



PUC
CAMPINAS
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS,
AMBIENTAIS E DE TECNOLOGIAS.**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO-SENSU*

DIEGO CESAR VALENTE E SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DA
TECNOLOGIA DE RÁDIO SOBRE FIBRA EM REDES
IEEE 802.15.4**

**PUC CAMPINAS
2008**

DIEGO CESAR VALENTE E SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DA
TECNOLOGIA DE RADIO SOBRE FIBRA EM REDES
IEEE 802.15.4**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação na área de concentração Gestão de Rede e Serviços, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

**PUC CAMPINAS
2008**

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3845 Silva, Diego César Valente e.

S586a Análise experimental da aplicação da tecnologia de rádio sobre fibra em redes IEEE 802.15.4 / Diego César Valente e Silva. - Campinas: PUC-Campinas, 2009.
108p.

Orientador: Marcelo Luis Francisco Abbade.
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Engenharia elétrica.
3. Sistemas de telecomunicações. 4. Comunicações óticas. I. Abbade, Marcelo Luís Francisco. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

GRÃO-CHANCELER

Dom Bruno Gamberini

MAGNÍFICO REITOR

Prof. Pe. Wilson Denadai

VICE-REITOR

Prof^a. Dra. Ângela de Mendonça Engelbrecht

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Prof^a. Dra. Vera Engler Cury

**DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

**COORDENADOR DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO DE REDES DE
TELECOMUNICAÇÕES**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GESTÃO DE REDES E SERVIÇOS

Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

“Pro-Tempore”

DIEGO CESAR VALENTE E SILVA

**" ANÁLISE EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DA
TECNOLOGIA DE RADIO SOBRE FIBRA EM REDES
IEEE 802.15.4"**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviços.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

Dissertação defendida e aprovada em 06 de fevereiro de 2009 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta
Universidade São Francisco



Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

À minha família pelo incentivo nos momentos mais difíceis, me confortando e apoiando durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Meu maior agradecimento é a Deus, pela saúde, disposição, oportunidades e força proporcionada durante todo meu período de formação e conclusão de minhas atividades como mestrando.

Agradeço a minha família pela educação e ensinamentos que foram responsáveis pela construção de meus valores, fé e força de vontade, os quais foram essenciais para a conclusão dessa fase tão importante na minha vida.

Ao Prof. Dr. Marcelo Luís F. Abbade, não só pela orientação, mas pela amizade, paciência, educação, profissionalismo e outras “n” qualidades dedicadas ao meu trabalho, incentivando e acreditando em meus ideais.

A FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisas do Estado de São Paulo, pelo financiamento que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Eletrônica Quântica, Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP, representado pelo Prof. Dr. Arismar C. Sodré Junior e Prof. Dr. Hugo L. Fragnito pela contribui o, colabora o e empréstimo de equipamentos.

A equipe do Projeto KyaTera (financiado pela FAPESP), representada pelo S.r Marco Aurélio Q.R. Fortes, pelas contribui es e auxílio na disponibilidade da rede  tica utilizada nos experimentos.

Ao Prof. Fúlvio Andres Callegari pelas aulas de  tica e simula es, as quais contribuiram significativamente para a execu o dos trabalhos.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho, pelo importante auxílio e acompanhamento durante a execu o dos trabalhos.

Agradeço também aos funcionários da PUC-Campinas, em especial a Juliana Machado e aos alunos de Gradua o Karyna Cardoso e Alberto Imamura que me auxiliaram na realiza o dos experimentos. Aos meus colegas de sala de aula, em especial ao Luis Fabiano Silva, pelo auxílio e empréstimo de equipamentos utilizados nos experimentos.

"A alegria não chega apenas no encontro do achado, mas faz parte do processo da busca. E ensinar e aprender não pode dar-se fora da procura, fora da boniteza e da alegria."

Paulo Freire.
(1921-1997)

RESUMO

VALENTE E SILVA, Diego Cesar. Análise experimental da aplicação da tecnologia de rádio sobre fibra em redes IEEE 802.15.4. Campinas, 2007. 108 (folhas).
Dissertação (Mestrado) – Pós Graduação em gestão de redes e telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2008.

Esse trabalho apresenta uma investigação experimental da implementação de redes de sensores (IEEE 802.15.4) sobre fibras ópticas. Tal investigação foi realizada com a utilização de transceptores IEEE 802.15.4, de uma infra-estrutura de fibras ópticas localizada dentro uma rede experimental, chamada Rede KyaTera, e de lasers com modulação direta e foto-diodos projetados para operações usuais em laboratórios. A análise compreendeu medidas a razão sinal-ruído óptica e elétrica e a avaliação da taxa de erro de quadros sob diferentes condições de transmissão (p. ex., tamanho de payload e intervalo de tempo entre quadros sucessivos). Os resultados indicam que os sinais de RF da rede de sensores podem ser propagados adequadamente, sem amplificação óptica, em enlaces de até 100 km ou por distâncias ainda maiores, com a utilização de amplificadores ópticos.

Termos de indexação: Redes de Sensores sem Fio, LR-WPAN, Radio sobre Fibra, Radio/Fibra, Sistemas de Comunicações híbridos, Redes heterogêneas, Redes Ópticas e análise de desempenho de redes WPAN.

ABSTRACT

VALENTE E SILVA, Diego Cesar. Analysis of applying the technology of radio-over-fiber networks in IEEE 802.15.4. Campinas, 2007. 108 (pages). Dissertation (Masters) – Post Graduate in Network Management and Telecommunications. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2008.

This work presents an experimental investigation on the implementation of wireless sensor networks (IEEE 802.15.4) over fiber optics. Such investigation was performed with the utilization of IEEE 802.15.4 transceivers, an optical fiber infrastructure inside a field-trial network, called KyaTera Network, and directly modulated lasers and photodiodes designed for usual lab applications. The analysis comprised optical and electrical signal-to-noise ratio measurements and packet error rate evaluation under different conditions of transmission (e.g., payload length and time between consecutive frames). Results indicate that the RF signals of the sensor network may be properly propagated through unamplified optical links of up to 100 km or for longer distances with the use of optical amplifiers.

Indexing terms: Sensors Wireless Network, LR-WPAN, Radio-over-Fiber, Radio/Fiber, Systems Hybrid Communication, Heterogen Networks, Optical Network, and analysis of the performance of networks WPAN

LISTA DE FIGURAS

	<i>Páginas</i>
Figura 1.1	Divisão dos grupos de tecnologias de redes sem fio..... 20
Figura 1.2	Topologias de tecnologias de redes sem fio..... 22
Figura 1.3	Sistema de RoF..... 25
Figura 2.1	Topologia RoF convencional..... 30
Figura 2.2	Janelas ópticas utilizadas para comunicações ópticas..... 35
Figura 2.3	Efeito de dispersão cromática em sinais ópticos analógicos..... 37
Figura 2.4	Dispersão dos modos de polarização (PMD)..... 38
Figura 2.5	Sistema RoF (Bandas Laterais) 40
Figura 2.6	Efeito de desvanecimento..... 41
Figura 2.7	RoF como “caixa-preta”..... 42
Figura 3.1	Topologias estrela e malha de RSSF..... 50
Figura 3.2	Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4..... 51
Figura 3.3	Distribuição de canais IEEE 802.15.4..... 53
Figura 3.4	Constelação QPSK e modulação QPSK no domínio do tempo.. 54
Figura 3.5	Comparação entre a modulação QPSK e OQPSK no domínio do tempo..... 55
Figura 3.6	Aplicação de RoF na topologia estrela com Coordenador PAN centralizado..... 59
Figura 3.7	Aplicação RoF na associação entre coordenadores PAN na topologia estrela estendida..... 60
Figura 3.8	Aplicação de RoF na topologia de malha..... 61
Figura 3.9	Aplicação de RSSF com o sistema de RoF em dutos utilizando 2 trajetos ópticos..... 62
Figura 3.10	Aplicação de RSSF com o sistema de RoF em dutos utilizando 1 trajeto óptico..... 63
Figura 3.11	Aplicação de RSSF com o sistema de RoF em rodovias..... 64
Figura 4.1	Primeiro ambiente experimental padrão (sem o emprego de RoF)..... 69
Figura 4.2	Segundo ambiente Experimental Padrão (com emprego de RoF) 71
Figura 4.3	Gráfico da FER com relação à distância entre ANT1 e ANT2.... 74
Figura 4.4	FER relacionada com SNR – Teste ponto-a-ponto..... 75
Figura 4.5	Segundo Ambiente Experimental Padrão com AOV - Análise dos limites da FER e a relação com a Potência Óptica..... 76
Figura 4.6	Espectro de RF capturado na saída do TX..... 77
Figura 4.7	Sinal óptico de RF após AOV, potência de -6,8dBm..... 78
Figura 4.8	Sinal óptico obtido através de simulação de RoF, na potência óptica de -6,8dBm..... 79
Figura 4.9	Espectros de RF capturados para as potências ópticas de (a) -6,8 (b) -23,8 e (c) 25,4 dBm..... 79
Figura 4.10	Gráfico da potência óptica relacionada com o FER 81
Figura 4.11	Alteração do <i>payload</i> e sua relação com a FER..... 83
Figura 4.12	Alteração do tempo de geração entre quadros e sua relação com a FER..... 83
Figura 4.13	Segundo Ambiente Experimental Padrão com EDFA – Propagação Óptica com Amplificação 85
Figura 4.14	Gráfico da relação da FER com a distância do enlace óptico.... 86
Figura 4.15	Gráfico da relação entre potência do Sinal de RF e Ruído com a distância do enlace óptico..... 87
Figura 4.16	Gráfico da Simulação do desvanecimento do Sinal de RF 88

Figura 4.17	Gráfico da relação entre SNR com a distância do enlace óptico	88
Figura 4.18	Gráfico da relação entre a SNR e a FER Segundo Ambiente Experimental Padrão com Antenas –	89
Figura 4.19	Propagação Óptica e Aérea	90
Figura 4.20	Gráfico da FER com relação a propagação óptica e aérea	91
Figura 4.21	Gráfico da SNR com relação à propagação óptica e aérea	92

LISTA DE TABELAS

	<i>Páginas</i>
Tabela 3.1 Características da PHY do padrão IEEE 802.15.4 Valores dos parâmetros do primeiro e segundo ambiente	52
Tabela 4.1 experimental Valores dos parâmetros de análise dos espectros de RF e óptico	73
Tabela 4.2 no sistema RoF..... Valores dos parâmetros da análise da propagação óptica com	77
Tabela 4.3 amplificação óptica Valores dos parâmetros do experimento de Análise da	85
Tabela 4.4 Propagação Óptica e Aérea com Amplificação Óptica	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANT	=	Antena
AOV	=	Atenuador Óptico Variável
BER	=	<i>Bit Error Rate</i>
CATV	=	<i>Cable Television</i>
CCA	=	<i>Clear Channel Assessment</i>
CCUEC	=	Centro de Computação da Universidade Estadual de Campinas
CD	=	<i>Dispersão Cromática</i>
CPQD	=	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
CSMA/CA	=	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSMA/CA	=	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CTX	=	Controlador do Transmissor
CWDM	=	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DFB	=	<i>Distributed Feed-Back</i>
DGD	=	<i>Defferential Group Delay</i>
DSF	=	Dispersion Shifted Fiber
DSSS	=	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
DT	=	Dispositivo sem fio Terminal
DWDM	=	Dense Wavelength Division Multiplexing
EB	=	Estação Base
EC	=	<i>Estação Central</i>
EDFA	=	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
ERB	=	Estação Rádio Base
FAPESP	=	Fundação de Amparo a Pesquisas do Estado de São Paulo
FD	=	Fotodiodo
FER	=	<i>Frame Erros Rate</i>
FFD	=	<i>Full-Function Device</i>
FI	=	Freqüência Intermediária
GSM	=	<i>Global System for Mobile</i>
GTS	=	<i>Garantee Time Slots</i>
IDC	=	<i>International Data Corporation</i>
IEEE	=	<i>Institute of Eletrical and Eletrônics Engineers</i>
IEM	=	Interferências Eletromagnéticas
ISM	=	<i>Industrial, Scientific, Medical</i>
ITU	=	<i>International Telecommunication Standardization</i>
Laser	=	<i>Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	=	<i>Ligth Emitting-Diode</i>
LF	=	Laboratório de Fotônica – PUCCAMP
LLC	=	<i>Logical Link Control</i>
LMT	=	Laboratório de Meios de Transmissão - PUCCAMP
LP-Sira	=	Laboratório de Pesquisa em Sistemas de Rádio - PUCCAMP
LR-WPAN	=	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>

MAC	=	Medium Access Control
MANET	=	<i>Mobile Ad hoc Networks</i>
MBWA	=	<i>Mobile Broadband Wireless</i>
MP	=	Medidor de Potência Óptica
MRX	=	Monitor do Receptor
NZD	=	Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
OQPSK	=	<i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i>
OSI	=	Open Systems Interconnection
PA	=	Ponto de Acesso
PAN	=	<i>Personal Area Network</i>
PHY	=	Physical Layer
PLME	=	<i>physical Layer Management Entity</i>
PMD	=	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PRK	=	<i>Phase Reversal Keying</i>
PUCCAMP	=	Pontifícia Universidade Católica de Campinas
QOS	=	<i>Quality of Service</i>
QPSK	=	Quadrature Phase Shift Keying
RF	=	Rádio Frequência
RFD	=	<i>Reduced-Function Device</i>
RoF	=	Radio-over-Fiber
RSSF	=	Redes de Sensores sem Fio
RX	=	Receptor
RX	=	Receptor
SDH	=	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SM	=	Standard Single Mode Fiber
SNR	=	Signal-noise-ratio
SONET	=	<i>Synchronous optical networking</i>
SSCS	=	<i>Service Specific Convergence Sublayer</i>
TIDIA	=	Tec. da Informação no Desenv. da Internet Avançada
TX	=	Transmissor
UMTS	=	Universal Mobile Telecommunication System
WDM	=	Wavelength-Division Multiplexing
WiMax	=	<i>Worldwide Interoperability for Microwave</i>
WLAN	=	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	=	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WPAN	=	<i>Wireless Personal Area Network</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Tecnologia de redes sem fio	19
1.1.2 Arquitetura de Redes sem Fio	22
1.2 Rede de comunicação óptica	23
1.2.1 Sistema de Rádio sobre Fibra	24
1.3 Motivação do trabalho	27
1.4 Objetivo do trabalho	27
1.5 Organização da dissertação	28
CAPÍTULO 2 SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA	29
2.1 Sistemas Ópticos Convencionais	30
2.1.1 Geração do Sinal Óptico	31
2.1.2 Fibras Ópticas	32
2.1.3 Propagação Óptica	34
2.1.4 Foto-detecção	38
2.2 Sistemas de Rádios sobre Fibra	39
2.2.1 Efeito de Desvanecimento	40
2.2.2 Ganho do Sistema de RoF	42
2.3 Considerações Finais	43
CAPÍTULO 3 REDES DE SENSORES SEM FIO	44
3.1 Redes de Sensores sem Fio	44
3.2 Padrão IEEE 802.15.4	47
3.2.1 Topologia de Redes IEEE 802.5.4	48
3.2.2 Arquitetura do IEEE 802.15.4	51
3.2.3 Propostas de Aplicação de RoF em LR-WPAN	58
3.2.4 Métricas de RSSF no padrão IEEE 802.15.4 com aplicação de RoF	65
3.3 Considerações Finais	66
CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	67
4.1 Descrição do Ambiente Experimental Padrão	67
4.1.1 Ambiente Experimental sem Aplicação de RoF	68

4.1.2	Ambiente Experimental com Aplicação de RoF	69
4.1.3	Elementos Experimentais Comuns aos Dois Ambientes ..	72
4.2	Análise da RSSF sem Aplicação de RoF	73
4.3	Análise dos Espectros de RF e Óptico no Sistema RoF	76
4.4	Análise da FER e a Relação com a Potência Óptica	80
4.5	Análise da Alteração de Tamanho do Quadro e Tempo de Geração de Quadros na FER	81
4.6	Análise da Propagação Óptica com Amplificação Óptica	84
4.7	Análise da Propagação Óptica e Aérea com Amplificação Óptica	89
CONCLUSÕES 5		93
5.1	Contribuições	94
5.2	Propostas para Trabalhos Futuros	94
REFERÊNCIAS 6		95
APÊNDICES		
	Apêndice A	104
	Apêndice B	105

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

No mercado da tecnologia, as redes sem fio vêm conquistando cada vez mais destaque. Algumas de suas principais características, tais como, fácil instalação e custo reduzido possibilitam o surgimento de novas soluções e aplicações em ritmo acelerado.

De acordo com uma pesquisa realizada em 04 de outubro de 2007, com 460 companhias da América Latina, o *International Data Corporation* (IDC) Brasil, aponta que grandes corporações têm planos de altos investimentos financeiros em tecnologias de rede sem fio para o ano de 2008. Desta maneira, essa crescente tendência é visível desde a liberação das redes sem fio para uso comercial, bem como, as padronizadas pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) (IDC BRASIL, 2007)

No final da década de 70, realizou-se, pela primeira vez, a comunicação de dados sem fio, com o objetivo de conectar as diversas ilhas existentes no arquipélago havaiano (TANENBAUM, 2003). Entretanto, o crescimento e a normalização da tecnologia de redes sem fio, tornaram-se expressivos após a aprovação do padrão 802.11 pelo IEEE em 1997 para uso comercial (O'HARA, BOB; PETRICK, AL, 1999).

Paralelamente à conquista das redes sem fio, as tecnologias das redes ópticas são fundamentais nas telecomunicações. Ressalta-se que a primeira propagação utilizando fibra óptica ocorreu em 1966. Posteriormente, destacam-se a evolução de materiais, tecnologias e técnicas de fabricação de fibras ópticas e a criação de novos dispositivos ópticos e eletrônicos, que tornaram as comunicações ópticas como a tecnologia mais favorável para enlaces e redes de alta capacidade e longo alcance.

Os objetivos desta evolução correlacionam-se diretamente com a busca do aumento da capacidade de transmissão, integridade e confiabilidade na transmissão de dados a grandes distâncias, baixa atenuação e redução de custos.

O estado da arte de redes ópticas, registra transferência de dados na ordem de 1 Tb/s na utilização de apenas 1 canal óptico, já para os canais de Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda (*Wavelength-Division Multiplexing* - WDM), utilizam-se mais de 20 Tb/s (SMULDERS, P, 2002).

A combinação das funcionalidades das tecnologias de redes sem fio e redes ópticas motiva pesquisadores de todo mundo na tentativa de unir a mobilidade das redes sem fio com a confiabilidade, a largura de banda elevada e a capacidade de atingir longas distâncias das redes ópticas.

Com isso, surge um novo campo de estudo, o da tecnologia de rádio sobre fibra, o qual será abordado no presente trabalho.

Neste capítulo será abordado de maneira geral os tipos e estrutura das redes de comunicação sem fio e, também o sistema de rádio sobre fibra.

1.1 Tecnologia de redes sem fio

O IEEE constitui uma associação de profissionais com o objetivo de estudar e criar padrões abertos de tecnologias, garantindo assim que estes padrões se tornem acessíveis aos diversos pesquisadores e fabricantes de dispositivos.

O IEEE divide as redes sem fio em 4 grupos específicos para coberturas de área pessoal, de área local, de áreas metropolitanas e de área mundial. Conforme mostrado na Figura 1.1 (IEEE – WSZ, 2008), os critérios utilizados para a divisão desses grupos são: aplicação, alcance do sinal e largura de banda.

O primeiro grupo, *Wireless Personal Area Network* (WPAN), define redes sem fio que possuem um alcance de cobertura nominal de 10 metros, podendo chegar até 70m, operando na frequência de 2,4 GHz.

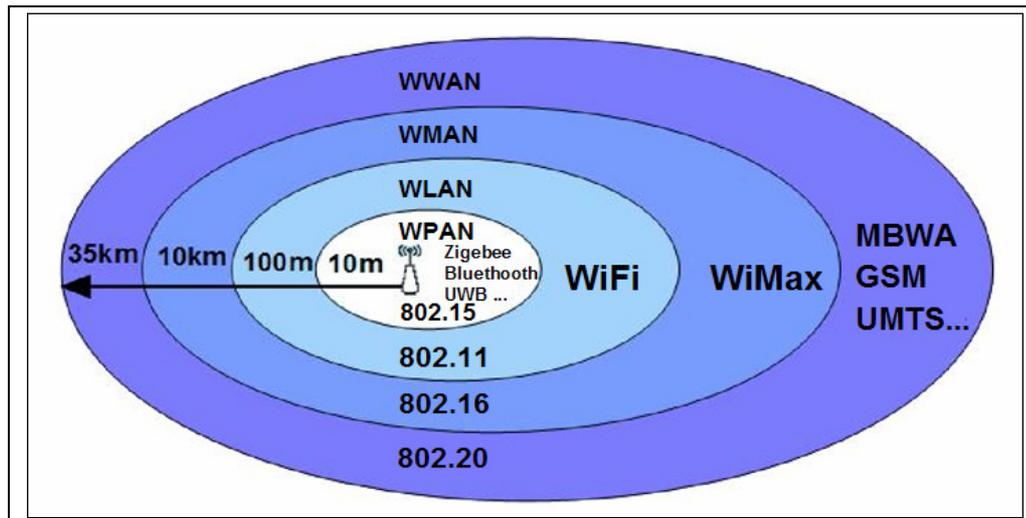


Figura 1.1 – Divisão dos grupos de tecnologias de redes sem fio.

Estas redes são utilizadas para interconectar dispositivos que estejam fisicamente próximos, como por exemplo, o padrão IEEE 802.15.4, que atende redes que não necessitam de altas taxas de transferência de dados, taxa essa na ordem de 250 Kbps, mas sim de baixa latência e baixo consumo de energia, ideal para uso em rede de sensores sem fio, também conhecida pela aplicação comercial Zigbee® do grupo Alliance (IEEE 802.15.4, 2003). No Capítulo 3 detalhar-se-á a tecnologia IEEE 802.15.4, a qual representa o foco deste trabalho.

O segundo grupo, *Wireless Local Area Network* (WLAN), atende a uma abrangência de área de cobertura de aproximadamente 30 metros *indoor* e cerca de 100 metros *outdoor*, operando na faixa ISM na frequência de 2,4 GHz ou 5 GHz, e com taxas nominais de transferência de dados de 1 a 2 Mbps (802.11), 11 e 54 Mbps (802.11a, 802.11b e 802.11g) e 600 Mbps (802.11n) (O'HARA, BOB; PETRICK, AL, 1999) .

O terceiro grupo, *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN), consiste em redes sem fio de alcance nominal de 30 a 40 km, nas frequências de 2,4, 5,4 e 5,8 GHz e, com taxa de transferência nominal de 70 Mbps. Encontra-se em testes dispositivos WMAN com taxa de transferência da ordem de Gbps e com Qualidade de Serviço (*Quality of Service – QOS*) (SMULDERS, P., 2002).

Em 2001, o IEEE especificou o 802.16 como padrão para atender às necessidades das WMAN's, também conhecidas pelo nome comercial WiMax® (*Worldwide Interoperability for Microwave*) (IEEE 802.16, 2004).

O quarto grupo, os *Wireless Wide Area Network* (WWAN), são redes sem fio que possibilitam a conexão de usuários e dispositivos a redes remotas públicas ou privadas que tenham abrangência de grande distância geográfica.

Aprovado em junho de 2008 pelo IEEE, o padrão 802.20 *Mobile Broadband Wireless* (MBWA), que atende as necessidades de redes WWAN com mobilidade a taxas de transferência de até 1 Mbps e operando em 3,5 GHz, surge como a mais nova proposta do IEEE para tecnologias de WWAN (IEEE 802.20, 2008).

Ainda pode ser citado como exemplo de WWAN, a tecnologia *Global System for Mobile* (GSM), surgida em 1992, também conhecida como tecnologia 2G, é capaz de conectar dispositivos telefônicos móveis em uma área de cobertura de até 35 km, nas bandas de 890 e 1800 MHz, podendo ainda oferecer serviços de transferência de arquivos multimídia e acesso a Internet. (GSM, 2008)

Mais recentemente destaca-se, também, a tecnologia *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS), mais conhecida como tecnologia 3G de telefonia móvel, que opera em 2 GHz com taxa de transferência na ordem de 2 Mbps. (UMTS – FORUM.ORG, 2008)

Pode ser citado como estado da arte das tecnologias WWAN, WMAN, WLAN e WPAN, pesquisas que estão sendo realizadas utilizando ondas milimétricas (*mm-waves*), isto é, redes sem fio operando na frequência de 26 a 100 GHz. Trabalhos que investigam a viabilidade, vantagens e desvantagens na utilização de ondas milimétricas podem ser consultados em (SMULDERS, P., 2002) (FORREST, J.R., 1999) (ANDRISANO, O. TRALLI. e V. VERDONE, R., 1998) (GLIESE, U. NORSKOV, S. NIELSEN, T.N., 1996) (GIANNETTI, F.;LUISE, M.; REGGIANNINI, R., 1999) (GUO, N.; QIU, R. C., MO, S.S.; TAKAHASHI, K., 2007).

1.1.2 Arquitetura de Redes sem Fio

De maneira geral, toda tecnologia de rede sem fio necessita de dispositivos denominados de Estações Centrais (EC). Pode-se dizer que uma EC é responsável, basicamente, por oferecer conexão entre a rede de dados e as Estações Bases (EB), prover segurança lógica, monitorar, gerenciar as EB e os Dispositivos sem fio Terminais (DT) conectados a elas.

Normalmente, quando empregadas em sistemas de comunicação sem fio, as EB são chamadas de Estações Rádio Base (ERB), mas neste trabalho serão tratadas como EB, já que após o emprego do sistema de Rádio sobre Fibra não haverá mais o dispositivo transceptor.

A Figura 1.2 demonstra as tecnologias de rede sem fio WPAN, WLAN, WMAN e WWAN, a partir de uma criação de referência com os elementos EC, EB e DT.

Geralmente, as EB's são representadas por um rádio transceptor. No momento em que esse transceptor deseja iniciar uma transmissão, a informação em questão será convertida para o domínio de RF e, por meio de uma conexão entre a saída de RF do transceptor e uma antena, essa informação será irradiada.

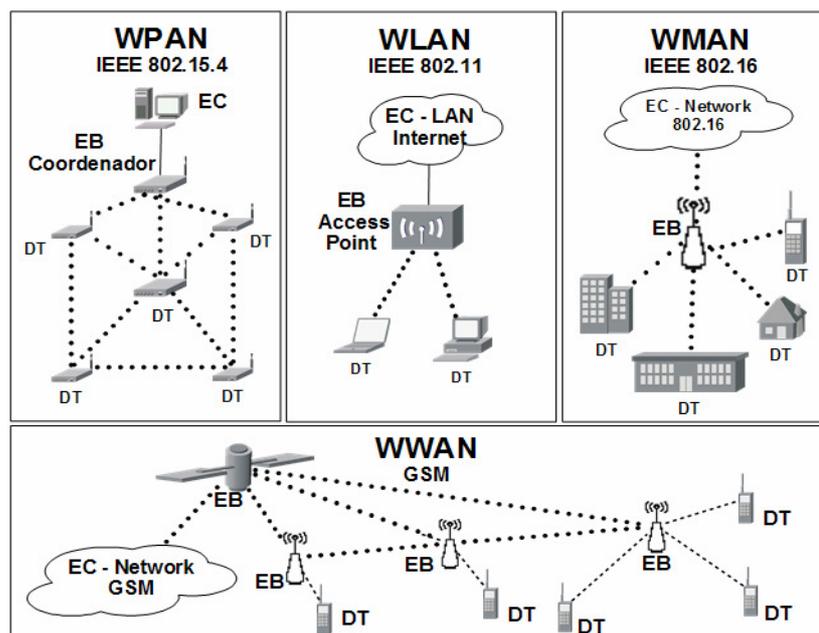


Figura 1.2 - Topologias de tecnologias de redes sem fio.

Inversamente, isso ocorre quando o transceptor deseja receber uma informação, neste caso, o sinal de RF que foi irradiado pela antena do transceptor-transmissor será capturado pela antena do transceptor-receptor e convertido para o domínio elétrico para que a informação possa ser recebida.

Com isso, as EB's possuem a função de receber e/ou transmitir os dados de ECs, como também a de realizar conversão dos dados recebidos e/ou transmitidos com a compatibilidade do meio físico em que os mesmos serão propagados. A EB é responsável também por gerenciar e controlar o acesso ao meio, oferecer a segurança e controle dos DT conectados.

A comunicação entre EB e EC realiza-se por rádio frequência – RF, cabeamento metálicos ou enlaces ópticos. Entre estas alternativas, a mais atraente na ligação entre EC e EB, é a de enlace óptico, uma vez que os enlaces ópticos apresentam baixa atenuação em comparação a outras opções, é imune a interferências eletromagnéticas (IEM), é segura e propicia uma grande largura de banda.(IEEE 802.15.4, 2003) (O'HARA, BOB; PETRICK, AI, 1999) (IEEE 802.16, 2004) (GOLDSMITH, ANDREA, 2005)

Na implementação de tecnologias sem fio atuais é necessário garantir o seu desempenho com segurança, disponibilidade e qualidade dos serviços oferecidos. Para isso percebe-se um crescente aumento no número de EB's implantadas.

Vale destacar que a implantação de EBs geram custos relacionados à manutenção, gerência, alocação de espaço, administração e segurança das estruturas utilizadas.

1.2 Rede de comunicação óptica.

São notáveis as vantagens oferecidas por enlaces ópticos. Nos últimos anos, as comunicações ópticas tiveram um grande desenvolvimento. Isso se deve aos melhoramentos alcançados nos diversos componentes, como por exemplo: a diminuição das perdas nas fibras ópticas, o desenvolvimento de novas tecnologias de fonte de luz, o aumento da sensibilidade de receptores óptico-eletrônicos e a

criação do amplificador óptico. Todos estes avanços permitiram a construção de sistemas de longo alcance.

Uma consequência evidente desse avanço é a maior aplicabilidade de redes ópticas para diversas formas de comunicação, tais como, os sistemas de transmissão submarinos, redes telefônicas, televisivas e a Internet já acessível em áreas de difícil acesso e com milhares de quilômetros de distância (NIIHO, T.; et. al, 2006)

1.2.1 Sistema de Rádio sobre Fibra

Os avanços das redes ópticas conduziram pesquisadores a explorar novas aplicações e soluções utilizando enlaces ópticos, tornando-os compatíveis com diversas tecnologias de rede, combinando vantagens das redes ópticas com as de outras tecnologias de rede.

Com isso, novas pesquisas são realizadas, com o objetivo de combinar o longo alcance e a grande largura de banda das redes ópticas com a mobilidade, baixo custo e fácil implementação das redes sem fio. Nesta perspectiva, surge o sistema de Radio Sobre Fibra.

O sistema de Radio Sobre Fibra (*Radio-over-Fiber* - RoF) consiste em modular uma portadora de RF, na frequência f_{RF} em uma portadora óptica, de frequência f_c . Com isso, o sinal propagado pela fibra, correspondente a portadora é acompanhado de duas bandas laterais $f_c - f_{RF}$ e $f_c + f_{RF}$. Esses sinais podem então ser propagados por uma fibra e, ao final desta, serem foto-detectados e permitirem, idealmente, a recuperação do sinal de RF.

O sistema de RoF poderia ser usado para estender o alcance das tecnologias de redes sem fio abordadas na sessão anterior conectando, por exemplo, uma EB a uma antena. Desta forma, as EBs teriam somente a responsabilidade de converter o sinal RF para o domínio óptico e vice-versa, e as funções de Controle de Acesso ao Meio (*Medium Access Control* - MAC),

comutação, roteamento e controle da camada física estariam a cargo da EC (GARCIA, M. LARRODÉ; et. al., 2006).

A Figura 1.3 apresenta como é organizado o sistema de RoF e sua relação com as camadas do Modelo de Referência OSI. Também é possível observar que o controle da MAC e o Controle Lógico do Link (Logical Link Control - LLC) estão sob a responsabilidade da EC e DT, estabelecendo assim a gerência centralizada da MAC e LLC.

Com isso, a EB fica responsável por executar a conversão eletrônico-óptica e óptico-eletrônica de acordo com o meio de transmissão pretendido. Após a conversão óptico-eletrônica, o sinal RF é enviado a uma antena que terá a função de irradiá-lo à antena do DT (GARCIA, M. LARRODÉ, 2006).

Com o emprego do sistema de RoF, a antena pode ser levada a até centenas de quilômetros de distância da EC, ao contrário dos cabos metálicos que limitam a instalação da antena a poucos metros da EB.

Além disso, se reduz o efeito de IEM e aumenta a proteção da EB e EC contra altas voltagens provenientes de descargas atmosféricas, as quais provocam danos em EBs. Conseqüentemente, nota-se o aumento da segurança proporcionado pelo enlace óptico no tráfego de dados entre a EC e a Antena, como também, a facilidade e agilidade na solução de problemas, já que toda gerência estaria centralizada.

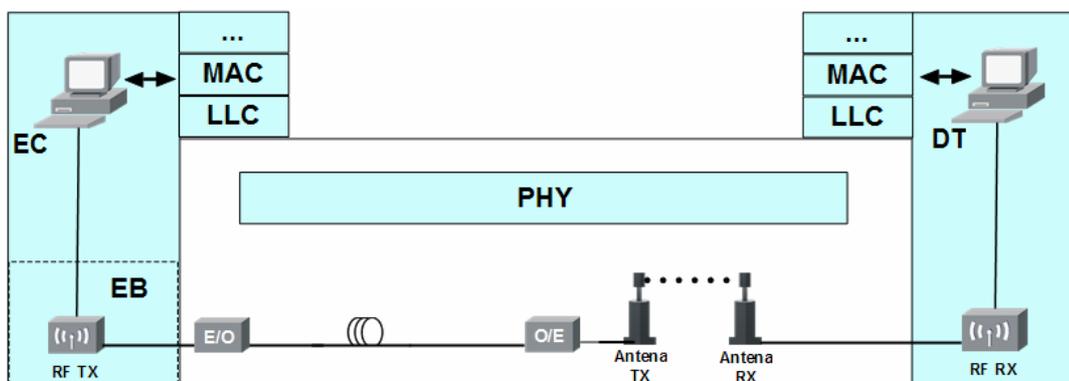


Figura 1.3 - Sistema RoF

Desde a década de 1990, quando a primeira demonstração do sistema de RoF em um sistema de telefonia celular foi apresentada, novas soluções e inúmeros estudos foram propostos e realizados a fim de explorar os limites e benefícios da tecnologia (COOPER, A.J., 1990) (CHU, T. S.; GANS, M. J, 1991) (OHMOTO, R. ;OHTSUKA, H.; ICHIKAWA, H, 1993).

Um exemplo importante destes avanços reside na utilização de RoF para as tecnologias redes sem fio que utilizam ondas milimétricas. Como exemplos, as referências (HARADA, H.; SATO, K.; FIJISE, M, 2001a) (HARADA, H.; SATO, K.; FIJISE, M, 2001b) citam o emprego de RoF em comunicação veicular e sistemas de transportes inteligentes e a referência (AJUNG, K.; YOUNG H. J.; YOUNGSOO, K, 2004) demonstra uma combinação de RoF e rede WLAN utilizando ondas milimétricas.

Pesquisas também estão sendo realizadas com a aplicação de RoF em sistemas de RF que utilizam microondas, como exemplo de aplicação de RoF em redes WWAN as referências (KWANSOO, Lee, 2005) (WAKE, D., et. al, 2004) (ROY, V.; DESPINS, C. L, 1999) citam aplicações de RoF em redes de telefonia móvel celular. Para redes WLAN em microondas, as referências (LETHIEN, C.; LOYEZ, C. ; VILCOT, J. P, 2005) (CHIA, M. Y. W.; et. al, 2004) (SINGH, G.; ALPHONES, A, 2003) citam novas soluções e investigam a viabilidade da combinação de RoF e WLAN

O sistema de RoF pode ser encontrado em equipamentos comerciais que atendem às tecnologias de redes sem fio WWAN (GSM/UMTS), WMAN, WLAN, WPAN.

A Optical Zonu[®] e ViaLite[®] oferecem às redes sem fio WLAN, WMAN, WLAN, WPAN, soluções que operam nas frequências RF de 2 kHz a 4,2 GHz, com suporte a multi-comprimento de ondas CWDM (1300 nm) e WDM denso (DWDM) na faixa de 1550nm. Esses equipamentos ainda permitem monitoramento remoto e controle automático de ganho (VIALITE, 2008) (OPTICAL ZONU, 2008).

1.3 Motivação do trabalho

A motivação deste trabalho reside em combinar redes de sensores WPAN no padrão IEEE 802.115.4 com redes ópticas. Em particular, serão apresentados resultados experimentais relativos à convergência destas tecnologias. Os experimentos deste trabalho foram realizados em uma rede experimental.

De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada durante a execução deste trabalho, esta é a primeira vez que uma investigação experimental de RoF é feita para o padrão IEEE 802.15.4 com arquitetura centralizada.

Com isso, a investigação experimental de RoF em redes WPAN 820.15.4 surge como proposta para um novo campo de estudo e fomento para trabalhos futuros.

Algumas características das redes IEEE 802.15.4 foram fundamentais para garantir uma adaptação da tecnologia de rede sem fio à tecnologia óptica, dentre as principais características do padrão IEEE 802.15.4 podem ser citados: a facilidade na programação da MAC, sua baixa taxa de transmissão (250 kbps) que é uma característica fundamental de rede de sensores sem fio, monitoramento e gerenciamento centralizado.

1.4 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é investigar através de experimentos a viabilidade da aplicação do sistema de RoF em redes de sensores sem fio, que utilizam o padrão IEEE 802.15.4 para as camadas Físicas (PHY) e MAC.

Certamente, a banda oferecida por redes ópticas supera em grande escala a taxa de comunicação oferecida pelas redes sensores, mas deve-se considerar que dependendo da aplicação, em uma rede de sensores é comum à utilização de centenas de sensores (RUIZ, L, 2004).

Ao contrário de outros trabalhos, nos quais o foco é a aplicação de RoF em sistemas de comunicação de banda larga sem fio (*broadband wireless*) para

atender serviços de telefonia, sistemas televisivos, etc., este trabalho tem como objetivo a aplicação de RoF em redes de sensores sem fio, que hoje possuem um papel fundamental em aplicações de monitoração de atividades e gerenciadores remotos industriais, rurais e veiculares.

Com isso, o estudo e execução experimental de RoF aplicado em redes de sensores sem fio surge como uma proposta para aplicações comerciais não realizadas até o presente.

1.5 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira: no Capítulo 2 será abordado o conceito de redes ópticas convencionais e o sistema de RoF; no Capítulo 3 será tratada a tecnologia de rede sem fio IEEE 802.15.4, suas características e algumas aplicações combinadas com o sistema de RoF; no Capítulo 4, será visto a descrição dos ambientes experimentais realizados neste trabalho e serão apresentados os resultados obtidos; já no Capítulo 5, será apresentada a conclusão dos dados obtidos do experimento e propostas para trabalhos futuros. Os apêndices apresentam a topologia da rede óptica utilizada nos experimentos (rede KyaTera) e os dados coletados para as análises experimentais.

CAPÍTULO 2 SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA

A tecnologia RoF utiliza um enlace de fibra óptica para transmitir sinais gerados por um sistema de Rádio Freqüência. Em alguns casos, podem ser utilizados sinais analógicos de Freqüência Intermediária (FI) para propagação pelo enlace óptico. Nessa situação, após foto-detectados, os sinais de FI precisam ser eletronicamente convertidos para o domínio de RF antes de serem irradiados pela antena.

Para que o sinal de RF gerado por um transceptor possa ser convertido para o domínio óptico, é necessária uma modulação de uma fonte de luz pelo modulador de RF. A modulação dessa fonte de luz é que irá converter a portadora de RF que está no domínio elétrico em uma portadora óptica.

Logo após a conversão eletro-óptica, o sinal será propagado por um enlace óptico e ao término desta etapa, novamente, o sinal será foto-detectado e convertido do domínio óptico para o elétrico.

Durante todos os processos de modulação óptica, propagação pelo enlace óptico e foto-deteccção, nota-se que o ideal seria que o sistema RoF fosse transparente, isto é, o sinal de entrada deveria ser idêntico ao sinal de saída. No entanto, existem algumas limitações referentes à não linearidade óptica, a dispersão causada pela fibra óptica e os limites da freqüência de resposta tanto na modulação da fonte de luz quanto na foto-deteccção, os quais afetam diretamente o sinal que será enviado à antena (ACKERMAN, E. I.; COX, C. H., 2001) (GARCIA, M. LARRODÉ; et. al, 2005).

De maneira geral, o capítulo em questão irá abordar a tecnologia RoF em relação aos aspectos de geração, propagação e foto-deteccção desse sinal óptico, bem como, os efeitos que podem causar alteração do sinal de RF, os quais são gerados durante a modulação óptica, propagação pelo enlace óptico e foto-deteccção.

2.1 Sistemas Ópticos Convencionais

A Figura 2.1 ilustra um esquema de um sistema óptico convencional. O dispositivo transmissor TX é constituído por uma fonte de luz modulada por um sinal elétrico que contém a informação a ser transmitida. Esse sinal elétrico pode ser analógico, como no caso de redes de TV a cabo (*Cable Television* – CATV) (OHTSUKA, T.; et. al, 1988) (KOONEN, T., 2006), ou digital, como em redes de hierarquia digital síncrona (*synchronous digital hierarchy*, SDH) (EFFENBERG, F. J.; ICHIBANGASE, H.; YAMASHITA, H., 2001) (BERGNSTEIN, G.; MANNIE, E.; SHARMA, V., 2001).

Após a modulação, o sinal óptico resultante é propagado por um ou mais enlaces de fibras ópticas e, se necessário, pode ser amplificado no próprio domínio óptico por equipamentos chamados amplificadores ópticos. Uma vantagem destes equipamentos com relação aos amplificadores eletrônicos é a largura de banda de amplificação que pode ser superior a 4 THz (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N., 2002). Em contrapartida, a figura de ruído destes amplificadores é da ordem de 5 dB. Isso tende a degradar a qualidade do sinal, especialmente quando vários amplificadores ópticos são utilizados em cascata.

No receptor (RX), um fotodetector converte o sinal óptico modulado em um sinal elétrico que, idealmente, deveria ser idêntico ao sinal utilizado para modular a fonte de luz. Obviamente, todas as partes do sistema podem introduzir degradações que afetarão a qualidade deste sinal de saída.

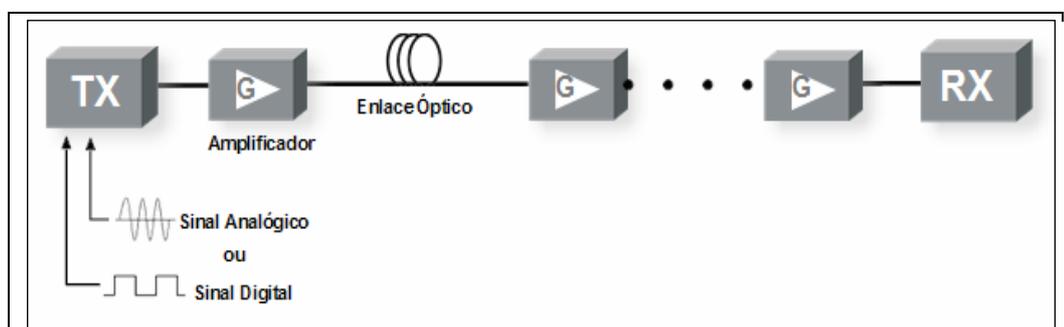


Figura 2.1 – Topologia RoF convencional.

Nas próximas seções, discutem-se algumas características básicas da geração e propagação dos sinais ópticos.

2.1.1 Geração do Sinal Óptico.

Em relação à escolha da tecnologia a ser empregada para a geração do sinal óptico, deve-se levar em consideração as características da fonte de modulação do sinal óptico e o tipo de aplicação da tecnologia óptica. Estas características auxiliam na escolha dos dispositivos responsáveis pela geração do sinal óptico, objetivando aliar custo e benefício.

O desempenho, qualidade e alcance do sinal óptico dependem diretamente do tipo de fonte de luz utilizada. Existem dois tipos de fontes de luz empregados em comunicações ópticas, os Diodos Emissores de Luz – LEDs (*Light Emitting-Diode*) e os Diodos Lasers (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Os LEDs possuem um custo menor mas só podem ser utilizados para transmissão em distâncias relativamente curtas, tipicamente de alguns poucos quilômetros. Isso ocorre porque estes dispositivos possuem uma largura de linha relativamente elevada (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N, 2002) que realça os efeitos de dispersão (discutidos posteriormente neste capítulo). Por esta razão, apesar de um custo mais elevado, os *lasers* devem ser a opção para transmissões a longa distância.

A forma como a fonte de luz é modulada também afeta a qualidade do sinal óptico. Na modulação direta, a própria corrente de entrada da fonte de luz é modulada pela informação a ser transmitida. Este tipo de modulação possui custo reduzido, mas causa um *chirping* no sinal que também aumenta os efeitos de dispersão. Tipicamente, a modulação direta é utilizada para transmissão de sinais digitais com taxas de até 2,5 Gb/s.

A outra forma de modulação é chamada de modulação externa. Neste caso, a fonte de luz normalmente utilizada é o *laser* que é polarizado com uma corrente contínua e assim transmite um sinal óptico *cw* (*continuous-wave*). Esse sinal é, por sua vez, inserido em um dispositivo chamado modulador óptico que tem a propriedade de alterar a potência do sinal em *cw* proporcionalmente à corrente de

um sinal elétrico de entrada. Moduladores ópticos de niobato de lítio, LiNbO_3 , são bastante utilizados para a modulação de sinais analógicos (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N, 2002) ao passo que moduladores *Mach-Zehnder* são freqüentemente utilizados em sistemas digitais. Obviamente, estes moduladores externos ao *laser* introduzem um custo adicional ao sistema de transmissão óptica, mas reduzem o problema de dispersão que é evidenciado no caso da modulação direta. A modulação externa é tipicamente utilizada em sistemas digitais com taxas de transmissão superiores a 10 Gb/s (CHANG, W. S, 2002) (COX, C. H, 2004).

2.1.2 Fibras Ópticas

A fibra óptica consiste em um núcleo cilíndrico de material dielétrico composto basicamente de sílica (SiO_2), envolvido por um revestimento também composto por sílica, mas com um índice de refração menor que o do núcleo. Essa diferença no índice de refração é que direciona o feixe de luz na sua propagação pelo núcleo da fibra através do fenômeno de reflexão interna total.

O campo eletromagnético dos sinais ópticos inseridos na fibra são distribuídos (acomodados) em várias configurações chamadas de modos (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N., 2002). De acordo com o número de modos de propagação, as fibras ópticas são classificadas em multimodo e monomodo. As multimodais são aquelas cujos diâmetros permitem vários modos de propagação e são utilizadas em aplicações que não exigem grandes distâncias. Já as monomodais permitem um único modo de propagação, e são comumente empregadas em *backbones* ópticos que podem alcançar centenas de quilômetros de distância. No presente trabalho, serão consideradas apenas as fibras monomodo, já que a rede utilizada para os experimentos é composta por fibra monomodo.

Em comparação com as fibras multimodo, as monomodo apresentam maior banda passante, menor perda e maior distância de transmissão, da ordem de 50 km antes da amplificação do sinal óptico. O principal limitante da distância de propagação nas fibras multimodo é a dispersão intermodal causada pela diferença de velocidade de propagação de cada modo (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N, 2002).

Esse efeito faz com que os sinais que se propagam por este tipo de fibra fiquem severamente degradados após distâncias que variam entre algumas centenas de metros a alguns quilômetros, dependendo da taxa de transmissão utilizada.

Os principais tipos de fibras monomodo são: a fibra-padrão (*Standard Single Mode Fiber, SSMF*), a fibra de dispersão deslocada (*Dispersion Shifted Fiber - DSF*) e a fibra de dispersão não-nula (*Non-Zero Dispersion Fiber, NZDF*) e, para as comunicações ópticas são utilizadas janelas ópticas, as quais foram selecionadas devido a sua baixa atenuação. Na próxima seção serão discutidas com maiores detalhes as janelas ópticas.

Fibra Monomodo Padrão (Standard Single Mode Fiber- SSMF)

O padrão ITU G652 especifica as características da Fibra Monomodo Padrão (*Standard Single Mode Fiber – SSMF*). Na segunda janela este tipo de fibra possui valor de dispersão próximo a zero e na terceira janela (1550nm) sua dispersão pode ser de até 20 ps/nm.km. A atenuação deste tipo de fibra varia de 0,15 a 0,25 dB/km (ITU-T, G 652, 1993).

Fibra Monomodo de Dispersão Deslocada (Dispersion Shifted Fiber - DSF)

A Fibra Monomodo de Dispersão Deslocada (*Dispersion Shifted Fiber – DSF*) possui características especificadas pelo padrão ITU-G653.

As fibras DSF foram criadas com o objetivo de reduzir a dispersão da terceira janela para zero. No entanto, essa característica mostrou-se negativa para os sistemas com multiplexação densa por divisão de comprimento de onda (*Dense Wavelength Division Multiplexing – DWDM*), já que a dispersão nula (de 0 á 3,5 ps/nm.km) aumenta as interferências causadas por efeitos não lineares inter-canais (ITU-T, G 653, 2003).

Fibras Monomodo de Dispersão Deslocada Não-Nula (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber - NZD)

A fibra Monomodo de Dispersão Deslocada Não-Nula é especificada pelo padrão ITU-G655 e foram criadas, especialmente, para o uso em sistemas DWDM. A NZD possui atenuação de 0,35 a 0,4 dB/km e dispersão de 1 a 10 ps/nm.km na terceira janela. Esse valor intermediário de dispersão em 1550 nm, tem por objetivo reduzir simultaneamente os efeitos de alargamento temporal de pulsos observados nas SSMF sem e os efeitos de interferência causados nas DSF (ITU-T, G 655, 2006).

2.1.3 Propagação Óptica

Para que uma comunicação seja realizada através do domínio óptico é necessária a utilização de um condutor óptico para a propagação do feixe de luz, a fibra óptica. Como em qualquer meio de propagação, surgem os chamados efeitos de propagação óptica, os quais podem alterar, distorcer ou degradar o sinal óptico empregado. Tais efeitos de propagação são divididos em efeitos lineares e não-lineares.

Efeitos Lineares

Entre os efeitos lineares, destacam-se a Atenuação e a Dispersão, os principais efeitos a serem observados na implantação de uma rede óptica.

Atenuação

A atenuação em fibras ópticas ocorre com a perda da potência do sinal óptico durante a propagação óptica, e as principais causas da atenuação são provocadas pela absorção, curvaturas e espalhamento (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N, 2002). Essas perdas podem ser acentuadas quando há junções no meio óptico, como emendas por fusão ou conexões. Cada emenda pode

ocasionar perdas da ordem de 0,1 dB, ao passo que as conexões podem atingir até 0,6 dB mesmo quando os conectores utilizados em cada ponta são idênticos (SUGITA, E.; et. al, 1989) (DYOTT, R. B.; STERN, J. R.; STEWART, J. H, 1972).

A Figura 2.2 apresenta as janelas ópticas utilizadas nas comunicações ópticas. Verifica-se que as janelas ópticas foram definidas levando em consideração a atenuação, dispersão e largura de banda. Na primeira janela com comprimento de onda (λ) de 800 a 900 nm, nota-se uma atenuação por volta de 2 dB/km. Na segunda janela λ está ao redor de 1310 nm e a atenuação é de 0,3 a 0,5 dB/km. Por fim, a terceira janela, está na faixa de 1550 nm e as perdas estão tipicamente entre 0,18 e 0,25 dB/km (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N., 2002) (ITU-T, G 652., 1993).

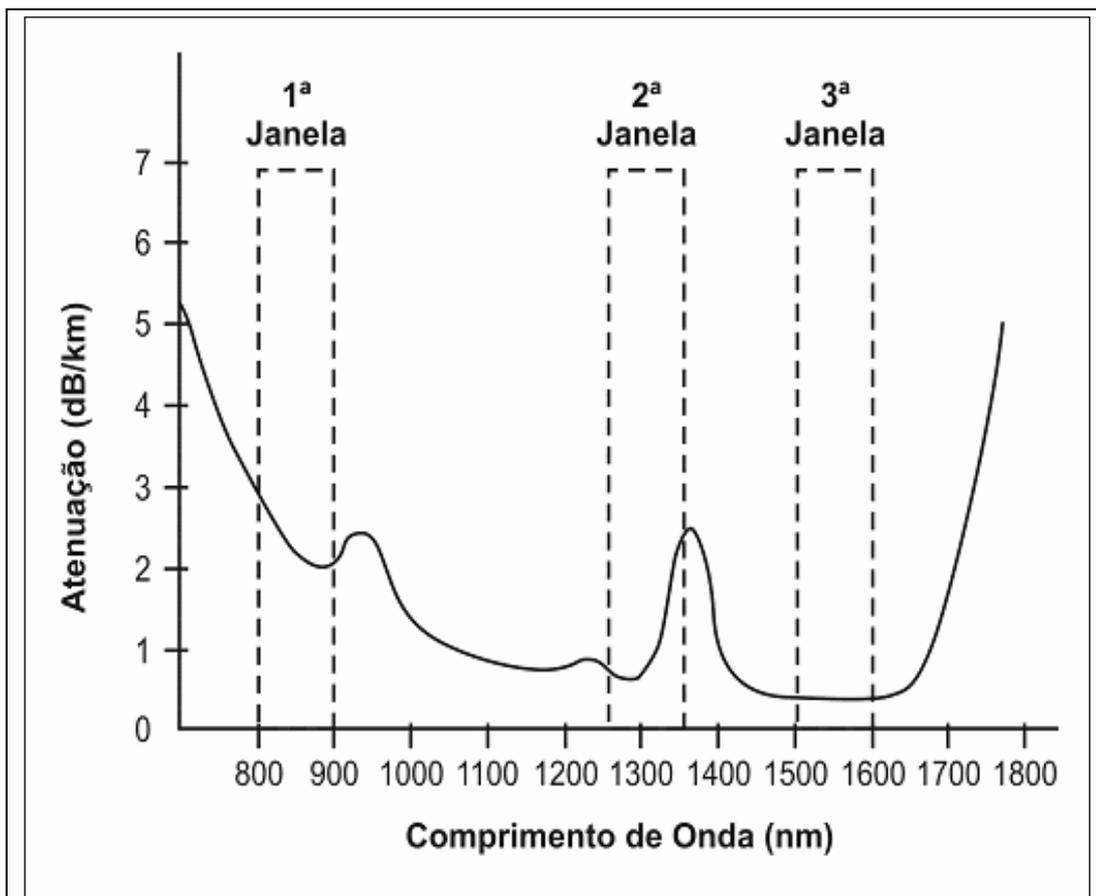


Figura 2.2 – Janelas ópticas utilizadas para comunicações ópticas.

Dispersão

A dispersão é um dos principais parâmetros a ser considerado quando se escolhe o tipo da fibra óptica que será utilizada.

Há dois tipos de dispersão, a intermodal e a intramodal. O primeiro ocorre em fibras multimodo que não serão abordadas neste trabalho, podendo o leitor interessado consultar (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N., 2002)

A Dispersão Intramodal, por sua vez, possui contribuições da Dispersão Cromática (*Chromatic Dispersion* - CD) e da Dispersão dos Modos de Polarização (*Polarization Mode Dispersion* – PMD).

Dispersão Cromática

Um sinal óptico é composto por diversas componentes espectrais independentes. Como o índice de refração da fibra depende da frequência, cada componente espectral adquire uma velocidade própria de propagação. Dessa maneira, cada componente chegará ao receptor em um instante de tempo diferente, ocasionando um alargamento temporal do pulso. Este alargamento é chamado de dispersão cromática (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N., 2002).

O efeito da CD aumenta paralelamente ao aumento do trajeto óptico, com isso a dispersão cromática torna-se fator limitante para extensão de enlaces de fibra óptica. No caso de sistemas de comunicações que utilizam sinais analógicos, a CD é ainda mais séria quando combinada com a foto-detecção, dando origem ao efeito de Desvanecimento, que será tratado mais adiante, assim como formas de minimizar ou anular seus efeitos.

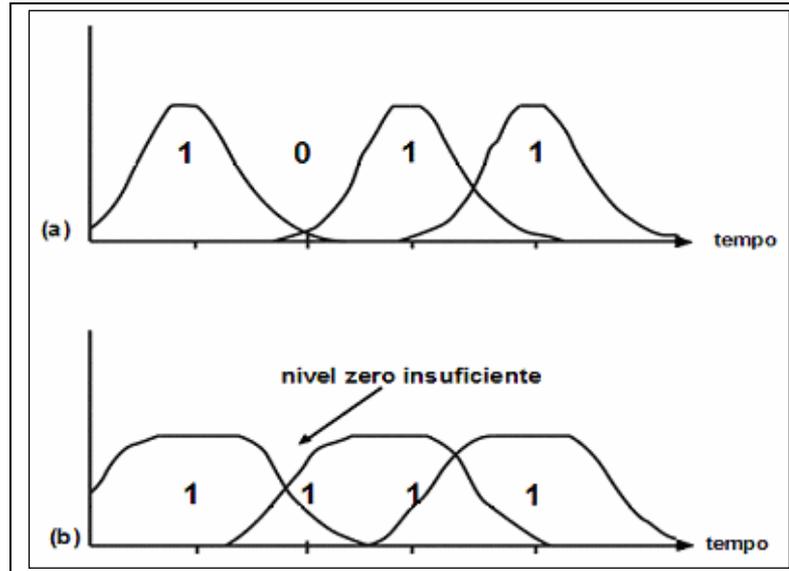


Figura 2.3 – Efeito de dispersão cromática em sinais ópticos Analógicos.

A Figura 2.3 apresenta uma ilustração do efeito da CD em um sinal óptico. Podemos observar que no início do trajeto (Figura 2.3a) a CD ainda não é suficiente para a degradação do pulso óptico que ainda permanece distinto, mas após a propagação por uma distância relativa ao nível crítico de CD (Figura 2.3b), pode-se perceber que o alargamento dos pulsos ópticos provocados pela CD os torna indistintos, a ponto de impossibilitar sua identificação.

Nos experimentos apresentados por este trabalho foi utilizado 100km de fibra SSMF com λ de 3^o janela, dispersão por volta de 16 ps/km.nm

Dispersão do Modo de Polarização (PMD)

A PMD ocorre devido à natureza assimétrica do núcleo de uma fibra óptica, causada durante os processos de fabricação ou instalação, e pode ser significativa em fibras ópticas monomodo transportando sinais com taxas iguais ou superiores a 10 Gb/s (ANDRÉ, P. S.; PINTO, J. L., 2002) .

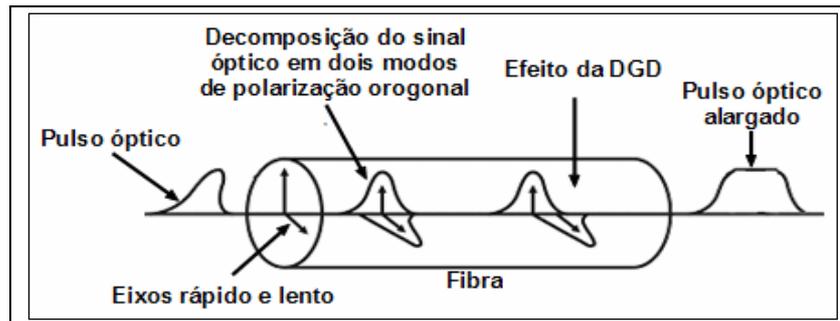


Figura 2.4 – Dispersão dos modos de polarização (PMD).

Essa assimetria do núcleo da fibra provoca dois valores diferentes de índice de refração para os dois eixos ortogonais existentes no núcleo da fibra, a chamada birrefringência. Durante a propagação pela fibra óptica, o sinal óptico é decomposto em dois modos de polarização ortogonal com velocidades características distintas. Essas variações de velocidade também ocasionarão um alargamento do pulso óptico.

Estatisticamente, a PMD é determinada pela média temporal de Atraso Diferencial de Grupo (*Differential Group Delay – DGD*), que é o atraso entre os dois modos de polarização em um dado instante na fibra. De acordo com a ilustração apresentada na Figura 2.4, pode-se observar que ao se propagar pela fibra, o sinal óptico pode ser decomposto em dois estados ortogonais de polarização. Durante o trajeto óptico pelos chamados eixos rápido e lento, o sinal sofrerá o efeito de DGD que causará a dispersão desse sinal. É importante notar que esse efeito varia com o tempo, devido, por exemplo, a variações ambientais ao longo da fibra.

2.1.4 Foto-deteccção

A foto-deteccção consiste na conversão de um sinal óptico em um sinal elétrico. Fotodetectores do tipo PIN, como os utilizados neste trabalho, são de baixo custo e proporcionam um sinal elétrico de saída cuja corrente (I_D) é, idealmente, dada por:

$$I_D = \mathfrak{R}P_{opt} \quad (2.1)$$

na qual P_{opt} é a potência do sinal óptico na entrada do fotodetector e \mathfrak{R} é a responsividade deste dispositivo, que pode ser calculada a partir de:

$$\mathfrak{R} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (2.2)$$

Nesta equação, η é a eficiência quântica do dispositivo (número médio de elétrons gerados por cada fóton incidente), q é a carga do elétron, λ é o comprimento de onda da portadora óptica, h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz no vácuo (Wilberg, A. 2008). Na prática, a corrente de saída dos fotodetectores também contém uma corrente de escuro devido à presença de ruído térmico (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N, 2002).

Se o fotodetector puder ser caracterizado por uma resistência R_D , a potência do sinal elétrico na saída deste dispositivo será:

$$P_D = R_D I_D^2 = R_D (\mathfrak{R} P_{opt})^2 \quad (2.3)$$

Esta relação mostra que o dispositivo é não-linear com relação à potência óptica do sinal de entrada.

Algumas características sobre a absorção, saturação, frequência máxima de entrada óptica e saída elétrica de fotodetectores, podem ser obtidas a partir de (KATO, K, 1999), (WILLIAMS, K. J.; et. al,1998), (BOWERS, J. E.; BURRUS, C. A. 1986) e (ALPING, A., 1989).

2.2 Sistemas de Rádio sobre Fibra

Em um sistema RoF ocorrem os mesmos efeitos de propagação que em outros sistemas de transmissão óptica. No entanto, alguns fatores como o efeito de desvanecimento, ganho do sistema e considerações referente a análise de desempenho do sistema, requerem atenção especial durante a implantação de um sistema de RoF.

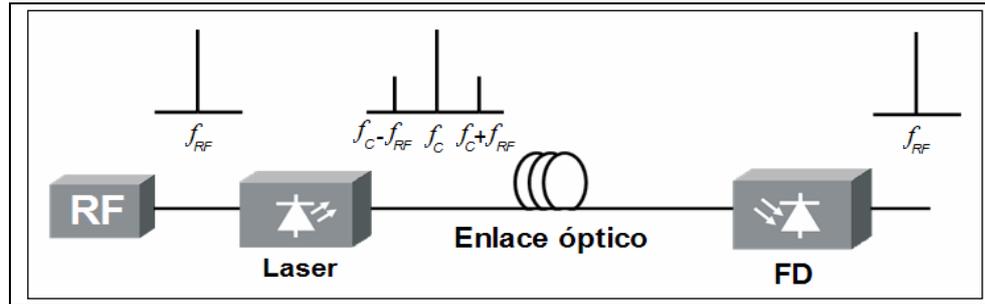


Figura 2.5 – Sistema RoF (Bandas Laterais).

De fato, quando um sinal de RF na frequência f_{RF} modula uma fonte de luz, surgem duas bandas laterais em torno da frequência da portadora óptica f_C , em $f_C - f_{RF}$ e $f_C + f_{RF}$, conforme indicado na Figura 2.5. Essas bandas laterais, devido ao efeito de dispersão, irão propagar-se com velocidades diferentes.

As Seções seguintes apresentam as características do efeito de desvanecimento, como é medido o ganho de um sistema de comunicação utilizando RoF e considerações sobre o sistema RoF como uma “caixa-preta”.

2.2.1 Efeito de Desvanecimento

O efeito de desvanecimento é provocado pela combinação de dispersão e foto-deteção, e deve ser considerado na implantação de um sistema de RoF.

A não-linearidade da foto-deteção causará uma interferência entre os sinais em cada uma dessas bandas f_C , em $f_C - f_{RF}$ e $f_C + f_{RF}$ que, em geral, não será construtiva e dará origem a um desvanecimento na potência do sinal de RF. Na verdade, dependendo da diferença de fase entre esses sinais, poderá haver interferência destrutiva e a potência do sinal de RF foto-detectado poderá ser nula (ABBADÉ, M. L. F.; et. al, 2008). Este efeito está ilustrado na Figura 2.6.

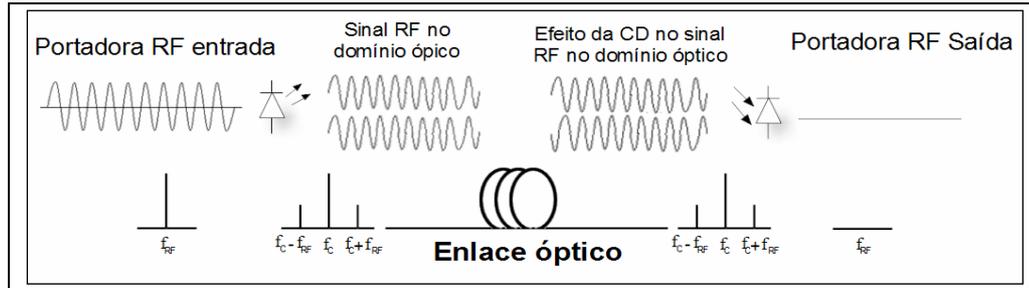


Figura 2.6 – Efeito de desvanecimento.

As distâncias de propagação do sinal óptico nas quais ocorrem a anulação da potência de RF devido ao desvanecimento podem ser obtidas a partir de:

$$L_{dk} = \frac{(2k+1)\pi}{\beta_2 \omega_m^2}, \quad k \text{ inteiro.} \quad (2.4)$$

na qual, L_{dk} é o comprimento de desvanecimento de ordem k , comprimento esse referente aos valores de potências do sinal de RF influenciado pelo efeito de desvanecimento, ω_m é a frequência da portadora em rad/s e o β_2 é o parâmetro de dispersão de segunda ordem da fibra que é dado por:

$$\beta_2 = -\frac{D\lambda^2}{2\pi c} \quad (2.5)$$

sendo D a dispersão cromática, c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda associado à portadora óptica.

Há várias técnicas para minimizar ou eliminar o desvanecimento em sistemas RoF que estão em estudo. Em (ABBADÉ, M. L. F.; et. al., 2008), é proposto o emprego de fibras DCF para tratamento do desvanecimento, em (JIN, X.; CHI, H.; ZHANG, X., 2006) propõe a utilização de grades de Bragg para melhorar a resposta em frequência do sistema, em (HILT, A.; et. al, 2002) é sugerido a utilização da modulação OSSB para minimizar os efeitos do desvanecimento e, por fim, em (WANG, J.; ZENG, F.; YAO, J, 2005) é proposta a aplicação de filtros de banda passante para eliminar uma das banda laterais, cancelando o desvanecimento.

Como observado a partir de (2.4), o desvanecimento é mais evidenciado em sistemas que operam com sinais de alta frequência. Por exemplo, utilizando os valores típicos de uma SSMF e considerando um sinal de ondas milimétricas com $f_{RF} = 30$ GHz, o comprimento de desvanecimento de ordem zero ($k=0$) será de, aproximadamente, 4,3 km. As medidas realizadas neste trabalho utilizaram um sinal com $f_{RF} = 2,48$ GHz, cujo ponto de desvanecimento de ordem zero está ao redor de 600 km. Como o maior enlace óptico empregado neste trabalho foi de 100 km, a influência do desvanecimento em nossos resultados não deve ser muito apreciável.

2.2.2 Ganho do Sistema de RoF

O ganho de um enlace RoF é definido como a relação entre a Potência de RF obtida na saída de um foto-detector, P_{OUT} , e a Potência de RF que será fonte de modulação de uma portadora óptica, P_{IN} . No caso da modulação direta, utilizada em nossos experimentos, o ganho do enlace RoF, g , pode ser expresso como:

$$g = \frac{P_{out}}{P_{in}} = s_l(f)^2 \alpha^2 s_d(f)^2 \frac{R_d}{R_l} \quad (2.6)$$

na qual f é a frequência, R_d é referente a resistência do foto-detector, R_l é a resistência efetiva do laser, α é a perda provocada pelo enlace óptico, o qual inclui também as perdas provocadas por emendas e conexões, s_l e s_d representam, respectivamente, as inclinações das curvas características do laser e do foto-detector que, em geral, dependem da frequência.

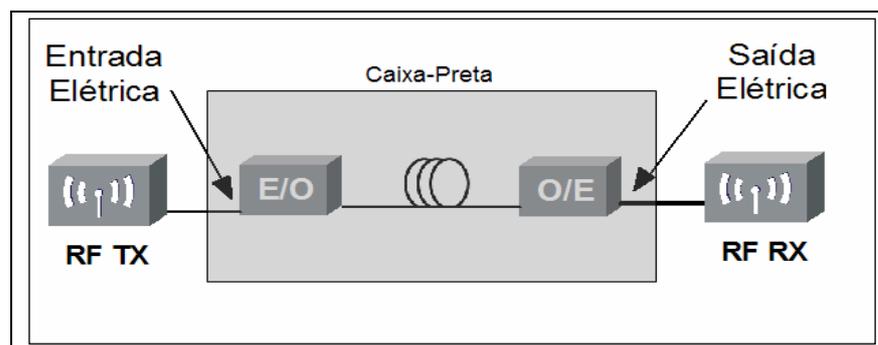


Figura 2.7 – RoF como “caixa-preta”.

O ganho de um sistema de RoF poderia ser aumentado com o emprego de amplificadores ópticos ou dispositivos eletro-ópticos mais eficientes (COX, C. H., 2002) (Wilberg, A, 2008) (KAHANA, E.; BAKER, M.; TZIORTZIS, A., 2002).

De forma geral, o engenheiro de RF deve considerar a influência de parâmetros como o desvanecimento, a dispersão cromática e as não-linearidades da fonte de luz e do foto-detector. No entanto, se for previamente conhecido que estes efeitos podem ser desprezados, é possível considerar um sistema RoF como uma caixa-preta, no qual o sinal de RF de saída corresponde ao sinal de entrada multiplicado pelo ganho (ou perda) previsto por (2.6). Esta situação está descrita na Figura 2.7.

2.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou de maneira geral a tecnologia de comunicações ópticas, desde a geração do sinal óptico até sua foto-detecção. Também foi visto detalhes sobre o funcionamento do sistema de RoF que será aplicado nos experimentos que serão descritos mais adiante.

CAPÍTULO 3 REDES DE SENSORES SEM FIO

Este capítulo abordará conceitos referentes a Redes de Sensores sem Fio (RSSF) e o padrão IEEE 802.15.4, bem como, o funcionamento, as limitações, a organização física e as aplicações. Em seguida, apresentar-se-ão algumas propostas de combinação de RSSF, de acordo com a tecnologia de RoF e métodos para realização de métricas de RSSF, utilizando-se da aplicação RoF.

3.1 Redes de Sensores sem Fio

A convergência e a miniaturização das tecnologias de comunicação sem fio, os microprocessadores e os micro-sistemas eletro-mecânicos são fatores determinantes que possibilitaram o surgimento e a viabilidade de tecnologias de RSSF (LOUREIRO, A. A. F.; et. al., 2003), tanto que, atualmente, a RSSF é apontada como uma das principais tecnologias do século XXI (GROSS, N.; COY P., 1999).

Com as RSSF é possível monitorar, acompanhar, estudar, controlar remotamente, compreender e atuar sobre fenômenos ou acontecimentos. Portanto, é imprescindível a investigação de novas soluções e aplicações oferecidas pela RSSF.

Paralelamente com a evolução da tecnologia de RSSF, outras áreas serão beneficiadas, como a saúde, prevenção de catástrofes atmosféricas, segurança, militares, automação industrial, comercial, etc.

Alguns exemplos de aplicações práticas para as RSSF são:

- Medições de condições físicas de pontes, prédios, alicerces;
- Monitoração de micro-climas como: temperatura, umidade, luz, pressão atmosféricas;
- Detecção e caracterização de objetos como: cargas e meios de transportes;

- Detecção de ambientes químicos e biológicos;
- Prevenção de danos estruturais na detecção de: vibração, alteração de cores, corrosão, inclinação ou rotação;
- Controle remoto de dispositivos e maquinários.

As RSSF são formadas por pequenos rádios transceptores de comunicações sem fios autônomos, estes, por sua vez, são constituídos de processador, memória, fonte de energia e sistema de sensoriamento. As comunicações entre os transceptores podem ser feitas através de laser, infravermelho ou RF, sendo esta última, a mais comumente empregada.

A forma reduzida de cada um desses sensores proporciona o baixo custo na implementação e fácil instalação das redes RSSF. Em contrapartida, o tamanho reduzido impõe restrições de energia, armazenamento de dados, taxa de transferência, memória e processamento.

Contudo, se considerarmos que a RSSF deve possuir um alto grau de cooperação entre os nós, como em um esforço colaborativo e, também, dependendo da aplicação que irá gerenciar o sistema sem fio, o desempenho dessas redes é significativamente aumentado (RUIZ, L. B.; et. al., 2004).

Pode-se dizer que as RSSF estão inseridas no grupo de tecnologias de rede móvel *ad hoc*, sendo consideradas um tipo especial de redes MANET (*Mobile Ad hoc Networks* – MANET) (RUIZ, L. B.; et. al., 2004). As redes MANET permitem a comunicação ponto-a-ponto entre Estações Móveis sem qualquer estrutura física. Para que este processo ocorra, cada dispositivo sem fio deverá possuir um protocolo de roteamento que atuará como um roteador de múltiplos saltos, ou seja, cada dispositivo colabora um com o outro para encaminhar a informação até seu destino.

Com isso, a comunicação através de múltiplos saltos utilizado em redes MANET não depende da área de cobertura de EBs ou Pontos de Acesso (PA). Desta forma, as comunicações das RSSF são diferentes das redes sem fio utilizadas por computadores ou celulares, já que estas, estão limitadas nas áreas de cobertura

proporcionadas pelas EBs e PAs, e não operam com mecanismos de múltiplos saltos.

Uma RSSF deve possuir características para alcançar seus objetivos, que são essenciais para garantir seu desempenho e aplicabilidade, são elas:

- Os nós precisam ter a capacidade de enviar mensagens a uma EB, as quais, não necessariamente têm de ser só as suas, mas também, a de seus vizinhos por meio de saltos múltiplos;
- Cada nó terá que possuir a capacidade de analisar de forma automática, a conexão com os dispositivos adjacentes, criando assim, sua própria conectividade e distribuição, gerando uma tabela de rotas essenciais para o funcionamento da rede;
- Quando alguma alteração da topologia ocorre, seja ela por deslocamento de algum nó, avaria, ou falta de energia, os nós terão de ser capazes de se reorganizarem sem intervenção humana, restabelecendo a conectividade;
- A RSSF deverá restabelecer de forma automática quando um nó é retirado ou inserido em sua topologia, sem que toda a rede tenha de ser reconfigurada. Diante disso, ela deverá ser capaz de se adaptar às falhas ou alterações quando estas são identificadas;
- Decidir através do hardware ou aplicação de camadas superiores, as melhores rotas para o encaminhamento das mensagens, levando em consideração o número de saltos, o menor custo, ou ainda, a capacidade de bateria;
- Todos os nós devem ter a capacidade de colaboração, minimizando a limitação de armazenamento e processamento de cada um deles, poupando energia de suas baterias, evitando assim, que sejam consumidas mais rapidamente, dependendo do nível de processamento (IEEE 802.15.4, 2003).

São encontradas algumas soluções de RSSF nas relações comerciais, denominadas Motes (placa de processamento e comunicação sem fio de sensores)

(CROSSBOW, 2008) e dispositivos de RSSF que atendem o padrão IEEE 802.15.4 (XBEE-PRO[®], 2008).

3.2 Padrão IEEE 802.15.4

Em outubro de 2003, o IEEE *Wireless Standard Zone* por meio do padrão IEEE 802.15.4, definiu os protocolos de interligação de dispositivos via RF de uma Rede de Área Pessoal (*Personal Area Network* – PAN) denominada de Rede Pessoal Sem Fio de Banda-Curta (*Low-Rate Wireless Personal Area Network* - LR-WPAN).

O padrão IEEE 802.15.4 define as especificações para as camadas MAC e Física, sendo o Sensor de Portadora de Múltiplos Acessos com Prevenção de Colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - CSMA/CA) utilizado como protocolo de camada física. Com isso, as Redes LR-WPAN atenderiam implementações nas quais as topologias seriam do tipo ponto-a-ponto (*peer-to-peer*), estrela (*star*) e malha (*mesh*) (IEEE 802.15.4, 2003).

Em 2002, antes da homologação do padrão IEEE 802.15.4, houve a união de um grupo de empresas com o objetivo de desenvolver as camadas de Rede, Segurança e Aplicação para emprego na indústria e áreas residenciais. Tais aplicações poderiam ser utilizadas por dispositivos que atendessem padrão IEEE 802.15.4, surgindo assim, a Zigbee Alliance[®], em dezembro de 2004, a qual apresentou a toda comunidade científica, o padrão Zigbee (ZIGBEE[®] ALLIANCE, 2008a) (ZIGBEE[®] ALLIANCE, 2008b).

Para ilustrar o funcionamento de uma RSSF em um modelo funcional e, definir as características, topologias e funções de cada elemento presente nessa rede, será abordada nesse trabalho a definição de camadas superiores (rede, segurança e Aplicação) descritas pelo padrão Zigbee[®](ZIGBEE[®] ALLIANCE, 2008a)

Os dispositivos IEEE 802.15.4 disputam o meio para a transmissão de dados nas frequências ISM de 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz com taxa de transferência aérea de 20, 40 e 250 Kbps respectivamente, utilizando na camada

física o processo de Seqüência Direta de Espalhamento Espectral, a qual será abordada mais adiante. (*Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS*).

Visando atender a diretiva referente à economia de energia dos sensores de uma RSSF do tipo LR-WPAN, são determinadas duas funções necessárias para a atividade desses sensores, o Dispositivo de Função Completa (*Full-Function Device – FFD*) e o Dispositivo de Função Reduzida (*Reduced-Function Device - RFD*), sendo que os FFD são divididos em dois tipos, o coordenador e o roteador.

A função do FFD coordenador é de armazenar através de constantes atualizações, informações de gestão interna referentes à rede em que ele está integrado, desta forma, ele se torna responsável pela criação e manutenção da rede, e também, pode atuar como ponte interligando-se com outro coordenador. Neste sentido, o FFD roteador pode atuar como um nó normal de uma rede LR-WPAN e, além disso, atuar como um roteador de pacotes da rede, permitindo assim, a comunicação entre os outros nós da rede sem a intervenção do coordenador.

Já que o RFD não possui a capacidade de enviar grandes volumes de dados, o mesmo pode ser implementado com baixa capacidade de memória e processamento, direcionados assim, a aplicações mais simples.

Os RFD podem se associar somente a um único FFD, sendo possível sua aplicação em redes estrelas, ou ainda, como dispositivos terminais de redes malha e ponto-a-ponto. Os dispositivos FFD podem se associar a RFDs e FFDs (IEEE 802.15.4, 2003).

3.2.1 Topologia de Redes IEEE 802.15.4

As redes RSSF LR-WPAN do padrão IEEE 802.15.4, dependendo da sua aplicação, podem ser implementadas nas topologias estrela e ponto-a-ponto.

Quando na topologia estrela, os dispositivos sensores estabelecem a comunicação com um dispositivo único, denominado coordenador da PAN.

O coordenador PAN tem a função de armazenar tabelas de rotas que irão determinar o início e o término da rede WPAN. Ele pode possuir uma aplicação específica ou pode ser utilizado para iniciar, terminar ou estabelecer rotas de uma sessão de comunicação. Uma de suas principais funções é também se associar a outro coordenador PAN de uma outra rede WPAN, gerando uma estrela estendida.

Pode-se dizer que para que todo dispositivo se associe em uma rede WPAN, é necessária a utilização de um endereçamento de 64 bits. Em casos especiais, dependendo da implementação da WPAN, o coordenador PAN, pode realizar a alteração do endereçamento de 64 bits por um endereço mais curto previamente alocado.

Na descrição da topologia estrela de uma rede LR-WPAN, o nó central é um coordenador PAN do tipo FFD, o qual pode se associar a vários dispositivos RFD e FFD dentro de sua área de cobertura. Caso haja a necessidade de alcances maiores das redes na topologia estrela, o coordenador PAN deve se associar a outro coordenador PAN, estendendo assim, sua abrangência. Na Figura 3.1 podem ser observados os dois tipos de topologias LR-WPAN.

Na topologia ponto-a-ponto cada dispositivo deve se associar a outro diretamente adjacente dentro de sua área de cobertura, toda essa atividade é organizada por um coordenador PAN. Desta maneira, é possível a criação de topologias mais complexas utilizando o conceito de topologia de rede em malha.

Para a implementação das topologias de redes estrela ou ponto-a-ponto é necessário à configuração da camada de rede dos dispositivos RSSF. Esta camada não é descrita no padrão IEEE 802.15.4, já que este descreve somente a camada Física e sub-camada MAC. Utiliza-se então como parâmetro o padrão IEEE 802.2.

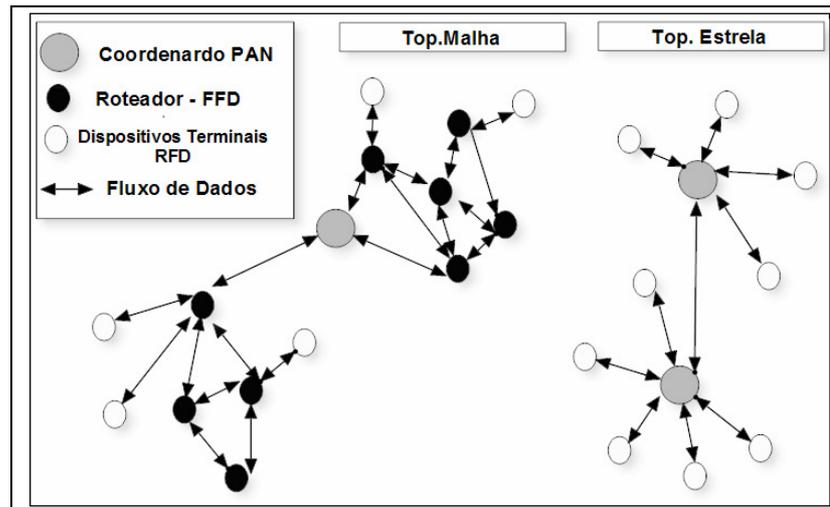


Figura 3.1 – Topologias estrela e malha de RSSF.

Conforme ilustrado na Figura 3.1, na topologia de Malha, pode-se perceber que os Dispositivos Roteadores podem se associar a outros Dispositivos Roteadores, bem como, a Dispositivos Terminais e a um Coordenador PAN. Neste tipo de topologia, um único Coordenador PAN é eleito, essa eleição ocorre utilizando parâmetros como tempo de atividade na rede e maiores recursos computacionais. Verifica-se também que os Dispositivos Terminais podem ser elementos finais da topologia, pois não possuem capacidade de saltos múltiplos ou administrar rotas.

A principal vantagem de uma rede de RSSF na topologia de malha é o aumento da área de cobertura. Porém, as principais desvantagens são: latência causada pelos diversos saltos que a mensagem precisa percorrer, maior suscetibilidade a IEM causadas por outras formas de comunicação sem fio e ameaças atmosféricas (LOUREIRO, A. A. F.; et.al, 2003).

Na topologia de estrela apresentada na Figura 3.1, pode ser observado que os Dispositivos Terminais possuem área de cobertura limitada, a qual é oferecida pelos Coordenadores PAN. Caso haja a necessidade de expandir a área de cobertura, uma nova associação com outro coordenador PAN é necessária.

No Capítulo 4 demonstrar-se-á que a topologia utilizada para os experimentos será a do tipo ponto-a-ponto, com método de comunicação unidirecional. As outras topologias mencionadas serão propostas de novas pesquisas e aplicações futuras da tecnologia de RoF em sistemas de RSSF.

3.2.2 Arquitetura do IEEE 802.15.4

A arquitetura da LR-WPAN é representada através de camadas, especificamente a camada Física (*Physical* – PHY) e a sub-camada MAC. A camada PHY define as características físicas necessárias para a implementação da tecnologia LR-WPAN, nessas definições constam o dispositivo transceptor de RF, seu mecanismo de controle de enlace e uma sub-camada MAC, permitindo acesso ao meio físico, de acordo com a Figura 3.2.

As camadas superiores à sub-camada MAC são constituídas por uma camada de rede e aplicação. A camada de rede oferece serviços de roteamento e manipulação de pacotes e a de aplicação determina qual será a função do dispositivo.

Tais camadas não são abordadas pelo padrão IEEE 802.15.14, mas sim pelo padrão IEEE 802.2, o qual, por meio de uma convergência de serviços de subcamada Controle Lógico do Enlace (*Logical Link Control* – LLC). Para a Subcamada de Convergência de Serviços Específicos (*Service Specific Convergence Sublayer* – SSCS), é realizada a interface entre o padrão IEEE 802.15.4 e o IEEE 802.2 (IEEE 802.15.4, 2003) (HOWITT, I., GUTIERREZ, J. A., 2003).

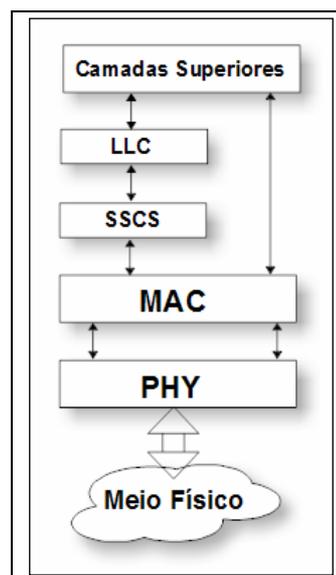


Figura 3.2 – Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4.

Camada Física

A camada PHY do padrão IEEE 802.15.4 oferece dois tipos de serviços, o Serviço de Dados da Camada Física (*PHY Data Service*) e o Serviço de Gerência da Interface e o Serviço de Gestão e Gerência da camada Física (*Physical Layer Management Entity - PLME*).

Esses serviços permitem que as funcionalidades abaixo sejam executadas na camada PHY:

- Ativação e Desativação do radio transceptor;
- Detecção de potência do sinal dentro do canal;
- Indicação da qualidade do enlace para receber pacotes;
- Avaliação de canal limpo (*Clear Channel Assessment –CCA*) para CSMA-CA;
- Seleção da Freqüência do canal;
- Transmissão e Recepção de dados.

A Tabela 3.1 mostra as freqüências de operação da camada PHY do padrão IEEE 802.15.4, a modulação, além da taxa de símbolos utilizada pela modulação e a quantidade de canais possíveis para cada freqüência. Como pode ser observado nessa tabela, quanto maior a freqüência utilizada, maior será a quantidade de canais disponíveis para a comunicação dos dispositivos de RSSF.

TABELA 3.1
Características da PHY do padrão IEEE 802.15.4.

Banda de Freqüência da Camada PHY (MHz)	Modulação	Canais	Parâmetros de transmissão de dados		
			Taxa de Transmissão Bit (kb/s)	Taxa de Transmissão – Símbolo (Ksymbol/s)	Símbolos
868-869.6	BPSK	1	20	20	Binário
902-928	BPSK	10	40	40	Binário
2400-2483.5	O-QPSK	16	250	62.5	16-ary Ortogonal

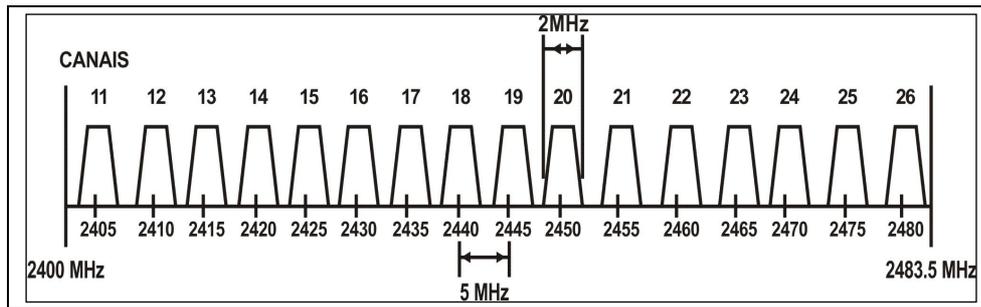


Figura 3.3 – Distribuição de canais IEEE 802.15.4.

A Figura 3.3 apresenta o gráfico da distribuição dos canais para a frequência de 2,4 GHz, utilizada nos experimentos realizados no presente estudo.

Observa-se que na frequência de 2,4 GHz serão utilizadas 16 frequências centrais (f_c) e, de acordo com o padrão IEEE 802.15.4, o espaçamento entre a f_c de cada canal é de 5 MHz e a banda passante é de 2 MHz. (IEEE 802.15.4, 2003).

Modulação de RF do padrão IEEE 802.15.4

A comunicação entre dispositivos de RSSF ocorre mediante um sinal modulado de rádio frequência. A técnica de modulação utilizada é essencial para garantir menores custos na utilização de amplificadores de RF, correções de erros de transmissão em nível de hardware ou software, menor consumo computacional e uma maior eficiência espectral, possibilitando um maior número de canais em um espectro de frequência.

Desta forma, a modulação utilizada pelo padrão IEEE 802.15.4 na frequência de 2,4 GHz é a modulação OQPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*). A modulação OQPSK é uma variante da modulação QPSK apresentada na Figura 3.4, sendo assim, faz-se necessária a compreensão do funcionamento da modulação QPSK para o entendimento da modulação OQPSK.

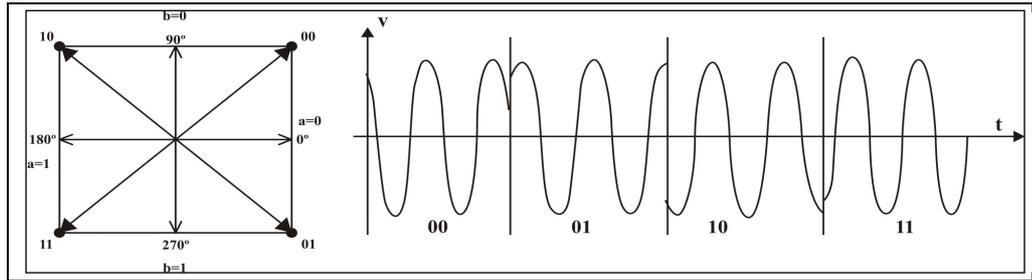


Figura 3.4 – Constelação QPSK e modulação QPSK no domínio do tempo.

Modulação QPSK

A modulação *QPSK* (*Quadrature Phase Shift Keying*) ou 4-PSK é realizada por um modulador denominado Modulador *I-Q* (o *I* indica que o sinal é formado pela componente Em Fase “*In-Phase*” e o *Q* pela componente em Quadratura com a Fase “*Q-Phase*”).

O Modulador *I-Q* tem a função de dividir o sinal binário digital em sua entrada em *I* e *Q* através de um conversor série-paralelo. O sinal enviado para entrada *I* irá modular uma portadora dando origem a um sinal Chave de Fase Reversa (*Phase Reversal Keying* – *PRK*) de 0° e 180° graus (sendo 0° a fase de referência).

Do mesmo modo, o sinal enviado para a entrada *Q* irá modular uma portadora dando origem a outro sinal *PRK*, mas, desta vez, esse sinal gerado será em 90° e 270° graus (defasado em 90°), em quadratura com o sinal gerado pela entrada *I*. Na Figura 3.4 nota-se o gráfico de constelação que representa a modulação *QPSK* e a representação do sinal no domínio do tempo.

Modulação OQPSK

A modulação *OQPSK* é uma variante da modulação *QPSK*, criada para corrigir um problema observado na modulação *QPSK*, o qual pode se agravar em baixas potências de transmissão RF.

Na modulação *QPSK*, quando há uma transição de símbolos não adjacentes, ocorre uma mudança de fase de 180° . Observa-se essa mudança pela

Figura 3.5 (a) e (b). Essa transição pode ser vista quando ocorre a passagem do símbolo 00 para o símbolo 11 ou do símbolo 10 para 01. Na Figura 3.5 (a) fica visível a mudança de fase de 180° na passagem do símbolo 01 para 10. Portanto, quando ocorre uma transição de símbolos não adjacentes, a portadora atinge uma amplitude nula (igual a 0).

A transição de 180° utilizada na modulação QPSK dá origem a alguns problemas quando utilizadas em sistemas de RF de baixas potências, como por exemplo:

- O circuito de recuperação de sincronismo (*clock*) tanto do transmissor quanto do receptor precisa lidar com as incertezas causadas pelas transições de símbolos não adjacentes;
- A trajetória de 180° para a transição de símbolos não adjacente, faz com que o sinal RF fique mais suscetível a distorções criadas pela não linearidade dos moduladores;

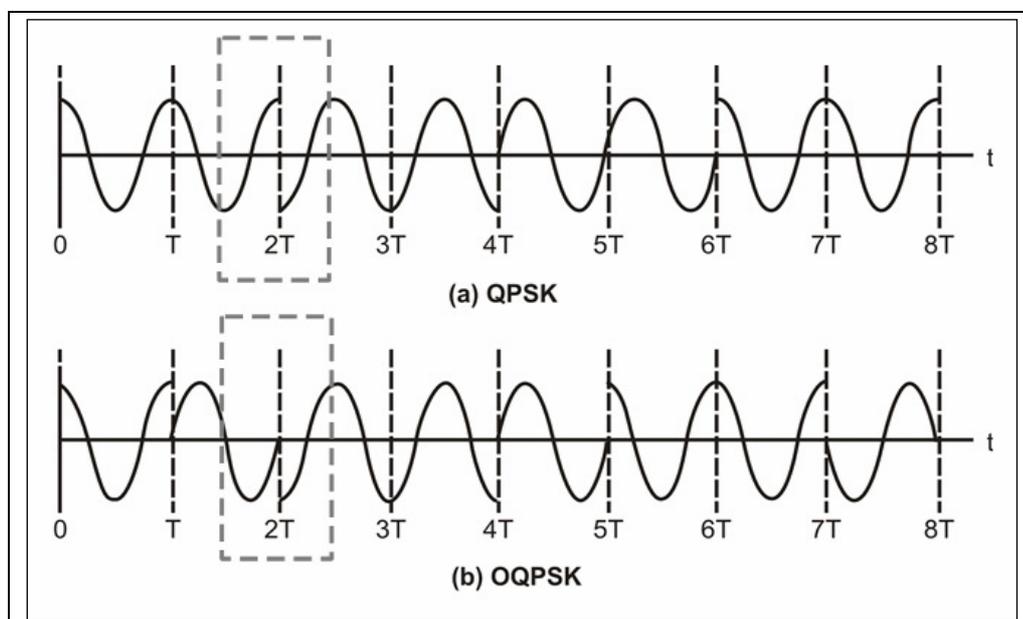


Figura 3.5 – Comparação entre a modulação QPSK e OQPSK no domínio do tempo.

- E também, mais suscetível a efeitos como ruído e IEM, os quais são mais prejudiciais em baixas potências de transmissão. (HAMANA, D. V.; PRASAD, A. P. S.; PAL, S., 2003).

Com isso, a modulação OQPSK para resolver a transição de 180° , realiza o atraso de meio símbolo no segundo dos bits que entra no registrador de deslocamento serial pela entrada Q, antes de ser aplicado a seu modulador de inversão de fase.

Este atraso de meio símbolo resulta em transições de fase de 0° ou 90° do estado da fase anterior, com isso, a modulação OQPSK não possui transições de reversão de fase completos com passagem por 0 ou amplitude nula. (GRONEMEYER, S. MCBRIDE, A, 1976).

Seqüência Direta de Espalhamento Espectral

Outra técnica utilizada para uma melhor eficiência da comunicação sem fio é a Seqüência Direta de Espalhamento Espectral (*Direct Sequence Spread-Spectrum* – DSSS), a qual consiste em uma modulação do espectro de RF utilizado na comunicação sem fio.

A técnica DSSS gera um padrão redundante de bits para cada bit transmitido, denominado código de *chip* ou simplesmente *chip*. Este padrão permite filtrar sinais que não utilizam o mesmo padrão, ruídos e interferências.

Sub-camada MAC

Conforme já mencionado, o padrão IEEE 802.15.4 define especificações da camada Enlace e PHY, a camada de enlace é dividida em duas outras sub-camadas, a LLC e MAC. A sub-camada LLC é relativa a todos os outros padrões de redes sem fio IEEE, já a sub-camada MAC está diretamente relacionada ao hardware com o qual ela irá trabalhar.

Com isso, cada dispositivo transceptor das RSSF LR-WPAN terá de possuir uma configuração e programação independente, de acordo com seu hardware (CALLAWAY, E.; et. al., 2002). Com a possibilidade de se adaptar ao dispositivo de hardware, para se estabelecer uma comunicação de RSSF LR-WPAN, o padrão IEEE 802.15.4 destaca os principais serviços da sub-camada MAC como:

- Geração de *beacons* para estabelecer o sincronismo da rede pelos dispositivos coordenadores da rede *LR-WPAN*;
- Gerenciamento e manutenção do mecanismo de Garantia de *Slots* de Tempo (*Guarantee Time Slots - GTS*);
- Utilização do protocolo *CSMA/CA* para acesso aos canais;
- Fornecer conexão confiável entre camadas MAC de dispositivos independentes;
- Suporte a segurança da rede;
- Suporte para associação e dissociação entre dispositivos LR-WPAN;
- Estabelecer interface entre a subcamada SSSS e PHY;
- Fornecer serviços a camadas superiores compatíveis com o padrão IEEE 802.2 (IEEE 802.15.4, 2003).

Diretamente relacionado com a sub-camada MAC, o protocolo de camada PHY, CSMA/CA também possui suas características definidas pelo IEEE 802.15.4. O cuidado na configuração da MAC determinará o desempenho da rede LR-WPAN, assim como, consumo de energia e computacional dos dispositivos comunicadores (PARK, T. R.; et. al., 2005)

O protocolo CSMA/CA possui um mecanismo ao qual define que um dispositivo que deseja iniciar uma transmissão, primeiramente, escuta o meio para determinar se há alguma transmissão ocorrendo no canal, se não houver nenhum outro dispositivo utilizando o canal, ele transmitirá os dados.

Caso dois dispositivos resolvam ao mesmo tempo transmitir dados, isto é, ao escutar o meio ao mesmo tempo e encontrar o canal desocupado, irá ocorrer uma colisão. Os dispositivos que estarão transmitindo os dados, não perceberão que houve a colisão por estarem no modo transmissor; os receptores, por sua vez, não conseguirão distinguir colisões de outros pacotes de erros, desta forma, os receptores dependerão de mecanismos de camadas superiores para a detecção e tratamento de erros ou pacotes corrompidos (IEEE 802.15.4, 2003) (PETROVA, M.; et. al., 2006).

3.2.3 Propostas de aplicação de RoF em LR-WPAN

O objetivo deste trabalho é a investigação experimental a partir da análise da viabilidade da aplicação do sistema de RoF em RSSF do padrão IEEE 802.15.4.

Essa investigação experimental possibilita a criação de novas aplicações e soluções de RSSF, contribuindo para a evolução de RSSF, e também, de setores que utilizam a tecnologia RSSF para o avanço de suas pesquisas. A seguir, algumas propostas da aplicação do sistema de RoF em RSSF.

Centralização do Coordenador PAN em topologia estrela

Uma das propostas da aplicação de RoF é a centralização de Coordenadores PAN. A Figura 3.6 mostra a utilização da tecnologia RoF em uma RSSF na topologia estrela. A aplicação de RoF nesta topologia permite a centralização do Coordenador PAN na EC, neste caso, a EB seria os dispositivos responsáveis pela tecnologia RoF.

Conforme descrito anteriormente, o coordenador PAN é o dispositivo que necessita de maiores recursos computacionais e uma maior capacidade energética para cumprir seus objetivos, com isso, ele é o dispositivo que possui maior custo e recursos tecnológicos. Desta maneira, sua centralização permitirá:

- Segurança física contra roubo ou ameaças atmosféricas;

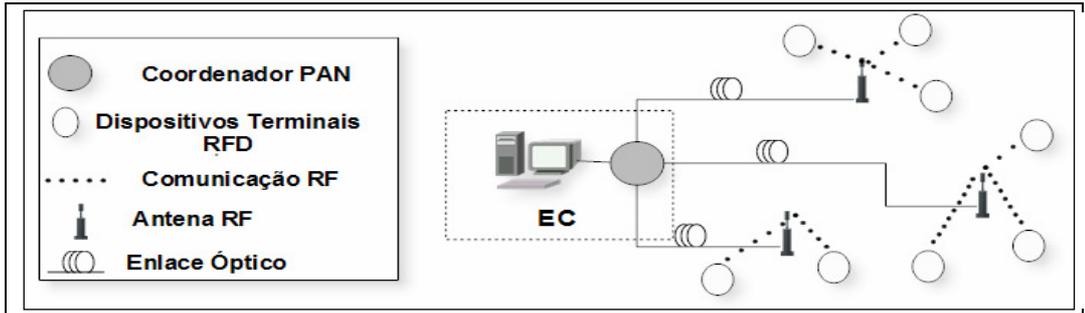


Figura 3.6 – Aplicação de RoF na topologia estrela com Coordenador PAN centralizado.

- Durabilidade da fonte de energia, já que o dispositivo poderia ser alimentado por outras fontes de energia e não somente as provenientes de baterias;
- Alcance maior da área de cobertura de um único Coordenador PAN de uma topologia estrela em relação à topologia estrela sem a aplicação de RoF;
- Garantir a integridade do sinal de RF durante o trajeto para os DTs;
- Facilidade na manutenção e substituição do coordenador PAN, já que o mesmo estará centralizado na EC;
- O sinal de RF propagaria sem sérias degradações entre o coordenador PAN e a antena;
- Menor perda e latência proporcionada pelo enlace óptico em comparação com enlaces RF;
- A soma de todas essas vantagens, ainda proporcionará a evolução dos dispositivos coordenadores PAN, já que sua capacidade computacional não estaria limitada à alimentação.

Associação de Coordenadores PAN na topologia estrela estendida

Na topologia estrela, quando há a necessidade de aumentar a área de cobertura de coordenadores PAN, ou aumentar sua capacidade computacional através de métodos colaborativos, é necessário que haja a associação entre esses dispositivos coordenadores.

A Figura 3.7 apresenta um exemplo dessa aplicação da tecnologia RoF entre coordenadores PAN de uma RSSF estrela estendida.

A aplicação da tecnologia RoF quando utilizada para essa associação, permitirá:

- A implantação de coordenadores PAN a quilômetros da EC, contribuindo para a escalabilidade da RSSF;
- Garantir a qualidade do sinal RF e a comunicação entre os coordenadores PAN, atividade essa que terá maior demanda, já que coordenadores PAN são pontos concentradores na troca de endereços, rotas e gerência;
- Menor perda e latência proporcionada pelo enlace óptico comparado com enlaces RF.

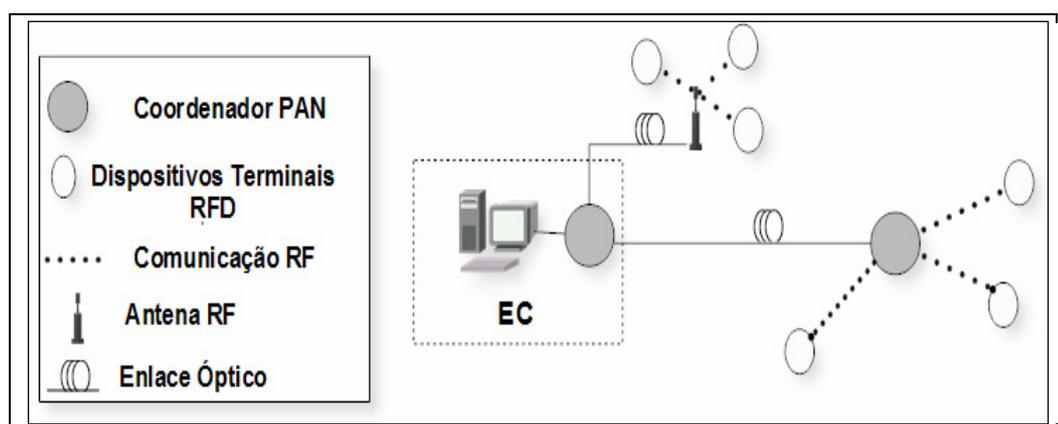


Figura 3.7 – Aplicação RoF na associação entre coordenadores PAN na topologia estrela estendida.

Centralização e associação de Coordenadores PAN com roteadores FFD em topologias de malha

Em topologias do tipo malha, o emprego da tecnologia RoF seria útil na centralização dos coordenadores PAN e na associação de dispositivos roteadores FFD. A Figura 3.8 apresenta um exemplo da aplicação da tecnologia RoF na centralização de coordenadores PAN e na associação de dispositivos roteadores FFD.

A aplicação de RoF na topologia malha permite a centralização de coordenadores PAN e associação de dispositivos roteadores, com isso, pode-se dizer que o emprego de RoF proporciona também:

- Controle sobre a área de cobertura de dispositivos RSSF, ideal para ambientes inóspitos ou situações onde IEM possa vir a prejudicar a comunicação;
- Escalabilidade, já que dispositivos roteadores podem ser levados a quilômetros de distância de outros roteadores ou do coordenador PAN;
- Garantia da qualidade do sinal de RF, pois em trechos no qual o sinal possa ser prejudicado por IEM, a aplicação de RoF seria uma solução para o problema;

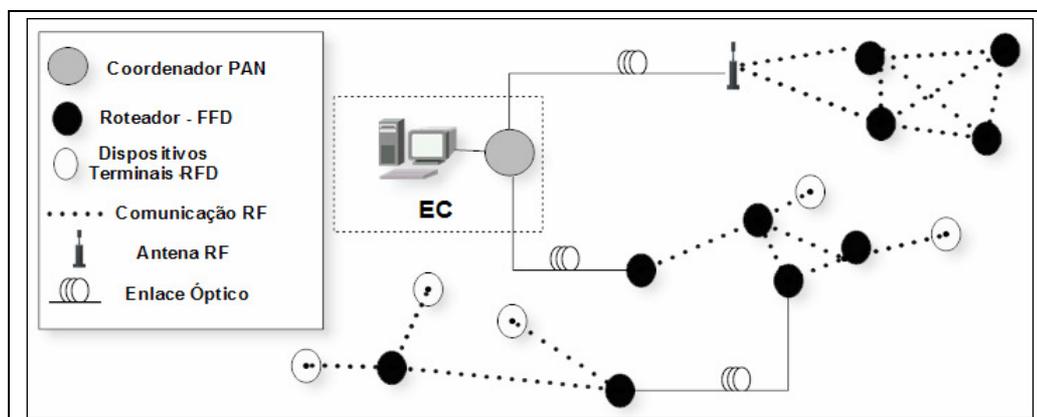


Figura 3.8 – Aplicação de RoF na topologia de malha.

- Perdas e latência características de sinal RF seriam reduzidas com o emprego de RoF;
- Integridade dos dados trafegados, garantindo segurança contra invasões, perdas ou distorções provocadas pelos inúmeros saltos entre dispositivos roteadores para o alcance de longas distâncias.

Propostas de aplicações de RSSF com aplicação da tecnologia RoF

Utilizando-se a tecnologia RoF em RSSF, novas aplicações e soluções práticas poderão ser oferecidas.

Uma das propostas apresentadas é a de aplicação em sistemas de monitoramento e controle de dutos de gás, petróleo e aquedutos. Em alguns casos, sua distância supera o limite de comunicação de sistemas de RSSF. A Figura 3.9 apresenta um exemplo da aplicação de RoF no monitoramento e controle de dutos utilizando 2 trajetos ópticos, sendo 1 para envio e outro para recebimento de dados.

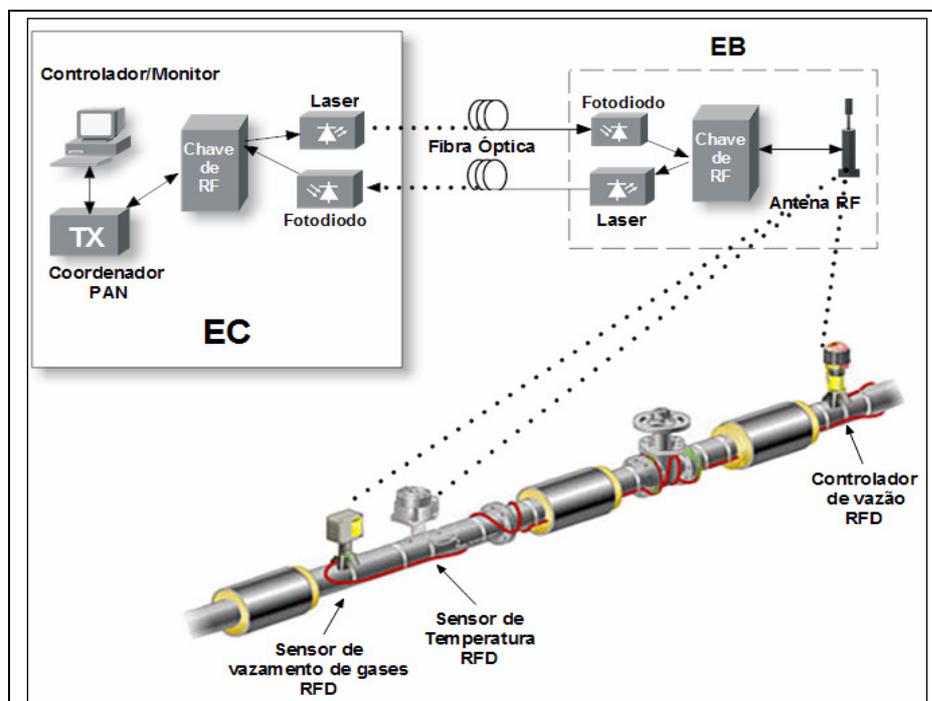


Figura 3.9 – Aplicação de RSSF com o sistema de RoF em dutos utilizando 02 trajetos ópticos.

Já a Figura 3.10 mostra a mesma aplicação, mas com o uso de um acoplador óptico. Com isso, somente seria necessário um único trajeto óptico para envio e recebimento de dados.

Observa-se que a EC permanece centralizada com a capacidade de controlar várias EB's, espalhadas, estrategicamente, por toda extensão do duto que será monitorado e controlado e, através de uma comunicação bidirecional a EC pode não só monitorar os sensores como também controlá-los remotamente, entretanto, para essa comunicação bidirecional é necessária a utilização de uma chave de RF e uma MAC projetada para essa função.

A chave de RF terá a função de selecionar o momento de envio ou recebimento de dados do TX ou da Antena, evitando assim colisões no sistema RoF. A MAC terá a função de gerenciar as características de atraso gerado pela propagação do sinal de RF pelo enlace óptico. Estudos já estão sendo realizados com propostas de MAC para o padrão IEEE 802.11 e 802.16 utilizando o sistema RoF (DANG, B. L.; PRASAD, V. R.; NIEMEGEERS, I, 2006).

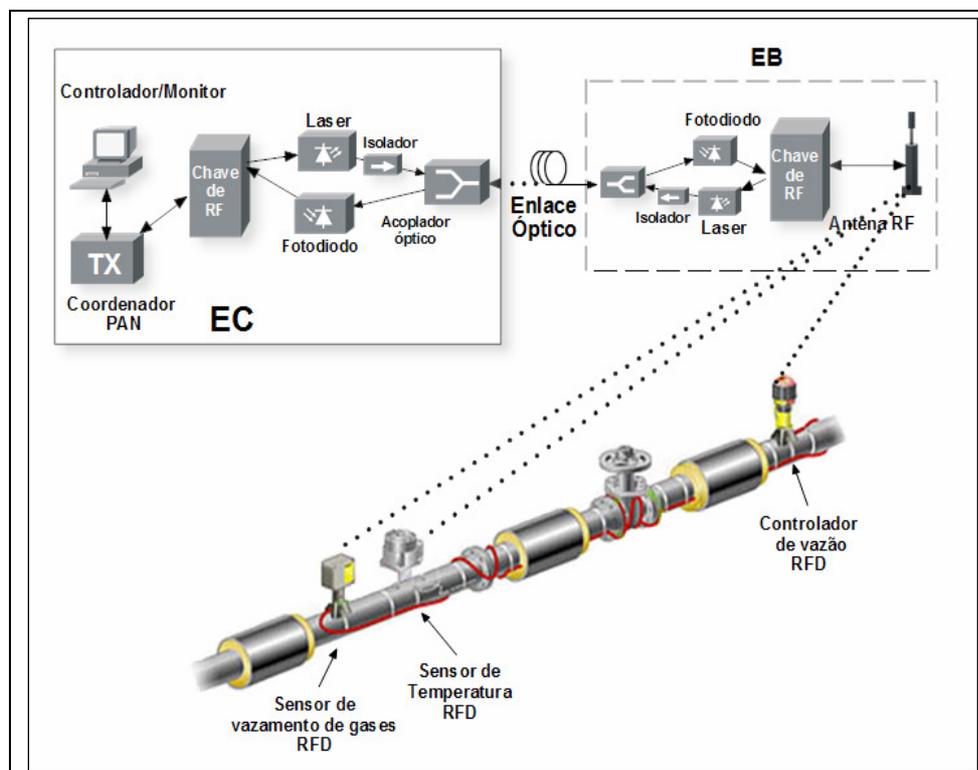


Figura 3.10 – Aplicação de RSSF com o sistema de RoF em dutos utilizando 01 trajeto óptico.

Com isso, é possível que a instalação de EB com custo reduzido, garantindo a qualidade do sinal durante o trajeto óptico, permitindo a proteção contra descargas atmosféricas e reduzindo o risco de defeitos, já que a EB somente seria composta por dispositivos de conversão e antena.

As RSSF com RoF também poderão ser empregadas em fazendas no monitoramento de dados de temperatura e umidade atmosférica, coloração de plantações e auxílio na criação de animais, além de serem empregadas em sistemas de transportes, como por exemplo, em rodovias e aeroportos. A Figura 3.11 apresenta um exemplo do emprego de RSSF com o sistema de RoF em rodovias.

Observa-se na Figura 3.11 que a EC poderia controlar várias antenas que estariam associadas a um único coordenador PAN. Alguns serviços poderiam ser oferecidos com a combinação de RSSF e RoF, como rastreamento de veículos, monitoramento de tráfego, alertas de acidentes e congestionamento e avisos de texto para motoristas.

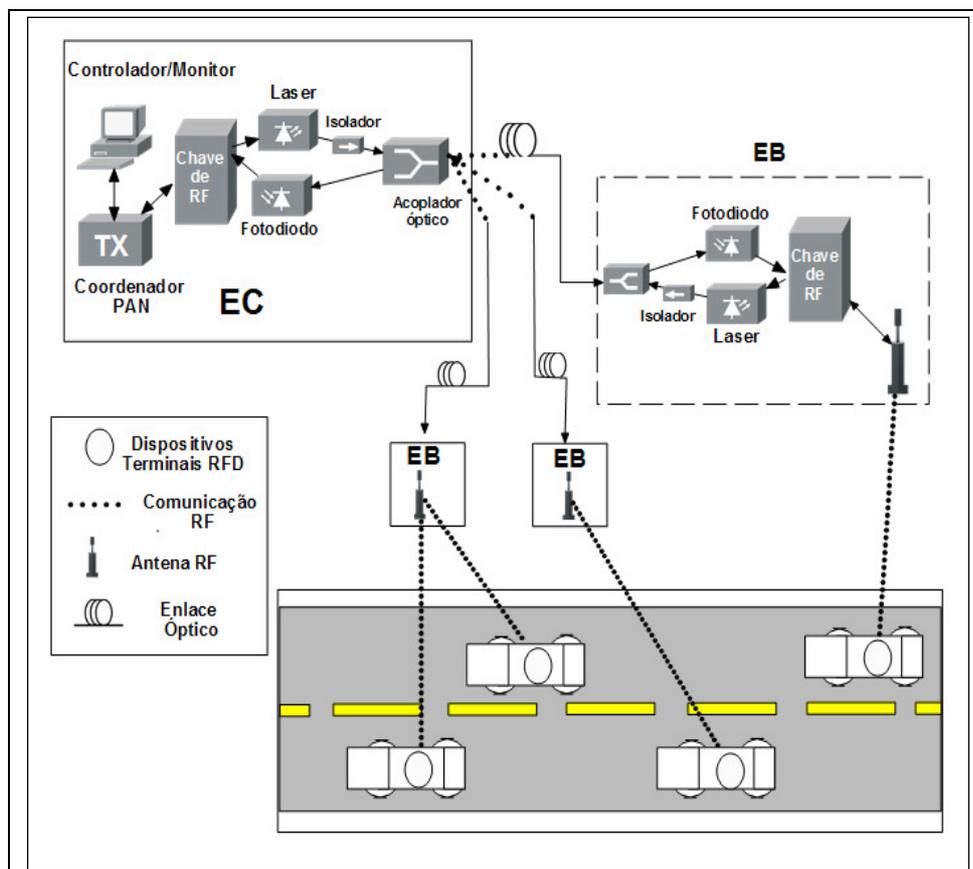


Figura 3.11 – Aplicação de RSSF com o sistema de RoF em rodovias.

Uma proposta apresentada em (AHMED, M.; et. al., 2007) sugere o emprego de RSSF IEEE 802.15.4 em rodovias utilizando a característica de múltiplos saltos para inter-comunicação entre os veículos, permitindo que a área de cobertura não fique limitada somente à da antena.

É possível também, com RoF, algumas soluções estratégicas de instalação de RSSF, como por exemplo, a substituição da propagação aérea em óptica, no caso de ambientes inóspitos ou com alto índices de ruído, ou ainda, em locais onde a utilização de sensores intermediários permite saltos e não a função final de monitoramento.

Nestes casos a aplicação de RoF em RSSF evitará o custo da implantação, manutenção e gerência de EB's, permitindo a gerência centralizada, aumentando a segurança dos dados durante a propagação, e também, garantindo a entrega dos dados, além da notável proteção contra IEM e efeitos eletromagnéticos atmosféricos.

3.2.4 Métricas de RSSF no padrão IEEE 802.15.4 com aplicação de RoF

O capítulo 2, que aborda o sistema de RoF, descreve como forma ideal o comportamento “transparente” da aplicação de RoF em qualquer tecnologia de comunicação sem fio. Esse comportamento transparente se deve ao fato de que os efeitos gerados pelos dispositivos de conversão eletrônico-óptico, fibra óptica e conversor óptico-eletrônico são mínimos nas frequências de 2,4 GHz com taxa de transmissão de dados de 250 kbps.

Com isso, a definição de parâmetros de medida de RSSF com aplicação de RoF terá como parâmetro as métricas utilizadas no domínio de RF. É necessária a atenção aos efeitos de perda gerada pelo enlace óptico, e dispositivos de geração do sinal óptico, amplificação e foto-detecção óptica, e também, ao efeito de desvanecimento, causado pela dispersão cromática da fibra. Conforme já tratado no Capítulo 2, alguns estudos já estão sendo realizados para minimizar e eliminar o efeito de Desvanecimento em frequências acima de 26 GHz, podendo ser aplicado em frequências de 2,4GHz (ABBADÉ, M. L. F.; et. al, 2008).

Formas de realizar métricas em tecnologias que utilizam o padrão IEEE 802.15.4 são descritas por Marina Petrova et. al. em “*Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations*” de Abril de 2006, por meio de experimentos *indoor* a *outdoor*, utilizando a análise do meio físico e banda espectral e sua coexistência com tecnologias da mesma frequência, e o desempenho da sub-camada MAC com comparações métricas, utilizando a checagem de Taxa de Erros de Bit (*Bit Error Rate* – BER) e Taxa de Erros de Quadros (*Frame Error Rate* – FER).

No trabalho realizado por Bougard, B. Catthoor, F. et all. em “*Energy efficiency of the IEEE 802.15.4 standard in dense wireless microsensor networks: modeling and improvement perspectives*” publicado em março de 2005, apresenta formas de investigar a relação entre o uso de sensores industriais e o padrão IEEE 802.15.4, assim como, seu consumo de energia pelos dispositivos de RSSF.

As métricas utilizadas para identificar a viabilidade da aplicação de RoF em RSSF empregadas nesta dissertação foram as de investigação da FER em diversas situações de transmissão e análise espectral do sinal de RF e óptico, bem como, as potências de transmissão e recepção RF e a Relação Sinal Ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) destas potências.

3.3 – Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi apresentar a tecnologia de RSSF LR-WPAN IEEE 802.15.4 e como seria a combinação de RSSF com o sistema de RoF. Neste capítulo, também foram propostos aplicações e serviços utilizando essa combinação, assim como formas de realizar medição de desempenho de RSSF com emprego da tecnologia RoF.

As medições realizadas neste trabalho serão apresentadas no próximo capítulo, assim como os resultados referente á viabilidade da combinação de RSSF com a tecnologia RoF.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

Os experimentos descritos no presente capítulo têm o objetivo de testar e avaliar a viabilidade e desempenho de um sistema de RSSF no padrão IEEE 802.15.4, utilizando-se da aplicação do Sistema de RoF.

Para a realização dos experimentos, a rede KyaTera foi utilizada como meio de propagação óptica. A rede KyaTera está vinculada ao programa TIDIA (Tecnologia da Informação no Desenvolvimento da Internet Avançada) e é um projeto de financiamento da Fundação de Amparo a Pesquisas do Estado de São Paulo (FAPESP), criado para a realização de pesquisas colaborativas no desenvolvimento e testes de novas tecnologias de comunicação, por meio de redes e backbones ópticos que interligam laboratórios de diversas áreas de estudos (KYATERA, 2008).

A organização deste capítulo divide-se da seguinte maneira. Na Seção 4.1 serão descritos os ambientes experimentais utilizados, assim como, os elementos experimentais comuns aos ambientes. Na Seção 4.2 realizar-se-á uma análise da RSSF no padrão IEEE 802.15.4 sem aplicação de RoF; na Seção 4.3 uma análise dos espectros de RF e Óptico no sistema RoF. Na Seção 4.4 analisar-se-á a FER e a relação com a potência óptica, na Seção 4.5, as implicações da alteração de tamanho do quadro e tempo de geração de quadros na FER, utilizando como parâmetros os dados da Seção 4.4. A Seção 4.6 demonstrar-se-á a propagação óptica com amplificação óptica e, por fim, na Seção 4.7, um estudo da propagação óptica e aérea com amplificação óptica.

4.1 Descrição do Ambiente Experimental Padrão

Utilizaram-se dois ambientes para a realização dos experimentos apresentados neste trabalho.

No primeiro ambiente experimental padrão empregaram-se experimentos somente de transmissão de RSSF, sem o uso do sistema de RoF, assim, os

resultados obtidos serão utilizados como referências para os experimentos com a aplicação do sistema de RoF.

O segundo ambiente experimental padrão foi utilizado com objetivo de combinar RSSF e o sistema de RoF. Os resultados obtidos com esses experimentos serão comparados com os resultados obtidos no primeiro ambiente experimental e, com isso, avaliar-se-á a viabilidade do emprego do sistema de RoF em RSSF.

4.1.1 Ambiente Experimental sem Aplicação de RoF

O primeiro ambiente experimental, no qual a montagem é apresentada pela Figura 4.1, não teve o emprego da tecnologia de RoF e realizou-se no Laboratório de Pesquisa em Sistemas de Rádio – LP-Sira da PUCCAMP.

O microcomputador Controlador do Transmissor (CTX), por meio de uma conexão serial com o Transmissor (TX), permitiu a aplicação configurações de parâmetros no TX, para que o mesmo iniciasse a transmissão de dados, tais parâmetros foram os de potência do sinal de RF em dBm, tamanho do *payload* de cada quadro em Bytes, o tempo de geração de quadros em milissegundos, quantidade de quadros enviados e a quantidade de vezes que o teste repetiria.

Em seqüência ao CTX, o elemento TX de RSSF fabricado pela Freescale® modelo MC 13211, com objetivo de atender o padrão IEEE 802.15.4, teve a função de transmitir os dados configurados pelo CTX, utilizando modulação *Offset Quadrature Phase Shift Keying* (OQPSK), operando na faixa *Industrial, Scientific, Medical* (ISM), na freqüência de 2,4 GHz, com taxa de transferência de 250 Kbps e com a potência do sinal RF de saída de 3dBm (FREESCALE®, 2008).

O TX conectou-se através de um cabo coaxial com uma Antena (ANT1) direcional de 12 dBi com ângulo de abertura de 58 graus. A ANT1 direcionou-se para a Antena (ANT2) Omni de 2 dBi, a fim de permitir a comunicação pelo sinal de RF. A ANT2 estava conectada diretamente ao Receptor (RX) (AQUÁRIO®, 2008.).

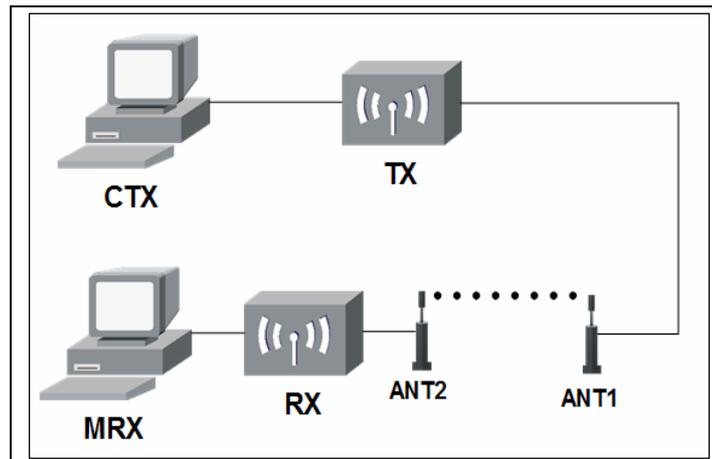


Figura 4.1 – Primeiro ambiente experimental padrão (sem o emprego de RoF).

O elemento RX consistia em um Receptor de RSSF da marca Freescale[®] atendendo o padrão IEEE 802.15.4, responsável por receber os dados transmitidos pelo TX, que também utiliza modulação OQPSK, operando na faixa ISM, na frequência de 2,4 GHz e com sensibilidade de recepção de -95 dBm (FREESCALE[®], 2008).

O elemento Monitor do Receptor (MRX), por uma conexão serial do padrão RS-232, teve a responsabilidade de coletar os quadros recebidos do TX. Esses quadros deram origem aos dados necessários para avaliar a Taxa de Erros de Quadros (*Frame Error Rate* – FER).

4.1.2 Ambiente Experimental com Aplicação de RoF

O segundo ambiente experimental padrão descreve a topologia utilizada nos experimentos nos quais foram empregados o sistema de RoF. Esses experimentos foram realizados nos Laboratório de Fotônica – LF, Laboratório de Pesquisas em Sistemas de Rádio – LP-Sira e de Meios de Transmissão - LMT da Pontifícia Universidade Católica de Campinas – PUCCAMP.

Como meio de propagação óptica, foram utilizados enlaces de fibra óptica da rede KyaTera que interligam o LF da PUCCAMP, com o Centro de Computação

da Universidade Estadual de Campinas (CCUEC - UNICAMP) e o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD). O Apêndice A - Diagrama da Rede KyaTera, apresenta os enlaces ópticos da rede KyaTera utilizados para os experimentos (KYATERA, 2008)

A Figura 4.2 apresenta o esquema do segundo ambiente experimental padrão utilizado nos experimentos com o sistema de RoF. Os elementos CTX, TX, ANT1, ANT2, RX e MRX foram os mesmos utilizados no primeiro ambiente experimental descrito na Seção 4.1.1.

O elemento CTX através de uma conexão serial teve a função de possibilitar a configuração de parâmetros necessários para a transmissão de dados pelo TX, à saída de RF do TX, por uma conexão coaxial, a qual foi conectada a entrada do laser.

O sinal de RF gerado pelo TX foi fonte de modulação direta de um laser DFB (Distributed Feed-Back laser diode - DFB), responsável por modular uma portadora óptica de 1551,73 nm. A escolha da forma de modulação direta teve como principal fator o custo em relação à modulação externa (MIKROULIS, A. et. al., 2006) (RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N, 2002.).

Diretamente conectado à saída do laser, instalou-se um Medidor de Potência Óptica (MP1), cuja função era registrar a potência óptica logo na saída do laser, e durante todo experimento, a potência óptica capturada de saída do laser pelo MP1 apresentou constantes 6,4 dBm

O MP1 ofereceu conexão direta com o enlace óptico de fibra monomodo SMF da rede KyaTera, pois, o comprimento do enlace óptico foi variado de 10 até 100 km, utilizando as redes que conectavam o LF – PUCCAMP com o CCUEC – UNICAMP e o CCUEC com o CPQD.

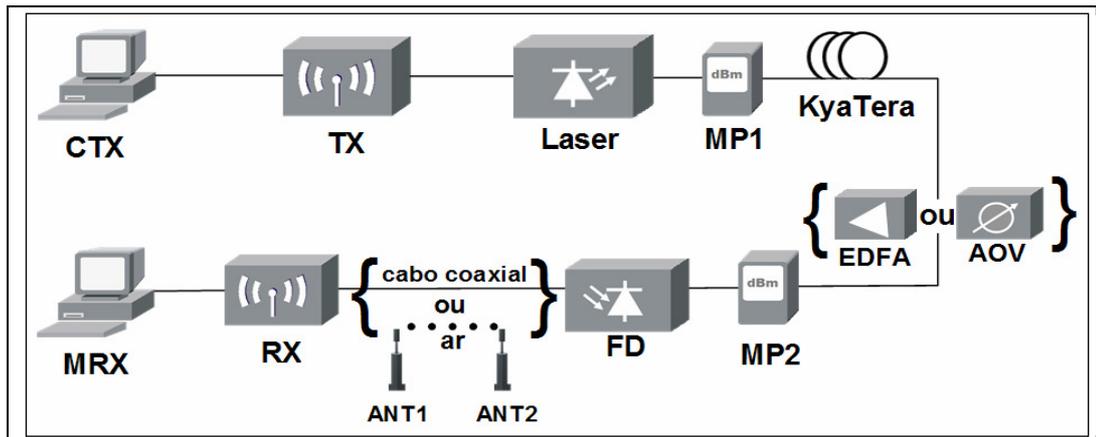


Figura 4.2 – Segundo ambiente Experimental Padrão (com emprego de RoF).

Após percorrer os enlaces ópticos oferecidos pela rede KyaTera, o sinal óptico retornava para o LF – PUCCAM e diretamente conectado ao retorno do enlace óptico da rede KyaTera, assim, este sinal óptico era recebido por um Atenuador Óptico Variável (AOV) ou um Amplificador óptico com Fibra Dopada com Érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier* - EDFA). A escolha da utilização do AOV ou EDFA no segundo ambiente experimental deu-se de acordo com o objetivo do experimento executado.

Em seguida ao AOV ou EDFA um enlace óptico de 30m foi utilizado para conectar o LF com o LMT ou com o LP-Sira. Este enlace de 30m e a mudança de laboratórios foram utilizados para evitar irradiações provenientes do Transmissor. Após o enlace de 30m, instalou-se um Medidor de Potência (MP2) que teve a responsabilidade de registrar a potência óptica antes da entrada do Fotodiodo (FD).

O elemento FD representa um Fotodiodo PIN, cuja função era de converter o sinal óptico para o domínio elétrico e entregar esse sinal ao RX por uma conexão utilizando um cabo coaxial ou uma antena Setorial de 58o de 12 dBi (ANT1) e uma antena Omni direcional de 2 dBi (ANT2). A escolha da utilização das antenas ou do cabo coaxial deu-se de acordo com o objetivo do experimento executado.

Conectado serialmente ao RX, o MRX tinha a responsabilidade de coletar através de conexão remota serial, os quadros recebidos do transmissor. Esses quadros deram origem aos dados necessários para avaliar a FER.

4.1.3 Elementos Experimentais Comuns aos Dois Ambientes

Alguns elementos experimentais foram comuns aos dois ambientes, os quais permitiram a comparação entre os resultados e a definição da viabilidade da aplicação de RoF em RSSF.

A conexão entre o CTX e o RX realizou-se, serialmente, através do padrão RS-232, que permitiu a configuração de parâmetros necessários para que o TX iniciasse a transmissão de dados. Esses parâmetros configuraram-se no Sistema Operacional aplicado firmware do TX.

Os parâmetros configuráveis no TX eram os de potência do sinal de RF, tamanho do *payload* de cada quadro, o tempo de geração de quadros em milissegundos, quantidade de quadros enviados e a quantidade de vezes que o teste seria repetido.

Para o parâmetro de potência de sinal RF selecionou-se a potência máxima de transmissão alcançada pelo hardware utilizado: 3 dBm, já para o tamanho de *payload*, de cada quadro, configurou-se os tamanhos variados de 25 a 125 Bytes. O tamanho total dos quadros enviados foi obtido com a soma do *payload* e do cabeçalho de 6 Bytes, sendo assim, os quadros com *payload* de 125 Bytes tiveram tamanho total de 131 Bytes observando as recomendações do padrão IEEE 802.15.4. O *payload* dos quadros eram compostos por seqüências de caracteres da tabela ASCII.

O tempo de geração entre quadros teve como configuração mínima 50 milissegundos, devido a limitações da conexão serial oferecida pelo TX e RX para a coleta de dados (FREESCALE®, 2008)

Durante os testes enviaram-se seções de 10.000 quadros, a quantidade de 10.000 quadros estabeleceu-se após a realização de pré-testes de 100.000 até 5.000 quadros. Desta forma, verificou-se que a FER se mantinha praticamente igual em qualquer valor acima de 5.000 quadros. Os parâmetros utilizados no primeiro e segundo ambiente experimental estão descritos na Tabela 4.1.

TABELA 4.1
Valores dos parâmetros do primeiro e segundo ambiente experimental.

Descrição	Valores	
	1º Ambiente Exp.	2º Ambiente Exp.
Potência de saída do TX	3 dBm	3 dBm
Quantidade de quadros por medida	10000	10000
Tamanho do <i>payload</i>	125 Bytes	de 25 á 125 Bytes
Tamanho do cabeçalho do quadro	6 Bytes	6 Bytes
Intervalo de tempo entre quadros	50 ms	50 á 150 ms
Comprimento de onda (laser)	--	1551,73 nm
Potência de saída do laser pelo MP1	--	6,4 dBm
Comprimento Rede KyaTera	--	de 10 á 100 km
Comprimento Rede óptica LF,LMT ou LP-Sira	--	30 m

4.2 Análise da RSSF sem Aplicação de RoF

A análise da RSSF no padrão IEEE 802.15.4 objetivou avaliar a FER, potência de sinal RF e a SNR do sinal de RF, utilizando propagação aérea sem a aplicação de enlace óptico. Desta maneira, os resultados obtidos, a partir deste experimento, utilizar-se-ão na comparação com os resultados obtidos com os experimentos no sistema de RoF.

Conforme tratado na Seção 2.2.2, o sistema de RoF foi considerado como uma Caixa-Preta, onde as principais métricas utilizadas foram feitas no domínio de RF. Entre as métricas no domínio de RF destacam-se a FER, a análise de espectro de RF, a captura da potência do sinal e ruído de RF, obtendo assim, a SNR.

Em todo experimento, para a medição da FER utilizou-se a Equação 4.1, na qual Q_{IN} é representado pelos quadros enviados e, Q_{OUT} pelos quadros recebidos.

$$FER = \frac{Q_{IN} - Q_{OUT}}{Q_{IN}} \quad (4.1)$$

A FER medida nos experimentos foi comparada com o teste ponto-a-ponto de transmissão entre os dispositivos TX e RX, sem a utilização de RoF.

O teste ponto-a-ponto de transmissão entre o TX e o RX sem RoF, utilizou o primeiro ambiente experimental padrão descrito na seção 4.1.1 e apresentado pela Figura 4.1, na qual foram utilizadas 2 antenas, sendo a ANT1 uma antena setorial de

conectada por um cabo coaxial na saída RF do TX e a ANT2 uma antena Omni direcional de 2 dBi conectada diretamente no RX.

A distância de propagação aérea entre as ANT1 e ANT2 variou-se de 0 a 54 metros e, as configurações aplicadas, foram os parâmetros descritos na Tabela 4.1, embora se utilizou o tamanho máximo de *payload* de 125 Bytes. Os dados coletados pelo MRX geraram o gráfico apresentado pela Figura 4.3.

No gráfico da Figura 4.3, a FER inicia com a distância 0, esse valor foi obtido através de uma ligação direta utilizando um cabo coaxial entre o TX e RX, já os valores superiores a 2 metros, resultaram-se a partir da utilização as antenas ANT1 e ANT2 para propagação aérea.

Também no gráfico da Figura 4.3 observa-se que a FER se mantém instável na relação entre os pontos medidos. Para os experimentos realizados neste trabalho, considerou-se como FER aceitável na ordem de 10^{-3} , isto é, uma FER por volta de 0,1%.

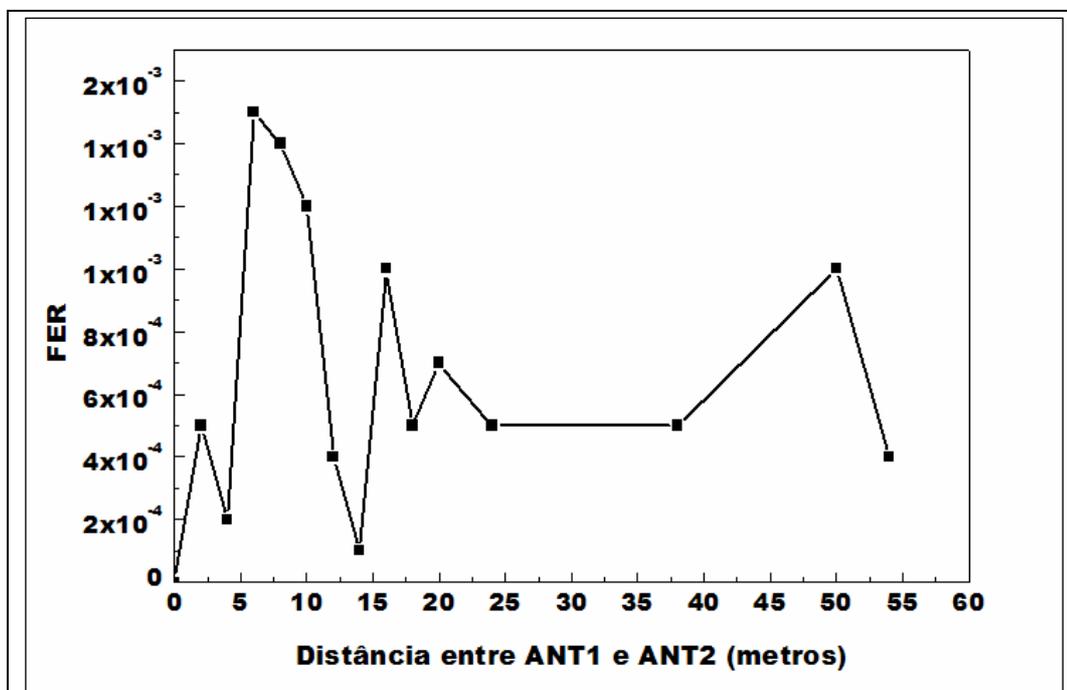


Figura 4.3 – Gráfico da FER com relação à distância entre ANT1 e ANT2.

Para a captura dos espectros de RF, utilizou-se um analisador de espectro RF conectado diretamente na saída de RF do TX. Registraram-se as potências do sinal e ruído de RF, utilizando-se a função de Medidor de Potência RF do analisador de espectro. Com os valores de potência de ruído e sinal de RF obteve-se a SNR com o uso da Equação 4.2, na qual P_S representa a potência do sinal de RF e P_R representa a potência do ruído.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_R} \right) \quad (4.2)$$

A SNR obtida no teste ponto-a-ponto com o primeiro ambiente experimental padrão está apresentada na Figura 4.4. O ponto na qual a FER é 0, a 0 metro de distância, resultou-se de uma conexão direta na saída do TX para medir a potência do sinal e ruído de RF. Nota-se que a instabilidade da FER está diretamente relacionada com a SNR, e que a SNR está também relacionada com a distância entre ANT1 e ANT2 apresentada na Figura 4.3. Os dados que deram origem aos gráficos apresentados podem ser consultados em: Apêndice B – Tabela B1 - Dados da Análise de RSSF sem Aplicação de RoF

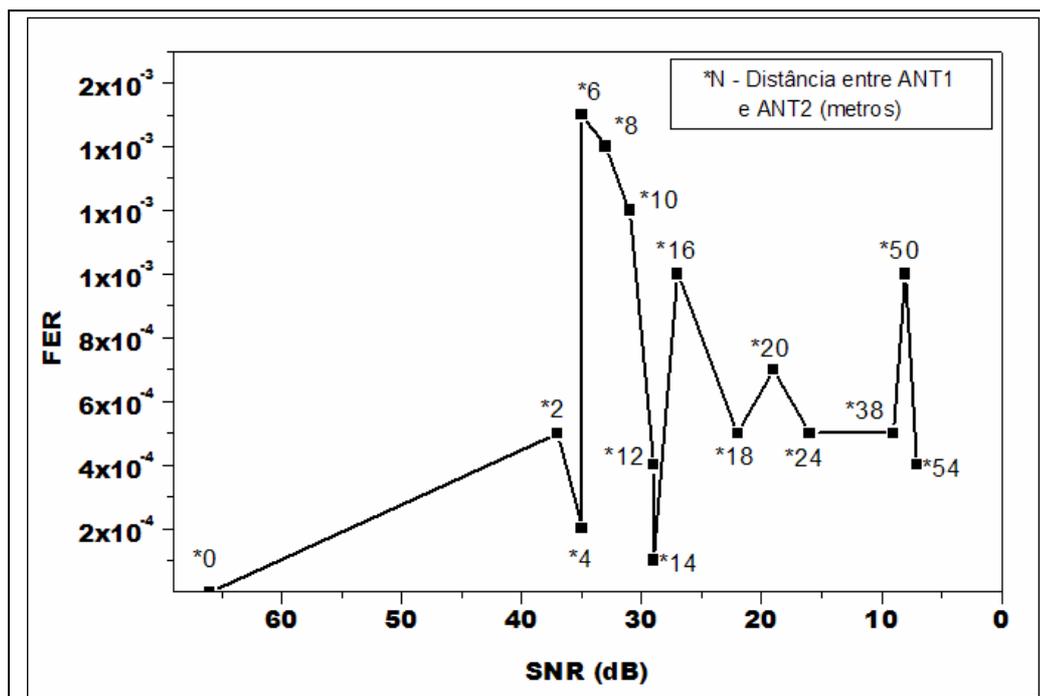


Figura 4.4 – FER relacionada com SNR – Teste ponto-a-ponto.

4.3 Análise dos Espectros de RF e Óptico no Sistema RoF

A análise dos espectros de RF e Óptico no sistema RoF realizou-se com a captura dos espectros de RF na geração do sinal pelo TX e após a conversão óptico eletrônica e, a captura dos espectro ópticos foram feitas após a modulação e antes do fotodiodo. Através da comparação dos espectros capturados foi possível analisar a degradação do sinal de RF e Óptico após sua propagação pelo enlace óptico.

Para essa análise utilizou-se o segundo ambiente experimental padrão com o AOV, de acordo com a Figura 4.5. Foram utilizadas 20 km da rede KyaTera que consistia em 2 enlaces de ida do LF – PUCCAMP até o CCUEC e 2 enlaces de volta do CCUEC - UNICAMP até o LF –PUCCAMP. Na Tabela 4.2 pode-se notar a descrição dos parâmetros e indicadores utilizados no experimento.

Com o objetivo de emular maiores distâncias de propagação do sinal óptico utilizou-se um AOV, o qual permitiu atenuar de 0 a 19 dB a potência do sinal óptico e se encontrava no LF. Desta forma, realizando a conexão da saída do AOV com o restante da topologia, utilizou-se um enlace óptico de 30 m entre o LF e o LMT, com o objetivo de evitar irradiações entre o TX e o RX.

Como primeira análise, o espectro de RF foi medido através de uma conexão direta entre a saída do TX e um analisador de espectro RF. O gráfico desse espectro está apresentado na Figura 4.6, na qual é possível observar uma Potência de Pico – PP_{RF} de -5dbm na frequência $f_{RF} = 2,48$ GHz (frequência utilizada no padrão IEEE 802.15.4).

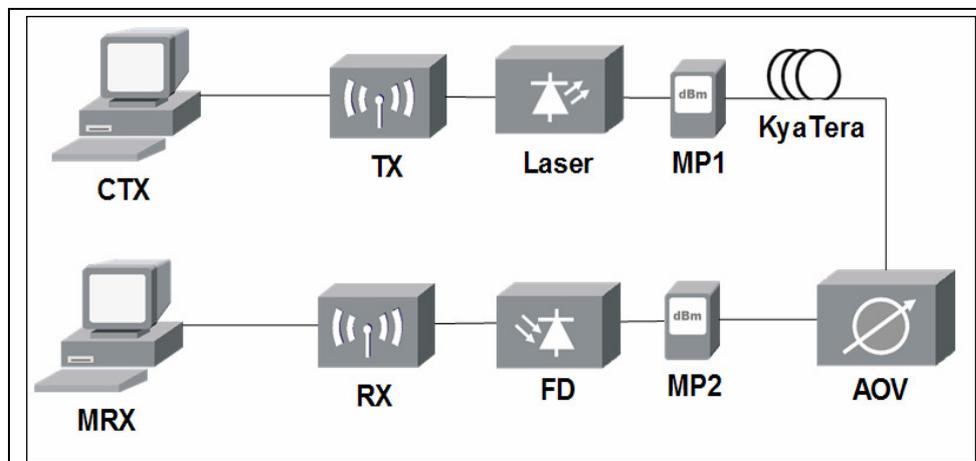


Figura. 4.5 – Segundo Ambiente Experimental Padrão com AOV- Análise dos limites da FER e relação com a Potência Óptica.

TABELA 4.2
Valores dos parâmetros de análise dos espectros de RF e óptico no sistema RoF.

Descrição	Valor
Potência de saída do TX	3 dBm
Quantidade de quadros por medida	10000
Tamanho do <i>payload</i>	125 Bytes
Tamanho do cabeçalho do quadro	6 Bytes
Intervalo de tempo entre quadros	50 ms
Comprimento de onda (laser)	1551,73 nm
Potência de saída do laser	6,4 dBm
Comprimento do enlace óptico na Rede KyaTera	20 km
Comprimento do enlace óptico entre LF e LMT	30 m
Resolução das medidas espectrais de RF	30 kHz
Variação do AOV	0 á 19 dB

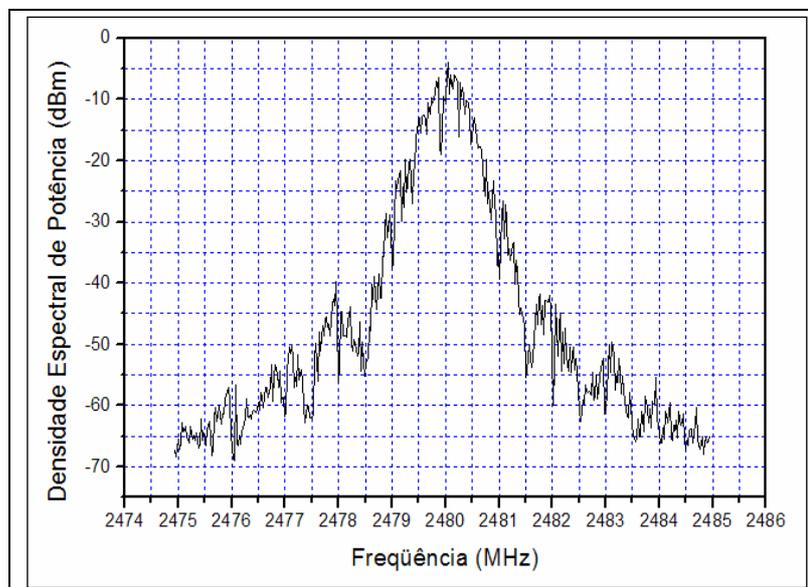


Figura 4.6 – Espectro de RF capturado na saída do TX.

O espectro do sinal após a modulação do sinal de RF para o domínio óptico e a propagação pela rede KyaTera está ilustrado na Figura 4.7, nota-se o sinal centrado em $\lambda_C = 1551,73$ nm, com uma razão sinal-ruído óptica de ~ 45 dB. Por se tratar de um sistema de RoF, também é esperado duas bandas laterais ao redor da frequência da portadora, f_C , em $f_C \pm f_{RF}$, ($f_C = c/\lambda_C$), conforme a Figura 4.8, obtida por uma simulação de RoF (LIN, C, 2006). No entanto, no estudo do caso apresentado, isso não foi possível de ser observado porque $f_{RF} = 2,48$ GHz e a melhor resolução do analisador de espectro utilizado é de 0,1 nm (ou 12,5 GHz).

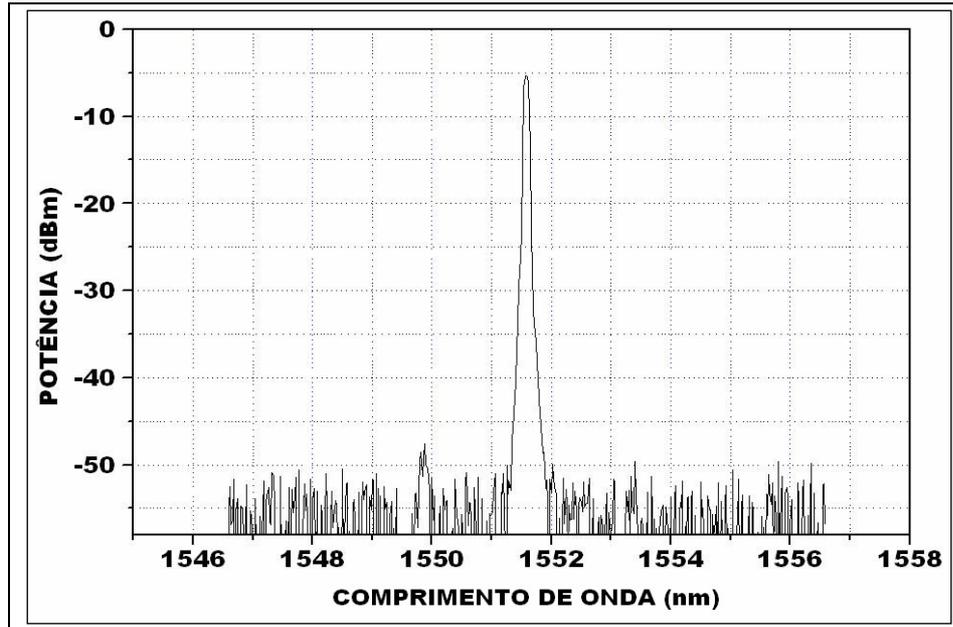


Figura 4.7 - Sinal óptico de RF após AOV, potência de -6,8dBm.

A Figura 4.9 mostra os espectros capturados após o FD, nas potências ópticas de -6,8 (Figura 4a), -23,8 (Figura 4b) e -25,4 dBm (Figura 4c). Em comparação com a Figura 4.9, com as PP_{RF} em -72, -94 e -100 dBm para respectivamente -6,8, -23,8, -25,4 dBm medidos no MP2. Observou-se que o ruído nas três situações manteve-se com uma PP_{RF} constante de -114 dBm.

Observou-se também que a perda gerada pela propagação óptica foi de 13,2 dB, considerando a potência óptica de entrada de 6,4 dBm e a potência óptica de saída de -6,8 dBm. Esse valor é composto da perda gerada por 20 km de fibra, que foi de 6 dB (considerando 0,3 dB p/km), somados a 7,2 dB referentes as perdas impostas por conexões, emendas e perdas por inserção, geradas pelos medidores de potência e AOV.

Observa-se que o ruído se mantém praticamente igual durante todas as atenuações experimentadas, ou seja, independe das características da transmissão ópticas do sinal.

Com a perda de 13,2 dB, gerada pela propagação óptica, o esperado é de 26,4 dB para o sinal de RF, em que é apenas adquirida pela propagação pela fibra óptica, mas que considerando a PP_{RF} de -5 dBm, apresentada pela Figura 4.6 e a PP_{RF} de -72 dBm, pela Figura 4.9, (a) coletadas na saída do FD, a perda para o sinal de RF seria de 67 dB.

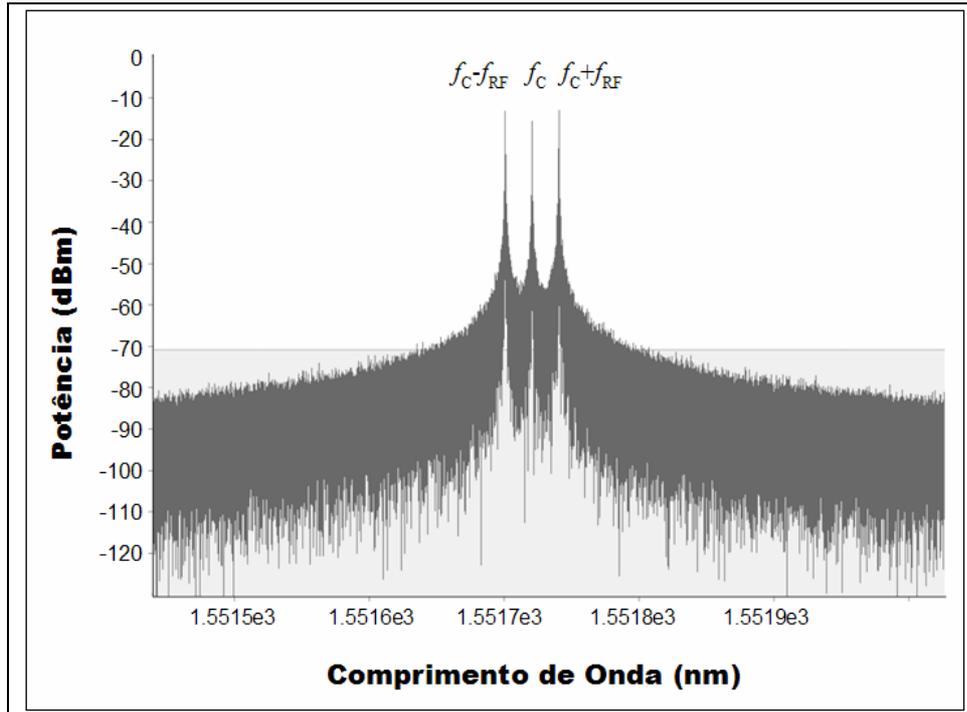


Figura 4.8 – Sinal óptico obtido através de simulação de RoF, na potência óptica de -6,8dBm.

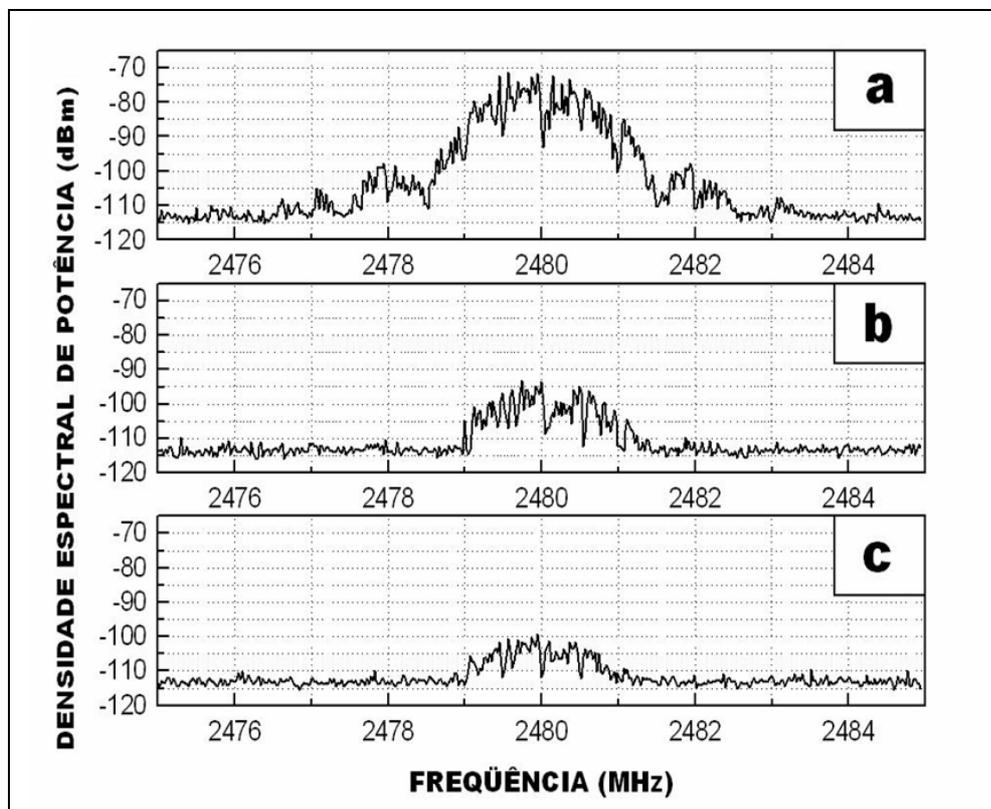


Figura 4.9 - Espectros de RF capturados para as potências ópticas de (a)-6,8 (b) -23,8 e (c) 25,4 dBm.

Contudo, pode-se afirmar que a perda de RF é composta por 26,4 dB referente à propagação pela fibra óptica, somado a 40,2 dB, composto da perda gerada pela eficiência e impedância do laser, pela responsividade e impedância do foto-detector, conforme já descrito na Seção 2.2.2 do Capítulo 2.

De acordo com um experimento realizado em (KAHAMA, E.; ET.AL, 2002), o valor total da perda gerada pela eficiência e impedância do laser, e pela responsividade e impedância do foto-detector, seria de 32,85 dB, já a diferença de 7,35 dB, possivelmente, se justifique pela diferença nos equipamentos utilizados na transmissão e na recepção (laser e fotodetector).

4.4 Análise da FER e a Relação com a Potência Óptica

O experimento da análise da FER e sua relação com a potência óptica objetivaram identificar os limites de propagação do sinal óptico por um enlace óptico, definir uma relação entre a FER e a potência do sinal óptico, bem como, a relação da potência do sinal óptico com a potência do sinal RF.

Para esse experimento utilizou-se a mesma configuração do ambiente experimental apresentada na Figura 4.5, na qual foram realizadas transmissões do TX ao RX. Os parâmetros de configurações aplicados ao TX são os mesmos descritos na Tabela 4.2. Os dados coletados pelo MRX deram origem ao gráfico da potência óptica relacionada com a FER apresentado na Figura 4.10, na qual podemos analisar a dependência da FER em relação à Potência de entrada do FD (P_{FD}).

Observa-se que no intervalo $-6,0 \text{ dBm} \geq P_{FD} \geq -23,4 \text{ dBm}$, a FER é, aproximadamente, constante no valor de 7×10^{-4} e independe da atenuação do enlace óptico. Desta forma, é possível que essa FER residual seja originada a partir do ruído gerado no processo de foto-detecção e/ou do ruído intrínseco ao RX. Como segunda investigação, analisou-se a relação da FER com a potência óptica na entrada do FD. Os dados que originaram o gráfico apresentado podem ser consultados em Apêndice B – Tabela B2 -Dados da Análise da FER e a Relação com a Potência Óptica.

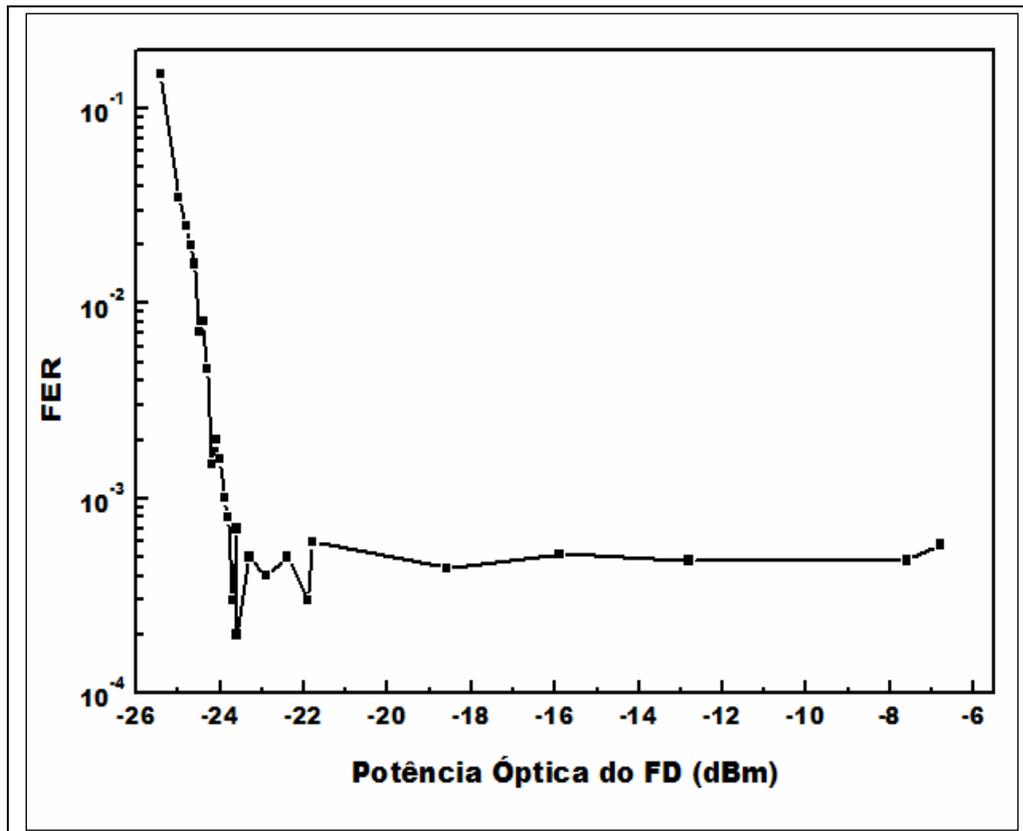


Figura 4.10 – Gráfico da potência óptica relacionada com o FER.

Para potências $P_{FD} < -23,4$ dBm a FER aumenta rapidamente, e atinge um valor superior a 10^{-1} para $P_{FD} < -25,4$ dBm. Uma possível causa para explicar esse aumento súbito da FER é a aproximação da potência recebida em RX da sensibilidade do receptor que é de -95 dBm, conforme pode ser visto pela PP_{RF} Figura 4.9b.

4.5 Análise da Alteração de Tamanho do Quadro e Tempo de Geração de Quadros na FER

O experimento de análise da alteração de tamanho do quadro e tempo de geração de quadros na FER dividiu-se em duas partes, a primeira investigará se alterações no tamanho do *payload* dos quadros influenciam na redução da FER, e a segunda parte, a influência na FER com a redução do tempo de geração de quadros. O ambiente experimental utilizado foi o mesmo apresentado pela Figura 4.5.

A análise foi realizada levando em consideração os pontos onde começa a instabilidade da FER até seu acentuado aumento e até taxas de 10^{-1} , que ocorre entre as P_{FD} de -21,5 até -24,5 dBm, de acordo com a Figura 4.10.

Na primeira análise, utilizaram-se os parâmetros da Tabela 4.2, sendo que, somente alteraram o tamanho do payload de cada quadro, para valores de 125, 75 e 25 Bytes (sendo 125 Bytes o valor utilizado para obter a instabilidade da FER apresentado na Figura 4.10) para as P_{FD} de -21,5, -22,5, -23,5 e -24,5 dBm.

Com os dados obtidos gerou-se o gráfico apresentado na Figura 4.11, na qual pode-ser observado, em comparação com a Figura 4.10, que houve uma relação entre a redução da FER com a do tamanho de *payload* dos quadros. Esse fato provavelmente aconteceu por causa da redução do risco da perda de um quadro completo devido à perda ou alteração de um único bit durante a propagação.

Percebe-se, que a curva da Figura 4.11 que representa a transmissão de quadros com o *payload* de 125 Bytes (o mesmo *payload* utilizado para obter a figura 4.10), a FER apresenta-se mais instável comparada a FER dos demais tamanhos de *payload*. Os dados que originaram o gráfico estão no Apêndice B – Tabela B3 - Dados da análise das implicações da alteração de tamanho de *payload* do quadro na FER.

Como segundo experimento, também se utilizaram os parâmetros da Tabela 4.2, mas alterando o tempo de geração entre os quadros para os valores de 50, 100 e 150 ms e mantendo o tamanho de *payload* com 125 Bytes, com os dados recebidos pelo MRX, a partir da Figura 4.12, a qual apresenta o gráfico da alteração do tempo de geração de quadros em relação a FER.

Observou-se que ao aumentar o tempo de geração de quadros também houve a redução da FER, mas na curva que representa o tempo de 150 ms, apresenta uma FER mais elevada quando na P_{FD} -21,5 dBm, provavelmente, esse efeito ocorreu-se devido ao ruído intrínseco do TX ou pela aproximação do limite de -95 dBm referente a sensibilidade do RX, ou também, por perdas durante o processo de foto-detecção.

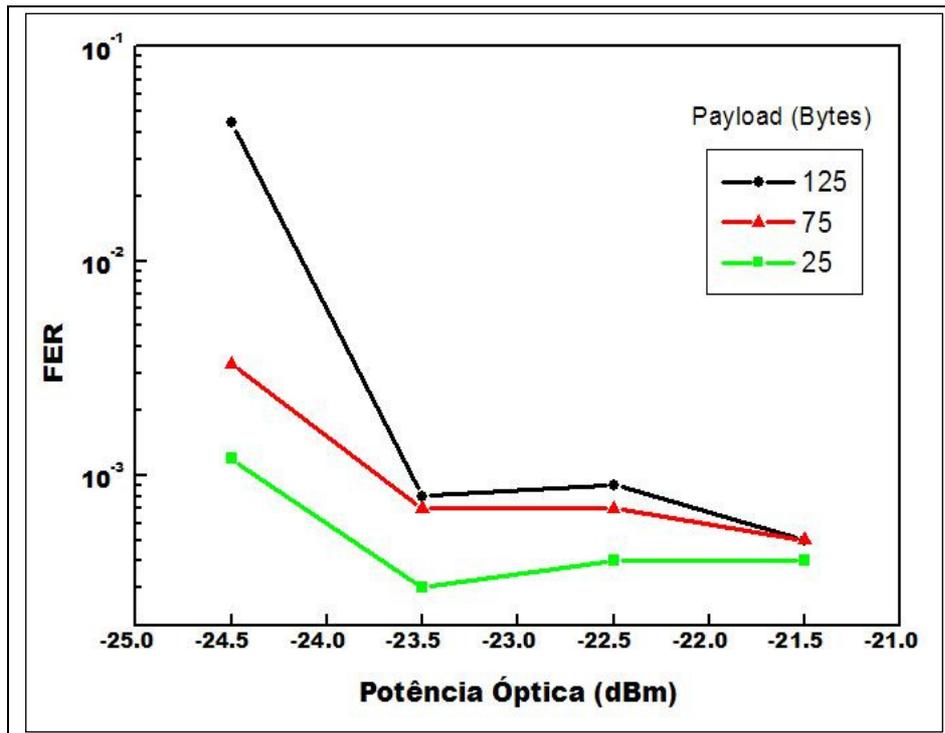


Figura 4.11 – Alteração do *payload* e sua relação com a FER.

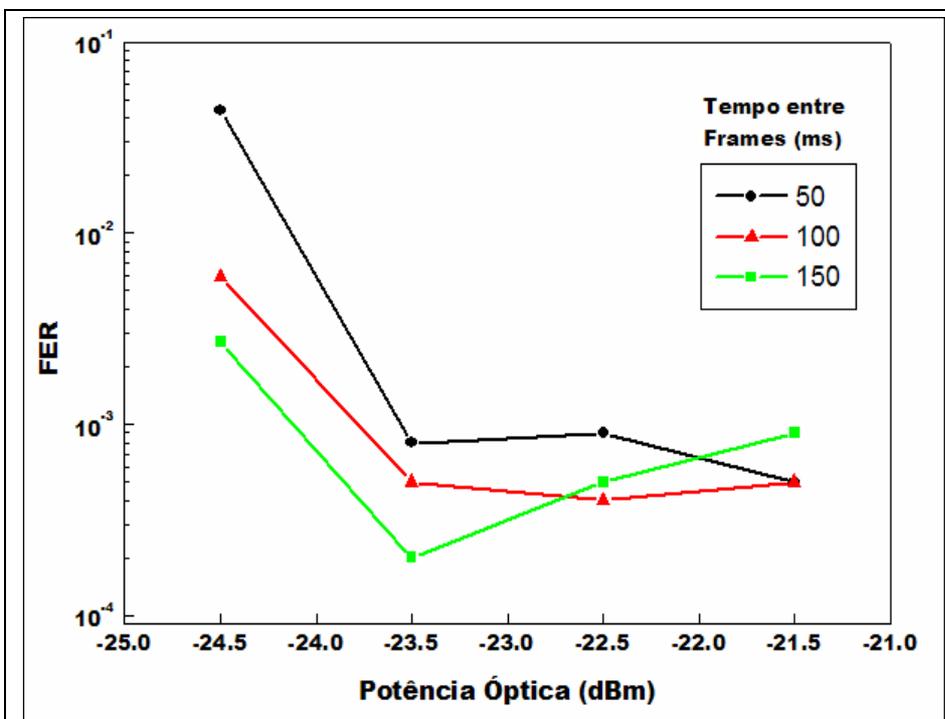


Figura 4.12 – Alteração do tempo de geração entre quadros e sua relação com a FER.

Percebeu-se também uma semelhança entre o gráfico da Figura 4.11 e o gráfico da Figura 4.12 referente à instabilidade da FER com relação aos valores de *payload* e o tempo de geração de quadros, conclui-se assim, que as mudanças de parâmetros de tamanho do *payload* e tempo de geração de quadros, provavelmente, se combinadas, haverá uma redução mais significativa da FER.

Portanto, conclui-se que a gerência centralizada da MAC possui uma grande importância para um melhor desempenho de redes com aplicação de RoF. Os dados que originaram o gráfico estão apresentados no Apêndice B – B4 - Análise das implicações de tempo de geração de quadros na FER.

4.6 Análise da Propagação Óptica com Amplificação Óptica

Os objetivos do experimento de análise da propagação óptica com amplificação óptica foi o de investigar os efeitos que a amplificação óptica teria na qualidade do sinal de RF, a relação da potência de RF com a potência óptica e confirmar, pela primeira vez na prática, os limites de propagação de uma RSSF com a aplicação da tecnologia de RoF.

O segundo ambiente experimental padrão foi empregado nesse experimento, mas com a utilização de um Amplificador Óptico com Fibra Dopada com Erbium (EDFA), conforme mostra a Figura 4.13. O EDFA foi instalado no Laboratório de Pesquisas em Sistemas de Rádio – LP-Sira da PUCCAMP, após o enlace de 30 metros que interligava o LF com o LP-Sira, também se utilizaram os parâmetros apresentados na Tabela 4.3.

A principal responsabilidade do EDFA foi a de manter a potência óptica constante de -7 dBm na entrada do FD, enquanto realizou-se o aumento do enlace óptico de 50 a 100 km e a potência óptica na entrada do FD registrou-se pelo MP2.

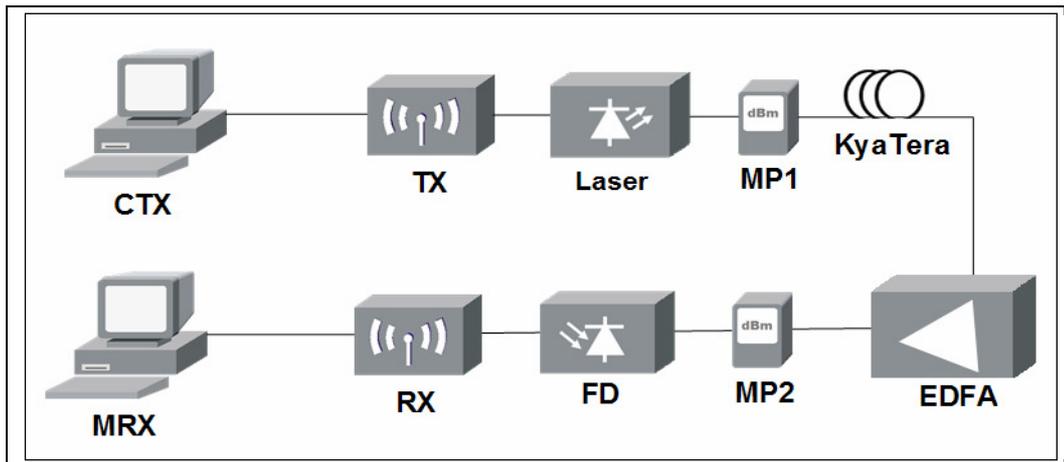


Figura 4.13 – Segundo Ambiente Experimental Padrão com EDFA – Propagação Óptica com Amplificação.

TABELA 4.3
Valores dos parâmetros da análise da propagação óptica com amplificação óptica.

Descrição	Valor
Potência de saída do TX	3 dBm
Quantidade de quadros por medida	10000
Tamanho do <i>payload</i>	125 Bytes
Tamanho do cabeçalho do quadro	6 Bytes
Intervalo de tempo entre quadros	50 ms
Comprimento de onda (laser)	1551,73 nm
Potência de saída do laser	6,4 dBm
Potência na entrada do FD	-7 dBm
Comprimento do enlace óptico na Rede KyaTera	de 50 á 100 km
Comprimento do enlace óptico entre LF e LP-Sira	30 m
Resolução das medidas espectrais de RF	30 kHz
Amplificador Óptico	20 á 25 dB

A potência de -7 dBm na entrada do FD foi selecionada, após observação pelo experimento que analisou os limites da FER em relação a potência óptica na Seção 4.4, pois a FER apresentou um índice aceitável para uma RSSF de 6×10^{-4} na potência de -7dBm.

Os dados coletados pelo MRX no experimento da análise de propagação óptica com amplificação óptica deram origem aos gráficos a serem apresentados nesta seção, os quais estão descritos no Apêndice B – Tabela B5 - Análise da Propagação Óptica com Amplificação Óptica.

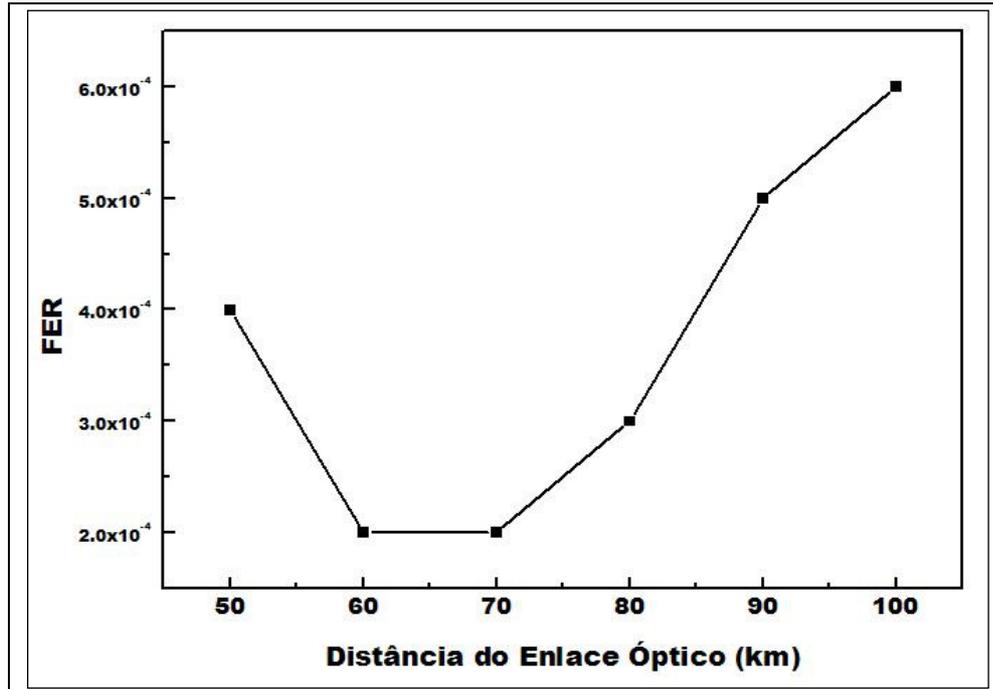


Figura 4.14 – Gráfico da relação da FER com a distância do enlace Óptico.

A Figura 4.14 mostra a relação entre a FER e a distância do enlace óptico. Observa-se que a FER tende a crescer proporcionalmente ao aumento do enlace óptico, com flutuações característica de uma comunicação sem fio.

Verifica-se que o ponto referente a FER capturada a 50 km é o único a fugir desse comportamento de crescimento, pois apresentou a perda de 04 quadros em 10.000, contra o ponto capturado a 60 km, o qual apresentou a perda de 02 quadros. Provavelmente, este comportamento deve-se ao fato de ocorrências de flutuações estatísticas naturais do experimento.

A Figura 4.15 apresenta o gráfico que mostra o sinal e o ruído de RF capturado na saída do FD, através de um medidor de potência de RF. Verifica-se que a potência do sinal de RF tende a diminuir com o aumento da distância do enlace óptico, mesmo com a potência óptica constante de -7 dBm na entrada do FD. Percebe-se também, que o ruído tende a acompanhar a redução da potência do sinal de RF, mas de forma menos decrescente, afetando diretamente na SNR.

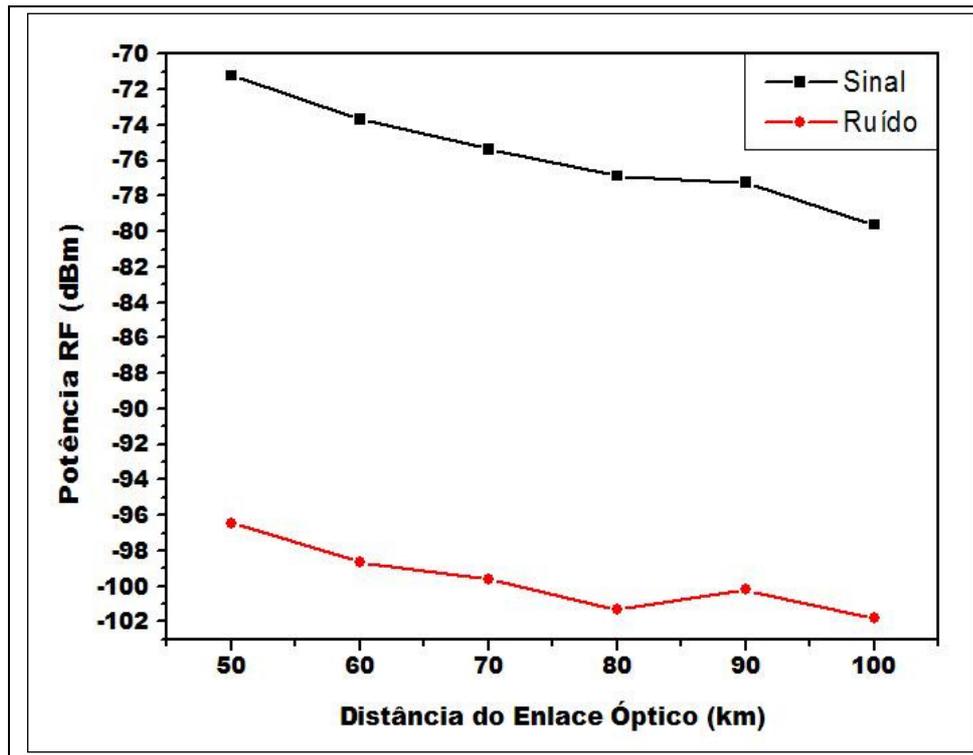


Figura 4.15 – Gráfico da relação entre potência do Sinal de RF e Ruído com a distância do enlace óptico.

Nota-se também, que para potências de RF < -70 dBm sua queda não é linear a potência óptica, provavelmente, isso ocorre devido à aproximação da sensibilidade do medidor de potência utilizado no experimento, ser de -80 dBm (ANRITSU[®]. 2008).

Com objetivo de investigar o motivo da queda do sinal de RF apresentada pela Figura 4.15, realizou-se, por meio de uma simulação matemática, o gráfico referente ao efeito de desvanecimento do sinal de RF.

Observa-se, pela Figura 4.16, o efeito de desvanecimento, em que o sinal de RF não sofre a mesma queda acentuada em comparação com o gráfico da Figura 4.15. Sendo assim, a queda verificada na Figura 4.15 pode ter sido provocada pela queda da eficiência do foto-detector ou pela sensibilidade do amplificador EDFA, que é de ~ -24 dBm e não por consequência do efeito de desvanecimento do sinal de RF. Sendo assim, estudos futuros poderão ser realizados para averiguar a causa do efeito observado.

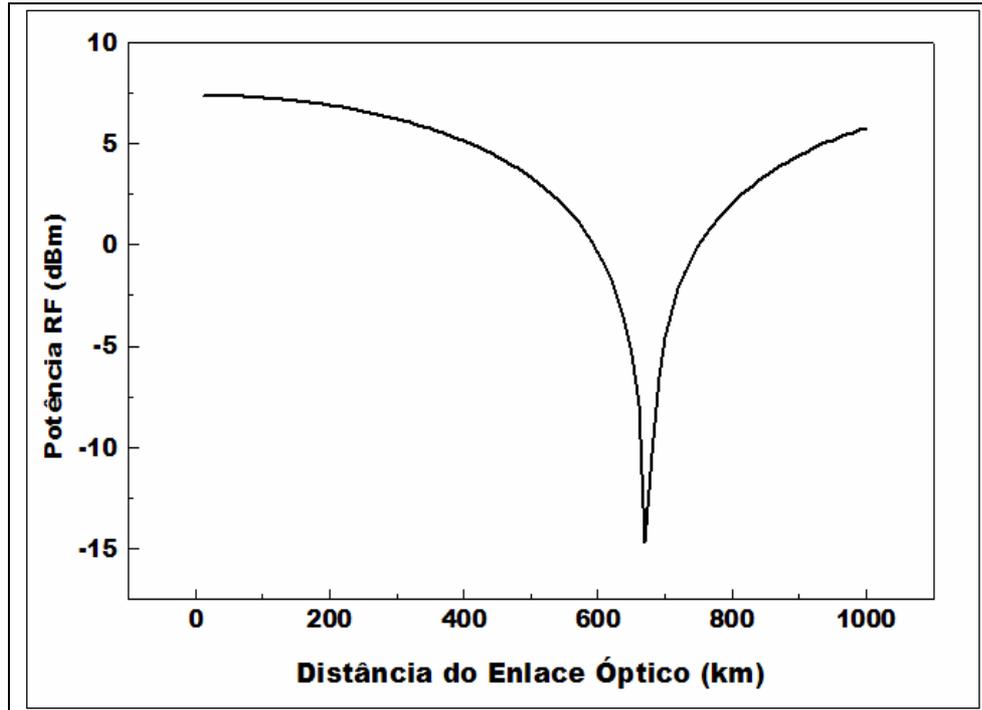


Figura 4.16 – Gráfico da Simulação do desvanecimento do Sinal de RF

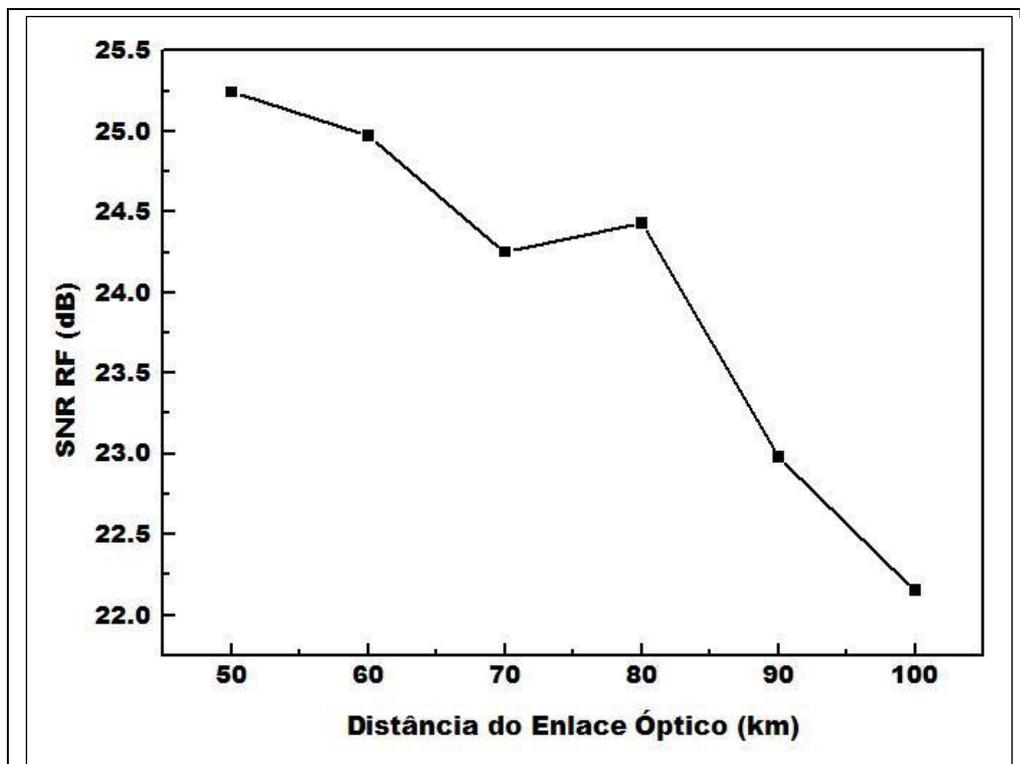


Figura 4.17 – Gráfico da relação entre SNR com a distância do enlace Óptico.

A Figura 4.17 apresenta o gráfico da SNR relacionada com o comprimento do enlace óptico. Percebe-se que a SNR diminui enquanto há o aumento do enlace óptico. A redução da SNR observada é consequência da redução do sinal RF, de acordo com a Figura 4.15. Verifica-se também que os pontos coletados nos quilômetros 70 e 80 apresentam flutuações, característica de redes de comunicação sem fio (PETROVA, M.; et. al, 2006).

A Figura 4.18 apresenta a relação entre a FER e a SNR. A FER apresenta flutuações com relação a SNR. Porém, de maneira geral, tende a aumentar proporcionalmente a redução da SNR. Sendo assim, conclui-se que a FER está relacionada com a SNR.

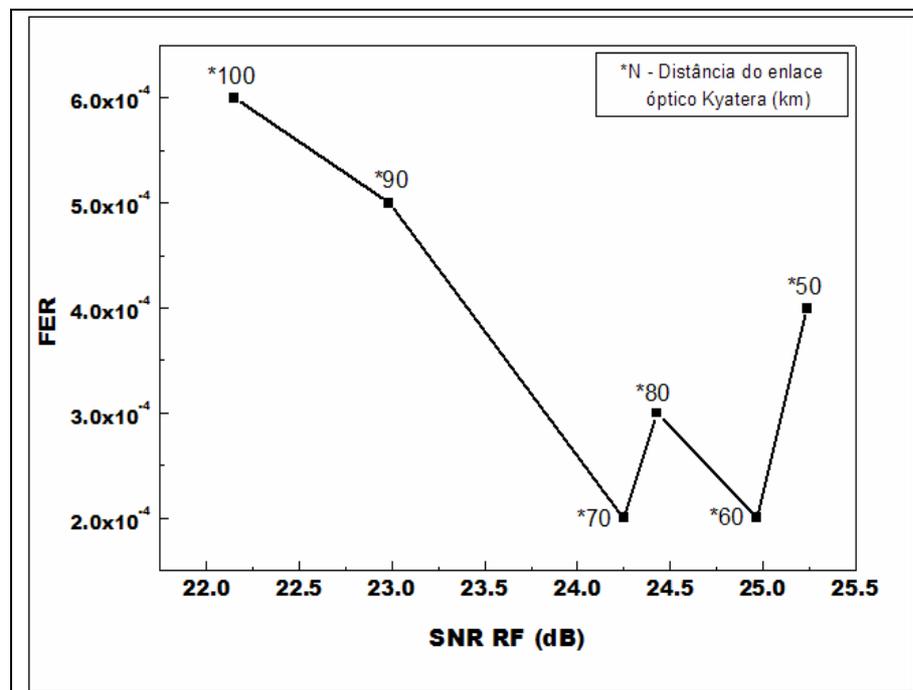


Figura 4.18– Gráfico da relação entre a SNR e a FER.

4.7 Análise da Propagação Óptica e Aérea com Amplificação Óptica

A análise da propagação óptica e aérea com amplificação óptica investigaram a viabilidade de uma RSSF com aplicação do sistema de RoF também na propagação aérea.

Para esse experimento, utilizou-se o ambiente experimental apresentado na Figura 4.2. Entretanto, a única mudança notável foi a substituição da conexão direta através de um cabo coaxial entre a saída do FD com o RX por duas antenas de RF denominadas na topologia de ANT1 e ANT2.

A ANT1 consistiu em uma antena setorial de 58° de 12 dBi e a ANT2, uma antena Omni direcional de 2 dBi, as quais permitiram a propagação aérea entre a saída do FD e o RX, conforme ambiente experimental apresentado na Figura 4.19 (AQUÁRIO®, 2008.).

Os parâmetros utilizados nesse experimento são os mesmos descritos na Tabela 4.4, onde se observou que as potências ópticas na entrada do FD, capturadas pelo MP2, apresentaram constantes 0 dBm. As distâncias de enlace óptico da rede KyaTera foram de 25, 50 e 100 quilômetros e as distâncias de propagação aérea entre as antenas ANT1 e ANT2 foram de 2, 4, 6, 8, 10, 12, e 14 metros. Os dados utilizados para a geração dos gráficos podem ser consultados no Apêndice B –B6 - Análise da Propagação Óptica e Aérea com Amplificação Óptica.

A Figura 4.20 apresenta o primeiro gráfico gerado a partir dos dados obtidos neste experimento. Observou-se que a FER apresentou um comportamento instável durante a propagação pelo enlace óptico somado a propagação aérea. Mas se realizada uma comparação entre o gráfico da Figura 4.20 e os gráficos apresentados na Seção anterior, conclui-se, que a instabilidade da FER é acrescentada pelos efeitos não lineares da propagação aérea, característicos de sistemas de comunicação sem fio.

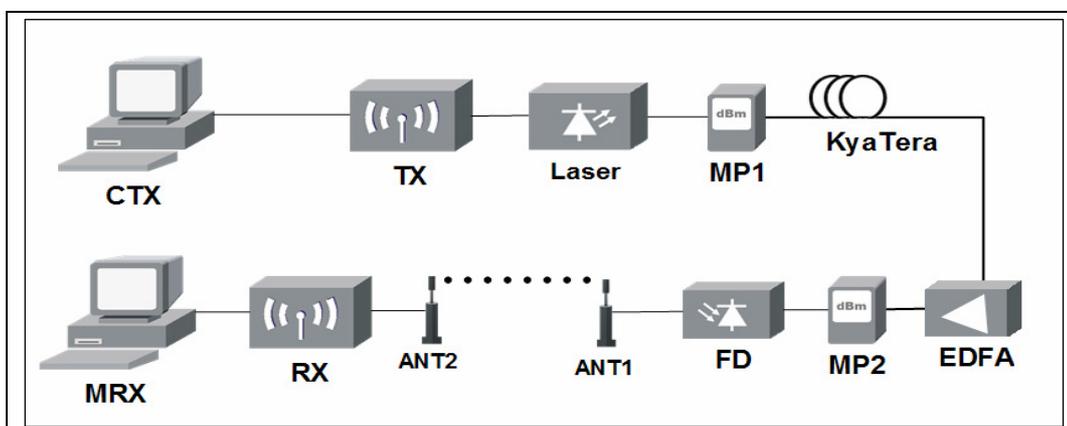


Figura 4.19 – Segundo Ambiente Experimental Padrão com Antenas – Propagação Óptica e Aérea.

TABELA 4.4
Valores dos parâmetros do experimento de Análise da Propagação Óptica e Aérea com Amplificação Óptica.

Descrição	Valor
Potência de saída do TX	3 dBm
Quantidade de quadros por medida	10000
Tamanho do <i>payload</i>	125 Bytes
Tamanho do cabeçalho do quadro	6 Bytes
Intervalo de tempo entre quadros	50 ms
Comprimento de onda (laser)	1551,73 nm
Potência de saída do laser	6,4 dBm
Potência na entrada do FD	0 dBm
Comprimento do enlace óptico na Rede KyaTera	de 25 á 100 km
Distância de propagação aérea	de 2 á 14 m
Comprimento do enlace óptico entre LF e LP-Sira	30 m
Resolução das medidas espectrais de RF	30 kHz
Amplificador Óptico	20 á 25 dB

Porém, por se tratar de uma aplicação em RSSF, a FER apresentada é aceitável até uma distância de 10m de propagação aérea, tornando assim, viável a aplicação do sistema de RoF em um sistema de RSSF.

A Figura 4.21 apresenta a SNR gerada pela propagação óptica e aérea. Observa-se uma acentuada redução da SNR relacionada com o aumento da distância de propagação óptica e aérea, que, possivelmente, causaram a instabilidade da FER apresentada no gráfico da Figura 4.20.

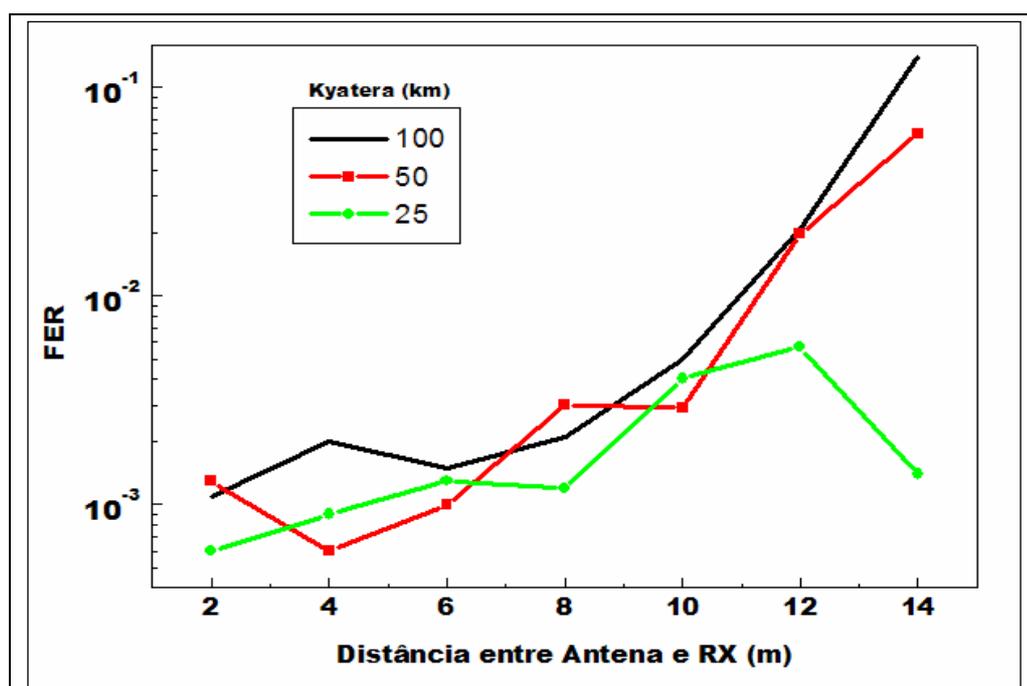


Figura 4.20 – Gráfico da FER com relação à propagação óptica e aérea.

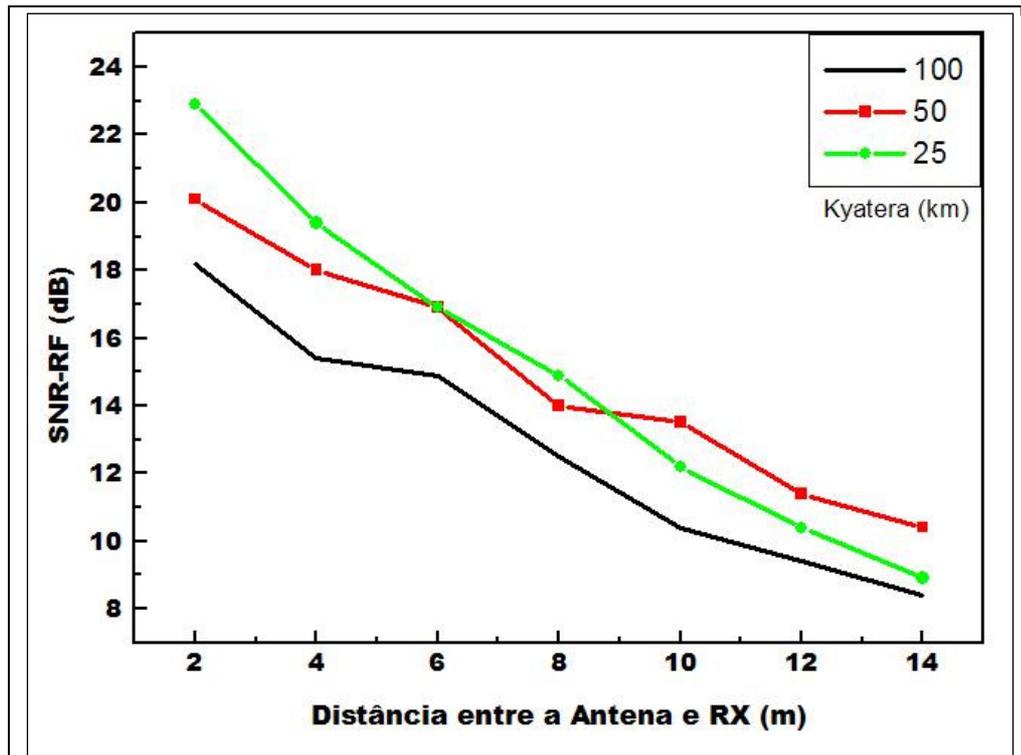


Figura 4.21 – Gráfico da SNR com relação à propagação óptica e aérea.

Com isso, pode-se destacar a viabilidade do emprego da tecnologia RoF em RSSF, além de ser notável numa comunicação aérea de até 10 metros de distância. Essa distância poderia ser maior, amplificando ainda mais o sinal óptico, conseqüentemente, amplificando o sinal de RF, mas o limite de potência aceito pelo FD utilizado foi de 1 dBm, ou seja, por medida de segurança, a potência óptica máxima foi de 0 dBm.

Outra maneira de aumentar as distâncias seria a de se utilizar um amplificador de RF instalado entre o FD e a ANT1. Essa possibilidade poderá ser considerada em trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO

O trabalho em questão investigou a viabilidade da aplicação do sistema de RoF em RSSF IEEE 802.15.4, através da análise de espectros de potências ópticas e RF, da avaliação da taxa de erros de quadro - FER e da relação sinal ruído SNR, obtidas por testes experimentais.

Os resultados apresentados na Seção 4.4 comprovaram a viabilidade da combinação do sistema de RoF com RSSF. Considerando-se que a FER manteve-se constante por um intervalo de 29,8 dB, é de se esperar que o sinal de RF poderia ter se propagado por 99,33 km.

Além disso, na Seção 4.6, comprovou-se que o sinal de RF no domínio óptico amplificado propaga-se por distâncias maiores que 99,33 km, sendo que a FER manteve-se dentro dos parâmetros estabelecido pelo padrão IEEE 802.15.4, testado na Seção 4.2.

Tal investigação possibilitou ainda a realização de teste de propagação aérea na distância de até 12 metros entre as antenas do TX e RX, conforme mostra Seção 4.7, ratificando a eficiência da combinação de RoF com RSSF.

Devido à falta de dispositivos de geração e detecção do sinal óptico, a comunicação entre o TX e RX foi unidirecional. Porém, se considerarmos o mesmo ambiente e parâmetros empregados na comunicação unidirecional para um canal de retorno (comunicação bidirecional), provavelmente, espera-se a mesma eficiência.

Portanto, uma proposta seria utilizar uma RSSF com o sistema RoF de comunicação unidirecional, somente para a coleta de dados de sensores, sendo necessário a sincronização de tempos de geração de quadros, evitando assim, colisões aérea e óptica.

Com os testes realizados na Seção 4.5, nota-se que os mecanismos de gerência da MAC são de grande importância para uma melhor eficiência na transmissão.

Outra proposta seria a aplicação de um amplificador de RF entre o FD e a antena, com objetivo de aumentar a área de cobertura observada nos experimentos.

Tendo em vista que a viabilidade de uma RSSF é definida pelo baixo custo na sua implementação, o emprego do amplificador de RF não foi considerado.

5.1 Contribuições

Entre as contribuições do presente trabalho, destaca-se a análise da viabilidade da combinação do sistema de RoF com RSSF. Os resultados propõem a abertura de novos estudos referentes à melhoria de desempenho desta combinação.

Os dispositivos utilizados para os experimentos estão entre os de custo mais acessível e de fácil instalação. Desta forma, os resultados apresentados sugerem uma oportunidade de continuidade das pesquisas, objetivando o desenvolvimento de aplicações comerciais e, desenvolvimento de MAC que vise uma melhora no desempenho da combinação de RoF e RSSF.

5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Como proposta para continuidade do trabalho apresentado está a investigação da comunicação bidirecional entre TX e RX.

Tendo em vista que os parâmetros variados da MAC afetaram significativamente o desempenho do sistema, outra proposta permitiria o estudo e desenvolvimento de uma MAC, visando também, uma melhor eficiência da RSSS com RoF.

6 REFERÊNCIAS

ABBADE, M. L. F.; et. al. Impacto da Sobre-Compensação de Dispersão em um Sistema WDM de Ondas Milimétricas sobre Fibra. *13º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica (SMBO), 8º Congresso Brasileiros de Eletromagnetismo (CBMAG)*. vol. 1. Set 2008. 914 - 918p.

ACKERMAN, E. I.; COX, C. H. RF fiber-optic link performance. *Microwave Magazine, IEEE*. vol. 2. Dez 2001. 50-58p.

AGRAWAL, G. P.; KAMINOW, I. P.; KELLEY, P. L. *Nonlinear Fiber Optics*. 3º ed. California. Academic Press. 2001

AHMED, M.; et. al. Intra-vehicular Wireless Networks. *Globecom Workshops, 2007 IEEE*. Vol. 1. Nov 2007. 1-9p.

AJUNG, K.; YOUNG H. J.; YOUNGSOO, K. 60 GHz wireless communication systems with radio-over-fiber links for indoor wireless LANs. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*. Vol.50, May 2004. 517-520p.

ALPING, A. Waveguide pin photodetectors: theoretical analysis and design criteria. *Optoelectronics (see also IEE Proceedings – Optoelectronics), IEE Proceedings J*. vol. 136. Jun 1989. 177-182p.

ANDRÉ, P. S.; PINTO, J. L. Birrefringência e Dispersão Devido aos Modos de Polarização em Fibras Ópticas. *Revista do DETUA*. Vol. 3. Jun 2002. 375-380p.

ANDRISANO, O. TRALLI.; V. VERDONE, R. Millimeter Waves for Short-Range Multimedia Communication Systems. *Proceedings of the IEEE*. vol. 86. Jul 1998. 1383-1401p.

ANRITSU®. 2008 – Anritsu Spectrum Master – Handheld Spectrum Analyser – MS2711D – Disponível em:
<<http://www.us.anritsu.com/products/MS2711D/Spectrum-Master--Handheld-SpectrumAnalyzer/B2FC3636D.aspx?sencqs=vK3%2FX%2BX%2B5O9bhXbaVbS9Vg%3D%3D>> Acessado em Nov 2008.

BERGNSTEIN, G.; MANNIE, E.; SHARMA, V. Framework for MPLS-based control of optical SDH/SONET networks. *Network, IEEE*. vol. 15. Jul/Ago 2001. 20-26p.

BOWERS, J. E.; BURRUS, C. A. High-speed zero-bias waveguide photodetectors. *Electronics Letters*. vol. 22. Ago 1986. 905-906p.

CALLAWAY, E.; et. al. Home networking with IEEE 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks. *Communications Magazine, IEEE*. vol. 40. Ago 2002. 70-77p.

CHANG, W. S. RF Photonic thecnology in optical fibers links. 1^o ed. New York. *Cambridge University Press*. 2002.

CHIA, M. Y. W.; et. al. Hybrid radio over fiber wireless LANs and Ethernet networks. *Optical Fiber Communication Conference, 2004. OFC 2004*. vol.1. Fev 2004.

CHU, T. S.; GANS, M.J. Fiber optic microcellular radio. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*. vol.40. Ago 1991. 599-606p.

COOPER, A.J. 'Fibre/radio' for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network. *IEEE Electronics Letters*. vol. 26, Nov 1990. 2054-2056p.

COX, C. H. Gain and noise figure in analogue fibre-optic links. *Optoelectronics (see also IEE Proceedings – Optoelectronics), IEE Proceedings J*. Vol. 139. Ago 1992. 238-242p.

COX, C. H. Analog optical link: Theory and Praticce. 1^o ed. New York. *Cambridge University Press*. 2002.

CROSSBOW. 2008. Crossbow Tecnology Wireless. Disponível em: <<http://www.xbow.com/Home/wHomePage.aspx>>. Acessado em: 10 Set 2008.

DANG, B. L.; PRASAD, V. R.; Niemegeers, I. On the MAC protocols for Radio over Fiber indoor networks. *Communications and Electronics, 2006. ICCE '06. First International Conference on*. vol 1. Out 2006. 112-117p.

DYOTT, R. B.; STERN, J. R.; STEWART, J. H. Fusion junctions for glass-fibre waveguides. *Electronics Letters*. vol. 8. Jun 1972. 290-292p.

EFFENBERG, F. J.; ICHIBANGASE, H.; YAMASHITA, H. Advances in broadband passive optical networking technologies. *IEEE Communications Magazine*. vol. 39. Dez 2001. 118-124p.

FORREST, J.R. Communication networks for the new millennium. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. vol. 47. Dez 1999. 2195-2201 p.

FREESCALE[®]. 2008 –MC13211 Product Summary Page. Disponível em: <http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MC13211&nodeId=0106B9869925657103&fosp=1&tab=Documentation_Tab>. Acessado em Nov 2008.

GARCIA, M. LARRODÉ; et. al. Bidirectional Radio-Over-Fiber Link Employing Optical Frequency Multiplication. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, Jan 2006. 241-243p.

GARCIA, M. LARRODÉ; et. al. Transparent transport of wireless communication signals in Radio-over-Fiber systems. *European Conference on Network e Optical Communications (NOC2005)*. vol. 1. Jul 2005. 83-90p.

GIANNETTI, F.;LUISE, M.; REGGIANNINI, R. Mobile and Personal Communication in the 60 GHz Band A Survey. *Wireless Personal Communications*. vol. 10. Jul 1999. 207-243 p.

GLIESE, U. NORSKOV S.; NIELSEN, T.N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wavelinks. . *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. vol.44. Out 1996. 1716-1724 p.

GOLDSMITH, ANDREA. *Wireless Communication* 1^o ed. New York, Cambridge University Press, 2005

GRONEMEYER, S. MCBRIDE, A. MSK and Offset QPSK Modulation. *Communications, IEEE Transactions on*. vol. 24. Ago 1976. 809-820p.

GROSS, N.; COY P. 21 Ideas for the 21 st Century. *Business Week*, Ago 1999. 81-162p. Disponível em: <<http://www.businessweek.com/archives/1999/b3644001.arc.htm>>. Acessado em: 10 Set 2008.

GSM – *Global System for Mobile communications* – GSM – Disponível em: <<http://www.gsmworld.com/technology/gsm/index.htm>> Acesso em: 04 Nov. 2008.

GUO, N.; QIU, R. C., MO, S.S.; TAKAHASHI, K. 60-GHz Millimeter-Wave Radio: Principle, Technology, and New Results. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. vol. 2007, Jan 2007. 8p

HAMANA, D. V.; PRASAD, A. P. S.; PAL, S. Theoretical and experimental results on QPSK spectrum used for data transmission. *TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region*. vol.2. Out 2003. 789-793p.

HARADA, H.; SATO, K.; FIJISE, M. A radio-on-fiber based millimeter-wave road-vehicle communications system by a code division multiplexing radio transmission scheme. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*. vol.2. Dez 2001. 165-179p.

HARADA, H.; SATO, K.; FIJISE, M. A radio-on-fiber based millimeter-wave road-vehicle communications system for future intelligent transport system-effect of cell size. *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th*. vol.4. Nov 2001. 2630-2634p.

HILT, A.; ET. AL. Fiber-dispersion compensation techniques in optical/wireless systems. *Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2002. MIKON-2002. 14th International Conference on*. vol. 1. Mai 2002. 25-36p.

HOWITT, I., GUTIERREZ, J. A. IEEE 802.15.4 low rate - wireless personal area network coexistence issues. *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*. vol.3 .Mar 2003. 1481-1486p.

IDC BRASIL, 2007 (International Data Corporation) – *IDC Brasil - Brasil prestes a entrar na onda da mobilidade corporativa*. Disponível em: <http://www.idclatin.com/news.asp?ctr=bra&year=2007&id_release=1038> . Acesso em 04 Nov. 2008

IEEE – WSZ. *IEEE – Wireless Standard Zone* – Disponível em: <<http://standards.ieee.org/wireless/>> . Acesso em 04 Nov. 2008.

IEEE 802.15.4 – *IEEE Standards for Information Technology Part: 15.4*. 1º ed. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Out 2003.

IEEE 802.16 – *IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Network Part 802.16*. 1º ed. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Oct 2004.

IEEE 802.20 – *IEEE 802.20 – Mobile Broadband Wireless Access – MBWA* – Disponível em: <<http://standards.ieee.org/announcements/802.20approval.html>>. Acesso em: 10 Ago. 2008.

ITU-T, G 652 – Transmission Media Characteristics of a single-mode optical fibre cable ITU-T G 652. *International Telecommunication Union (ITU)*. Mar 1993.

ITU-T, G 653 – Transmission Media Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable ITU-T G 653. *International Telecommunication Union (ITU)*. Mar 1993.

ITU-T, G 655 – Transmission Media Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable ITU-T G 655. *International Telecommunication Union (ITU)*. Mar 2006.

JIN, X.; CHI, H.; ZHANG, X. Improving frequency response of radio over fibre systems by fibre Bragg grating. *Electronics Letters*. vol. 42. Mar 2006. 369-370p.

KAHANA, E.; BAKER, M.; TZIORTZIS, A. “Central Processing/Remote RF” for Cellular Networks, using optical microcells: concept and performance. *Software Defined Radio International Technical Conference and Product Exposition-ADVISORY/2002*. Vol.1 – Nov. 2002.

KATO, K. Ultrawide-band/high-frequency photodetectors. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*. Vol. 47. Jul 1999. 1265-1281p.

KOONEN, T. Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When? *Proceedings of the IEEE*. vol. 94. Mai 2006. 911-934p.

KWANSOO, Lee. Radio over Fiber for Beyond 3G. *Microwave Photonics, 2005. MWP 2005. International Topical Meeting on*, Out. 2005. 9-10p.

KYATERA. 2008 – KyaTera Fiber-to-the-Lab. Disponível em: <<http://kyatera.incubadora.fapesp.br/portal>> Acessado em Nov 2008.

LETHIEN, C.; LOYEZ, C. ; VILCOT, J. P, Potentials of radio over multimode fiber systems for the in-buildings coverage of mobile and wireless LAN applications. *Photonics Technology Letters, IEEE*. Dez 2005, 2793-2795p.

LIN, C. Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home: Systems Technologies and Deployment Strategies, 1^o ed. *John Wiley & Sons Ltd*, London, 2006.

LOUREIRO, A. A. F.; et.al. Redes de sensores sem fio. *21^o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*. vol. 1. Mai 2003. 179-226p.

MIKROULIS, A. et. al. Evaluation of Distributed Feedback (DFB) Laser Operating Parameters for Direct Modulation Schemes in IM-DD RoF Links. *Technological Educational Institution of Athens, Egaleo – Greece*. Mai 2006.

NIIHO, T.; et. al. Transmission Performance of Multichannel Wireless LAN System Based on Radio-Over-Fiber Techniques. *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*. vol. 54. Fev 2006. 980-989p.

O'HARA, BOB; PETRICK, AL – *IEEE – 802.11 Handbook - A Designer's Companion*, 1^o ed. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Jan 1999.

OHMOTO, R. ;OHTSUKA, H.; ICHIKAWA, H. Fiber-optic microcell radio systems with a spectrum delivery scheme. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*. vol 11. Set 1993. 1108-1117p.

OHTSUKA, T.; et. al. Digital optical CATV system using hubbed distribution architecture. *Lightwave Technology, Journal of*. vol. 6. Nov 1988. 1728-1736p.

OPTICAL ZONU[®] – Optical Zonu Corporation. Disponível em:
<<http://opticalzonu.com/>>. Acessado em 05 Nov. 2008

PARK, T. R.; et. al. Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA. *Electronics Letters*. vol. 41. Set 2005. 1017 – 1019p.

PETROVA, M.; et. al. Performancy Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations. *Wireless Communications and Networking Conference 2006 (WCNC 2006)*. vol. 1. Abr 2006. 487–492p.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. Optical Network – A Practical Perspective. 2^o ed. California. *Morgan Kaufmann Publishers*. 2002.

ROY, DESPINS, C. V.; L. Planning of GSM-based wireless local access via simulcast distributed antennas over hybrid fiber-coax. *Global Telecommunications Conference, 1999. GLOBECOM '99*. vol.2 Set 1999. 1116-1120p.

RUIZ, L. B.; etc al. Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio. *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*. vol.1. Mai 2004. 167-218p.

SINGH, G.; ALPHONES, A. OFDM modulation study for a radio-over-fiber system for wireless LAN (IEEE 802.11a). *Information, Communications and Signal Processing, 2003 and the Fourth Pacific Rim Conference on Multimedia. Proceedings of the 2003 Joint Conference of the Fourth International Conference on*. vol.3, Dez 2003. 1460-1464p.

SMULDERS, P. Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: prospects and future directions. *Communications Magazine, IEEE*. vol. 40. Jan 2002. 140-147p.

SUGITA, E.; et. al. SC-type single-mode optical fiber connectors. *Lightwave Technology, Journal of*. vol. 7. Nov 1989. 1689-1696p.

TANENBAUM, Andrew S. *Computer Networks*. 4º ed. New Jersey, Prentice Hall Books, 2003.

UMTS – FORUM.ORG – *Promoting the global success of third generation mobile*. 2008. Disponível em: <<http://www.umts-forum.org>>. Acesso em: 05 Nov. 2008.

VIALITE – ViaLite® by PPM - RF-over-Fiber links for communications and data. Disponível em: < <http://www.vialite.com/products/index.html> >. Acessado em 05 Nov. 2008.

WAKE, D.; et. al. Radio over fiber for mobile communications. *Microwave Photonics, 2004. MWP'04. 2004 IEEE International Topical Meeting on*. Out 2004. 157-160p.

WANG, J.; ZENG, F.; YAO, J. All-optical microwave bandpass filters implemented in a radio-over-fiber link. *Photonics Technology Letters, IEEE*. Vol. 17. Ago 2005. 1737-1739p.

WILBERG, A. Generation, Modulation, and Detection of Signal in Microwave Photonic System – Thesis for the degree of doctor of philosophy. *Chalmers University of Technology*. Suécia, Set. 2008.

WILLIAMS, K. J.; et. al. Differences in p-side and n-side illuminated p-i-n photodiode nonlinearities. *Photonics Technology Letters*, IEEE. Vol. 10. Jan 1998. 132-134p.

XBEE-PRO. 2008. Xbee[®] Xbee-PRO[®] 802.15.4 OEM Modules. Disponível em: <<http://www.digi.com/products/wireless/point-multipoint/xbee-series1-module.jsp>>. Acessado em: 10 Set 2008

ZIGBEE[®] ALLIANCE. ZigBee Alliance Home Page. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/en/>>. Acessado em: 10 Set 2008

ZIGBEE[®] ALLIANCE. ZigBee Alliance Specification Download. Disponível em: <http://www.zigbee.org/en/spec_download/download_request.asp>. Acessado em: 10 Set 2008

TRABALHOS

1- Arismar Cerqueira S. Jr., D. C. Valente e Silva, M. A. Q. R. Fortes, L. F. da Silva, O. C. Branquinho, and M. L. F. Abbade. Implementation of a Radio over Fiber system in a geographically-distributed optical network. *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)* Pequim - CHINA, 23-27 Mar, 2009. - Aceito

2 - Arismar Cerqueira S. Jr., D. C. Valente 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. *Microwave and Optcial Thecnology Letters – MOTL*. – Submetido

3 - D. C. Valente e Silva¹, R. L. Cassiolato¹, Arismar Cerqueira S. Jr.², M. A. Q. R. Fortes², L. F. da Silva¹, O. C. Branquinho¹ e M. L. F. Abbade¹. Investigação Experimental do Desempenho de um Sistema de Rádio Sobre Fibra com o Padrão Wireless IEEE 802.15.4. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – SBRC*. Recife – BRASIL, 25-29 Mai, 2009 – a ser submtido até 19/12/2008.

Apêndice A - Diagrama da Rede KyaTera

Para os experimentos descritos no Capítulo 4 foram utilizados enlaces ópticos da rede KyaTera, mais especificamente os que interligam o Laboratório de Fotônica (LF) da PUC-Campinas com o Instituto de Computação (CCUE) da UNICAMP e os que interligam a UNICAMP com o CPDQ.

A Figura A-1 apresenta as ligações entre as instituições que cooperaram com esse trabalho. Essas ligações possuíam 5 km de fibra SSMF, sendo que ao todo foram utilizados 5 redes de 20 km totalizando 100 km de enlace óptico. Alguns testes necessitaram de variações de 10 km de comprimento do enlace óptico, para isso, foi utilizada uma conexão alternativa na UNICAMP.

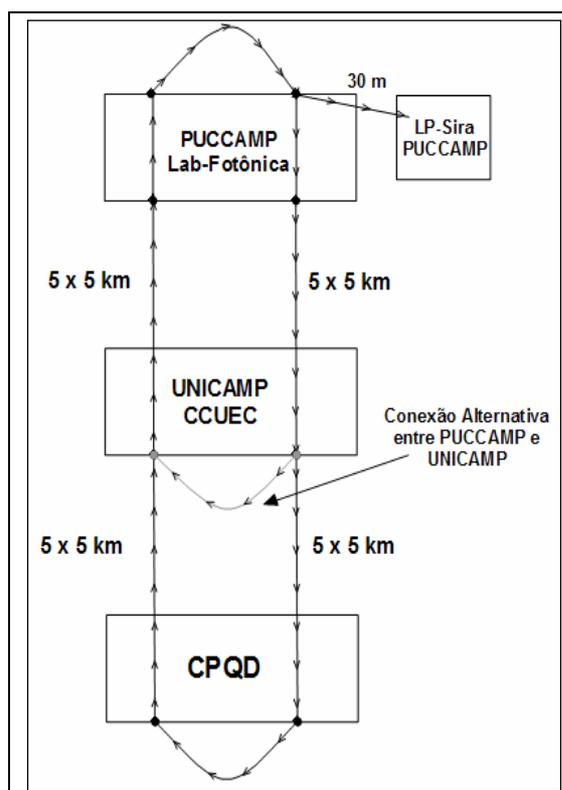


Figura A-1 – Diagrama da rede KyaTera utilizada nos experimentos

Apêndice B –. Dados dos experimentos.

Os dados que deram origem aos gráficos apresentados no Capítulo 4, foram obtidos através da coleta realizada pelo MRX e estão representados nas Tabelas B1, B2, B3, B4, B5 e B6.

Os dados da Tabela B1 referem-se à análise da RSSF sem aplicação de RoF e deu origem aos gráficos apresentados na Seção 4.2 pelas Figuras 4.3 e 4.4.

TABELA B 1			
Dados da Análise da RSSF sem Aplicação de RoF			
Ruído RF (dBm)	Sinal RF (dBm)	FER	Distância entre ANT1-TX e ANT2-RX (metros)
-68	-2	0,0E+00	0
-87	-50	5,0E-04	2
-87	-52	2,0E-04	4
-87	-52	1,5E-03	6
-87	-54	1,4E-03	8
-87	-56	1,2E-03	10
-87	-58	4,0E-04	12
-87	-58	1,0E-04	14
-87	-60	1,0E-03	16
-87	-65	5,0E-04	18
-87	-68	7,0E-04	20
-87	-71	5,0E-04	24
-87	-78	5,0E-04	38
-87	-79	1,0E-03	50
-87	-80	4,0E-04	54

Os dados apresentados pela Tabela B2 referem-se à análise da FER e a relação com a potência óptica, originaram o gráfico apresentado pela Figura 4.10 na Seção 4.4.

TABELA B 2	
Dados da Análise da FER e a Relação com a Potência Óptica.	
FER	MP2 Fotodiodo (dBm)
5,8E-04	-6,8
4,8E-04	-7,6
2,7E-03	-9,7
4,8E-04	-12,8
5,2E-04	-15,9
4,4E-04	-18,6
6,0E-04	-21,8
3,0E-04	-21,9
5,0E-04	-22,4
4,0E-04	-22,9
5,0E-04	-23,3
2,0E-04	-23,6
7,0E-04	-23,6
3,0E-04	-23,7
8,0E-04	-23,8
1,0E-03	-23,9
1,6E-03	-24
2,0E-03	-24,1
1,5E-03	-24,2
4,6E-03	-24,3
8,1E-03	-24,4
7,2E-03	-24,5
1,6E-02	-24,6
2,0E-02	-24,7
2,5E-02	-24,8
3,5E-02	-25
1,5E-01	-25,4

Já os dados apresentados pela Tabela B3 referem-se à análise das implicações da alteração de tamanho de *payload* do quadro na FER, as quais originaram o gráfico apresentado pela Figura 4.11 na Seção 4.5. Na Seção 4.5, o gráfico da Figura 4.12 originou-se a partir dos dados da Tabela B4, referentes à análise das implicações de tempo de geração de quadros na FER.

TABELA B 3				
Dados da análise das implicações da alteração de tamanho de <i>payload</i> do quadro na FER				
<i>Payload</i> (Kbytes)	FER	MP2 Fotodiodo (dBm)	Ruído RF (dBm)	Sinal RF (dBm)
125	5,0E-04	-21,5	-96,68	-91,33
75	5,0E-04	-21,5	-96,68	-91,33
25	4,0E-04	-21,5	-96,68	-91,33
125	9,0E-04	-22,5	-96,62	-92,74
75	7,0E-04	-22,5	-96,62	-92,74
25	4,0E-04	-22,5	-96,62	-92,74
125	8,0E-04	-23,5	-96,21	-92,97
75	7,0E-04	-23,5	-96,21	-92,97
25	3,0E-04	-23,5	-96,21	-92,97
125	4,4E-02	-24,5	-96,92	-94,24
75	3,3E-03	-24,5	-96,92	-94,24
25	1,2E-03	-24,5	-96,92	-94,24

TABELA B 4				
Dados da análise das implicações de tempo de geração de quadros na FER.				
Tempo (milisegundos)	FER	MP2 Fotodiodo (dBm)	Ruído RF (dBm)	Sinal RF (dBm)
50	5,0E-04	-21,5	-96,68	-91,33
100	5,0E-04	-21,5	-96,68	-91,33
150	9,0E-04	-21,5	-96,68	-91,33
50	9,0E-04	-22,5	-96,62	-92,74
100	4,0E-04	-22,5	-96,62	-92,74
150	5,0E-04	-22,5	-96,62	-92,74
50	8,0E-04	-23,5	-96,21	-92,97
100	5,0E-04	-23,5	-96,21	-92,97
150	2,0E-04	-23,5	-96,21	-92,97
50	4,4E-02	-24,5	-96,92	-94,24
100	5,9E-03	-24,5	-96,92	-94,24
150	2,7E-03	-24,5	-96,92	-94,24

Os dados apresentados pela Tabela B5 referem-se à análise da propagação óptica com amplificação óptica e, originaram os gráficos apresentados pelas Figuras 4.14, 4.15, 4.17 e 4.18 na Seção 4.6.

TABELA B 5					
Dados da análise da Propagação Óptica com Amplificação Óptica..					
Amplificador Óptico (mA)	Ruído RF (dBm)	Sinal RF (dBm)	FER	Distância Kyatera (km)	MP2 Fotodiodo (dBm)
430	-96,46	-71,22	4,0E-04	50	-7
437	-98,65	-73,68	2,0E-04	60	-7
449	-99,61	-75,36	2,0E-04	70	-7
459	-101,31	-76,88	3,0E-04	80	-7
469	-100,22	-77,24	5,0E-04	90	-7
479	-101,79	-79,64	6,0E-04	100	-7

Os dados apresentados pela Tabela B6 referem-se à análise da propagação óptica e aérea com amplificação óptica apresentada pela Seção 4.7 e, originaram os gráficos mostrados pelas Figuras 4.20 e 4.21 na Seção 4.7.

TABELA B 6						
Dados da análise da Propagação Óptica e Aérea com Amplificação Óptica.						
Amplificador Óptico (mA)	Ruído RF (dBm)	Sinal RF (dBm)	FER	Distância Kyatera (km)	Distância ANT1-TX ANT2-RX (metros)	MP2 Fotodiodo (dBm)
476	-86,4	-68,2	1,1E-03	100	2	0
476	-86,4	-71	2,0E-03	100	4	0
476	-86,4	-71,5	1,5E-03	100	6	0
476	-86,4	-73,9	2,1E-03	100	8	0
476	-86,4	-76	5,0E-03	100	10	0
476	-86,4	-77	2,1E-02	100	12	0
476	-86,4	-78	1,4E-01	100	14	0
468	-86,4	-66,3	1,3E-03	50	2	0
468	-86,4	-68,4	6,0E-04	50	4	0
468	-86,4	-69,5	1,0E-03	50	6	0
468	-86,4	-72,4	3,0E-03	50	8	0
468	-86,4	-72,9	2,9E-03	50	10	0
468	-86,4	-75	2,0E-02	50	12	0
468	-86,4	-76	6,0E-02	50	14	0
416	-86,4	-63,5	0,0006	25	2	0
416	-86,4	-67	0,0009	25	4	0
416	-86,4	-69,5	0,0013	25	6	0
416	-86,4	-71,5	0,0012	25	8	0
416	-86,4	-74,2	0,004	25	10	0
416	-86,4	-76	0,0057	25	12	0
416	-86,4	-77,5	0,0014	25	14	0