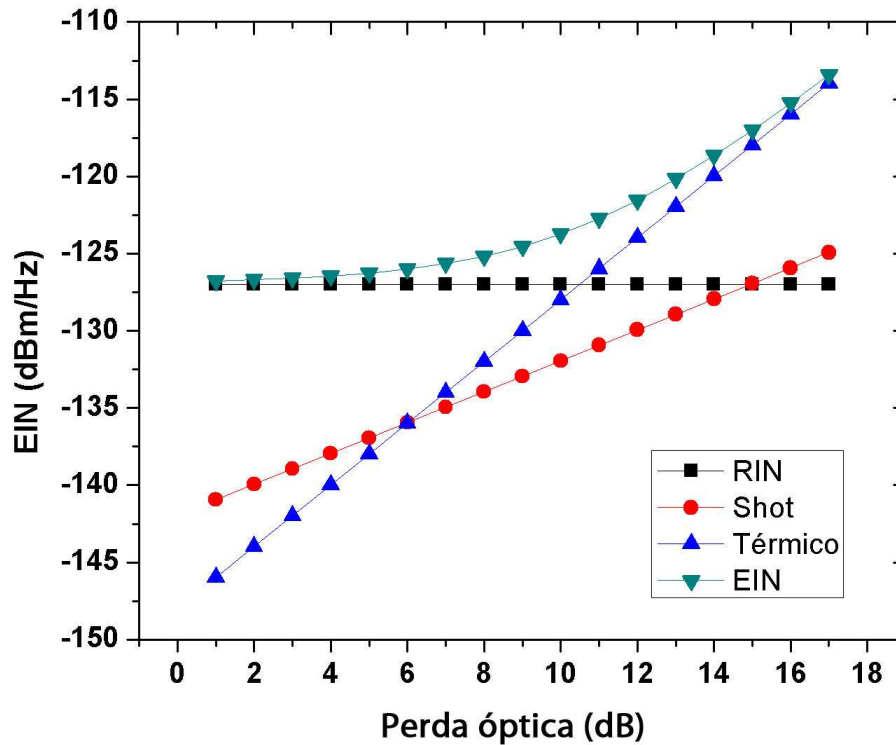


Fig. 3.3: EIN x perda óptica em sistemas RoF resistivos.

3.3.1 Ruído de intensidade relativa do laser

Em lasers semicondutores, a potência óptica de saída não é constante. Esta variação de potência é chamada de ruído de intensidade relativa do laser (RIN), a qual é medida em dB/Hz ou mW/Hz. O RIN é oriundo das interações entre o processo de emissão estimulada e emissão espontânea na região ativa do laser, pois a emissão de fótons depende da recombinação aleatória de pares de elétron-lacuna [22,42,60,62,90]. Além disso, o RIN depende quadraticamente da potência óptica de emissão [22], uma vez que na região ativa, o aumento da potência óptica eleva a população de fótons coerentes, reduzindo a geração de fótons aleatórios pelo processo de emissão espontânea [49, 51, 54, 88]. O cálculo do RIN por unidade de banda é dado pela média ao quadrado das flutuações de potência de emissão $\langle \Delta P_0^2 \rangle$ dividido pelo quadrado da potência óptica $\langle P_0^2 \rangle$ [22,42,61,62,90]:

$$RIN_{dB/Hz} = \frac{\langle \Delta P_0^2 \rangle}{\langle P_0^2 \rangle} \quad (3.8)$$

Lasers DFB apresentam valores de RIN entre -130 e -155 dB/Hz [69], enquanto os de estado-sólido o valor é tipicamente acima de -165 dB/Hz [58,68]. Já nos VCSELS, o RIN fica entre -100 e -125 dB/Hz [35]. A contribuição do RIN no EIN, em mW/Hz, para sistemas RoF com modulação direta é dado por [61]:

$$EIN_{RIN} = \frac{RIN (I_{DC} - I_{TH})^2 R_{IN} \left(\frac{M_{GAIN}}{s_l} \right)^2}{1000} \quad (3.9)$$

Onde RIN é o ruído de intensidade do laser, em mW/Hz, I_{DC} é a corrente do sinal de RF, em mA, I_{TH} é a corrente de operação do laser em mA, R_{IN} é a impedância na entrada do transmissor óptico, M_{GAIN} é o ganho de modulação e s_l é a eficiência de conversão do laser. Por fim, em sistemas RoF com modulação direta, sem amplificação e com baixa perda óptica, o RIN é a principal fonte de ruído [22, 42,58,62,90], sendo responsável pela limitação da NF [62].

3.3.2 Ruído *shot* do fotodetector

O ruído *shot* do fotodetector é a segunda maior fonte de ruído em sistemas RoF, sendo este oriundo da aleatoriedade do processo de fotodetecção [22, 42, 58-60, 62, 90]. A luz é composta por pacotes discretos de energia, os quais são chamados de fótons. A variação no tempo de chegada de cada fóton gera uma corrente ruidosa na saída do fotodiodo PIN, sendo este chamado de ruído *shot* do fotodetector. O ruído *shot* depende da eficiência do fotodiodo, banda de transmissão e potência óptica incidida. Desta forma, a corrente ruidosa gerada pelo *shot* na saída do fotodiodo é dada por [59,60,62,89]:

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2q s_{PD} P_0 B = 2q I_{PD} B \quad (3.10)$$

onde P_0 é a potência óptica em mW, q é a carga fundamental do elétron, B é a banda de transmissão do canal de RF em Hz, s_{PD} é a responsividade em A/W e I_{PD} é a corrente de saída do fotodiodo em mA. A equação 3.10 mostra que a corrente do ruído *shot* reduz conforme a corrente

na saída do fotodetector diminui. Ou seja, é possível chegar à condição onde a corrente gerada pelo fotodiodo apresenta os mesmos níveis de ruído *shot* e térmico [60]:

$$I_{PD} = \frac{2kT}{qR} \quad (3.11)$$

onde k é constante de Boltzmann, T é a temperatura de operação em kelvin e R é a impedância da carga em Ω . Como exemplo, para $R = 50\Omega$ e $T = 290K$, a corrente na saída do fotodetector é igual a 1 mA [60]. Por outro lado, a contribuição do ruído *shot*, em mW, no EIN é dada por [62]:

$$EIN_{SHOT} = 2q \left[\frac{P_o R_{IN}}{(s_l)^2 (s_{PD})} \right] L_o \quad (3.12)$$

onde q é a carga fundamental do elétron, P_o é a potência óptica no fotodetector em mW, R_{IN} é a impedância na entrada do transmissor em Ω , s_l é a eficiência de conversão do laser em W/A, s_{PD} é a responsividade do fotodetector em A/W e L_o é a perda óptica no enlace, dada em dB. A equação 3.12 mostra que ao contrário do RIN, a contribuição do ruído *shot* no EIN é diretamente proporcional a perda óptica. Observa-se também que é possível minimizar a contribuição desta fonte de ruído utilizando-se lasers e fotodiodos com altos valores de eficiência de conversão [58].

3.3.3 Ruído térmico

O ruído térmico é a última fonte de degradação em sistemas RoF, sendo ela comum a todo sistema de comunicação. O ruído térmico é produzido pela variação no fluxo de elétrons no material condutor, principalmente em circuitos resistivos, incluindo os amplificadores. Esta fonte de ruído depende da temperatura de operação do sistema, sendo a corrente ruidosa gerada na saída do receptor dada por [22,42,58-60,62,90]:

$$\langle I_{term}^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_L} \quad (3.13)$$

Onde, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura de operação em kelvin, B é a banda do sinal em Hz e R_L é a impedância da carga. Portanto, para $T = 290K$, $B = 1\text{ Hz}$ e $R_L = 50\Omega$, o

ruído térmico produzido na saída do receptor é igual a $18 \text{ pA}^2/\text{Hz}$. No entanto, como visto na seção 3.2, um circuito de casamento de impedância é inserido paralelamente no receptor para casar a saída do sistema RoF com o fotodiodo, o que resulta na divisão da corrente gerada pelo fotodiodo por um fator 2, ou seja, a corrente de ruído térmico que chega até a carga é de $9 \text{ pA}^2/\text{Hz}$, ou $-174 \text{ dBm}/\text{Hz}$ [62]. Analogamente, a contribuição do ruído térmico no EIN em dBm/Hz é dada por [58,62]:

$$EIN_{TERM} = -174 - G_{ROF} \quad (3.14)$$

Onde G_{ROF} é o ganho de RF do sistema RoF em dB. A equação 3.14 mostra que o ruído térmico depende quadraticamente da perda óptica, pois depende do ganho do sistema RoF. A seguir, a figura 3.4 ilustra os circuitos equivalentes do transmissor e receptor casado resistivamente juntamente com as fontes de ruído.

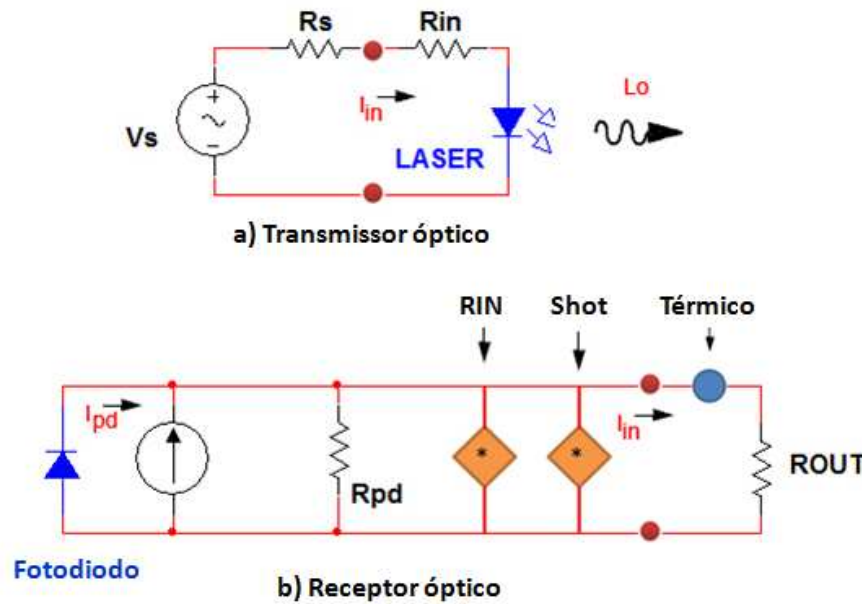


Fig. 3.4: Circuito equivalente das fontes de ruído em sistemas RoF.

No transmissor, Fig. 3.4a, o laser é casado com a impedância de entrada R_s utilizando um resistor em série R_{in} . O sinal é então transmitido pela fibra óptica, atenuando L_0 até chegar ao receptor, Fig. 3.4b. Em seguida, paralelamente a corrente gerada pelo fotodiodo, o RIN e o ruído *shot* são detectados como fontes de corrente ruidosas, enquanto a resistência R_{pd} , usada para

casar a impedância do fotodiodo com a saída do receptor produz o ruído térmico [60,62,90]. Adicionalmente, outro importante parâmetro de desempenho em sistemas de comunicação é a NF, a qual define o nível de degradação que um dispositivo ou sistema impõe na SNR, a qual é dada por:

$$NF_{dB} = \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}} \quad (3.15)$$

Onde SNR_{out} e SNR_{in} são os valores de SNR na saída e entrada do sistema RoF. Do mesmo modo, a NF também pode ser obtida através do EIN [42]:

$$NF_{dB} = EIN_{dBm/Hz} + 174_{dBm/Hz} \quad (3.16)$$

Sistemas RoF comerciais apresentam valores de NF que variam entre 6 e 50 dB. Como visto anteriormente, o desempenho do sistema RoF irá depender da modulação óptica, RIN, eficiência de conversão do laser e fotodiodo e a e frequência do sinal de RF que está sendo transmitida [56,58-60]. Os menores valores de NF obtidas experimentalmente foram de 17,8 dB e 2,5 dB, para a modulação direta e externa, respectivamente [59].

3.4 Faixa dinâmica de operação

A faixa dinâmica de operação livre de espúrios (*Spurious-Free Dynamic Range – SFDR*) é um parâmetro em sistemas RoF responsável por determinar a linearidade do sistema, ou seja, ele indica a diferença de potência entre o sinal de RF transmitido e as harmônicas e produtos de intermodulação. Em aplicações analógicas, como a transmissão de subportadoras em aplicações de CATV, a SFDR quantifica número máximo de canais de RF que podem ser transmitidos em cada portadora óptica [22,58]. Isto ocorre porque os componentes eletrônicos e ópticos não são perfeitos, existindo uma faixa linear de operação. A operação na faixa não linear gera produtos de intermodulação e harmônicas na saída do sistema RoF, o qual é intensificado conforme a potência do sinal de RF aumenta na entrada. Desta forma, com determinado valor de potência as componentes de intermodulação e harmônicas cresçam rapidamente, ultrapassando o ruído de fundo do sistema e transformando-se nas principais fontes de degradação [22,42,58-60,62,90], figura 3.5.

Portanto, é necessário calcular o valor máximo de potência de RF para que o sistema RoF opere linearmente. Basicamente existem duas técnicas de medição da SFDR: a medição com uma portadora ou duas portadoras de RF, sendo a última a mais utilizada [22,58,90].

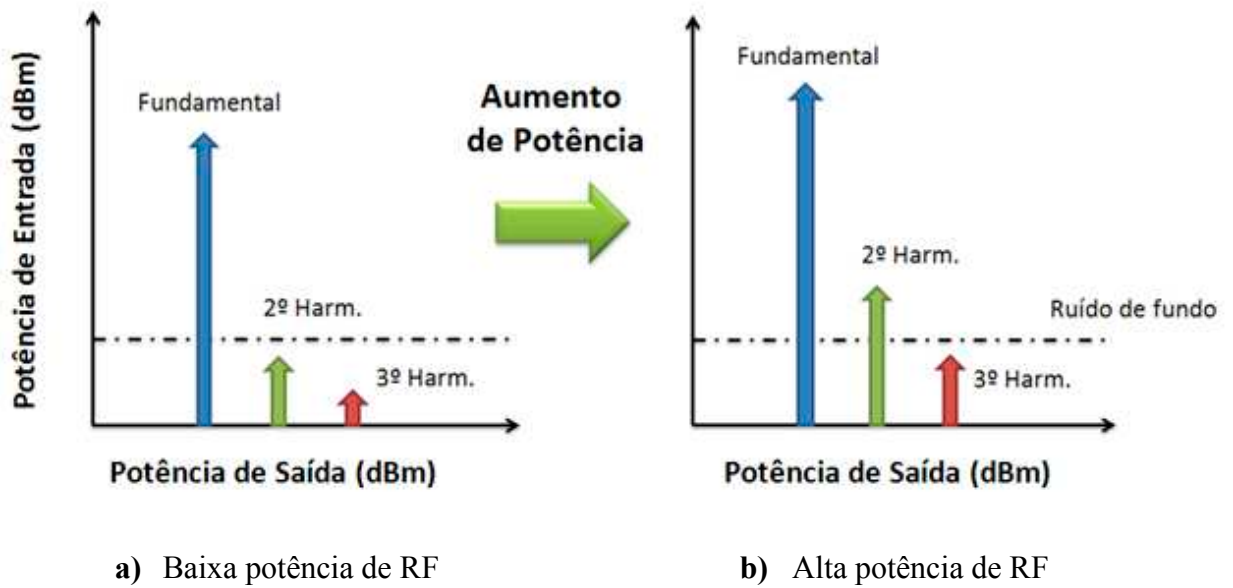


Fig. 3.5: Variação das harmônicas conforme a potência de RF na entrada do sistema.

A técnica com duas portadoras mede a intermodulação de terceira ordem (*3rd order InterModulation* - IMD3), a qual é um importante parâmetro em sistemas de comunicação, pois trata-se de uma componente de RF difícil de ser filtrada, uma vez que está muito próxima a frequência fundamental. Neste método, duas portadoras de RF, f_1 e f_2 , com frequências próximas são inseridas na entrada do sistema RoF através de um acoplador de RF. Os sinais são então recuperados no receptor e estudados por meio de um analisador de espectro elétrico [22], figura 3.6.

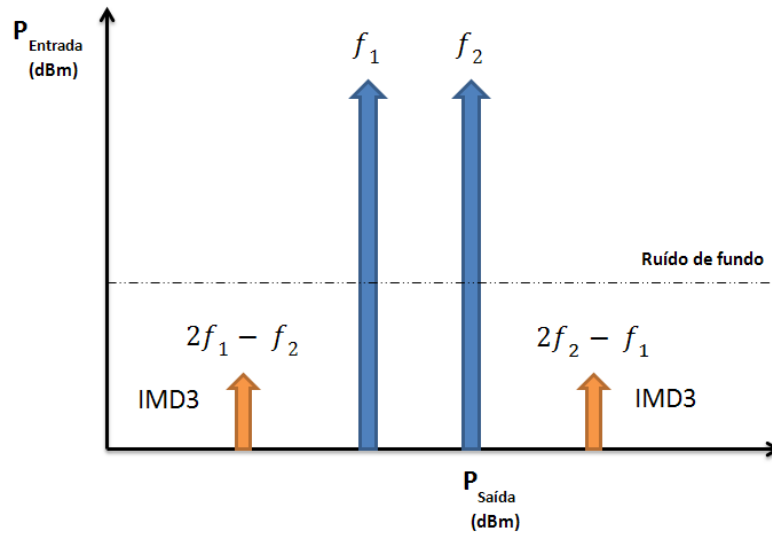


Fig. 3.6: Técnica de duas portadoras: medição da IMD3 e SFDR.

Em seguida, gradualmente a potência das portadoras de RF é aumentada, obtendo-se os pontos de potência da frequência fundamental e da IMD3 na saída do sistema. Observa-se com o analisador de espectro elétrico que a IMD3 cresce cubicamente mais rápido que a frequência fundamental. Os pontos coletados são então utilizados para plotar o gráfico da SFDR, no qual o eixo x é a potência de RF na saída e o eixo y é a potência de RF na entrada. Posteriormente, duas retas são usadas para extrapolar os valores medidos, criando um ponto de interseção, o qual é chamado de *3rd Order Intercept Point (IP3)*, dado em dBm. O IP3 apresenta geralmente um valor de potência de RF muito acima do que o sistema RoF é capaz de operar e quanto maior o seu valor mais linear é o sistema [22,58-60,62,90]. O cálculo da SFDR por meio da IP3 é dado por [22]:

$$SFDR = \frac{2}{3}(IP3 - N_{fundo}) \quad (3.16)$$

onde N_{fundo} é a potência do ruído de fundo do sistema RoF. A unidade de medida da SFDR é $dB.Hz^{\frac{2}{3}}$. Na prática, sistemas RoF utilizam o RIN como nível de ruído de fundo. A figura 3.7 ilustra o gráfico do cálculo da SFDR.

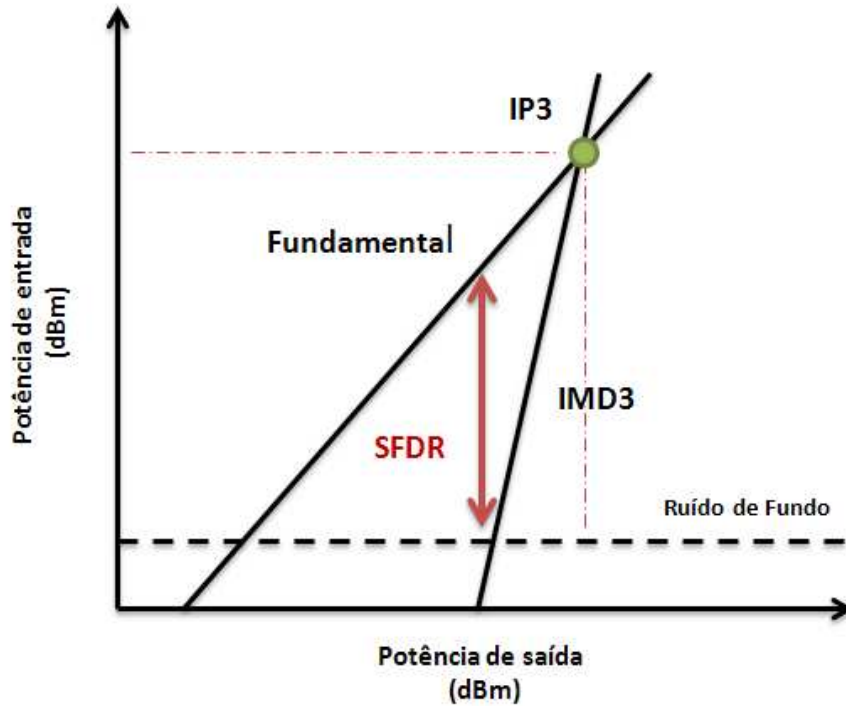


Fig. 3.7: Gráfico da SFDR por meio da IMD3.

Analogamente, a SFDR também pode ser calculada através da EIN [42]:

$$SFDR = \frac{2}{3}(IP3 - EIN - 10\log(B) - G_{RF}) \quad (3.17)$$

Onde B é a banda de transmissão em Hz e G_{RF} é o ganho de RF do sistema RoF em dB. Estudos afirmam que a maioria das aplicações podem ser atendidas em sistemas que ofereçam SFDR igual ou superior a $145 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{\frac{2}{3}}$ [90]. É importante frisar que a SFDR depende da frequência da portadora de RF, diminuindo conforme a frequência aumenta. Isto ocorre devido ao aumento das distorções no canal de RF conforme a frequência se aproxima do limite da banda de modulação e operação do laser e fotodiodo, respectivamente. Sistemas com modulação externa apresentam grandes valores de SFDR em altas frequências de modulação, sendo demonstrado valores de $112 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{\frac{2}{3}}$ entre 2 e 17 GHz [58]. Moduladores de eletro-absorção também podem ser utilizados, porém, a principal limitação destes dispositivos em relação ao Mach Zehnder é a baixa potência óptica de saturação. Em moduladores Mach Zehnder, a maior SFDR obtida é de

134 $dB \cdot Hz^{\frac{2}{3}}$ em 150 MHz e de 130 $dB \cdot Hz^{\frac{2}{3}}$ para frequências maiores que 500 MHz, enquanto com moduladores de eletro-absorção foi de 128 $dB \cdot Hz^{\frac{2}{3}}$ em 10 GHz [58].

Resumindo, altos valores de SFDR podem ser obtidos seguindo as seguintes características conforme o tipo de modulação óptica [58]:

- ❖ Modulação direta: lasers semicondutores e fotodiodos com alta eficiência, baixo RIN, pequena corrente de alimentação, grande banda de modulação e alta corrente de saturação.
- ❖ Modulação externa: lasers com alta potência óptica de emissão e baixo RIN, moduladores externos com baixa perda de inserção e V_{π} , suporte a altos níveis de potência óptica e fotodiodos com alta responsividade e corrente de saturação.

Atualmente, a maioria dos sistemas RoF comerciais oferecem modelos com SFDR entre 100 e 130 $dB \cdot Hz^{\frac{2}{3}}$. Por fim, os maiores valores experimentais com modulação direta e externa foram de 128 e 134 $dB \cdot Hz^{\frac{2}{3}}$, respectivamente [60].

3.5 Metodologia de projeto RoF

Com base nos parâmetros discutidos nos capítulos anteriores e nos equipamentos RoF comerciais atuais, esta seção descreve uma metodologia de projeto proposta pelo autor para a especificação de sistemas RoF. A metodologia resulta na aplicação de uma das três principais configurações utilizadas em transmissores RoF: VCSELs com modulação direta (VCSEL-MD), DFBs com modulação direta (DFB-MD) e DFBs com modulação externa (DFB-ME). Cada configuração implica em um custo sistêmico classificado em três categorias: baixo, médio e alto. As métricas utilizadas na definição de cada transmissor foram: janela óptica de transmissão (800, 1300, 1500), banda de modulação do laser, RIN e SFDR. A figura 3.8 apresenta o fluxograma da metodologia de projeto proposta.

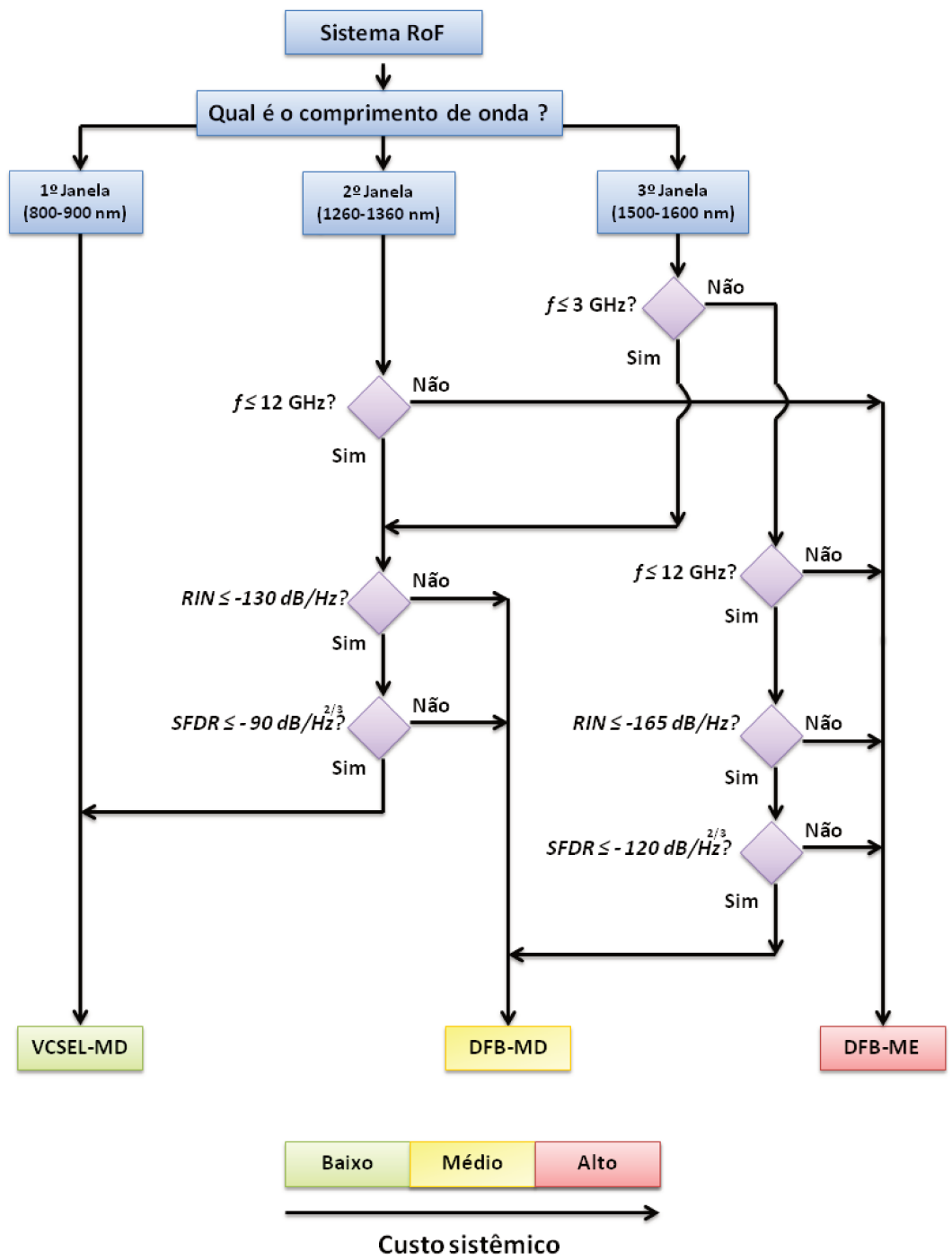


Fig. 3.8: Metodologia de projeto RoF.

Considere o exemplo a seguir para facilitar o uso da metodologia de projeto. Qual tecnologia de transmissão óptica um engenheiro de telecomunicações deve implementar em um sistema RoF com as seguintes características: $\lambda = 1550$ nm, $f = 5,8$ GHz, $RIN = -130$ dB/Hz e $SFDR = -90$ dB.Hz^{2/3}? A figura 3.9 descreve o caminho a ser percorrido para atingir tais especificações. Sendo assim, aconselha-se utilizar um transmissor RoF com laser DFB e modulação direta.

Além da metodologia de projeto, a experiência obtida com a presente dissertação leva as seguintes conclusões em relação ao custo-benefício das atuais soluções RoF comerciais. Transmissores VCSEL-MD são indicados para aplicações com portadoras de baixa frequência e linearidade, sendo recomendados para distribuição de sinais de telefonia móvel e Wi-Fi em ambientes *indoor* por meio de fibras SMF e MMF. Por outro lado, transmissores RoF com DFB-MD são indicados para soluções com frequência de RF de até 12 GHz e que precisem de SFDR entre 100 e 120 dB.Hz^{2/3}. A principal aplicação destes transmissores é na distribuição de sinais GSM e UMTS em ambientes *outdoor*. Além disso, lasers DFB são facilmente encontrados nas janelas de 1300 e 1500 nm.

Por fim, transmissores DFB-ME apresentam alto custo sistêmico, pois utilizam um modulador externo, geralmente do tipo Mach Zehnder. O custo deste sistema irá depender das características do modulador e do laser. Apesar do alto custo, este tipo de transmissor apresenta grande linearidade (>120 dB.Hz^{2/3}) e banda de modulação (>12 GHz), sendo empregado na distribuição de antenas remotas para radares e radioastronomia.

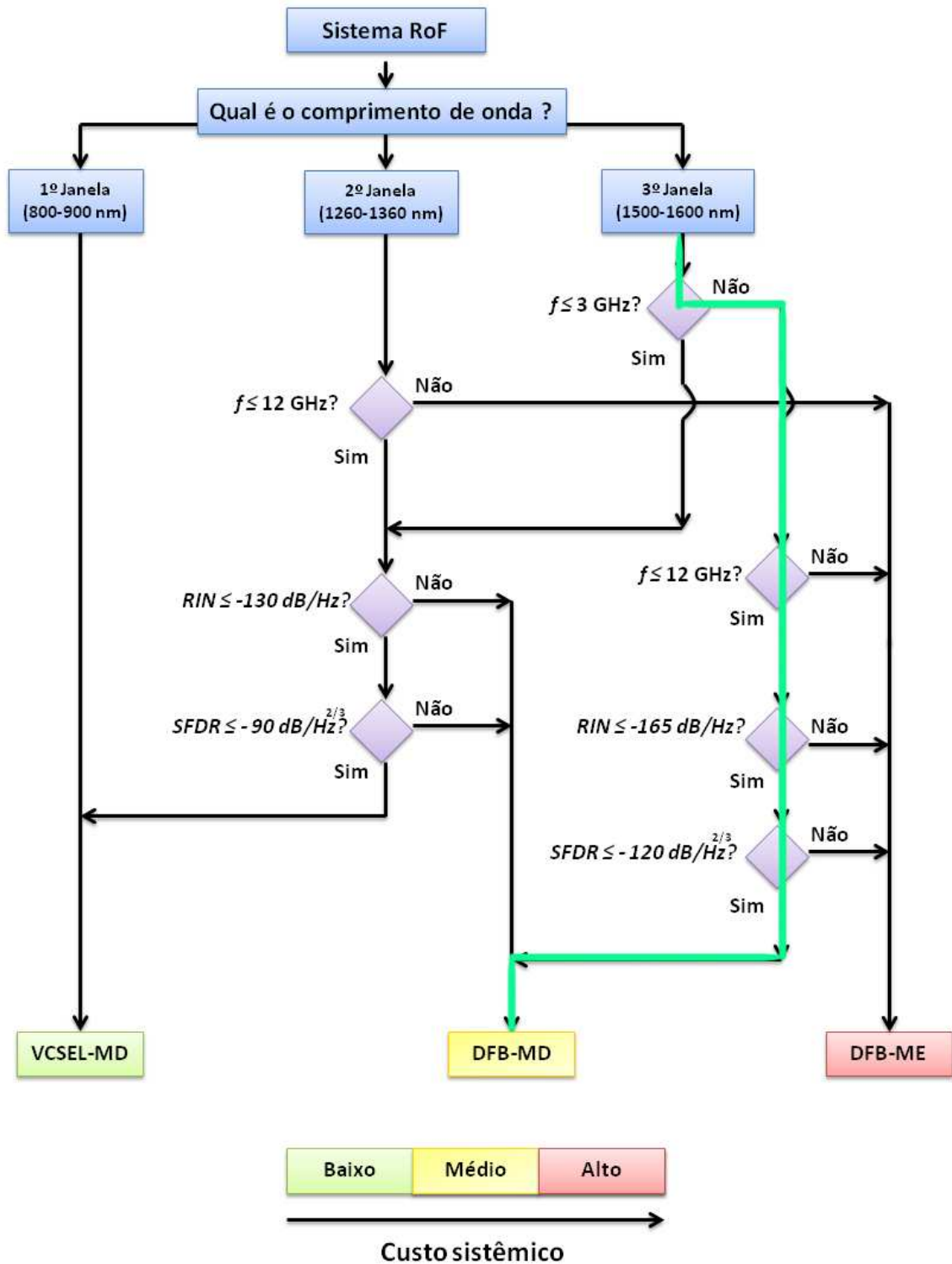


Fig. 3.9: Solução para o exemplo descrito.

CAPÍTULO 4

Implementação de sistemas RoF em redes de sensores sem-fio

Nos últimos anos, redes de sensores sem-fio, do inglês *Wireless Sensor Networks* (WSNs) vêm atraindo a atenção do mundo, principalmente com a evolução da tecnologia *Micro-Electro Mechanical Systems* (MEMS), a qual está permitindo a criação sensores menores e mais eficientes [91]. Estes sensores podem ser aplicados em sistemas de monitoramento remoto, obtendo informações como temperatura, pressão e umidade. Neste capítulo são apresentadas as características básicas das WSNs, tais como: bandas de transmissão, plataformas e aplicações. Por fim, é verificado analiticamente e experimentalmente o desempenho destas redes com os sistemas RoF por meio de quatro setups WSN-RoF.

4.1 Rede de sensores sem-fio

A WSN é uma rede de comunicação sem-fio formada por dezenas ou centenas de sensores autônomos que estão geograficamente distribuídos, os quais trabalham em conjunto no monitoramento das condições físicas e químicas do ambiente. Os dados coletados pelos sensores são então transmitidos por sinais de RF até um dispositivo concentrador, chamado de sensor *gateway*. Em seguida, o sinal recebido pelo sensor é retransmitindo para o usuário, o qual pode receber as informações utilizando um computador, *tablet* ou celular, figura 4.1 [91].

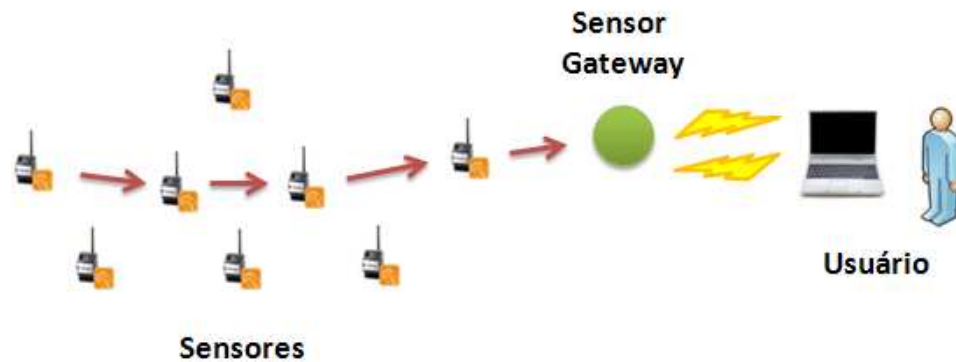


Fig. 4.1: Redes de sensores sem-fio.

Na arquitetura WSN, cada dispositivo de monitoramento é chamado de nó, sendo este composto pelos seguintes componentes: um ou mais transdutores, um microcontrolador, uma memória, uma bateria e um radiotransmissor. Vários tipos de sensores podem ser acoplados ao circuito, tais como: mecânico, térmico, biológico, químico, óptico e magnético [91]. Além disso, a alimentação de cada nó é realizada utilizando-se baterias, o que faz o consumo de energia ser um sério problema [92, 93]. Para isso, diferentes técnicas de alimentação estão sendo estudadas, principalmente as que visam obter energia do ambiente, como por exemplo, a aplicação de células fotovoltaicas [93]. A falta de alimentação no nó ocasiona a perda de conexão, o que pode, na maioria dos casos, afetar significativamente o canal de comunicação e a vida útil da rede WSN. Desta forma, existem vários estudos que buscam a criação de protocolos de comunicação que apresentem baixo consumo de energia [93].

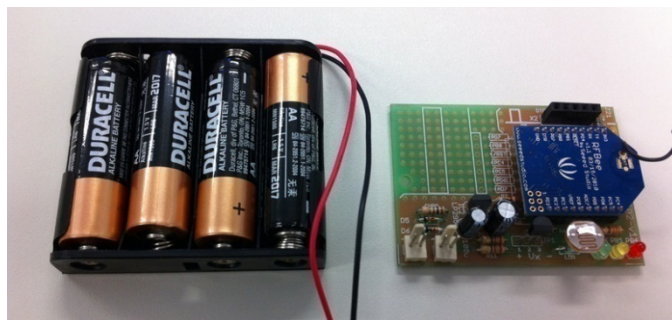


Fig. 4.2: Sensor sem-fio alimentado por bateria.

Atualmente, as frequências mais utilizadas em WSNs são 915 MHz e 2,4 GHz [94]. Em 2,4 GHz, a principal tecnologia utilizada é o padrão IEEE 802.15.4 ou *Zigbee* [95]. No entanto, esta banda de transmissão apresenta alta interferência de RF, pois é muito utilizada em várias aplicações, incluindo as redes Wi-Fi. Além disso, a duração da bateria e o raio de cobertura são menores devido à alta frequência. Por outro lado, a faixa de 915 MHz vem sendo extensivamente estudada em diferentes aplicações e plataformas, tais como: Arduino [94,96], SMAC da Freescale [97] e SimpliciTI da *Texas Instruments* [98]. A plataforma Arduino é uma solução simples e de baixo custo que pode ser facilmente aplicada na construção de WSNs [94], o que tem atraído o interesse de grandes empresas. Como exemplo, em 2011, o Google, anunciou um hardware oficial baseado em Arduino que tem como objetivo criar dispositivos de monitoramento para automação doméstica utilizando *tablets* e celulares [99].

É importante ressaltar também que o rápido desenvolvimento da computação e sensores está fazendo emergir um novo conceito na área de comunicações sem-fio, chamado de Internet das coisas, do inglês *Internet of Things (IOT)* [100]. A IOT visa à integração do mundo físico com o virtual conectando qualquer objeto à internet. Suas principais aplicações incluem: sistemas inteligentes, redes domésticas, sistemas de tele medicina, entre outros. Portanto, as WSNs são uma interessante solução para a popularização da IOT. Atualmente, WSNs podem ser aplicadas no monitoramento de pacientes em hospitais [101], terremotos [102], redes elétricas inteligentes (*smartgrids*) [103], usinas eólicas [104,105] e na criação das casas inteligentes [106].

4.2 Arquitetura WSN-RoF

A arquitetura WSN-RoF visa criar uma rede híbrida de monitoramento capaz de percorrer longas distâncias por meio da integração das tecnologias RoF e WSN [23,83]. A utilização da fibra óptica para estender o canal de transmissão permite o desenvolvimento de WSNs com maior raio de cobertura, menor consumo de energia, confiabilidade [108] e com tempo de atraso reduzido quando comparado às arquiteturas convencionais, como *ad-hoc* e *mesh* [109]. Nesta arquitetura, a portadora óptica é diretamente modulada com o sinal de RF oriundo do sensor *gateway*. O sinal modulado é então enviado para o receptor RoF que está localizando em uma

estação central. Divisores ópticos de potência (DO) podem ser então utilizados na criação de novas nuvens WSN, permitindo assim a cobertura de diferentes regiões [23,83,94], figura 4.3.

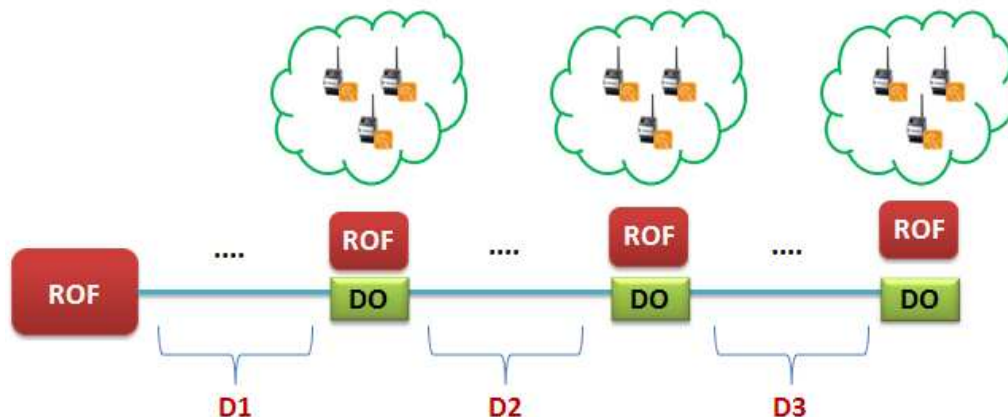


Fig. 4.3: Arquitetura WSN-RoF.

O raio de cobertura desta arquitetura irá depender principalmente do EIRP do sistema RoF, da frequência de RF usada na transmissão WSN e da programação na camada de acesso ao meio (*Media Access Control* - MAC) [94]. A programação da camada MAC é importante porque a fibra óptica insere um atraso de propagação no canal de RF, o qual deve ser considerado [107]. Tipicamente, o atraso inserido por uma fibra óptica monomodo é da ordem de $5 \mu\text{s}/\text{km}$ [82,94]. Portanto, caso a camada MAC não seja corretamente programada, o atraso pode ultrapassar o tempo de espera para se estabelecer a conexão dos sensores com o sensor *gateway*, impossibilitando a transmissão de dados. Assim sendo, o ajuste no atraso de propagação em diferentes células WSN-RoF deve ser considerado [94, 107]. Outro fator importante na instalação destas redes é a adição de novas células de cobertura. A criação de novas células implica no aumento do número de transmissores ópticos, o que conseqüentemente eleva a contribuição do RIN no receptor. Isto traz duas penalidades: aumento da figura de ruído e a diminuição do raio de cobertura da nuvem WSN [94].

Uma aplicação promissora para a arquitetura WSN-RoF é o monitoramento remoto de usinas eólicas [104,105]. Anualmente, cada turbina de geração precisa de cinco manutenções para manter a eficiência e evitar falhas, como superaquecimento que podem ocasionar grandes explosões e danos. Portanto, estes casos são extremamente perigosos e devem ser evitados. Para

isso, sensores sem-fio podem facilmente serem instalados nas torres de energia eólica, obtendo informações como velocidade de rotação, capacidade de geração e temperatura de operação em tempo real. As informações obtidas são então correlacionadas em um banco de dados, estimando a geração típica de cada turbina, prevendo assim manutenções futuras e a capacidade da rede conforme determinada época do ano [104,105], figura 4.4.

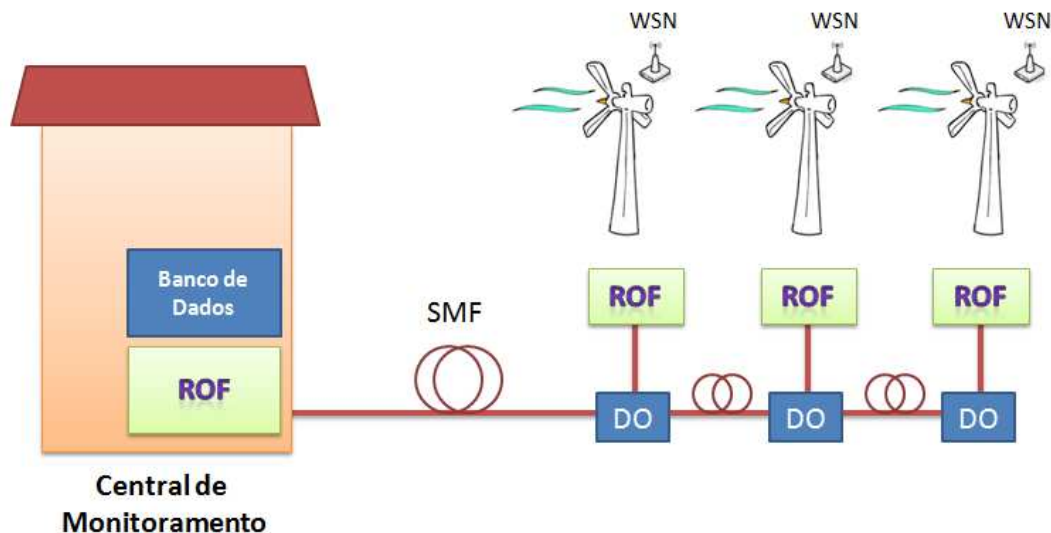


Fig. 4.4: Sistema WSN-RoF: monitoramento de energia eólica.

Nesta aplicação, a distribuição dos receptores RoF é realizada por meio de enlaces ópticos instalados individualmente em cada torre. Divisores ópticos de potência (DO) são então aplicados na criação de novas nuvens de sensores para cada torre. Em seguida, os parâmetros medidos pelos sensores são enviados para a Estação Central, a qual esta conectada a um banco de dados. Outras aplicações incluem o monitoramento em zonas de risco, alertando a população por meio de mensagens de texto em celulares sobre uma possível enchente ou deslizamento. Em redes de energia elétrica, o consumo em residências pode ser monitorado em tempo real, evitando desperdícios e auxiliando na criação de casas inteligentes [103,106].

4.3 Implementação

A implementação da arquitetura WSN-RoF baseou-se em quatro setups experimentais, nos quais os sistemas RoF foram utilizados como *backhaul*. O desempenho destes sistemas foi

avaliado por meio da PER em função da RSSI. A plataforma WSN utilizada nos experimentos trabalha na banda 915 MHz e utiliza modulação FSK com taxa de 250 kbps [94]. Para a criação da arquitetura WSN-RoF dois modelos de equipamentos RoF comerciais foram utilizados: OZ810, da empresa OpticalZonu, designado como RoF 1; ViaLiteWideband 10-3000MHz, da empresa PPM, designado como RoF 2, figura 4.5.



Fig. 4.5: Equipamentos RoF: a) Optical Zonu OZ810; b) PPM ViaLite.

RoF	EIN (dBm/Hz)	λ (nm)	NF (dB)	RIN (dBm/Hz)	P_{out} (mW)	S_l (A/W)	Pol. (mA)	S_{PD} (W/A)	Largura de linha (Hz)
1	-130	1310	44	-140	4	0,1	20	0,85	3 GHz
2	-150	1550	24	-155	4	0,25	20	1	10 MHz

Tabela 4-1:Parâmetros dos sistemas RoF em 915 MHz.

A tabela 4.1 apresenta os parâmetros de operação em 915 MHz dos dois sistemas RoF. Primeiramente, foi verificada a variação da NF conforme o RIN no transmissor RoF usando as equações descritas no capítulo 3. Para isso, o ruído *shot* e térmico foram calculados e mantidos constantes, considerando-se uma atenuação óptica de 6 dB (valor do enlace experimental). Os valores obtidos foram -135,23 e -137,97 dBm/Hz para o RoF 1 e de -143,89 e -145,93 dBm/Hz para o RoF 2, respectivamente. Aplicando estes valores na equação 3.7 e variando-se o valor da RIN entre -125 à -185 dB/Hz na equação 3.9 foi possível determinar a mudança do EIN e obter a

NF em cada sistema RoF por meio da equação 3.16. O gráfico da figura 4.6 ilustra a relação NF x RIN para cada sistema RoF operando em 915 MHz com 6 dB de perda óptica.

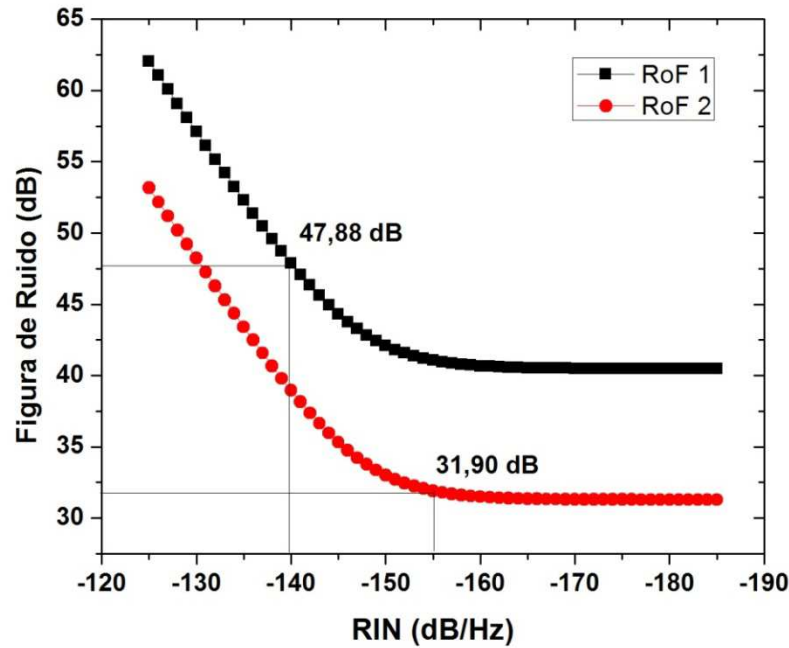


Fig. 4.6: Variação da NF conforme o RIN nos RoF em 915 MHz.

Nesta análise, o casamento de impedância considerado foi o resistivo e com uma carga de 50Ω . Utilizando-se o RIN informado pelo fabricante, obtêm-se os pontos destacados no gráfico da figura 4.6. No RoF 1, para um laser com RIN igual à -140 dB/Hz , a NF é de $47,88 \text{ dB}$, enquanto que no RoF 2, para RIN igual à -155 dB/Hz a NF foi de $31,90 \text{ dB}$, o que comprova um ganho na NF de $15,98 \text{ dB}$ do RoF 2 em relação ao RoF 1. Vale ressaltar que a largura de linha do RoF 2 é muito estreita (10 MHz) quando comparada com a do RoF 1 (3 GHz), ou seja, isto torna o sistema RoF 2 indicado para aplicações de longa distância e com altas frequência de modulação, uma vez que são menos sensíveis ao *chirp*. Em seguida, foi calculada a contribuição das fontes de ruído no EIN em função da perda óptica. Como descrito no Capítulo 3, o RIN independe da perda óptica, enquanto o ruído *shot* e térmico competem como fonte de ruído. A figura 4.7 mostra que no RoF 1 o RIN é a principal fonte de degradação, o qual limita o EIN até 8 dB de perda óptica.

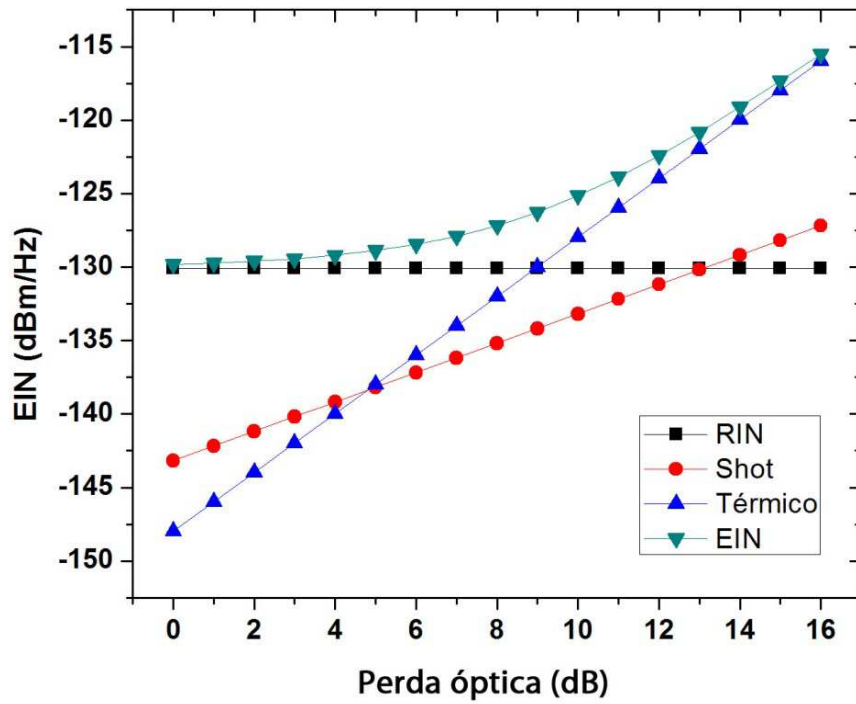


Fig. 4.7: EIN x perda óptica no RoF 1.

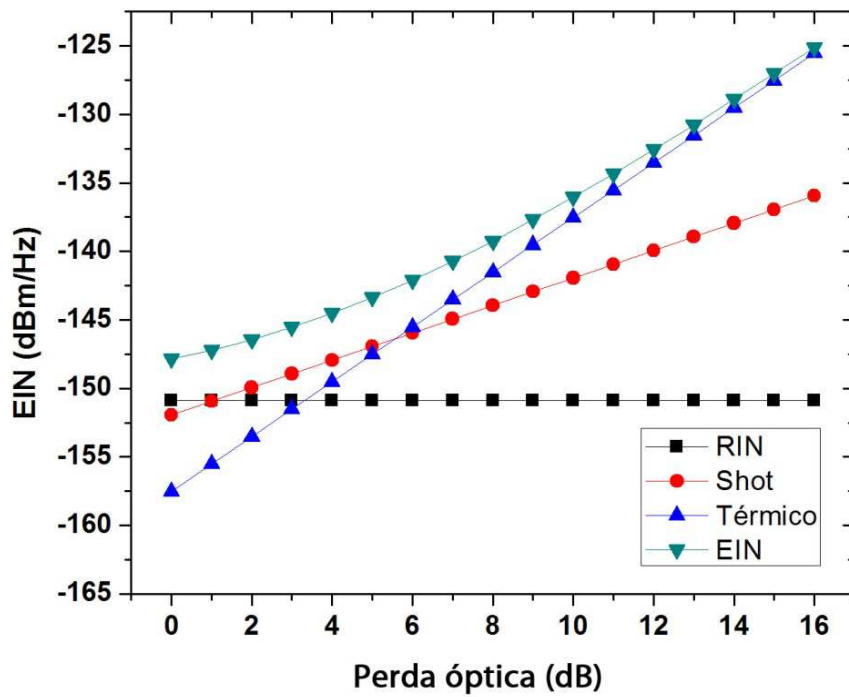


Fig. 4.8: EIN x perda óptica no RoF 2.

O RIN é superado somente aos 9 dB, quando o resistor utilizado no casamento de impedância na saída do sistema RoF gera uma grande quantidade de ruído térmico, elevando o EIN até -115 dBm/Hz com 16 dB de perda óptica. Vale ressaltar que o ruído *shot* não foi dominante em nenhum momento, ou seja, sistemas RoF que utilizem lasers com alto RIN a NF será alta e a principal fonte de ruído é a do laser, sendo esta dominante até elevadas perdas ópticas.

Analogamente, o gráfico da figura 4.8 ilustra a curva EIN x perda óptica para o RoF 2. Neste sistema, a contribuição do RIN foi de -150,86 dBm/Hz, enquanto no RoF 1 foi de -130,08 dBm/Hz, o que confirma a importância da utilização de lasers semicondutores com baixo RIN na criação de sistemas RoF de alto desempenho. Entretanto, apesar desta melhora, o RIN ainda é a principal fonte de ruído em baixa atenuação. Além disso, observa-se que o RIN é superado pelo ruído *shot* em apenas 2 dB de perda óptica, o qual permanece limitando o EIN até 6 dB, sendo então ultrapassado pelo térmico.

Desta forma, o RoF 2 é considerado um sistema de alto desempenho, pois apresenta uma fonte óptica com baixo RIN, emissão em 1550 nm e estreita largura de linha (10 MHz), sendo portanto indicado para aplicações de longo alcance. Por outro lado, o RoF 1 é uma solução para aplicações de curta distância, como ambientes *indoor*, devido ao elevado EIN, emissão em 1310 nm e grande largura de linha (3GHz).

Em seguida, o ganho de RF foi calculado considerando uma atenuação de 6 dB, casamento resistivo com uma carga de 50Ω e sem amplificação. O ganho calculado foi de -26,02 e -18,06 dB para o RoF 1 e RoF 2, respectivamente. Por outro lado, as figuras 4.9 e 4.10 mostram o ganho de RF dos sistemas RoF na configuração *back-to-back*. Os valores foram medidos com um analisador de espectro elétrico (*Electrical Spectrum Analyzer - ESA*) na faixa de 10 a 3000 MHz. No RoF 1, o ganho obtido foi de 3,51 dB em 915 MHz e 3,2 dB em 2,4 GHz, enquanto no RoF 2 foram de -0,94 e -1,11 dB, respectivamente.

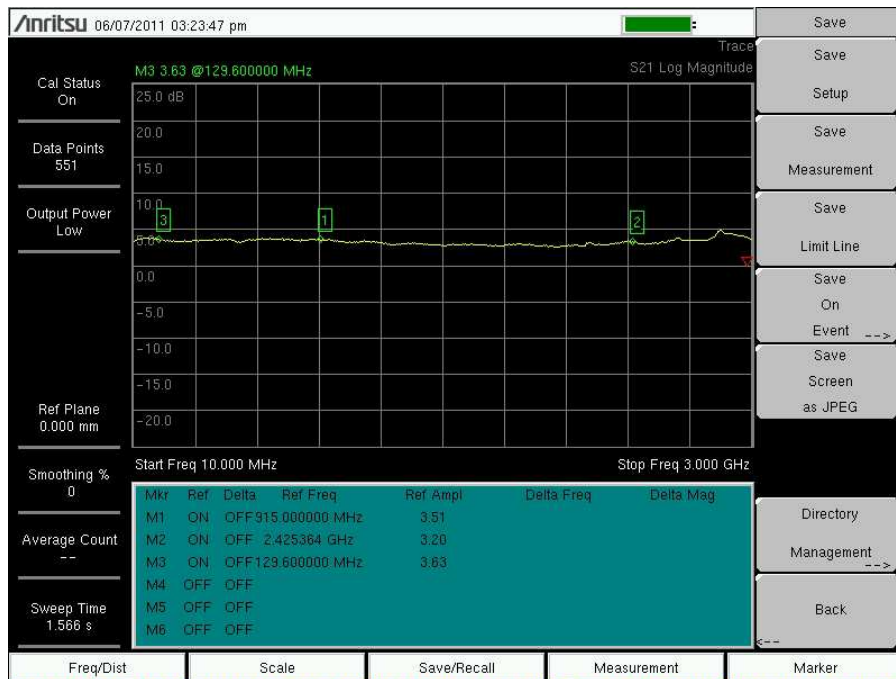


Fig. 4.9: Ganho de RF no RoF 1

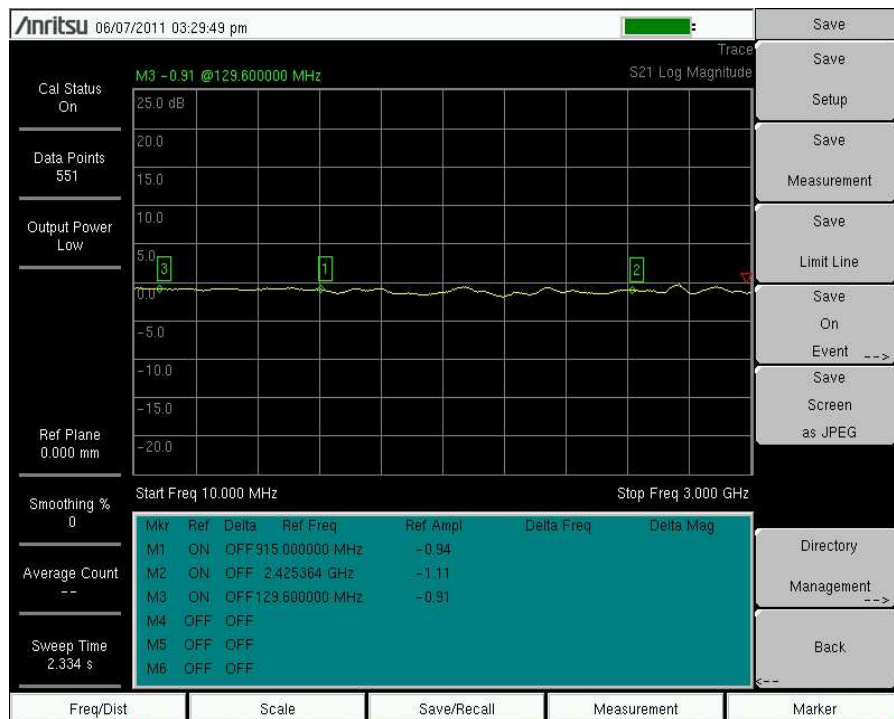


Fig. 4.10: Ganho de RF no RoF 2

4.3.1 Raio de cobertura da nuvem

O cálculo do raio de cobertura da nuvem WSN foi obtido considerando-se um canal com ruído branco gaussiano. A modulação utilizada na WSN é a por desvio de frequência (*Frequency-Shift Keying* - FSK), a qual tem probabilidade de erro dada por [94]:

$$P_{e,FSK} = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{N_0}} \quad (3.1)$$

Onde E_b é a energia do bit e N_0 é a densidade espectral de potência de ruído. A SNR para atingir 250 kbps de taxa de transmissão com banda de 541,66 kHz foi calculada por [94]:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b Rb}{N_0 B} \quad (3.2)$$

Onde Rb é a taxa de dados e B é a banda do canal, enquanto a PER foi obtida por meio da taxa de erro de bits (*Bit Error Rate* - BER) e o tamanho do pacote de transmissão (n) [94]:

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad (3.3)$$

Para uma WSN utilizando modulação FSK, taxa de transmissão de 250 kbps, filtro com banda de 541,66 kHz, pacote de transmissão com 152 bits e considerando-se uma PER de 5% a menor SNR necessária para estabelecer uma conexão é de 8,3 dB [94]. A potência de recepção no sensor na arquitetura WSN-RoF é dada por [94]:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{PL} + G_{Rx} + G_{RoF} \quad (3.4)$$

Onde P_{Tx} é a potência transmitida em dBm, G_{Tx} é o ganho de transmissão da antena em dBi, L_{PL} é a atenuação do enlace conforme o modelo de propagação em dB, G_{Rx} é o ganho de recepção da antena e G_{RoF} é o ganho do sistema RoF em dB. A potência de sinal recebido também pode ser calculada por meio do EIN e banda do canal de transmissão [94]:

$$P_{Rx} = EIN_{dBm/Hz} + 10 \log(B_{Hz}) + SNR_{dB} \quad (3.5)$$

O modelo de propagação utilizado para os cálculos analíticos foi o log-distance [94]:

$$L_{PL} = 20 \log \left(\frac{4\pi * d_0}{\lambda} \right) + 10\beta \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.6)$$

Onde d_0 é a distância de referência, λ é o comprimento de onda em RF, β é o expoente de perda no meio e d é a distância total entre as antenas. Neste caso, o β foi definido como 3,41, o que representa uma WSN em ambiente aberto operando em 915 MHz. Desta forma, é possível combinar as equações 3.4 e 3.6, derivando a equação 3.7, a qual foi usada no cálculo do raio de cobertura da nuvem WSN [94]:

$$d = d_0 10^{\frac{P_{Tx} + G_{Tx} - 10 \log \left(\frac{4\pi * d_0}{\lambda} \right)^2 + G_{RoF} - P_{Rx}}{10\beta}} \quad (3.7)$$

A figura 4.11 mostra o raio de cobertura da nuvem WSN (d) conforme o EIN varia entre -90 e -160 dBm/Hz. Neste gráfico, foram considerados $P_{Tx} = 10$ dBm, $d_0 = 1$ m, $G_{RoF} = -15$ dB, $G_{Tx} = G_{Rx} = 0$ dBi e $\beta = 3,41$. Desta forma, o raio de cobertura da nuvem WSN nos sistemas RoF 1 (-130 dBm/Hz) e RoF 2 (-150 dBm/Hz) foram de e 8,49 e 28,65 metros, respectivamente.

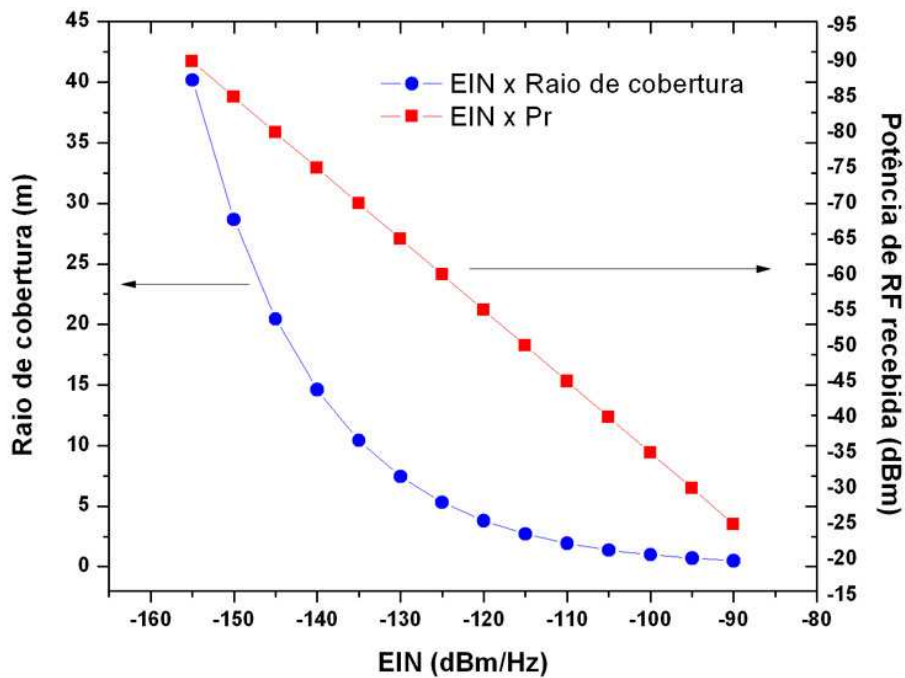


Fig. 4.11: EIN x Pr x raio de cobertura

4.4 Resultados experimentais

Os setups experimentais com as arquiteturas WSN-RoF são ilustrados pela figura 4.12, sendo estes compostos pelos seguintes dispositivos: um sensor *gateway*, um sensor nó, um atenuador variável de RF (AV), utilizado para emular a atenuação do canal de RF conforme o sensor nó afasta-se do sensor *gateway*; dois sistemas RoF (RoF 1 e RoF 2), dois circuladores de RF de 915 MHz (C1 e C2) com isolamento de 23 dB, duas câmaras reverberantes (CRRF), usadas para isolamento do sinal WSN e um computador (PC), para medir os valores de PER e RSSI. Como visto no capítulo 3, sistemas WSN-RoF operando em 915 MHz podem atingir distâncias de até 4000 km. Entretanto, o experimento utilizou um enlace de 3 km com o objetivo de unir as WSNs com as redes Wi-Fi para a distribuição em ambientes *indoor*, visando aplicações em hospitais e casas inteligentes.

O enlace óptico utiliza fibra monomodo (SMF) com atenuação de 0,22 dB/km em 1550 nm e 0,33 dB/km em 1310 nm. A dispersão é de aproximadamente 16 ps/nm.km em 1550 nm e desprezível em 1310 nm. Cada experimento consistiu em uma série de testes no qual o canal de RF é gradualmente atenuado utilizando o AV e medindo os valores de PER e RSSI. Para cada ponto, cinco medidas foram realizadas, nas quais foram transmitidos dez mil pacotes entre os sensores. O tipo de modulação utilizada e taxa de transmissão no sistema WSN foi a FSK e 250 kbps, respectivamente. A largura de banda do filtro é de 541,66 kHz e os pacotes transmitidos têm 152 bits [94]. Primeiramente, obteve-se a medida de referência do canal de RF na rede WSN sem os sistemas RoF. Em seguida, foram implementados quatro diferentes arquiteturas WSN-RoF usando dois sistemas RoF. A tabela 4.2 apresenta os valores de RSSI para PER = 5% em cada setup. É importante ressaltar que em sistemas ópticos a PER é muito inferior aos 5% estabelecidos. Entretanto, em sistemas de comunicação sem-fio, este valor é considerado aceitável devido às perdas por propagação e multipercurso.

Setup	Tx	Rx	RSSI p/ PER = 5% (dBm)
A	RoF 1	RoF 1	-71,01
B	RoF 2	RoF 2	-88,53
C	RoF 1	RoF 2	-87,10
D	RoF 2	RoF 1	-75,37

Tabela 4-2: RSSI dos setups WSN-RoF em 915 MHz

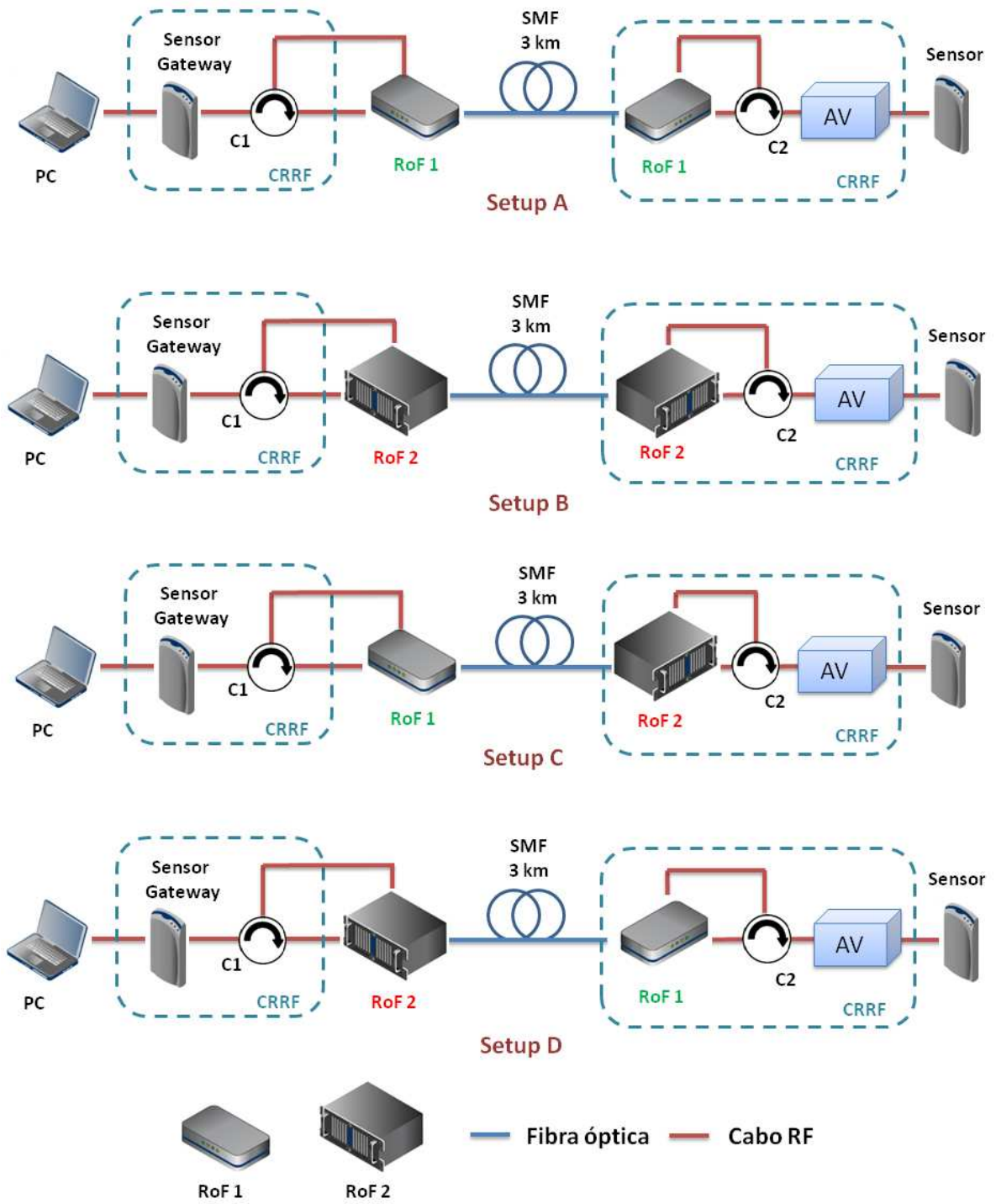


Fig. 4.12: Setups experimentais WSN-RoF

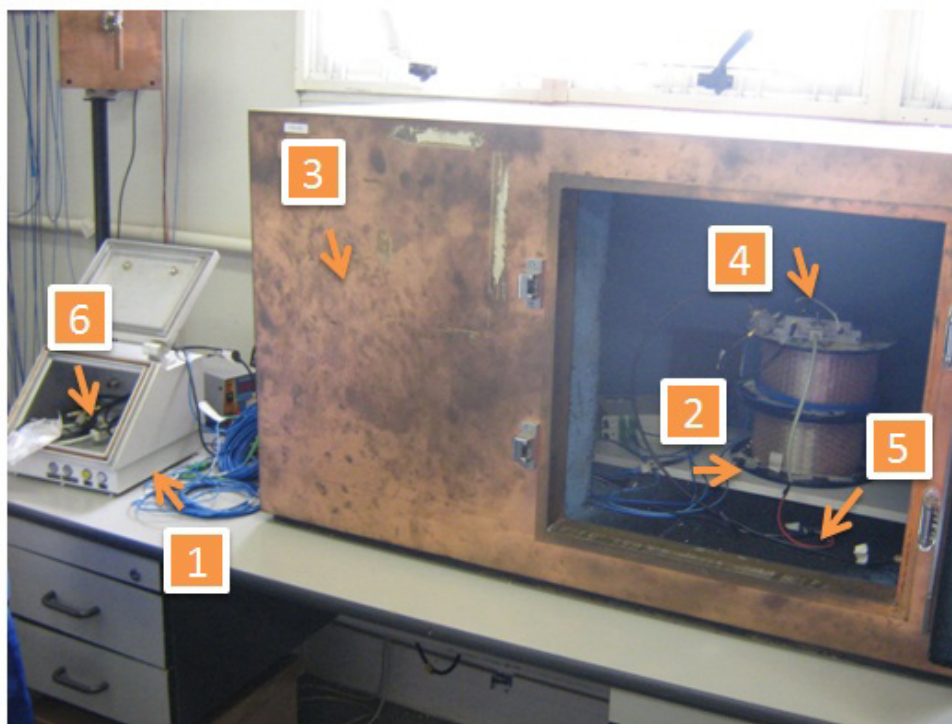


Fig. 4.13: Setup experimental: 1-Câmara de isolamento, 2-Carretel de fibra, 3-Câmara de isolamento, 4-Sistema RoF, 5-Sensor sem-fio, 6-Atenuador variável.

A figura 4.13 mostra uma foto de um dos setups experimentais descritos anteriormente. Nesta figura é possível observar as câmaras de isolamento (1) (3), usadas para proteger o vazamento do sinal WSN, dois carretéis de fibra óptica com 3 km (2), usados na distribuição, o módulo RoF (4), o sensor nó (5) e o atenuador variável de RF (6) o qual está dentro da câmara de isolamento (1). A figura 4.14 ilustra o gráfico dos pontos de PER e RSSI medidos em cada setup experimental. Observa-se que o melhor resultado foi obtido usando o setup B, no qual a penalidade foi de apenas 6,32 dB na RSSI em relação ao setup de referência (sem RoF), o que resulta em uma potência de recepção de -88,53 dBm. O gráfico também mostra o comportamento linear do EIN em relação à potência de recepção, descrito pela equação 3.5.

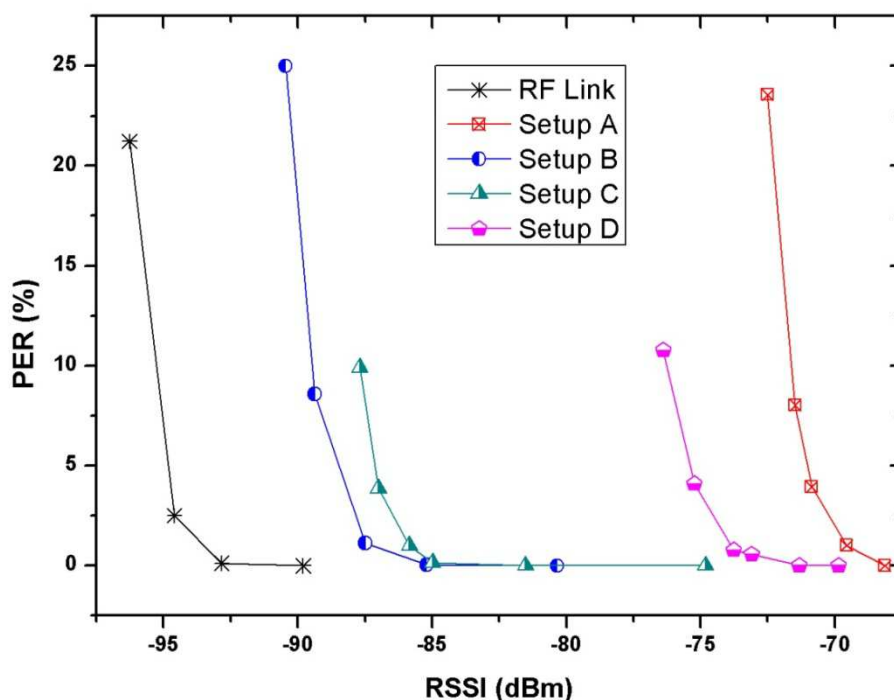


Fig. 4.14: Resultados experimentais WSN-RoF.

Do mesmo modo, o pior resultado foi obtido através do setup A, o qual exige uma RSSI igual a -71,01 dBm para obter PER = 5%, o que significa uma penalidade 23,84 dB em relação à medida sem RoF (RF Link). Isto demonstra experimentalmente uma superioridade do setup B em relação ao setup A de 17,45 dB, valor próximo da predição analítica de 15,98 dB. Já para os setups C e D, a RSSI necessária para obter PER = 5% foram -87,10 e -75,37 dBm, ou uma penalidade de 7,75 e 19,48 dB, respectivamente em relação ao setup sem RoF. A figura 4.14 mostra ainda que no setup C, a troca do transmissor óptico pelo de alto RIN afetou em apenas 1,43 dB o sinal de RF em relação ao setup A, mostrando que o desempenho no sistema não está limitado pelo RIN, mas sim pelo receptor óptico, o que é comprovado comparando-se o setup C e D, onde o receptor com maior amplificação e eficiência de conversão (RoF 2) é substituído pelo de menor amplificação e eficiência de conversão (RoF 1), afetando significativamente a RSSI da arquitetura WSN-RoF.

Por outro lado, a figura 4.15 ilustra o raio de cobertura das nuvens WSN com a tecnologia RoF para os dois sistemas. Os raios de cobertura para o RoF 1 e RoF 2 foram estimados com valores experimentais e analíticos. Desta forma, os valores considerados foram: potência de

transmissão P_{Tx} igual a 10 dBm, ganho da antena de transmissão e recepção iguais a 0 dBi, distância de referência d_0 igual a 1 metro, ganho do sistema RoF 1 e RoF 2 iguais a -15 dB e -13 dB, respectivamente e coeficiente de perda no meio β igual a 3,41.

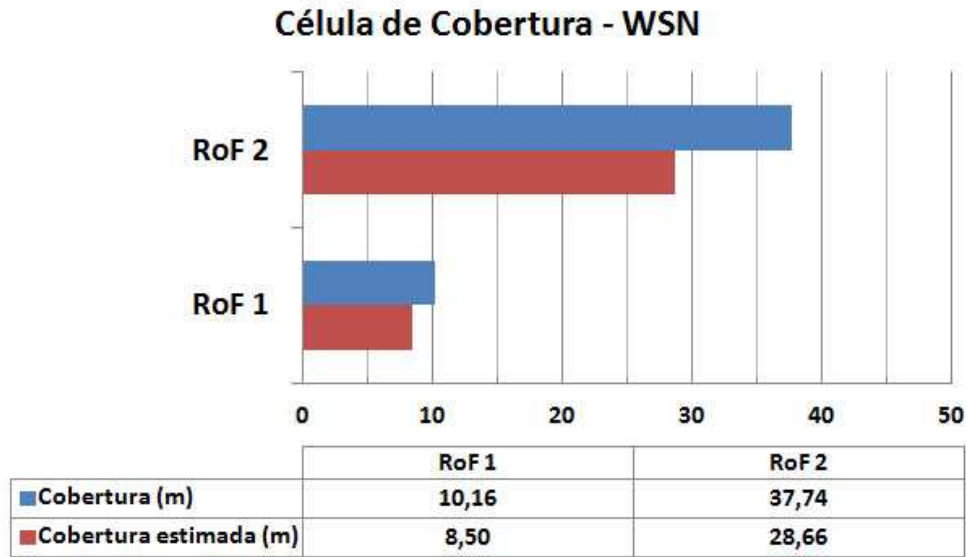


Fig. 4.15: Raio de cobertura dos sistemas WSN-RoF.

As potências de recepção calculadas foram de -68,36 e -84,36 dBm para o RoF 1 e RoF 2, respectivamente, enquanto que experimentalmente os valores obtidos foram de -71,01 e -88,44 dBm. Utilizando estes valores na equação 3.7 e 3.5 foi possível obter os raios de cobertura para cada nuvem WSN. Para o setup A (RoF 1), o raio de cobertura experimental foi de 10,16 metros, enquanto que para o setup B (RoF 2) foi de 37,74 metros. Estes resultados mostram que o setup A é uma solução com ótimo custo-benefício para a criação da arquitetura WSN-RoF, permitindo realizar a distribuição de sinais por enlaces ópticos com 3 km e obtendo uma nuvem WSN com raio de cobertura de 10,16 metros, ou 3010,16 metros de cobertura total. Observa-se também que para este caso, a degradação do EIN é oriunda dos amplificadores e componentes optoeletrônicos utilizados no receptor, sendo este problema facilmente solucionado com a adição de amplificadores de RF [94].

Analogamente, os resultados do setup B ilustram a importância de um transmissor RoF com lasers de baixo RIN e um receptor formado por componentes optoeletrônicos de alta eficiência de conversão, o que permitiu um desempenho superior de 17,45 dB na RSSI em relação ao setup

A e estendendo o raio de cobertura da nuvem WSN em 27,58 metros. Já os setups C e D ilustram a importância de um receptor que utilize amplificadores de RF com alto ganho e baixa distorção para aplicações de longa distância. Comparando estes setups nota-se que o RIN não é a principal fonte de ruído na arquitetura WSN-RoF proposta, demonstrando a distribuição de WSNs por 3 km de fibra SMF utilizando um transmissor com RIN igual a -130 dB/Hz e um receptor de alto desempenho, o que resultou em uma penalidade de 1,43 dB na RSSI em relação ao setup de melhor desempenho WSN-RoF (setup B).

Vale ressaltar também que o raio de cobertura da WSN convencional foi estendido de aproximadamente 140 metros para 3.010,16 e 3.037,74 metros utilizando-se as arquiteturas dos setups A e B, respectivamente. Para aplicações WSN-RoF de longo alcance (maiores que 10 metros) recomenda-se a utilização de sistemas RoF com valores de EIN menores que -150 dBm/Hz, enquanto que para aplicações de pequeno alcance (menores que 10 metros), lasers semicondutores de baixo custo, com elevado RIN e casados resistivamente podem ser utilizados, oferecendo EIN maiores que -130 dBm/Hz.

Concluindo, a arquitetura WSN-RoF foi analiticamente e experimentalmente estudada e aplicada com sucesso por meio de quatro setups experimentais utilizando um enlace óptico com 3 km de fibra monomodo. Os resultados confirmam que a arquitetura WSN-RoF pode ser aplicada em soluções de monitoramento remoto, tais como: zonas de risco, pacientes em hospitais, refinarias de petróleo; minas de carvão, redes elétricas inteligentes, casas inteligentes e energia renovável.

CAPÍTULO 5

Implementação de sistemas RoF em redes Wi-Fi

Neste capítulo é apresentado e discutido o crescimento das redes Wi-Fi na criação de *hotspots* para os próximos anos, retratando como a tecnologia RoF pode contribuir positivamente na criação destas redes. Para isso, foram realizados dois setups experimentais utilizando sistemas RoF comerciais. Em seguida, o desempenho da arquitetura Wi-Fi-RoF foi então analiticamente e experimentalmente estudada, tendo como métricas de desempenho a taxa de perda de pacotes (PER) e vazão (*Throughput*) em função da RSSI.

5.1 Redes Wi-Fi

Nos últimos anos, as redes Wi-Fi cresceram significativamente, tornando-se a principal tecnologia de conexão com a internet em vários dispositivos, tais como: notebooks, celulares, videogames, media centers e televisores. A frequência de operação nessas redes é de 2,4 GHz, para o padrão IEEE 802.11g/n e de 5,8 GHz para o IEEE 802.11a, oferecendo taxas de transmissão de até 300 Mbps [40-43,110]. A utilização destas frequências, as quais não são licenciadas, permitiu a popularização da tecnologia Wi-Fi, principalmente em ambientes domésticos e empresariais através de roteadores sem-fio. Em países desenvolvidos, várias redes Wi-Fi estão sendo instaladas em locais públicos, como praças, pontos turísticos, aeroportos e shoppings, criando os chamados *hotspots* [111]. Além disso, recentemente, a *Wireless Broadband Alliance*, estimou que o número de *hotspots* no mundo seja de aproximadamente 1,3 milhões e espera-se que este valor aumente em 2015 para 5,8 milhões [111], figura 5.1.

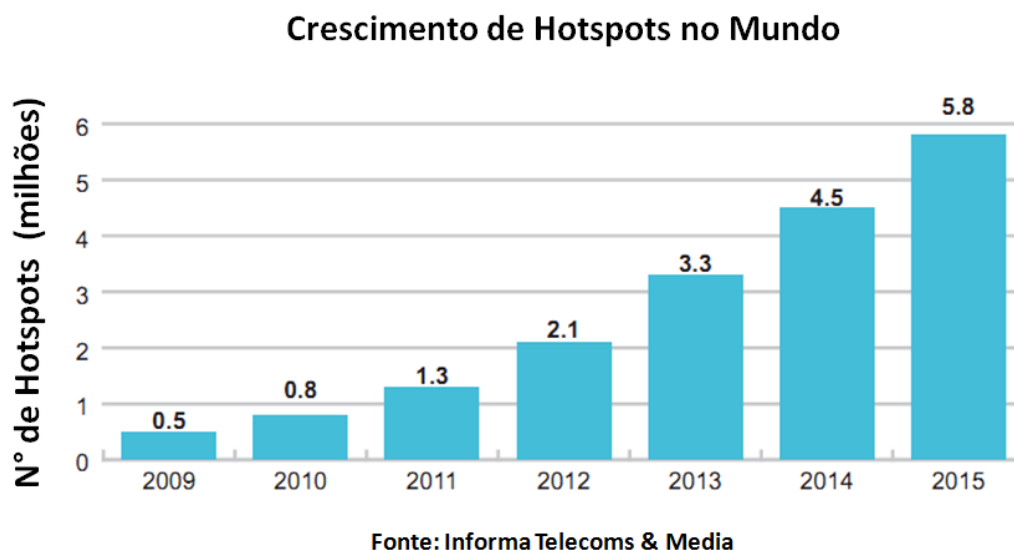
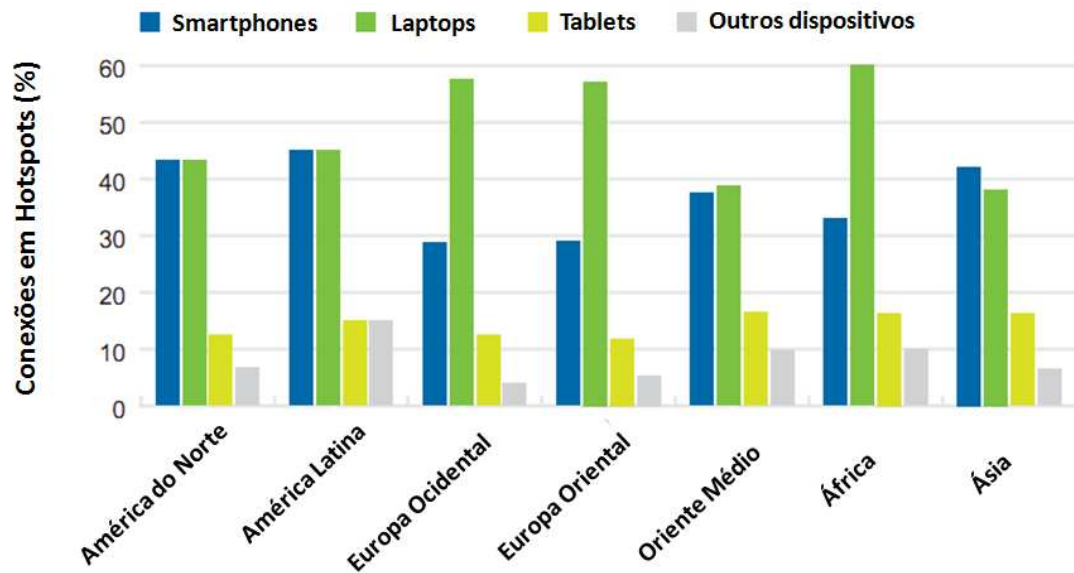


Fig. 5.1: Crescimento de *hotspots* no mundo (extraído de [111]).

O estudo apontou ainda que 58% das operadoras entrevistadas, sendo 47% da área de telefonia móvel, acreditam que os *hotspots* serão fundamentais na redução da sobrecarga em redes 3G e 4G, uma vez que até 2014, o fluxo de dados nessas redes irá superar os 16 milhões de terabytes. A pesquisa revelou ainda que, em breve, as conexões por meio de *smartphones* devem superar as por notebook em todo o mundo. Atualmente, os notebooks representam 48% das conexões, os *smartphones* 36% e os *tablets* 10%. No entanto, na América do Norte e Ásia os *smartphones* já ultrapassaram estas conexões [111], figura 5.2.

Por outro lado, no Brasil, o número de *hotspots* ainda é pequeno quando comparado com os países de primeiro mundo. Em 2008, o Brasil tinha aproximadamente 4.090 *hotspots*, enquanto em 2011, este número subiu para apenas 4.193. Como comparativo, no mundo, este valor aumentou de 287.992 para 682.861 em apenas dois anos, sendo o Reino Unido, China e Coréia do Sul os principais *players* [112].



Fonte: Informa Telecoms & Media

Fig. 5.2: Acesso por dispositivos em *hotspots* (extraído de [111]).

Desta forma, espera-se que nos próximos anos, a tecnologia Wi-Fi seja amplamente aplicada pelas operadoras de telefonia móvel, oferecendo acesso a internet em áreas públicas e reduzindo a sobrecarga nas redes móveis, como 3G, LTE e WiMAX. De fato, a próxima geração de *hotspots* será integrada por meio do chip da operadora, ou seja, quando o sinal do celular estiver em um ambiente com *hotspots*, ele é automaticamente conectado e vice-versa. Esta tecnologia é chamada de *Next Generation Hotspots* [113]. Desta forma, a instalação de *hotspots* apresenta vários desafios, principalmente em relação à distribuição de várias antenas a um baixo custo, o que torna a tecnologia RoF uma interessante opção, pois ela permite a criação de uma rede centralizada de distribuição que é imune a interferências eletromagnéticas, capacidade de compartilhamento de infraestrutura, permite distribuir antenas por longas distâncias e com consumo reduzido de energia [40-43].

5.2 Arquitetura Wi-Fi-RoF

A arquitetura Wi-Fi-RoF permite a distribuição de sinais Wi-Fi por meio de enlaces de fibra óptica, criando uma rede centralizada com múltiplas antenas remotas [40-43], a qual pode ser aplicada em ambientes *indoor* e *outdoor*. Atualmente, redes Wi-Fi estão sendo instaladas em

várias residências devido ao baixo custo dos roteadores. Entretanto, a instalação destes vários roteadores está contribuindo para o aumento de interferências na faixa de 2,4 GHz, o que reduz raio de cobertura e a taxa de transmissão efetiva das redes Wi-Fi. Desta forma, uma possível e eficiente solução é utilizar a tecnologia RoF para realizar a distribuição de picocélulas Wi-Fi em prédios comerciais e residências [40-43], como ilustra a figura 5.3.

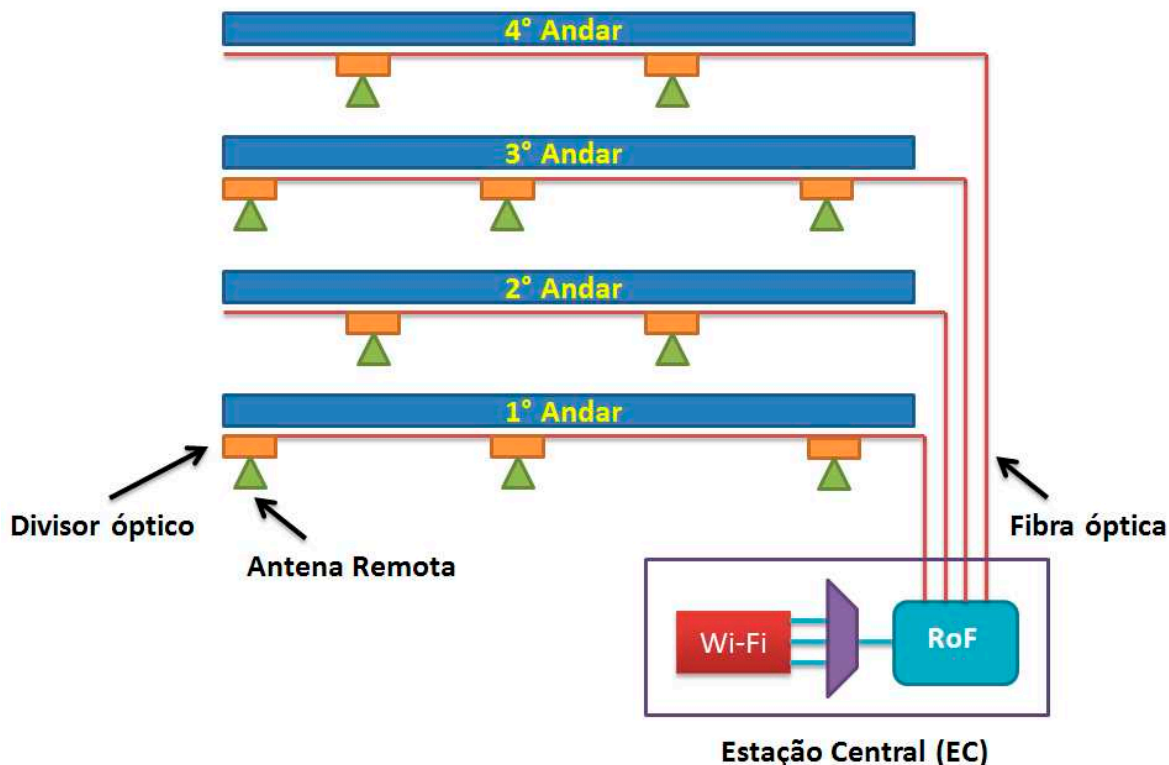


Fig. 5.3: Aplicação da arquitetura Wi-Fi-RoF em ambientes *indoor*.

Neste exemplo, várias antenas são distribuídas remotamente em cada andar utilizando-se enlaces de fibra óptica do tipo multimodo ou monomodo. Esta configuração também é chamada de sistemas de antenas distribuídas, do inglês *Distributed Antenna Systems* (DAS) [16,40-43], sendo as suas principais vantagens o compartilhamento de infraestrutura, aumento do raio de cobertura e redução das interferências entre os canais. Além disso, esta arquitetura apresenta fácil atualização, pois a tecnologia Wi-Fi pode ser substituída na EC por outros padrões de comunicação sem-fio sem necessitar trocar todas as antenas remotas e cabeamento, sendo possível transmitir sinais WiMAX [25]. Apesar destas vantagens, sistemas Wi-Fi-RoF com

padrão 802.11g são atualmente limitados a 4 km de distância da EC devido ao atraso de propagação adicionado pela fibra óptica [82]. Isto ocorre porque a programação da MAC no padrão Wi-Fi apresenta um tempo máximo de espera de 20 μ s para estabelecer um canal de comunicação. Ou seja, o sistema envia um pacote, chamado *ACKNOWLEDGE*, responsável por solicitar um canal de transmissão e ativar um contador. Caso o pacote de confirmação, chamado *ACK_out* não seja recebido no período de 20 μ s, a conexão não é estabelecida [82]. Portanto, uma vez que a fibra monomodo insere um atraso típico de 5 μ s/km, a distância máxima para o padrão IEEE 802.11g em sistemas RoF é de 4 km. Além disso, sistemas Wi-Fi-RoF utilizando enlaces com fibras multimodo foram experimentalmente demonstrados com lasers VCSEL em 850 nm, atingindo distâncias de até 600 metros [24].

5.3 Setup e análise de desempenho

Nesta seção, é apresentado o estudo analítico e experimental da penalidade de transmissão RF nas arquiteturas Wi-Fi-RoF. Para isso, dois setups com a arquitetura Wi-Fi-RoF foram criados utilizando dois equipamentos RoF comerciais: OpticalZonu OZ810 (RoF 1) e PPM ViaLite Wideband 10-3000MHz (RoF 2). A figura 5.4 ilustra o esquemático do setup, o qual é composto por: dois computadores (servidor e cliente), dois circuladores de RF de 2,4 GHz e com isolamento de 23 dB, C1 e C2, um atenuador variável de RF com banda de 3 GHz (AV), dois carretéis de fibra óptica monomodo com 3 km e duas câmaras reverberantes (CRRF) para isolamento do sinal Wi-Fi.

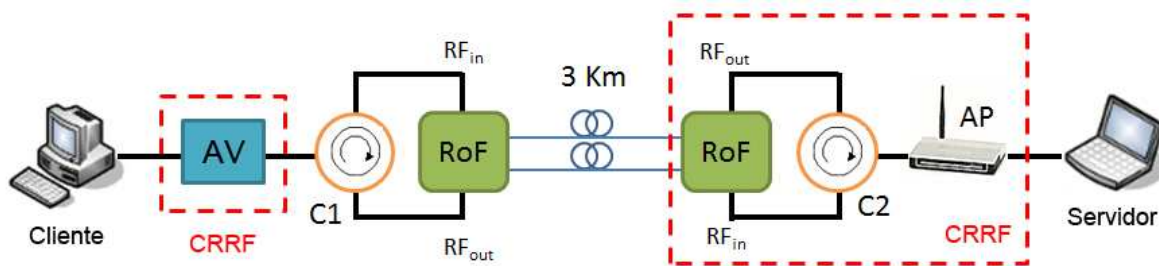


Fig.5.4: Setup experimental Wi-Fi-RoF.

Os dados gerados pelo servidor foram enviados pela rede através do roteador Wi-Fi (AP), o qual está conectado ao sistema RoF por meio do circulator C2. O sinal Wi-Fi é então usado para

modular diretamente o transmissor óptico do sistema RoF, enviando o sinal até o receptor por um enlace óptico com 3 km de fibra monomodo. No receptor, o sinal é então fotodetectado e atenuado por um atenuador variável antes de ser transmitido para o usuário. Para evitar perdas por multipercurso, todas as conexões de RF foram cabeadas. O tráfego de dados e medição da PER foram realizados utilizando o software Jperf [114], enquanto o software inSSIDer [115] foi utilizado para obter a RSSI. A figura 5.5 mostra uma foto de um dos setups Wi-Fi-RoF.

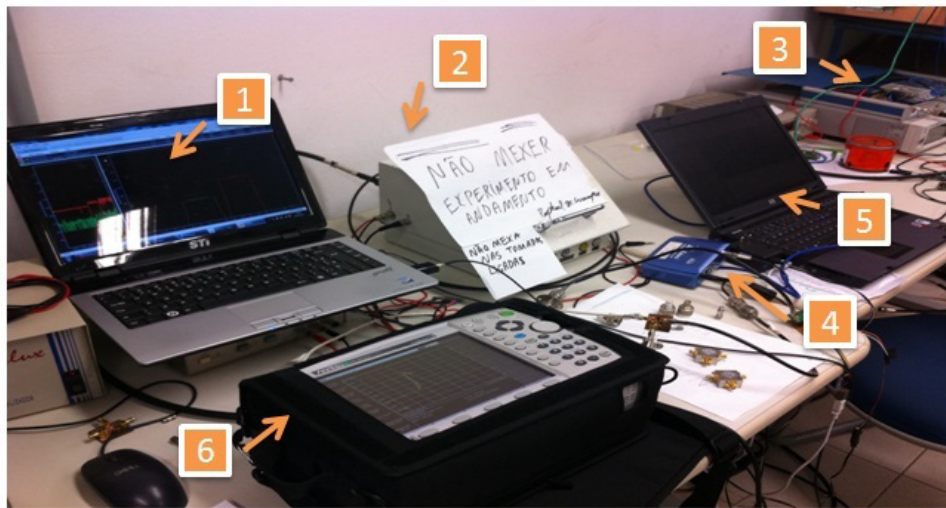


Fig. 5.5: Setup experimental: 1-Cliente, 2- Câmara de isolamento, 3-Sistema RoF, 4-Roteador, 5-Servidor, 6-Analisador de espectro.

Primeiramente, a conexão Wi-Fi entre o cliente e servidor foi estabelecida sem a utilização dos sistemas RoF, obtendo-se a medida de referência (RF Link). Em seguida, os dois sistemas RoF foram inseridos, criando a arquitetura Wi-Fi-RoF. A atenuação na fibra é de 0,22 dB/km em 1550 nm e 0,33 dB/km em 1310 nm, enquanto a dispersão é de aproximadamente de 16ps/nm.km em 1550 nm e desprezível em 1310 nm. Os parâmetros de operação para cada sistema RoF em 2,4 GHz estão sumarizados na tabela 5.1.

RoF	EIN (dBm/Hz)	λ (nm)	NF (dB)	RIN (dBm/Hz)	P_{out} (mW)	S_I (A/W)	Pol. (mA)	S_{PD} (W/A)	Largura de linha (Hz)
1	-126	1310	48	-140	4	0,1	20	0,85	3 GHz
2	-147	1550	27	-155	4	0,25	10	1	10 MHz

Tabela 5.1:Parâmetros dos sistemas RoF em 2,4 GHz.

Assim como no capítulo 4, cálculos analíticos foram realizados para verificar o desempenho dos sistemas RoF em 2,4 GHz. Utilizando os dados da tabela 5.1, a curva NF x RIN foi calculada para valores de RIN entre -125 e -185 dB/Hz. A perda óptica considerada foi de 0 dB, enquanto que os valores de ruído *shot* e térmico calculados foram de -141,23 e -146,56 dBm/Hz para o RoF 1 e -149,89 e -155,93 dBm/Hz para o RoF 2. Fixando estes valores na equação 3.7 e alterando os valores de RIN na equação 3.9 foi possível calcular a NF de cada sistema RoF utilizando a equação 3.16. A análise considerou um sistema RoF sem amplificação e resistivamente casado com uma carga de 50Ω. A figura 5.6 mostra a curva NF x RIN para cada sistema RoF operando em 2,4 GHz, enquanto os pontos em destaque indicam os valores de NF para cada sistema RoF conforme o RIN informado pelo fabricante.

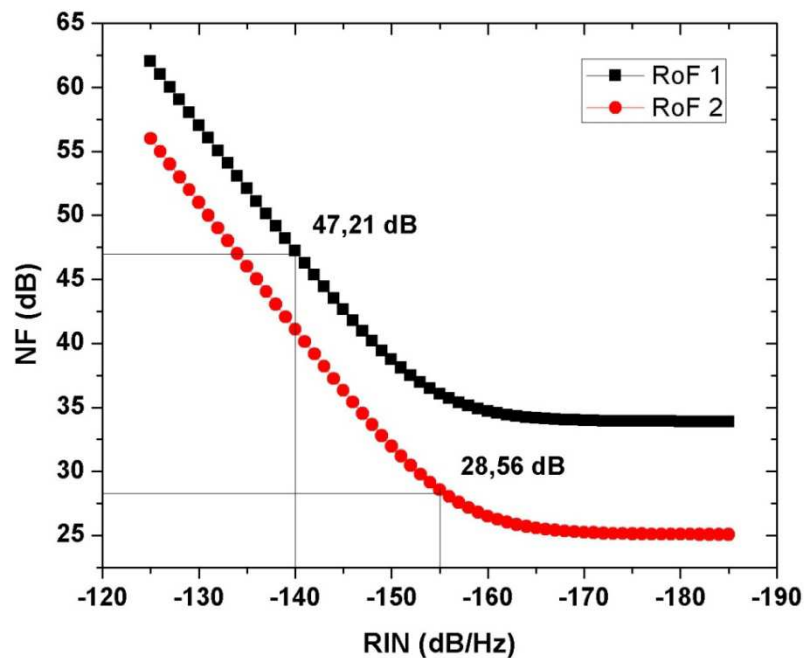


Fig.5.6: NF x RIN em 2,4 GHz.

A NF obtida para o RoF 1 com RIN igual a -140 dB/Hz é de 47,21 dB, enquanto no RoF 2 para RIN igual a -155 dB/Hz a NF foi de 28,56 dB. Esta análise mostra novamente a importância do diodo laser na NF do sistema RoF, confirmando um desempenho superior de 18,65 dB no EIN do RoF 2 em relação ao RoF 1.

Em seguida, foi verificada a contribuição de cada fonte de ruído no EIN dos sistemas RoF em conforme a perda óptica. A figura 5.7 mostra a análise para o RoF 1. Observa-se que a degradação no EIN é, em sua maioria, oriunda do RIN, o qual é a principal fonte de ruído até 10 dB de perda óptica, quando é ultrapassado pelo ruído térmico. Além disso, o ruído *shot* não limita o EIN do sistema RoF em nenhum momento devido ao elevado RIN.

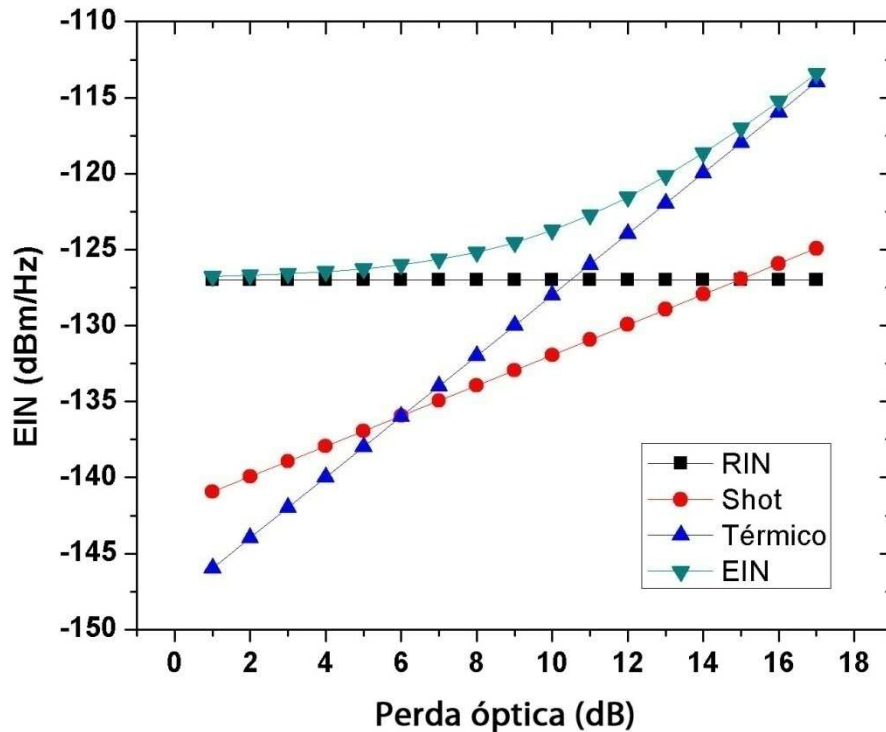


Fig. 5.7: EIN x perda óptica no RoF 1.

Observa-se também que existe uma mudança no EIN conforme a frequência do sinal de RF. Isto ocorre porque as bandas de modulação do laser e de resposta no fotodiodo, respectivamente, variam conforme a frequência do sinal de RF. Desta forma, no RoF 1 o EIN foi alterado de -130 dBm/Hz em 915 MHz para -126 dBm/Hz em 2,4 GHz ou uma penalidade de 4 dB. Por outro lado, a figura 5.8 mostra a contribuição das fontes de ruído no EIN para o RoF 2. Neste sistema, a contribuição do RIN no EIN diminuiu de -126 (RoF 1) para -147 dB/Hz através da utilização de um laser DFB de alta qualidade com RIN = -155 dB/Hz. Analogamente, a eficiência de conversão do laser mudou de 0,1 (RoF 1) para 0,25 (RoF 2) W/A, o que reduz a contribuição do ruído *shot* e térmico no sistema RoF. Entretanto, apesar desta melhora no transmissor óptico, o

RIN ainda é a principal fonte limitante do EIN para baixas perdas, sendo esta dominante até 2 dB de perda óptica, quando é superado pelo *shot*. O ruído *shot* então permanece como principal fonte de degradação até 6 dB, onde é ultrapassado pelo térmico. Já a variação do EIN conforme a frequência do sinal usada mudou no RoF 2 de -150 dBm/Hz em 915 MHz para -147 dBm/Hz em 2,4 GHz, o que significa uma penalidade de 3 dB.

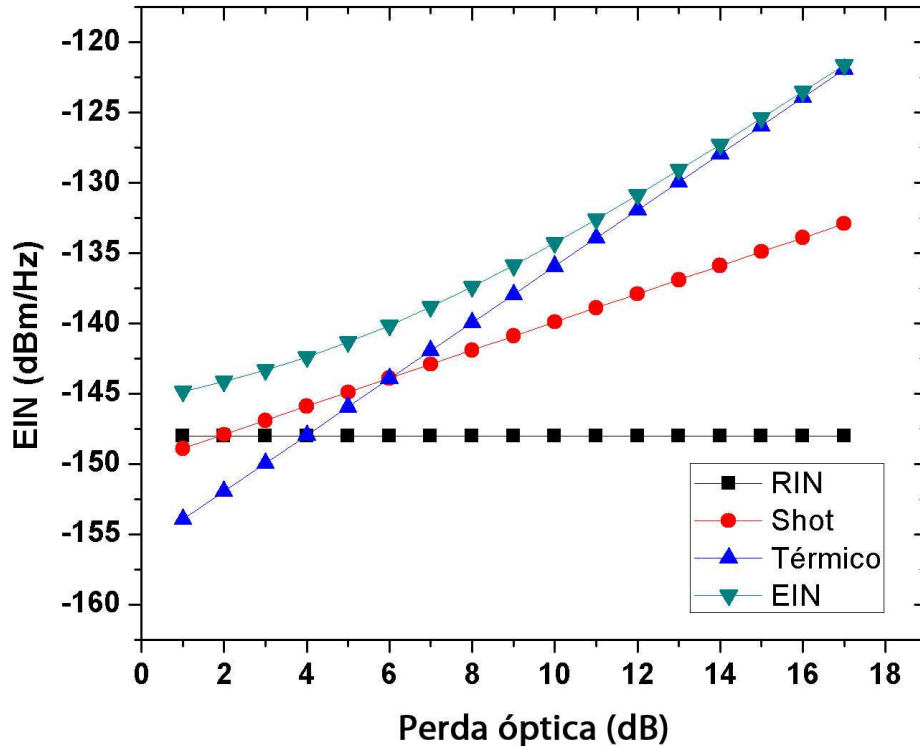


Fig. 5.8: EIN x perda óptica no RoF 2.

5.4 Resultados experimentais

A seguir, são apresentados os resultados experimentais aplicando a tecnologia RoF como *backhaul* para redes Wi-Fi. As métricas de desempenho consideradas foram a PER e vazão (*Throughput*) em função da RSSI. A potência de RF na saída do roteador Wi-Fi é de 10 dBm. A figura 5.9 ilustra a curva PER x RSSI para cada arquitetura Wi-Fi-RoF, juntamente com o enlace de referência sem RoF (RF Link). Cada ponto foi obtido variando-se a potência do sinal Wi-Fi recebida pelo cliente por meio de um atenuador de RF variável, coletando os valores de PER e RSSI através dos softwares Jpof [114] e inSDDider [115], respectivamente.

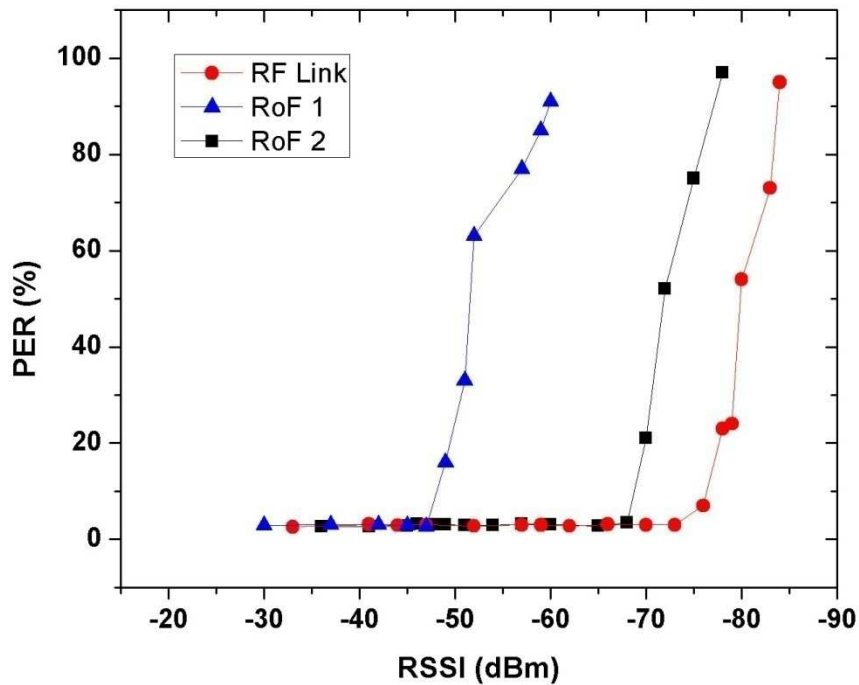


Fig. 5.9: PER x RSSI nos sistemas Wi-Fi-RoF.

A PER máxima considerada para se estabelecer a conexão foi de 3%. Desta forma, a RSSI necessária para obter $PER = 3\%$ no RoF 1 foi de -46 dBm, enquanto no RoF 2 foi de -68 dBm. Como comparativo, o setup de referência (sem RoF) precisou de uma RSSI igual a -77 dBm para atingir a mesma PER. Ou seja, isto significa que o RoF 1 apresentou uma penalidade de 31 dB em relação ao RF Link, enquanto no RoF 2 a penalidade foi de 9 dB. Os resultados mostram ainda que o desempenho da arquitetura Wi-Fi-RoF com o RoF 2 foi 22 dB superior ao RoF 1, o qual foi calculado como sendo de 18,65 dB.

Por outro lado, a figura 5.10 mostra a penalidade na vazão (*Throughput*) em função da RSSI em cada configuração proposta. Observa-se que para transmitir 12 Mbit/s no canal de *download* é necessário -46 dBm de RSSI para o RoF 1 e -68 dBm para o RoF 2. Ou seja, sistemas RoF com EIN igual a -147 dBm/Hz podem oferecer taxas de transmissão de 12 Mbit/s por 3 km de fibra monomodo para uma RSSI de -68 dBm, enquanto que para sistemas RoF com EIN igual a -126 dBm/Hz, é necessário uma RSSI de -46 dBm.

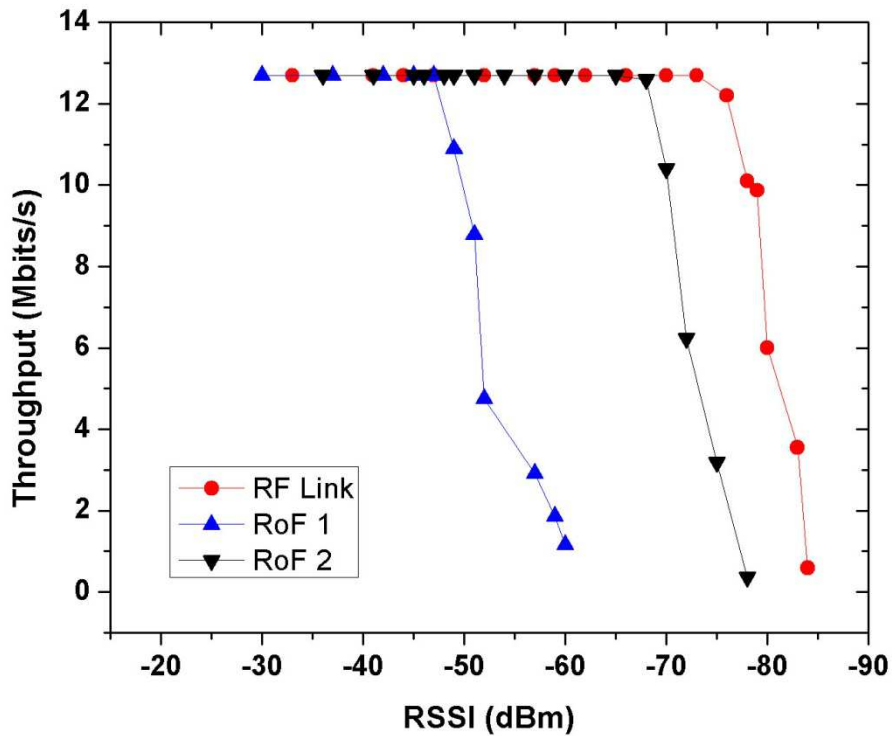


Fig. 5.10: Vazão x RSSI nos sistemas Wi-Fi-RoF.

Desta forma, observa-se que o sistema RoF 1 é uma interessante solução com ótimo custo-benefício que pode ser aplicada na distribuição de redes Wi-Fi em ambientes *indoor*. Neste sistema, o raio de cobertura pode ser aprimorado com amplificadores de RF, suprimindo as perdas oriundas da alta NF. Do mesmo modo, o sistema RoF 2 foi a solução que apresentou o melhor resultado, sendo portanto indicada para distribuição de redes Wi-Fi em ambientes *outdoor*, como aeroportos, shoppings e pontos turísticos, sendo que o raio de cobertura também pode ser aprimorado utilizando-se amplificadores de RF.

Concluindo, a arquitetura Wi-Fi-RoF foi implementada com sucesso utilizando-se dois sistemas RoF comerciais. Além disso, foi demonstrado experimentalmente que é possível realizar a transmissão de sinais Wi-Fi por 3 km de fibra monomodo, utilizando sistemas RoF com EIN de -147 dBm/Hz e -126 dBm/Hz, obtendo-se 12 Mbit/s de taxa de transmissão com PER = 3% para RSSI igual a -68 e -46 dBm, respectivamente. Por fim, a arquitetura proposta pode ser aplicada na distribuição de *hotspots* em ambientes *indoor* e *outdoor*, como estádios de futebol, aeroportos,

shoppings e pontos turísticos, permitindo que usuários de *smartphones* e notebooks usufruam das redes Wi-Fi, reduzindo a sobrecarga de conexões em redes 3G e 4G.

CAPÍTULO 6

Conclusões e trabalhos futuros

Esta dissertação abordou a tecnologia rádio sobre fibra (*Radio over Fiber* – RoF) e verificou analiticamente e experimentalmente a sua aplicabilidade em redes de sensores sem-fio e Wi-Fi. No capítulo 1 foram descritos os principais desafios das telecomunicações nos próximos anos para realizar a implementação de sistemas de banda larga. Em seguida, foram apresentados os recentes projetos mundiais que utilizam a tecnologia RoF, como o ALMA, WEIRD e BDA, enfatizando a importância destas pesquisas no âmbito científico e social.

No capítulo 2, as diferentes técnicas de modulação e multiplexação em sistemas RoF foram descritas, definindo os principais parâmetros que devem ser considerados no transmissor e receptor óptico. Posteriormente, foram apresentados os diferentes tipos de fibras ópticas utilizadas em sistemas RoF, mostrando que fibras monomodo estão presentes em enlaces de longa distância, enquanto que fibras multimodo e poliméricas são aplicadas em ambientes *indoor*, como prédios comerciais e residências.

No capítulo 3, foi realizada uma detalhada análise de desempenho para sistemas RoF, definindo os seus principais parâmetros, tais como: frequência de operação, ganho de RF, fontes de ruído e SFDR. As fontes de ruído estudadas foram: ruído de intensidade relativa do laser, ruído *shot* do fotodetector e ruído térmico. Já na SFDR, foram abordadas as principais técnicas de medição, principalmente através do método com duas portadoras de RF. Por fim, foi proposta também uma metodologia de projeto para a especificação de sistemas RoF.

No capítulo 4, a arquitetura WSN-RoF foi analisada e implementada, com a finalidade de usufruir das vantagens dos dispositivos RoF comerciais. Para tal, quatro diferentes arquiteturas WSN-RoF utilizando dois diferentes sistemas RoF foram elaboradas experimentalmente. Os experimentos mostraram que para enlaces de 3 km utilizando equipamentos RoF com potência

óptica de 4 mW e EIN = -130 dBm/Hz, o raio de cobertura da nuvem WSN foi de 10,16 metros para uma RSSI igual a -71,01 dBm e PER de 5%. Por outro lado, para sistemas RoF com EIN = -150 dBm/Hz, o raio de cobertura foi de 37,74 metros e RSSI igual a -88,53 dBm para PER de 5%. Portanto, o aprimoramento do EIN em 20 dB permitiu estender o raio de cobertura da nuvem WSN em 27,58 metros.

Resumindo, o raio de coberta da nuvem WSN foi estendido de 140 metros para 3010,16 e 3037,74 metros utilizando-se os sistemas RoF 1 e RoF 2, respectivamente. Os resultados comprovam que a tecnologia RoF pode ser eficientemente aplicada na criação da arquitetura WSN-RoF, desenvolvendo um sistema de monitoramento capaz de percorrer longas distâncias, o que permite elaborar redes WSN com melhor qualidade de transmissão, maior o raio de cobertura e vida útil, visando aplicações como: prevenção de desastres naturais, redes elétricas inteligentes, monitoramento de gasodutos, pacientes em hospitais e casas inteligentes. Além disso, esta dissertação propôs a aplicação da arquitetura WSN-RoF para o monitoramento de usinas eólicas.

No capítulo 5, foi apresentado o crescimento das redes Wi-Fi no mundo para os próximos anos. Em seguida, estes dados foram discutidos e utilizados para destacar como a tecnologia RoF pode solucionar o problema de implementação de vários *hotspots*, auxiliando na distribuição de sinais Wi-Fi em ambientes *indoor* e *outdoor*. Para isso, a aplicabilidade da arquitetura Wi-Fi-RoF foi analiticamente e experimentalmente verificada por meio de dois setups com equipamentos RoF comerciais.

Os resultados mostraram que para enlaces ópticos com 3 km de fibra monomodo é possível utilizar um sistema RoF com EIN = -126 dBm/Hz para oferecer uma taxa de transmissão 12 Mbit/s no canal de *download* para RSSI = -46 dBm, enquanto um sistema RoF com EIN = -147 dBm/Hz a RSSI é de -68 dBm, o que significa um ganho de 22 dB. Estes resultados comprovam que a arquitetura Wi-Fi-RoF pode ser aplicada com sucesso na distribuição de *hotspots* em diferentes ambientes, diminuindo as interferências no canal de RF e reduzindo a sobrecarga prevista para os próximos anos nas redes 3G e 4G.

Por fim, os trabalhos futuros incluem o desenvolvimento de transmissores ópticos de baixo custo utilizando VCSELs para aplicação nas arquiteturas WSN-RoF e Wi-Fi-RoF. Vislumbra-se também a implementação de um sistema bidirecional WiMAX-RoF em 5,8 GHz com modulação

direta ou externa e a distribuição simultânea das tecnologias WSN, Wi-Fi e WiMAX utilizando as técnicas SCM e WDM com lasers VCSEL e DFB.

Referências bibliográficas

- [1] T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature*, vol. 187, pp. 493-494, 1960
- [2] F. P. K., D. B. Keck, and R. D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, no. 10, pp. 423-425, Nov. 1970.
- [3] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, "Low-noise Erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm ," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 19, pp. 1026-1028, Sep. 1987
- [4] S. -J. Park, L. -H. Chang, K.-T. Jeong, H.-J. Park, "Fiber-to-the-home services based on Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Network," *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 11, Nov. 2004.
- [5] Y. Patt, "Requeriments, Bottlenecks, and Good Fortune: Agents for Microprocessor Evolution", *Proc. of the IEEE*, vol. 89, no. 11, Nov. 2001.
- [6] G1 Notícias (2012, Março) [Online].
<http://g1.globo.com/Noticias/Tecnologia/0,,MUL611041-6174,00.html>
- [7] UOL Notícias (2012, Março) [Online]
<http://economia.uol.com.br/ultimas-noticias/infomoney/2011/04/19/ate-2014-brasil-tera-140-milhoes-de-computadores-em-uso-mostra-fgv.jhtm>
- [8] CPQD - Ministério das Comunicações - PNBL (2012, Março) [Online]
<http://www.cpqd.com.br/files/pdf/MINICOM.pdf>
- [9] BBC Brasil Notícias (2012, Março) [Online]
http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2009/06/090630_itreport_pu.shtml
- [10] Ministério das Comunicações (2012, Março) [Online]
<http://www.mc.gov.br/noticias-do-site/23768-290911-redes-de-banda-larga-devem-ter-isencao-fiscal-ate-2016>
- [11] J. J. Romero, "Smartphones: The Pocketable PC," *IEEE Spectrum*, Jan. 2011 [Online].
<http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/smartphones-the-pocketable-pc/0>
- [12] Teleco Inteligencia em Telecomunicações (2012, Março) [Online]
<http://www.teleco.com.br/ncel.asp>
- [13] Erricson Report - "Erricson predicts mobile data traffic to grow 10-fold by 2016" (2012, Março) [Online]
<http://www.ericsson.com/news/1561267>
- [14] G1 Notícias - "Cidades da Copa terão prioridade para receber tecnologia 4G" (2012, Março) [Online]
<http://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2011/05/cidades-da-copa-terao-prioridade-para-receber-tecnologia-4g-diz-governo.html>
- [15] A. J. Seeds and K. Willians, "Microwave photonics", *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4628-4641, Dec. 2006.
- [16] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds", *Nature photonics*, vol. 1, pp. 319-330, Sep. 2007.

- [17] N. J. Gomes, M. Morant, A. Alphones, B. Cabon, J. E. Mitchell, C. Lithien, M. Csoranyi, A. Stohr, and S. Iezekiel, "Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services," *J. Opt. Netw.*, vol. 8, no. 2, pp. 156-177, Feb, 2009.
- [18] N. Ghazisaidi, M. Maier, and C. M. Assi, "Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks: A Survey," *IEEE Common. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 160-167, Feb. 2009.
- [19] X. Qian, P Hartmann, J. Ingham, R. Penty, and I. White, "Directly-modulated photonic devices for microwave applications," in *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Jun. 2005.
- [20] T. Marozsák, A. Kovács, E. Udvary, and T. Berceci, "Direct modulated lasers in radio over fiber applications," *Intenational Topical Meeting on Microwave and Photonis, MWP 2002*, pp. 129-132, Nov. 2002.
- [21] L. Chen, H. Wen, S. Wen, "A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength for up-link connection," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, pp. 2056-2058, Sep. 2006.
- [22] A. Wiberg, "Generation, Modulation and Detection of Signals in Microwave Photonic Systems," Ph. D. Thesis, *Dept. of Microtechnoly and Nanoscience, Chalmers University of Technol.*, Göteborg, 2008.
- [23] X. Sun, K. Xu, X. Shen, Y. Li., Y. Dai, J. Wu, and J. Lin, "New hierarchical architecture for ubiquitous wireless sensing and access with improved coverage using CWDM-ROF links," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 10, pp. 790-796, Sep., 2011.
- [24] C. Lethin, C. Loyez, and J. P. Vilcot, "Potencials of radio over multimode fiber systems for the in-buildings coverage of mobile and wireless LAN applications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2793-2795, Dec. 2005.
- [25] H. Pfrommer, M. A. Piqueras, V. Polo, J. Herrera, A. Martinez, and J. Marti, "Radio-over-fiber architecture for simultaneous feeding of 5.5 and 41 GHz WiFi or WiMAX access networks," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 1-5, pp. 301-303, 2006.
- [26] B. Chow, M. L. Yee, M. Sauer, A. Ng'Oma, M. C. Tseng, and C. H. Yeh, "Radio-over-fiber distributed antenna system for WiMAX bullet train field trial," *MWS 2009 IEEE WiMAX Symposium* pp. 98-101, 2009.
- [27] S. Mignanti, P. M. Neves, M. Castellano, V. Augusti, G. Martufi, C. Mambretti, and F. Andreotti "WEIRD - Real use cases and application for the WiMAX technology," *5th IEEE Consumer Commun. and Netw. Conf.* pp. 948-952, 2008.
- [28] A. V. Osadchiy, K. Prince, and I. T. Monroy, "Converged delivery of WiMAX and wireline services over an extended reach passive optical access network," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 16, no. 3, pp.182-186, Jun. 2010.
- [29] M. Al-Noor, J. Loo, R. Comley, "WiMAX 54 Mbit/s over Radio over Fibre using DCF SMF fibre and FGB for fibre over 410 km," *ISWCS 2010*, pp. 829-833, Nov, 2010.

- [30] S. Montebugnoli, M. Boschi, F. Perini, P. Faccin, G. Brunori, and E. Pirazzini, "Large antenna array remoting using radio-over-fiber techniques for radio astronomical application," *Microw. and Opt. Technol. Lett.* vol. 46, no. 1, pp. 48-54, Jul, 2005.
- [31] M. Tarengi "The Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array: overview & status," *Astrophys. and Space Science*, vol. 313, no. 1-3, pp. 1-7, Jan. 2008.
- [32] Brazilian Decimetric Array – BDA – INPE – Website (2012, Março) [Online]
<http://www.das.inpe.br/fmi/bda/album1.html>
- [33] J. H. Han, Z. Lhee, and S. W. Park, "Characterization of loss-coupled 1550 nm DFB lasers for microwave optical links," *Appl. Phys. B-Lasers and Optics*, vol. 85, no. 1, pp. 85-88, Oct. 2006.
- [34] T. Ismail, J. E. Mitchell, and A. J. Seeds, "Linearity enhancement of a directly modulated uncooled DFB laser in a multi-channel wireless-over-fibre systems," *IEEE MTT-S Inter. Microw. Symposium*, vol. 1-4, pp. 7-10, 2005.
- [35] A. Larsson, C. Carlsson, J. Gustavsson, A. Haglund, P. Modh, and J. Bengtsson, "Direct high-frequency modulation of VCSELs and applications in fibre optic RF and microwave links," *New J. of Phys.* vol. 6, no. 176, Nov. 2004.
- [36] LightRadio – Alcatel-Lucent (2012, Março) [Online]
<http://www2.alcatel-lucent.com/blogs/techzine/2011/lightradio-technology-overview/>
- [37] Z. Z. Cao, J. J. Yu, H. Zhou, W. P. Wang, M. M. Xia, J. Wang, Q. Tang, and L. Chen, "WDM-RoF-PON Architecture for Flexible Wireless and Wire-Line Layout," *J. of Opt. Commun. and Netw.*, vol. 2, no. 2, pp. 117-121, Feb. 2010.
- [38] R. E. Schuh, A. Alping, and E. Sundberg, "Penalty-free GSM-1800 and WCDMA radio-over-fibre transmission using multimode fibre and 850 nm VCSEL," *Eletro. Lett.* vol. 39, no. 6, pp. 512-514, Mar. 2003.
- [39] H. Al-Rawshidy, K. M. Glaubitt, and P. Faccin, "In-building coverage for UMTS using radio over fibre technology," *5th Inter. Symp. on Wireless Personal Multimedia Commun.*, vol. 1-3, pp. 581-585, 2002.
- [40] A. Ng'oma, "Radio-over-Fiber Technology for broadband wireless communication systems," Ph. D. Thesis, *Eindhoven University of Technology*, Eindhoven, 2005.
- [41] A. J. Seeds, and T. Ismail, "Broadband access using wireless over multimode fiber systems," *J. of Lightw. Technol.*, vol. 28, no. 16, pp. 2430-2435, Aug. 2010.
- [42] H. Al-Rawshidy and S. Komaki, "Radio over fiber technologies for mobile communication networks," USA: Artech House, INC., 2002.
- [43] M. R. Mokhtar, M. Z. A. Kadir, R. Mohamad, M. R. Yahya, H. A. A. Rashid, "Minimal optimization technique for radio over fiber WLAN transmission in IM-DD optical link," *Microw. and Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, no. 4, pp. 812-815, Apr. 2010.
- [44] COMMSCOPE Corp. Fiber Distributed Antenna System for indoor and outdoor - ION Series (2012, Março) [Online]
http://www.commscope.com/andrew/eng/product/cov_cap/das/1217949_13517.html

- [45] D. Vez, S. G. Hunziker, R. Kohler, P. Royo, M. Moser, and W. Bachtold, "850 nm vertical-cavity laser pigtailed to standard singlemode fibre for radio over fibre transmission," *Electron. Lett.* vol. 40, no. 19, pp. 1210-1211, Sep. 2004.
- [46] N. Sheffi, and D. Sadot, "Low cost direct modulation and coherent detection optical OFDM for metro applications," *Coherent Opt. Commun: Components, Subsystems, and Systems*, vol. 7960, no. 796005, 2011.
- [47] P. Resneau, M. Krakowski, "Long term ageing with highly stable performance of 1.55 μm DFB lasers for microwave optical links," *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, vol. 5465, pp. 116-126, 2004.
- [48] E. R. H. Funchs, E. J. Bruce, R. J. Ram, and R. E. Kirchain, "Process-based cost Modeling of photonics manufacture: The cost competitiveness of monolithic integration of 1550-nm DFB laser and an electroabsorptive modulator on an InP platform," *J. of Lightw. Technol.* vol. 24, no. 8 pp. 3175-3186, Aug. 2006.
- [49] X. J. Meng, T. Chau, and M. C. Wu, "Experimental demonstration of modulation bandwidth enhancement in distributed feedback lasers with external light injection," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 21, pp.2031-2032, Oct. 1998.
- [50] D. Parakh, B. Zhang, X. Zhao, Y. Yue, W. Hofmann, M. C. Amman, A. Willner, and C. J. Chang-Hasnain, "Long distance single-mode fiber transmission of multimode VCSELs by Injection Locking," *Opt. Express*, vol. 18, no. 20, pp. 20552-20557, Sep. 2010.
- [51] S. Mohrdiek, H. Burkhard, and H. Walter, "Chirp reduction of directly modulated semiconductor lasers at 10 Gb/s by strong CW light injection," *J. of Lightw. Technol.* vol. 12, no. 3, pp. 418-424, Mar. 1994.
- [52] X. J. Meng, D. T. K. Tong, T. Chau, and M. C. Wu, "Demonstration of an analog fiber-optic link employing a directly modulated semiconductor laser with external light injection," *IEEE Phot. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 11, pp. 1620-1622, Nov. 1998.
- [53] E. K. Lau, H. K. Sung, and M. C. Wu, "Ultra-high 72 GHz resonance frequency and 44 GHz bandwidth of injection-locked 1.55 μm DFB lasers," *Opt. Fiber Commun. Conf. (OFCC 2006)*, vol. 1-6, pp. 1373-1375, 2006.
- [54] L. Chrostowski, X. Zhao, C. J. Chang-Hasnain, R. Shau, A. Ortsiefer, and M. C. Amman, "50-GHz optically injection-locked 1.55 μm VCSELs," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, no. 1-4, pp. 367-369, Jan. 2006.
- [55] A. Larsson, C. Carlsson, J. Gustavsson, A. Haglund, P. Modh, and A. Alping, "Broadband direct modulation of VCSELs and applications in fiber optic RF link," *IEEE Inter. Topical Meeting on Microwave Photonics Tech. Digest – MWP 04'*, pp. 251-254, 2004.
- [56] C. H. Cox, G. E. Betts, and L. M. Johnson, "An analytic and experimental comparison of direct and external modulation in analog fiber-optic links," *IEEE Trans. on Microw. and Techn.* vol. 38, no. 5, pp. 501-509, May. 1990.

- [57] W. Burns, M. Howerton, and R. Moeller, "Broad-band unamplified optical link with RF gain using a LiNbO₃ modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 1656-1658, Dec. 1999.
- [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 Trans. on Microw. Theory and Techniques*, vol. 54, no. 2, pp. 906-920, Feb. 2006.
- [59] E. I. Ackerman, and C. H. Cox, "RF fiber-optic link performance," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp. 50-58, Dec. 2001.
- [60] C. H. Cox, III, "Analog optical link: Theory and practice," *Cambridge, U. K., Cambridge University Press*, 2004.
- [61] D. Derickson, "Fiber optic test and measurement," Hewlett-Packard Comp., pp. 173-174, *Prince Hall*, New Jersey, 1998.
- [62] Encore - "RF and Microwave Fiber-Optic Design Guide" (2012, Janeiro) [Online] <http://www.docstoc.com/docs/48332406/RF-and-Microwave-Fiber-Optic-Design-Guide---rossir24-0018>
- [63] T. Chen, J. Ungar, X. Yeh, and N. Bar-Chaim, "Very large bandwidth strained MQW DFB laser at 1.3 μm ," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 458-460, May. 1995.
- [64] Vertilas Company (2012, Março) [Online] <http://www.vertilas.com/home.php>
- [65] B. Witzigmann, F. Henneberger, Y. Arakawa, and A. Freundlich, "Analogue modulation performance of 20 GHz Vertical Cavity Surface Emitting Lasers for Radio over Fiber applications," *Phys. and Simul. of. Optoelectronic Devices XIX*, vol. 7933, 2011.
- [66] D. Young, J. Scott, M. Peters, M. Majewski, B. Thiebeault, S. Corzine, and L. Coldren, "Enhanced performance of offset gain high barrier vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 2013-2022, Jun. 1993.
- [67] D. Tauber, G. Wang, R. Geels, J. Bowers, and L. Coldren, "Large and small signal dynamics of vertical cavity surface emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 325-327, Jan. 1993.
- [68] G. Kovacs, T. Berceli, and P. Herczfeld, "Quadrature Amplitude Modulated microwave signal generation using a single electro optic Nd:YVO(4) Solid-state laser," *IEEE Microw. and Wireless Components Lett.*, vol. 19, no. 4, pp. 254-256, Apr. 2009.
- [69] J. R. Burie, G. Beuchet, M. Mimoun, P. Pagnod-Rossiaux, B. Ligat, J. C. Bertreux, J. M. Rousselet, J. Dufour, P. Rougeolle, and F. Laruelle, "Ultra high power, Ultra low RIN up to 20 GHz 1.55 μm DFB AlGaInAsP Laser for analog applications," *Novel In-plane Semic. Lasers IX, Proceedings of SPIE*, vol. 7616, no. 76160Y, 2010.
- [70] R. Olshansky, V. Lanzisera, and P. Hill, "Subcarrier multiplexed lightwave systems for broadband distribution," *J. Lightw. Technol.*, vol. 7, no. 9, pp. 1329-1342, 1989.
- [71] R. Hui, B. Zhu, R. Huang, C. Allen, K. Demarest, and D. Richards, "Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission," *J. Lightw. Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 417-427, Mar. 2002.

- [72] W. I. Way, "Broadband hybrid fiber/coax access system technologies," San Diego, CA, USA, *Academic Press*, 1999.
- [73] J. J. V. Olmos, T. Kuri, and K. Kitayama, "Reconfigurable radio-over-fiber networks: multiple-access functionality directly over the optical layer," *IEEE Transc. on Microw. Theory and Techniq.* vol. 58, no. 11, pp. 3001-3010, Nov. 2010.
- [74] W. H. Chen, and W. I. Way, "Multichannel single-sideband SCM/DWDM transmission systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 7, pp. 1679-1693, Jul. 2004.
- [75] V. Sittakul, and M. J. Cryan, "A comparison of single mode and multimode fiber links for use in wireless-over-fiber systems," *Microw. and Opt. Technol. Lett.*, vol. 51, no. 6, pp. 1445-1449, Jun. 2009.
- [76] H. H. Lu, C. H. Chang, P. C. Peng, H. S. Su, and H. W. Hu, "A radio-over-GI-POF transport system," *J. of Lightw. Technol.*, vol. 28, no. 13, pp. 1917-1921, Jul. 2010.
- [77] H. C. Peng, H. H. Lu, C. Y. Li, H. S. Su, and C. T. Hsu, "Integration of FTTH and GI-POF in-house networks based on injection locking and direct-detection techniques," *Opt. Express*, vol. 19, no. 7, pp. 6749-6755, Mar. 2011.
- [78] G. J. Meslener, "Chromatic dispersion induced dissorsion of modulated monochromatic light employing direct detection," *IEEE. J. Quantum Electron.*, vol. 20, no. 10, pp. 1208-1216, Oct. 1984.
- [79] T. Koonen, "Fiber to the home/fiber to the premises: What, where, and when?," *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 5, pp. 911-934, May. 2006.
- [80] M. J. Li, P. Tandon, D. C. Bookbinder, S. R. Bickham, M. A. McDermott, R. B. Desorcie, D. A. Nolan, J. J. Johnson, K. A. Lewis, and J. J. Englebert, "Ultra-low bending loss single-mode fiber for FTTH," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 1-4, pp. 376-382, Feb. 2009.
- [81] Y. H. Luo, L. L. Liu, Y. Q. Chen, H. B. Qiu, J. M. Lin, L. Zheng, X. Li, "Performance comparison of analog optical link and copper cable link for RF signal transmission," *10th International Conf. on Commun. Technol.*, vol. 1-2, pp. 416-419, Nov. 2006.
- [82] B. L. Dang, and I. Niemegeers, "Analysis of IEEE 802.11 in radio over fiber home networks," *IEEE Computer Society, 30th Conference on Local Computer Networks, Proceedings*, pp. 744-745, Nov. 2005.
- [83] Arismar Cerqueira. S. Jr., D. C. V. E. Silva, M. A. Q. R. Fortes, L. F. da Silva, O. C. Branquinho, and M. L. F. Abbade, "Performance analysis of a radio over fiber system based on IEEE 802.15.4 standard in a real optical network," *Microw. and Opt. Technol. Lett.*, vol. 51, no. 8. pp. 1876-1879, Aug. 2009.
- [84] T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, and T. Furuta, "Uni-traveling-carrier photodiodes," *Ultrafast Eletron. Optoeletron. Tech. Dig.* pp. 83-86, Jun. 1997.
- [85] Y. Chen, S. Williamson, T. Brock, R. Smith, and A. Calawa, "375-GHz-bandwidth photoconductive detector," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, pp. 1984-1986, Oct. 1991.

- [86] S. Kollakowski, A. Strittmatter, E. Droge, E. Bottcher, D. Bimberg, O. Reimann, and K. Janiak, "65 GHz InGaAs/InAlGaAs/InP waveguide-integrated photodetectors for the 1.3-1.55 mm wavelength range," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, pp. 612-614, Jan. 1999.
- [87] C. Cox, H. Roussel, R. Ram, and R. Helkey, "Broadband directly modulated analog fiber optic link with positive intrinsic gain and reduced noise figure," in *Proc. IEEE Int. Topical Meeting on Micro-wave Photonics*, Princeton, NJ, Oct. 1998.
- [88] A. Goutzoulis, J. Zomp, and A. Johnson, "An eight element optically powered directly modulated receive UHF fiber-optic manifold," *J. of Microw.*, vol. 39, pp. 74-86, Feb. 1996.
- [89] C. Cox, E. Ackerman, and G. Betts, "Relationship between gain and noise figure of an optical analog link," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1551-1554 San Francisco, CA, Jun. 1996.
- [90] E. I. Ackerman, and C. H. Cox, "State of the art in analog fiber-optic link technology," *1998 URSI Symp. Signals Systems and Eletronics*, pp. 372-377, Oct. 1998.
- [91] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330, Aug. 2008.
- [92] A. Kansai, and M. B. Srivastava, "An environmental energy harvesting framework for sensor networks," *ISLPED 03'*, pp. 481-486, Aug. 2003.
- [93] W.K. G. Seah, Z. A. Eu, and H. P. Tan, "Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) – Survey and Challenges," *WIRELESS VITAE 2009'*, vol. 1-2, pp. 1-5, Jul. 2009.
- [94] R. M. Assumpção, "Avaliação do impacto em rede de sensores sem-fio com utilização de sistema de rádio sobre fibra," *Dissertação de Mestrado, PUC-Camp*, Dec. 2011.
- [95] P. Cheong, K. F. Chang, Y. H. Lai, K. Ho, I. K. Sou, and K. W. Tam, "ZigBee-based wireless sensor network node for ultraviolet detection of flame," *IEEE Trans. on Industrial Eletronics*, vol. 58, no. 11, pp. 5271-5277, Nov. 2011.
- [96] Arduino Website (2012, Março) [Online]
<http://www.arduino.cc/>
- [97] Freescale SMAC (2012, Março) [Online]
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?code=784_LPBBSMAC
- [98] SimplicITI – Texas Instruments (2012, Março) [Online]
http://www.vscp.org/wiki/lib/exe/fetch.php/downloads/swru130_simplicity_principle.pdf
- [99] Revista Info – "Google aposta na dupla Android e Arduino" (2012, Março) [Online]
<http://info.abril.com.br/noticias/blogs/zonalivre/desenvolvimento/google-aposta-na-dupla-android-e-arduino/>

- [100] A. Iera, C. Floerkemeier, J. Mitsugi, and G. Morabito, "The Internet of things [Guest Editorial]," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 17, no. 6, pp.8-9, Dec. 2010.
- [101] R. S. Dilmaghani, H. Bobarshad, M. Ghavami, S. Choobkar, and C. Wolfe, "Wireless sensor networks for monitoring physiological signal of multiple patients," *IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 347-356, Aug. 2011.
- [102] M. Youssef, A. Yousif, N. El-sheimy, and A. Noureldin, "A novel earthquake warning system based on virtual MIMO-Wireless Sensor Networks," *2007 Canadian Conf. on Eléctrical and Comp. Eng.*, vol. 1-3, pp. 932-935, Apr. 2007.
- [103] V. C. Gungor, B. Lu, G. P. Hancke, "Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3557-3564, Oct. 2010.
- [104] L. P. Shen, X. Z. Duan, H. Wang, and X. H. Li, "Application of Wireless Sensor Networks in the Prediction of Wind Power Generation," *4th Inter. Conf. on Wireless Commun, Netw.and Mobile Comp.*, vol. 1-31, pp. 3997-4000, Oct. 2008.
- [105] R. A. Swartz, J. P. Lynch, S. Zerbst, B. Sweetman, and R. Rolfes, "Structural monitoring of wind turbines using wireless sensor networks," *Smart Structures and Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 183-196, Apr. 2010.
- [106] A. Drumea, and P. Svasta, "Wireless Sensor for Temperature and Humidity Measurement," *Adv. Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies V*, vol. 7821, no. 78211s, Aug. 2010.
- [107] T. P. C. Andrade, L. B. Oliveira, N. L. S. da Fonseca and O. C. Branquinho, "HMARS: A MAC protocol for integration of Radio-over-Fiber and Wireless Sensor Networks," *LATINCOM 2011*, pp. 1-6, Oct. 2011
- [108] X. Shen, K. Xu, J. Wu and Lin J. T, "Enabling Technologies for Green Radio-over-Fiber Distributed Antenna System Based Wireless Sensor Networks," *China Communications*, vol. 8, no. 8, pp. 56-63, Dec. 2011.
- [109] M. Hossen, B. J. Jang, K. D. Kim, Y. Park, "Extension of wireless sensor networks by employing RoF-based 4G network," *11th Int. Conf. on Advanced Communication Technol.*, vol. 1-3, Proc. pp. 275-278, Feb. 2009.
- [110] S. Frohn, S. Gubner, and C. Lindemann, "Analyzing the effective throughput in multi-hop IEEE 802.11n networks," *Computer Commun.*, vol. 34, no. 16, pp. 1912-1921, Oct. 2011.
- [111] Wireless Broadband Alliance - Report 2011(2012, Março) [Online]
<http://www.wballiance.com/component/files/dltrack.html?files=3b01001fba73a5422ad8e666052437b791a63974>
- [112] Teleco Inteligencia em Telecomunicações(2012, Março) [Online]
<http://www.teleco.com.br/wifi.asp>

- [113] A. Chowdhury, and M. Gregory, "Hybrid Next Generation Mobile System Analysis Based on Internet Applications," *Australian Telecommunication Networks and Applications Conf. ATNAC 10*, Oct. 2010.
- [114] Jperf Software (2012, Março) [Online]
<http://code.google.com/p/xjperf/>
- [115] inSSIDerSoftware (2012, Março) [Online]
<http://inssider.softonic.com.br/>