



Andrea Daniela Baldivieso Miranda

**Monitoramento em redes de acesso híbridas
fibra óptica-cabo de cobre**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC–Rio

Orientador: Prof. Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro
Agosto de 2016



Andrea Daniela Baldivieso Miranda

**Monitoramento em redes de acesso híbridas
fibra óptica-cabo de cobre**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Jean Pierre von der Weid

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Ricardo Marques Ribeiro

UFF

Dr. Gustavo Castro do Amaral

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador setorial do Centro

Técnico Científico- PUC Rio

Rio de Janeiro, 03 de Agosto de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Andrea Daniela Baldivieso Miranda

Gradou-se em Engenharia eletrônica na Universidad Privada del Valle - La Paz - Bolivia em 2012. Mestre em Administração de Negócios (MBA) na Escuela Europea de Negocios – La Paz - Bolivia em 2014.

Ficha Catalográfica

Miranda, Andrea Daniela Baldivieso

Monitoramento em redes de acesso híbridas fibra óptica-cabo de cobre / Andrea Daniela Baldivieso Miranda; orientador: Jean Pierre von der Weid. – 2016.

104 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) –Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2016.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Monitoramento de fibra óptica. 3. Monitoramento de cobre. 4. Refletômetria no domínio da frequência (FDR). 5. WDM/SCM-PON. I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Agradecer primeiramente, com todo meu coração ao meu amado Deus por me deixar viver esta experiência de crescimento tanto pessoal como profissional, por me dar de presente esta grande oportunidade, por me deixar abrir os meus olhos além do impossível, nada de isto houvesse sido o que foi sem as suas bênçãos e o seu amor infinito.

Aos meus pais Rosa Iris e Enrique pelo amor, apoio e pela confiança depositada em mim ao longo deste período longe sem importar as fraquezas no caminho, à minha avó Norita por seu amor, sua felicidade, apoio e carinho incondicional, ao meu irmão Fabricio por sempre se sentir orgulhoso dos passos que eu dou.

Agradecida infinitamente ao meu doce amor Rodrigo por toda sua paciência nos momentos difíceis, às vezes longes fisicamente, mas sempre cerca com o coração, obrigada por teu amor sem medida, por me acompanhar nas noites longas de estudo e de trabalho, tenho certeza que este logro não houvesse tido sucesso sem você na minha pequena vida.

Obrigada aos meus colegas e amigos do laboratório Gustavo, Diego, e Luis, pela paciência ao chegar, sempre estiveram disponíveis em todo momento, obrigada vocês pelos conhecimentos compartilhados e pelos ensinamentos aportados para minha pesquisa.

Aos meus queridos amigos que conheci no Brasil, que formaram, formam e formarão parte da minha vida, Tamara, Guille, Daniela D., Daniela A., Carlos B., Luisa, Juan P. Mario, Camila, Elisa, Mauricio N. Jose C., obrigada pelos momentos vividos, e sobre tudo por fazer desta a melhor experiência, os levo sempre no meu coração.

Agradecer ao meu orientador, o Professor Jean Pierre, pela confiança depositada em mim para desenvolver este trabalho, com certeza que esta raiz trairá muitos mais frutos.

Ao todo o pessoal do CETUC, e do departamento da elétrica da PUC-Rio.

À CAPES pelo apoio financeiro e ao governo do Brasil por brindar estas excelentes oportunidades profissionais para os alunos estrangeiros.

Resumo

Miranda, Andrea Daniela; Baldivieso, Von der Weid, Jean Pierre. **Monitoramento em redes de acesso híbridas fibra óptica-cabo de cobre.** Rio de Janeiro, 2016. 104 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento experimental de um método de monitoramento que permite localizar as posições das falhas tanto no enlace da fibra óptica como no cabo de cobre, no contexto de transmissão de sinais de rádio analógicos em redes móveis MFH (*Mobile Fronthaul*) de fibra óptica estendidas por cabos de cobre. O conceito MFH baseia-se na transmissão de sinais de rádio analógicos usando frequências intermediárias para a fibra e para o cabo de cobre e uma unidade de conversão opto/elétrica simples, a fim de utilizar as instalações de cabos de cobre já existentes. O método propõe alocar o sinal de monitoramento varrendo a frequência numa banda determinada a um canal de subportadora óptica. O sinal de monitoramento é utilizado para determinar tanto as características da fibra através do sinal retroespalhado, como também, as características do enlace de cabo de cobre através da técnica de refletometria no domínio da frequência (FDR: *Frequency Domain Reflectometry*). Os resultados mostraram que a técnica de monitoramento híbrido proposta é adequada para as Redes de Rádio Acesso (RAN: *Radio Access Networks*) que utilizam uma arquitetura de multiplexação em comprimento de onda e subportadora WDM/SCM-PON foi usada. O monitoramento da fibra em serviço apresentou uma resolução espacial de 10 m e uma faixa dinâmica de ~9 dB e o monitoramento do cabo apresentou um erro inferior a 1 metro na localização de falhas de ruptura do cabo.

Palavras-chave

Monitoramento de fibra óptica; monitoramento de cobre; Refletometria no domínio da frequência (FDR); WDM/SCM-PON; Redes Ópticas Passivas.

Abstract

Miranda, Andrea Daniela; Baldivieso, Von der Weid, Jean Pierre (Advisor).
Monitoring in hybrid fiber-copper access networks. Rio de Janeiro,
2016. 104 p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica,
Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work shows the experimental development of a monitoring method that allows locate positions of failures in both optical fiber and copper cable links in the context of analogue radio signal transmission over fiber-extended copper mobile fronthaul networks (MFH). The MFH concept is based on transmission of radio signals using unique intermediate frequencies for the fiber and copper cable and a simple optical/electrical conversion unit in order to use existing copper cable installations. The method proposes to allocate the monitoring signal sweeping the frequency in a chosen band to a subcarrier channel. The monitoring signal is used to determine both, the fiber characteristics through the backscattering signal and also the copper cable link characteristics by the Frequency Domain Reflectometry (FDR) technique. The results show that the hybrid monitoring technique is suitable for copper cable-extended radio access network, for which the WDM / SCM-PON technology has been used. In-service fiber monitoring is achievable with a spatial resolution of 10 m and a dynamic range of ~9dB. Open circuit faults in the copper line were localized with better than 1-m accuracy

Keywords

Optical monitoring; copper line monitoring; Frequency Domain Reflectometry (FDR); WDM/SCM-PON; Passive Optical Networks.

Sumário

1 Introdução	19
1.1. Objetivo Geral	21
1.2. Objetivos específicos	22
1.3. Organização da dissertação	24
2 Aspectos Teóricos	25
2.1. Redes Passivas Ópticas PON	25
2.1.1. Arquitetura de redes PON	27
2.1.2. Gerações PON	29
2.1.3. Monitoramento de redes PON	31
2.2. Redes WDM-PON	37
2.3. Arquitetura WDM-PON	38
2.3.1. AWG /DWDM	40
2.3.2. Monitoramento de Redes DWDM	42
2.4. Redes Híbridas de Acesso	45
2.4.1. Características das Redes HFC	46
2.5. Técnicas de caracterização de cabos elétricos	48
2.6. Redes SCM-PON	53
2.6.1. Rádio sobre Fibra (RoF: Radio Frequency Over Fiber)	53
2.6.2. Multiplexação por Subportadora (SCM: Sub Carrier Multiplexing)	55
2.7. Monitoramento de fibra óptica usando multiplexação de subportadoras	64
3 Montagem Experimental	70
3.1. Arquitetura WDM/SCM-PON	70
3.2. Monitoramento da rede de acesso híbrida	73
3.2.1. Monitoramento da fibra óptica	73
3.2.2. Monitoramento do cabo no CuFiC	76
3.3. Monitoramento em serviço	78
4 Resultados Experimentais	80

4.1. Monitoramento da rede de acesso híbrida	80
4.1.1. Monitoramento da fibra óptica	80
4.1.2. Monitoramento do cabo no CuFiC	87
4.2. Impacto do monitoramento em serviço	93
5 Conclusões	99
6 Referências bibliográficas	101

Lista de figuras

Figura 1. Conceito fronthaul. RRH: Radio Remote Head, BBU: Base Band Unit.	20
Figura 2. Construção de uma rede de banda larga. [5]	26
Figura 3. Arquitetura geral de uma rede PON [5]	27
Figura 4. Arquitetura FFTx. [6]	28
Figura 5. Funcionamento básico do OTDR[18]	33
Figura 6. Princípios de operação dos métodos NA-OFDR. [21]	35
Figura 7. Princípios de operação dos métodos I-FMCW. [21]	36
Figura 8. Princípio básico de funcionamento da técnica C-OFDR. [21]	37
Figura 9. Arquitetura simples de uma rede WDM-PON. [22]	39
Figura 10. Espectro típico de um filtro óptico de banda estreita para sistemas DWDM com 100 GHz de espaçamento entre canais. [25]	41
Figura 11. RN baseado na propriedade de comprimento de onda cíclica do AWG, bidirecional e unidirecional. [22]	42
Figura 12. Diagrama de blocos para o monitoramento reutilizando as fontes de downstream. [28]	43
Figura 13. Supervisão utilizando um filtro DWDM. [29]	44
Figura 14. Esquema do OTDR sintonizável. [16]	45
Figura 15. Configuração de uma rede híbrida fibra-coaxial. [33]	46
Figura 16. TDR. A forma de onda de reflexão a partir da extremidade do cabo deve ser um pulso de passo ideal, mas pode-se ver que a forma de onda é distorcida após da reflexão. [15] Distância Vs. Voltagem	49
Figura 17. FDR. O início e o fim do cabo são identificados e aproximadamente uma perda de retorno de 40 dB é observada em 6 e 10 m. [15] Distância Vs. Magnitude	50
Figura 18. Parâmetros S para caracterizar um dispositivo de duas portas (Port 1 e Port 2) [38].	51
Figura 19. Varredura de frequências no analisador de rede. F_{start} é a frequência inicial e F_{stop} é a frequência final. [38]	52
Figura 20. Medição no domínio do tempo e no domínio da frequência usando a transformada Inversa de Fourier (F^{-1}). [38]	53

Figura 21. Conceito básico de RoF. [39]	54
Figura 22. Esquema básico apenas de um canal SCM [40]	56
Figura 23. Esquema básico de SCM.[39]	58
Figura 24. Modulação direta com o Laser. A corrente direta do laser varia de acordo com o sinal modulador, resultando na modulação da potência emitida.	60
Figura 25. Diagrama de blocos da modulação externa para subportadoras. [39]	61
Figura 26. Modulador Mach- Zehnder.	62
Figura 27. Princípio de funcionamento de um modulador de amplitude eletro/óptico Mach- Zehnder.[44]	63
Figura 28 Arquitetura de monitoramento. SCM mux (Multiplexador de Subportadoras), LD:Laser Diode, Circulator: Circulador, R/B: Filtro Vermelho/Azul Monitoring Unit: Unidade de monitoramento, WDM demux: Demultiplexador WDM.[4]	64
Figura 29 Configuração experimental da técnica de monitoramento usando subportadora. [4]	69
Figura 30. Esquema básico da arquitetura WDM/SCM-PON.	70
Figura 31. Arquitetura WDM/SCM-PON detalhada, composto pelo CO e o CuFiC. RF-C: Canal de Rádio frequência, SW: switch, LD: diodo laser, PD: fotodiodo, OC: circulador óptico, IF-d: frequência intermediária downstream, IF-up: frequência intermediária upstream, G ganho. [45]	71
Figura 32. Espectro dos canais DWDM, Downstream e Upstream.	72
Figura 33. Estrutura da transmissão downstream desde o CO e a recepção downstream no CuFiC. SW: switch, RF-C: Canal de rádio frequência.	75
Figura 34. a) CuFiC Downstream e Upstream; b) Esquema de modulação do sinal de monitoramento do cabo.	77
Figura 35. Upstream no CO. Interpretação do Monitoramento do cabo. Low-pass filter (filtro passa baixa), DEMOD (demodulador), FM Radio Receiver (rádio FM), Oscilloscope (osciloscópio).	78
Figura 36. Espectro do canal OFDM gerado pelo Vector Signal Generator VSG.	79
Figura 37. Diagrama de blocos para o processamento do sinal de monitoramento.	81

Figura 38. Curva do monitoramento da fibra no primeiro enlace sem falhas e com falhas.	82
Figura 39. Curva do monitoramento da fibra no segundo enlace, com diferentes intensidades de falhas.	83
Figura 40. Medida de referência do monitoramento feita com o dispositivo OTDR convencional.	83
Figura 41. Curva do monitoramento da fibra do segundo enlace usando o OTDR convencional.	84
Figura 42. Resposta do Laser Mitsubishi. Potencia óptica de saída (mW) Vs. Corrente de bias (mA).	85
Figura 43. Resposta do Laser KAP-10. Potencia óptica de saída (mW) Vs. Corrente de bias (mA).	85
Figura 44. Curva de monitoramento da fibra óptica realizada com o laser Mitsubishi.	86
Figura 45. Curva de monitoramento com o laser Mitsubishi e o KAP-10 apresentando a faixa dinâmica.	87
Figura 46. Configuração para obter medidas de referência de seis diferentes comprimentos de cabo com o NA. L: comprimento.	88
Figura 47. Medidas de referência do parâmetro S_{11} obtidas pelo Analisador de rede para os seis diferentes trechos de cabo em teste (a)-(f).	89
Figura 48 FFT dos sinais de monitoramento do cabo, em ordem de menor a maior comprimento a)-f). Relação pontos/Hz.	91
Figura 49. Resultados do monitoramento do cabo para diferentes trechos, em ordem de menor a maior comprimento (a) – (f).	92
Figura 50. Espectro do sinal recebido no VSA.	94
Figura 51. Constelação e EVM do sinal de dados recebido no VSA com o monitoramento desligado.	95
Figura 52. Constelação e EVM do monitoramento em serviço.	95
Figura 53. Diagrama de blocos do setup experimental da arquitetura WDM/SCM-PON para o monitoramento em serviço.	96
Figura 54. Curva do EVM Vs. Amplitude pico do canal OFDM.	96
Figura 55. Valor do EVM e constelação 64-QAM adquirida do sinal recebido no VSA com o monitoramento desligado.	97
Figura 56. Valores do EVM e a constelação 64-QAM adquirida do sinal recebido no VSA com o monitoramento ligado.	98

Lista de tabelas

Tabela 1. Quadro de ações da pesquisa.	23
Tabela 2. Características de redes PON.	30
Tabela 3. Benefícios e limitações da fibra óptica e do cabo coaxial como meio de acesso.	47
Tabela 4. Parâmetros de configuração do Network Analyzer.	73
Tabela 5 Resultados de referência do monitoramento do cabo usando o NA.	89
Tabela 6. Comparação das medidas obtidas para o monitoramento do cabo.	93

*Conozca todas las teorías, domine todas las técnicas,
pero al tocar un alma humana sea apenas otra alma
humana.*

Carl G. Jung

Lista de acrônimos

10GE PON	10 Gigabit EPON
ADSL	Asymmetric digital subscriber line
AM	Amplitude Modulation
AM-VSB	Amplitude Modulation- Side Bands
a-MFH	Analogue Mobile Fronthaul
APON	ATM PON
ASK	Amplitude Shift Keying
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BBU	Base Band Unit
BER	Bit Error Rate
BPON	Broadband PON
CATV	Cable Television
CO	Central Office
C-OFDR	Coherent Optical Frequency-Domain Reflectometry
C-OTDR	Coherent Optical Time-Domain Reflectometry
CPRI	Common Public Radio Interface
CRN	Coherent Rayleigh Noise
CW	Continuous Wave
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
CuFiC	Copper-Fiber Converter
d-MFH	Digital- Mobile Fronthaul

DT	Deutsche Telecom
DU	Digital Unit
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EFM	Ethernet First Mille
EPON	Ethernet PON
EVM	Error Vector Magnitude
FDR	Frequency Domain Reflectometry
FFT	Fast Fourier Transform
FTTB/C	Fiber To The Building/Curb
FTTCab	Fiber To The Cabinet
FTTH	Fiber To The Home
FTTx	Fiber To The x
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Networks
HDTV	High Definition TV
HFC	Hybrid fiber-coaxial
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Intermediate Frequency
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
I-FMCW	Incoherent Frequency
I-OFDR	Incoherent- Optical Frequency Domain Reflectometry
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution- Advanced
MFH	Mobile Fronthaul

NA-OFDR	Network Analise Optical Frequency Domain Reflectometry
NG-PON1	Next Generation Passive Optical Networks 1
NG-PON2	Next Generation Passive Optical Networks 2
NMS	Network Management Station
OBT	Optical Backend Terminal
ODN	Optical Distribution Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
OSW	Optical Switching Wavelength
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer
PON	Passive Optical Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of service
RAN	Radio Access Networks
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RIN	Relative Intensity Noise
RMS	Root Mean Square
RN	Remote Node
RoF	Radio over Fiber
RU	Radio Unit

SCM	Subcarrier Multiplexing
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
TDM	Time Division Multiplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TDM-PON	Time Division Multiplexing PON
TLS	Tunable Laser Source
T-PC-OTDR	Tunable Photo Counting-OTDR
VCO	Voltage Control Oscillator
VSA	Vector Signal Analyzer
VSG	Vector Signal Generator
WDM-PON	Wavelength-Division Multiplexed PON
xDSL	Digital Subscriber Line
XG-PON	10 Gigabit-capable PON

1

Introdução

Desde o início dos anos 70, o papel das comunicações móveis tem evoluído desde aplicações de voz para pessoas privilegiadas em empresas e administrações até tornar-se um serviço onipresente com grande relevância na vida social e de negócios em todo o mundo.

Essa transição foi possível graças a uma série de inovações e da introdução de novas tecnologias, como 2G, 3G, 4G LTE e LTE-A.

As operadoras de telefonia móvel para atualizar suas redes 4G precisaram adotar o novo conceito de *fronthaul*. Isto criou uma oportunidade de mercado para os fornecedores de trancetores ópticos que pode chegar a valer quase um bilhão de dólares ao longo dos próximos cinco anos, de acordo com a pesquisa da empresa de análise *LightCounting*. [1]

O conceito de MFH (*Mobile Fronthaul*) baseia-se numa estação base móvel que contém uma unidade de banda base (BBU: *Baseband Unit*) também chamada unidade digital (DU: *Digital Unit*), a qual processa os dados de usuário e de controle, e uma unidade de rádio frequência (RU: *Radio Unit*), que gera o sinal de rádio que é transmitido pela antena. Cerca de mais de uma década atrás, as operadoras móveis perceberam que, se pudessem separar essas funções, eles poderiam mover a unidade de rádio até a torre para economizar espaço e a potência na cabine. A RU, em seguida, torna-se uma unidade de rádio remoto (RRH) e o equipamento, uma estação base distribuída. O enlace resultante entre as duas unidades (BBU e RRH) é chamado *fronthaul* como se mostra na Figura 1. Há mais de dez anos, a interface interna entre RU e DU tem-se definido como o resultado da digitalização do sinal de rádio de acordo com a Interface de Rádio Pública Comum (CPRI: *Common Public Radio Interface*) [2].

Com o desenvolvimento do conceito redes de rádio acesso na nuvem, do inglês C-RAN (*Cloud-Radio Access Network*), C mantém-se centralizado e obtém vantagens de alongamento da interface CPRI localizando as DUs correspondentes a um número de células num lugar comum, tipicamente no escritório central, do

inglês *Central Office* (CO), onde geralmente existe uma DU por cada tecnologia de rádio acesso (RAT) (2G, 3G, LTE e LTE-A) [3].

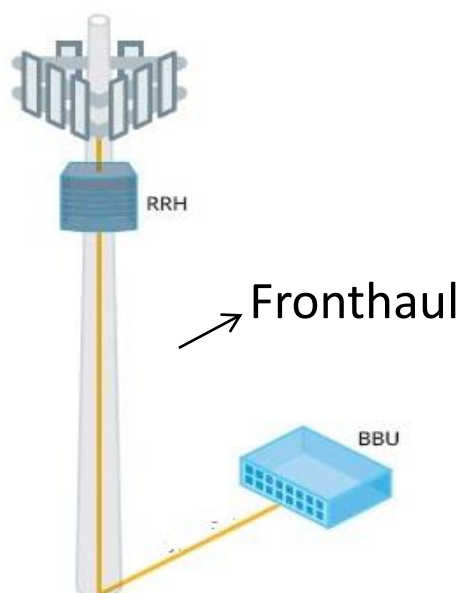


Figura 1. Conceito fronthaul. RRH: Radio Remote Head, BBU: Base Band Unit.

A tecnologia RAN necessita evoluir para atender as demandas das novas tecnologias emergentes da 5ª geração de comunicação móvel (5G), isso inclui: suportar volume de dados 1000 vezes maior, dezenas de bilhões de dispositivos móveis conectados, atingir taxas de dados de usuários de 10 a 100 vezes maiores, 10 vezes mais vida da bateria, e reduzir a latência em um fator de cinco. [4].

O MFH de fibra óptica admite duas concepções essencialmente diferentes: MFH digital (d-MFH) e MFH analógico (a-MFH). O d-MFH é o que suporta melhor a interface de rádio pública comum CPRI, mas a tecnologia 5G coloca a CPRI de fibra óptica num desafio de altas taxas de bit de operação podendo trazer de volta a tecnologia de transmissão analógica de rádio sobre fibra (a-RoF).

Com relação à tecnologia aplicada para a infraestrutura de MFH, as redes ópticas passivas PON (*Passive Optical Network*) são uma opção potencialmente atrativa para o transporte da interface CPRI em áreas com tráfego elevado, em que a implantação de células de dimensões pequenas é mais fácil de ocorrer; as redes WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexing-PON*) também oferecem uma boa

combinação de características para o transporte da interface CPRI, aumentando a capacidade, maximizando o uso da fibra e reduzindo ao mesmo tempo os custos de equipamento.

O desenvolvimento de novas arquiteturas e tecnologias de transmissão aumenta as expectativas das operadoras para reduzir os custos operacionais das soluções futuras. Juntamente com WDM-PON, a tecnologia de multiplexação por subportadora SCM (*Sub-Carrier Multiplexing*) pode utilizar eficientemente o espectro óptico e oferecer grande capacidade, sendo uma opção viável para transmitir sinais analógicos de rádio frequência em uma maneira custo-eficiente.

Nas redes de acesso, muitas vezes a terminação frontal da rede corresponde ao legado de instalações de cabo de cobre conectado às antenas de rádio RH (*Radio Head*) para a distribuição sem fio do sinal ao usuário. Com a chegada de C-RAN, onde a tendência é centralizar grande parte dos recursos da rede de acesso, o alcance de tal legado de cabo não é suficiente. Neste caso, a fibra óptica torna-se essencial para estender o enlace *fronthaul* da rede (entre DU e RU), a qual, em conjunto com o legado de cabos de cobre e um conversor de mídia, constituiria um enlace híbrido.

Para reduzir mais ainda os custos operacionais envolvidos na distribuição de sinais analógicos do *fronthaul* híbrido, é interessante que seja possível que o CO monitore todo o enlace.

O monitoramento de fibra em redes SCM-PON foi abordado em [4], no contexto de Rádio sobre Fibra (RoF).

Neste trabalho, será desenvolvido experimentalmente um método de monitoramento híbrido em redes de rádio acesso fibra óptica/cobre, apresentando o conceito de um nó de distribuição elétrica que chamaremos de CuFiC (Conversor cobre-fibra) que alimenta múltiplas antenas de rádio (RHs) compatível com a arquitetura WDM/SCM-PON a fim de oferecer e garantir qualidade de serviço (QoS) constante ao usuário além de custos reduzidos para o operador.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é realizar o monitoramento híbrido em redes de acesso de fibra óptica estendidas por cabo de cobre, a fim de localizar a

posição das falhas em ambos os enlaces. O monitoramento deve ser feito de forma precisa e oportuna, garantindo um serviço constante ao usuário.

1.2. Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, é possível estabelecer os objetivos específicos para alcançar os resultados desejados do trabalho.

- Montar uma interface opto/elétrica remota simulando o nó de distribuição elétrica do sinal (CuFiC) compatível com WDM/SCM-PON.
- Realizar o monitoramento no enlace de fibra óptica usando a técnica de multiplexação por subportadora (SCM) como é proposto na referência [4] que titula: *Fiber Monitoring using a Subcarrier Band in a Subcarrier Multiplexed Radio-over-Fiber Transmission System for applications in Analog Mobile Fronthaul* e encontra-se descrito no Capítulo 2.
- Usar um sistema de monitoramento convencional baseado na técnica de reflectometria com OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*); para caracterizar a fibra de teste fornecendo resultados a serem comparados com os obtidos pelo método de monitoramento proposto.
- Realizar o monitoramento do cabo de cobre no CuFiC usando a técnica FDR (*Frequency Domain Reflectometry*).
- Caracterizar diferentes comprimentos de cabo de cobre com um Analisador de Rede (NA: *Network Analyzer*) com o fim de obter medidas de referência FDR a serem comparadas com os resultados obtidos pelo método FDR proposto.
- Avaliar e qualificar o impacto do monitoramento na transmissão de dados (*in service monitoring*) através da medição do EVM (*Error Vector Magnitude*).

Tabela 1. Quadro de ações da pesquisa.

Objetivo específico	Ações
Montar uma interface opto/elétrica remota simulando o nó de distribuição elétrica do sinal (CuFiC) compatível com arquitetura WDM/SCM-PON.	<ul style="list-style-type: none"> • Montar o setup da arquitetura WDM/SCM-PON. • Montar o setup do nó de distribuição elétrica do sinal que seja compatível com a arquitetura WDM/SCM-PON.
Realizar o monitoramento no enlace de fibra óptica usando a técnica de multiplexação por subportadora (SCM) como é proposto na referência [4].	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar os parâmetros do sinal de monitoramento usando um canal de subportadora SCM no Analisador de Rede (NA). • Gerar o sinal de monitoramento SCM no escritório central CO. • Realizar o monitoramento da fibra com o NA em dois diferentes enlaces de fibra óptica. • Adquirir no NA e processar os dados.
Usar um sistema de monitoramento convencional baseado na técnica de reflectometria com OTDR, para caracterizar a fibra de teste fornecendo resultados a serem comparados com os obtidos pelo método de monitoramento proposto.	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar os dois enlaces de fibra óptica de teste utilizados no ponto anterior com um dispositivo OTDR convencional. • Obter e processar os dados. • Comparar os resultados obtidos pela técnica de reflectometria OTDR com os obtidos pelo método de monitoramento proposto.
Realizar o monitoramento do cabo de cobre no CuFiC usando a técnica FDR.	<ul style="list-style-type: none"> • Gerar o sinal de monitoramento SCM no NA. • Medir a potência óptica que chega ao fotodetector para garantir a recepção do sinal de monitoramento no lado de <i>downstream</i>. • Realizar o monitoramento do cabo de cobre usando o canal de subportadora SCM no CuFiC, usando a técnica FDR. • Enviar o sinal de monitoramento ao CO pelo canal de <i>upstream</i>. • Adquirir e processar os sinais recebidos. • Caracterizar diferentes comprimentos de cabo de cobre com o NA com o fim de obter medidas de referência FDR a serem comparadas com os resultados obtidos pelo método FDR proposto.
Avaliar e qualificar o impacto do monitoramento na transmissão de dados (<i>in service monitoring</i>) através da medição do EVM (<i>Error Vector Magnitude</i>).	<ul style="list-style-type: none"> • Usar um canal SCM para o monitoramento. • Usar um canal SCM para a transmissão de dados. • Determinar a frequência central e a amplitude do canal OFDM no Gerador Vetorial de Sinais VSG. • Realizar a transmissão de dados e o monitoramento em serviço. • Recepcionar os sinais num Analisador Vetorial de Sinais VSA. • Medir o EVM e obter a constelação 64-QAM do sinal em ambos os casos.

1.3.

Organização da dissertação

Este trabalho está dividido em 5 capítulos de acordo com as etapas desenvolvidas na pesquisa. Tem-se o capítulo introdutório no Capítulo 1, seguido do Capítulo 2, onde se apresentam os aspectos teóricos, produtos de uma revisão da literatura referente aos tópicos da pesquisa.

No Capítulo 3, é apresentada a montagem experimental da rede WDM/SCM-PON, e a montagem do nó de distribuição elétrica (CuFiC) compatível com a arquitetura WDM/SCM-PON. O Capítulo 4 consiste na apresentação e análise dos resultados obtidos de acordo com a montagem experimental do Capítulo 3. E finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões que representam a síntese do conhecimento e dos resultados obtidos ao longo da pesquisa e se apresentam também as recomendações para os futuros trabalhos.

2

Aspectos Teóricos

No desenvolvimento deste capítulo será apresentada uma breve revisão da literatura necessária para abordar as características, a arquitetura e a evolução das redes PON. Da mesma forma, será apresentada uma revisão das redes WDM-PON, os dispositivos de multiplexação que são usados e as principais técnicas de monitoramento. Aspectos teóricos e os diferentes tipos da técnica de multiplexação de subportadora SCM em redes PON também serão apresentados. Finalmente, será apresentada a descrição de uma rede híbrida (HFC) de acesso, as suas características, vantagens e limitações.

2.1.

Redes Passivas Ópticas PON

Quando se fala de redes de dados ou telefonia, os conceitos de *core*, distribuição, alimentação, e acesso podem ter diferentes enfoques em função da arquitetura de uma rede.

Na Figura 2 pode se observar uma rede de dados banda de larga, onde a rede de aceso está composta pela rede de alimentação e de distribuição. O *Central Office* e os nós de acesso são parte da rede de alimentação os quais alimentam os nós remotos RN (*Remote Node*) para sua posterior distribuição ao usuário.

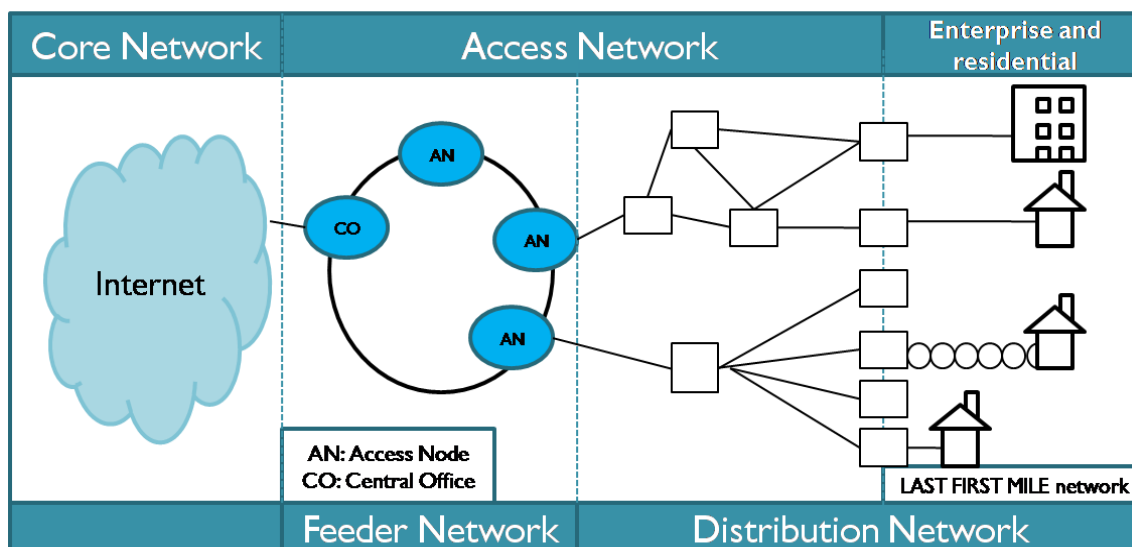


Figura 2. Construção de uma rede de banda larga. [5]

Do ponto de vista de redes de acesso, uma rede de acesso óptica passiva PON (*Passive Optical Network*) tem como o ponto inicial o OLT (*Optical Line Termination*), e como o ponto final o ONU (*Optical Network Unit*). Cabe mencionar que o ponto inicial OLT também é chamado de CO (*Central Office*) sigla que será usada ao longo deste trabalho.

A rede óptica passiva PON é apenas uma das várias tecnologias de acesso utilizada pelo serviço de prestadores, e goza de uma posição dominante no mercado de acesso. A idéia de uma rede PON é usar componentes passivos, os quais não precisam de alimentação elétrica desde a transmissão até a recepção, o que permite a eficiência de custos.

A PON leva sinais no domínio óptico, onde o CO envia todo o tráfego por uma fibra até o RN onde um dispositivo passivo de distribuição é usado para distribuir e separar os sinais até os pontos finais ONUs próximos aos usuários finais.

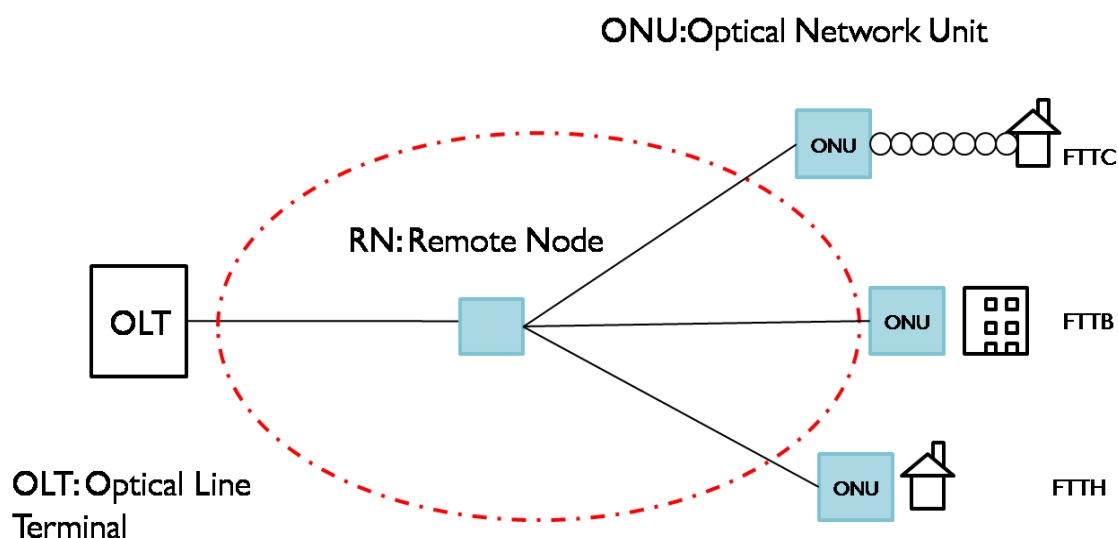


Figura 3. Arquitetura geral de uma rede PON [5]

A PON caracteriza-se por uma topologia física de difusão onde todas as ONUs recebem o sinal completo. A separação que vai dirigi-lo aos usuários é feita nas ONUs, onde os mecanismos de multiplexação de sinais usados são TDM (*Time Division Multiplexing*) e WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).

Para a multiplexação, dois tipos de componentes podem ser usados, no caso de uma rede TDM-PON o dispositivo de distribuição será um separador/combinador e para uma rede WDM-PON, são usados dispositivos AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) os quais separaram os comprimentos de onda e encaminham-nos em diferentes fibras. Na direção *upstream* (ONU-CO), os comprimentos de onda são combinados numa única fibra para o CO.

2.1.1. Arquitetura de redes PON

A rede de acesso PON pode ter uma arquitetura de rede ponto-multiponto ou ponto-ponto e pode ser classificada de acordo com o modelo físico FTTx.

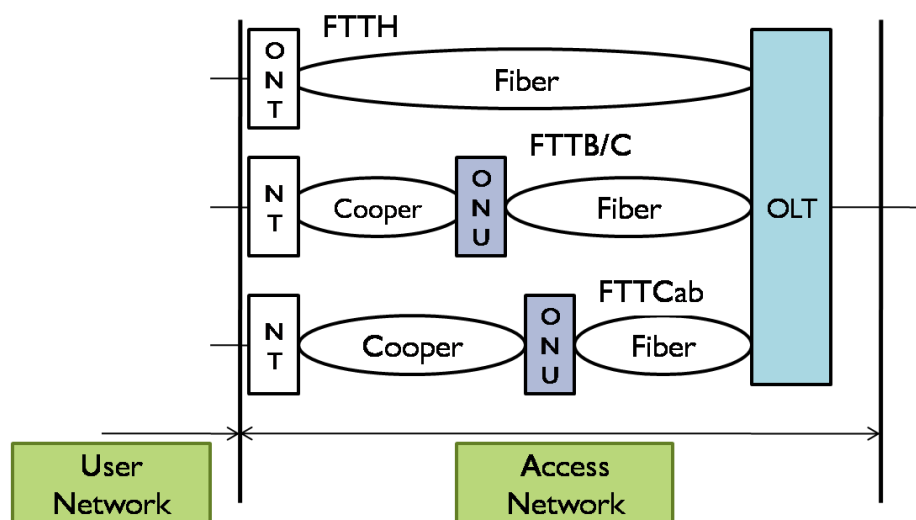


Figura 4. Arquitetura FTTx. [6]

FTTx é um termo utilizado para designar arquitetura de redes de acesso de alto desempenho, que conectam os usuários a um ponto central, mais conhecido como nó de acesso. Usualmente essa rede FTTx se conecta a uma grande quantidade de usuários, tais como: residências; prédios; empresas; ERBs.

- FTTH (Fiber To The Home), a rede de acesso é composta por uma fibra óptica que vai diretamente até a residência. Neste caso podem ser consideradas ONUs interiores, para ter condições ambientais mais favoráveis. A manutenção desta arquitetura é fácil, considerando que todas as instalações são somente de fibra e, portanto são mais confiáveis que os sistemas mistos de fibra e cobre.
- FTTB/C (Fiber To The Building/Curb), a fibra vai até o prédio/esquina.
- FTTCab (Fiber To The Cabinet), a ONU se localiza em um armário de distribuição usualmente fixado no poste de telefonia ou de energia elétrica. Sua distribuição é feita através de VDSL2 ou ethernet para o usuário, utilizando cabo coaxial ou par de cobre.
- Nesta configuração é importante mencionar a existência de redes Híbridas de Acesso HFC (*Hybrid Fiber Coaxial*) as quais utilizam a fibra e o cabo como o meio de transmissão, tal arquitetura é usada pelas operadoras de CATV.

- Tanto para FTTB/C e FTTCab são considerados serviços de banda larga assimétricos (internet, telemedicina, serviços de largura de banda digitais entre outros) e serviços simétricos (telecomunicação para pequenos clientes comerciais, teleconsulta, etc.).

2.1.2. Gerações PON

Com o passar do tempo, diferentes padrões de redes PON foram surgindo; no ano 1999 na recomendação ITU-T G.983 [6], foi especificada a BPON (*Broadband Passive Optical Network*) uma rede PON com 155 Mbit/s simétricos e 622/155 Mbit/s assimétricos conhecida também como ATM PON (*Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network- APON*).

Por usar ATM a BPON oferece grande qualidade de serviço (QoS) e é capaz de integrar voz, dados e vídeo a clientes empresariais ou residenciais por uma única fibra de acordo com as diferentes configurações da arquitetura FTTx.

Pelo fato da arquitetura APON não ter capacidade suficiente para atender a transmissão de vídeo e apresentar um alto custo de implementação, no ano 2004 o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) apresentou o padrão IEEE 802.3ah [7] EPON (*Ethernet Passive Optical Network*) que tem como objetivo usar a Ethernet na primeira milha (*EFM: Ethernet First Mile*) para a rede de acesso ao usuário. A diferença entre a EPON e a BPON é que a EPON transporta os dados em pacotes de até 1.5018 bytes [8] o que permite grande eficiência no tratamento de tráfego IP. A rede EPON provê taxas de transmissão de 1 Gbit/s nos dois sentidos.

GPON, (*Gigabit Passive Optical Network*) surgiu como a idéia de superar as taxas de transmissão nas redes de acesso de BPON e EPON. No ano 2008 foram publicados os primeiros padrões ITU- G.184.1 [9] para GPON. A rede garante grande eficiência no transporte de dados IP: as taxas de transmissão nominais são 1.25 Gbit/s e 2.5 Gbit/s para downstream e 155 Mbit/s, 622 Mbit/s, 1.25 Gbit/s, 2.5 Gbit/s para upstream. No mesmo contexto, tem-se uma nova segunda geração de GPON denominada X-GPON (10GPON) [10], esta rede é capaz de transmitir até 10 Gbit/s de downstream e 2.5 Gbit/s de upstream para X-GPON 1 e 10Gbit/s

simétrico para X-GPON 2. Tais tecnologias são capazes de incrementar a densidade de usuários.

A seguir é apresentada uma tabela, que resume as características importantes das diferentes redes PON descritas anteriormente.

Tabela 2. Características de redes PON.

CARACTERÍSTICAS		APON/BPON	EPON	GPON	XG-PON
Padrões		ITU-T G.983	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984	ITU-T G.987
Protocolo		ATM	Ethernet	ATM, Ethernet	ATM, Ethernet
Capacidade de transmissão	Downstream	622 Mbit/s	1.25 Gbit/s	2.4 Gbit/s	10Gbit/s
	Upstream	155/622 Mbit/s	1.25 Gbit/s	1.2 Gbit/s 2.4 Gbit/s	2.5 Gbit/s ou 10Gbit/s
Tamanho dos pacotes de dados		53 bytes	64 bytes - 1518 bytes	53 bytes- 1518 bytes	53 bytes- 1518 bytes
Meio de Acesso		TDM	TDM	TDM	TDM
Comprimento de onda (nm)	Downstream	1480-1500	1480-1510	1480 ou 1500	1550-1580
	Upstream	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1280
	Video RF	1500	1550	1550	1550
Alcance (km)		20	10/20	20	≥20

Devido ao crescimento exponencial da largura de banda, a capacidade das redes ópticas de acesso tem que aumentar no mesmo ritmo. Por isso, no ano 2010, a IEEE padronizou 40 e 100 Gbit/s Ethernet na especificação IEEE 802.3ba [11].

Para o futuro, encontra-se o estudo e desenvolvimento da Ethernet de altíssima velocidade 400 Gbit/s e 1Tbit/s [12], onde, atualmente algumas operadoras têm anunciado as provas em conjunto com diferentes provedores para a calibração das suas redes com a chegada de 400Gb/s Ethernet. Entre algumas se mencionam KPN, *NTT DoCoMo*, *France Telecom (FT)*, *Deutsche Telekom (DT)*, *AT&T* e *Sprint* [12]. Estes novos padrões levaram ao estudo de novas gerações PON como a denominada X-PON III (N-GPON 3) onde espera-se dois desenvolvimentos 40G/100G PON (TDM) e 10G PON (WDM) [13].

Não é possível ter uma predição certa da evolução das redes de acesso PON além do ano 2025, já que a maior parte dos componentes ainda não se encontra disponível. No entanto, acredita-se que PON pode-se basear na alocação dinâmica do comprimento de onda, baseada na tecnologia híbrida WDM / TDM. Esta evolução é denominada N-GPON 4. [13]

2.1.3. Monitoramento de redes PON

O monitoramento numa rede de acesso é altamente necessário para que possam ser detectadas e localizadas as falhas. A localização precisa a identificação de quebras, e a avaliação de certos eventos como perdas devido às curvas da fibra, emendas e conectores é fundamental para manter o sinal íntegro ao longo da rede.

Numa rede de acesso, as falhas que ocorrem na camada física podem gerar o corte do serviço, ou um serviço intermitente, ocasionando perdas econômicas no caso das operadoras e a insatisfação no caso do usuário; devido a estes problemas, as operadoras procuram um sistema de monitoramento para a camada física que ofereça um serviço diferenciado e uma qualidade de serviço garantida (QoS).

As redes ópticas passivas PON estão cada vez mais difundidas como redes de acesso de banda larga. Devido a sua importância, tais redes necessitam de monitoramento constante. Para que uma técnica de supervisão de redes PON possa ser utilizada deve atender idealmente aos seguintes requisitos gerais [14]:

- Fornecer uma supervisão contínua, centralizada, e rentável da camada física da rede.

- É necessária uma detecção rápida e precisa da degradação do sinal e a interrupção do serviço.
- Prover de forma inequívoca a localização da falha.
- Não deve afetar o tráfego normal de dados.
- Tem que distinguir entre uma falha no equipamento do usuário final e uma falha na rede do operador. Os resultados da supervisão têm que ser encaminhados para o NMS (*Network Management Station*), onde esse os avalia em detalhes, permitindo as contramedidas preventivas (como a restauração, isolamento ou troca de equipamento).
- Tem que ter interoperabilidade com as muitas variáveis da rede (taxa de bits, protocolo, distância, etc.).

Diversas técnicas têm sido empregadas para supervisão de redes ópticas PON, dentre elas as que utilizam reflectometria possuem destaque. As técnicas de reflectometria são utilizadas para a detecção de falhas provendo uma maior visibilidade da camada física da rede, além de reduzir o tempo de restauração da rede sem serviço, pois oferecem baixo custo, em comparação com outros métodos, e não exigem a intervenção na residência do usuário [15], [16].

Na recomendação ITU-T L.53 [17] descreve-se os critérios de manutenção de fibras ópticas para as redes de acesso com topologia ponto-multiponto onde se recomenda o uso de técnicas baseadas no OTDR.

2.1.3.1.

Técnicas de reflectometria para monitoramento de redes PON

Uma característica importante da técnica de reflectometria é o acesso a apenas uma extremidade da fibra. A seguir se apresenta as características das técnicas de reflectometria OTDR e OFDR.

Reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR)

O Refletômetro Óptico no Domínio do Tempo é um equipamento muito utilizado para realizar a caracterização de enlaces ópticos. Baseado na luz retroespalhada, o OTDR é capaz de medir indiretamente a atenuação sobre um

enlace de fibra óptica sendo necessário o monitoramento sobre apenas uma das entradas do enlace. Sendo assim, ele pode ser utilizado para uma supervisão centralizada.

Na Figura 5 é mostrado um diagrama de blocos do funcionamento do OTDR que é explicado a seguir:

O funcionamento do OTDR começa no processador de sinais, onde este ativa um gerador de pulsos elétricos ao mesmo tempo em que liga um cronômetro interno. O gerador de pulsos modula o laser do OTDR que envia a luz por um circulador. A luz é transmitida para a fibra de teste onde as imperfeições desta causam o espalhamento da luz em muitas direções. Uma pequena parte da luz volta na direção do circulador e posteriormente chega ao fotodetector. Logo o sinal é amplificado, digitalizado e processado. Dado que o OTDR só mede o tempo de voo do sinal, ele utiliza o índice de refração da fibra para calcular a velocidade da luz no meio e a distância na qual cada evento acontece. Além disso, a luz retroespalhada no OTDR experimenta uma viagem de ida e volta, ou seja, demora o dobro do tempo para chegar ao fotodetector e o pulso experimenta o dobro de atenuação. Todos estes fatos são tomados à conta no momento de realizar o gráfico da atenuação em função da distância percorrida pela luz. [18]

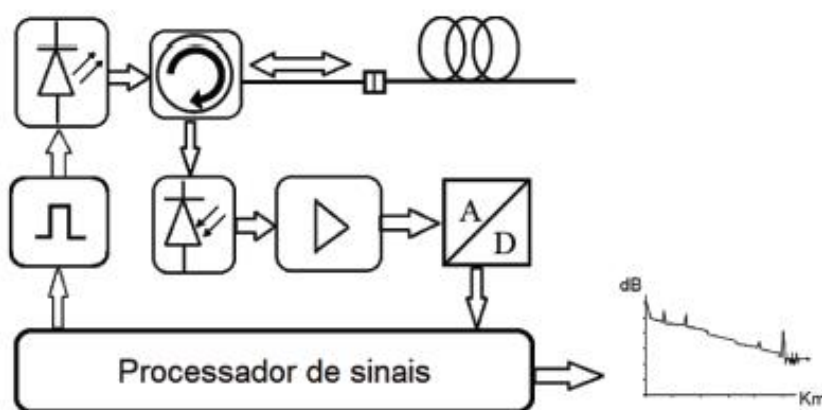


Figura 5. Funcionamento básico do OTDR[18]

Reflectometria óptica no domínio da Frequência (OFDR)

Diferentemente da técnica OTDR, esta é uma técnica de alta resolução e de grande dinâmica porém de curto alcance, por isso, é utilizada para caracterização de pequenos enlaces ou dispositivos ópticos com alguns metros de comprimento de fibra.

A técnica de reflectometria óptica no domínio da frequência OFDR consiste em analisar o batimento produzido pela interferência entre uma reflexão de referência e o sinal refletido ou retroespalhado vindo de vários pontos da fibra em teste, quando a frequência do laser é varrida linearmente. É feita uma análise de Fourier do sinal de batimento gerado, o que permite a visualização de picos de intensidade correspondentes a certas frequências.

Devido à forma de modulação do laser, cada frequência corresponde a um ponto distinto no dispositivo testado. Dessa forma, analisa-se o que ocorre em cada ponto da fibra.

Na técnica de reflectometria OFDR são considerados dois grupos: OFDR coerente (C-OFDR) e OFDR incoerente (I-OFDR) onde por sua vez o método I-OFDR é dividido em dois métodos: o *Network Analysis* OFDR (NA-OFDR), e o *Incoherent Frequency Modulated Continuous Wave* (I-FMCW), que serão explicados em mais detalhes a seguir:

a) I-OFDR

A técnica de detecção de reflectometria óptica no domínio da frequência incoerente ou detecção direta é equivalente à medida do OTDR convencional pulsado.

Neste método, uma portadora óptica (sinal de prova) de onda contínua CW é modulada em intensidade por uma amplitude constante de um sinal RF cuja frequência muda periodicamente durante um intervalo de frequências, seja por passos (em inglês *step-frequency method*) [19] ou continuamente (em inglês *sweep frequency method*) [20] e em seguida este sinal é lançado na fibra em teste. Os sinais ópticos por espalhamento Rayleigh são detectados, e processados num analisador de sinais para obter a resposta em frequência da fibra. A função de transferência é obtida medindo a magnitude e a fase do sinal refletido em cada frequência de teste.

O grupo de métodos incluindo o método de *step frequency* e *sweep frequency* [21] são globalmente conhecidos por NA-OFDR Network Analysis OFDR, como se mostra na Figura 6.

A refletividade óptica versus a distância é obtida por meio da transformada de Fourier da resposta em frequência ajustando o eixo do tempo com a velocidade da luz para representar a distância.

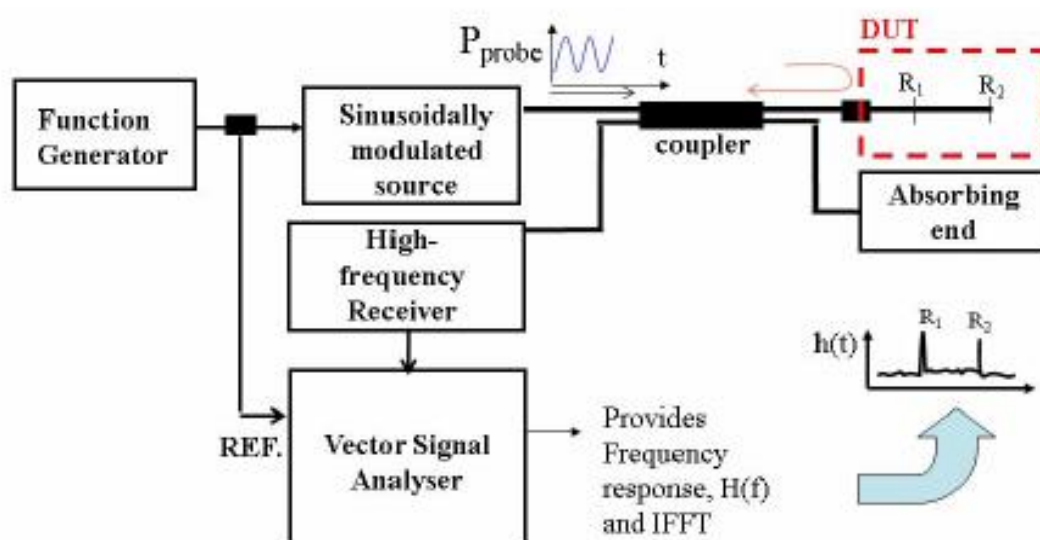


Figura 6. Princípios de operação dos métodos NA-OFDR. [21]

No segundo grupo (I-FMCW), o sinal modulador RF é varrido linearmente em frequência e o sinal de teste detectado é mixado com o sinal modulador RF no domínio elétrico como é apresentado na Figura 7.

O sinal resultante que contém a mistura de produtos pode ser observado num analisador de espectro elétrico. Conhecendo a velocidade da luz e a rampa de frequências o eixo do tempo pode ser convertido em distância. [21]

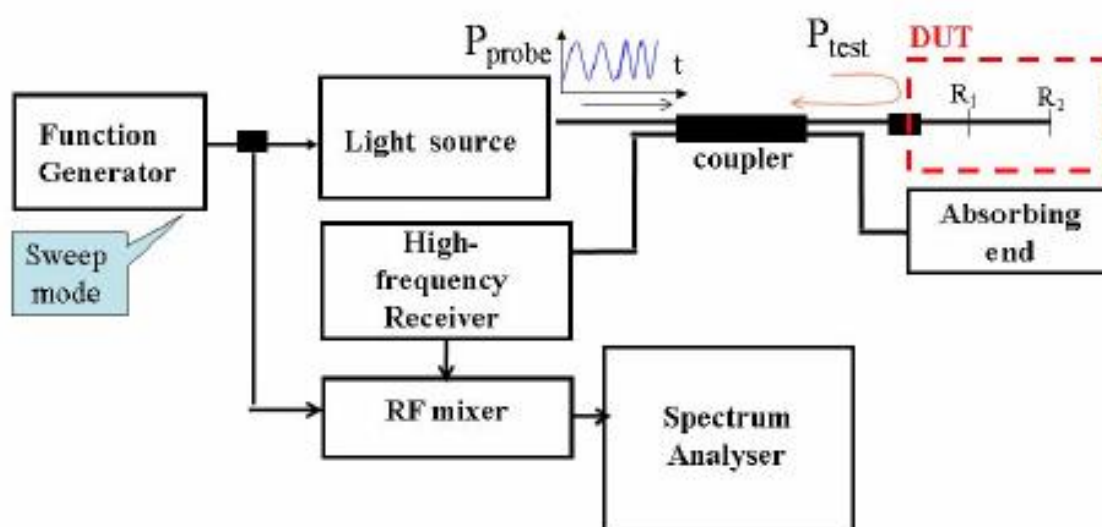


Figura 7. Princípios de operação dos métodos I-FMCW. [21]

b) C-OFDR

A reflectometria óptica coerente no domínio da frequência tem o potencial de ser uma técnica de reflectometria de alta sensibilidade provendo resoluções espaciais de até 100µm [18]. Esta técnica é muito similar à técnica I-OFDR, mas em vez de modular a intensidade óptica, o campo óptico da portadora óptica é usado como o sinal de teste.

Na Figura 8 mostra-se de forma esquemática como funciona a técnica. O sinal de interferência é obtido com um interferômetro de Michelson [21]. A frequência óptica de um laser é linearmente varrida e acoplada na porta de entrada 1 de um acoplador dividindo o sinal em dois. A reflexão Fresnel do conector da porta 4 dá a reflexão de referência (oscilador local) e a porta 2 é acoplada ao dispositivo que se quer testar. Os sinais refletidos pela referência e pelo dispositivo são combinados na porta 3 e o sinal de interferência produzido por eles é analisado em um analisador de espectros de transformada rápida de Fourier (FFT).

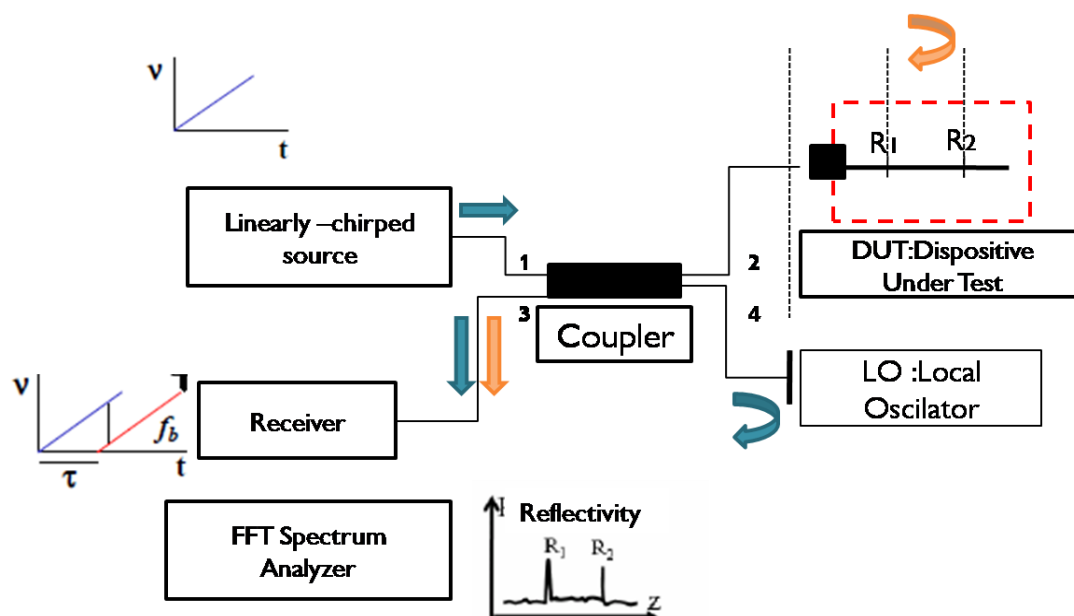


Figura 8. Princípio básico de funcionamento da técnica C-OFDR. [21]

Devido à linearidade da varredura de frequências, o sinal de batimento gerado é proporcional à distância entre o oscilador local e o ponto de reflexão no dispositivo, enquanto a intensidade da reflexão é dada pelo quadrado da amplitude do sinal de batimento, que é proporcional ao campo elétrico da luz refletida. A análise de Fourier do sinal de batimento permite a visualização de vários picos em frequências de batimento distintas, as curvas obtidas são similares às obtidas com a técnica de OTDR, com a diferença da escala ser em frequência ao invés de tempo.

C-OFDR tem um problema em lidar com longas distâncias de medição. O alcance de medição é limitado pelo comprimento de coerência da fonte de luz ajustável. [21]

2.2. Redes WDM-PON

Embora a rede PON ofereça maior largura de banda do que as redes de acesso à base de cobre tradicionais, houve a necessidade de aumentar ainda mais a largura de banda da rede PON empregando a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), de modo que os múltiplos comprimentos de onda

possam ser suportados em uma ou em ambas as direções *downstream* e *upstream*. Tal PON é conhecida como WDM-PON.

2.3. Arquitetura WDM-PON

As redes tradicionais TDM-PON combinam a alta capacidade fornecida pela fibra óptica com o baixo custo de instalação e manutenção de uma infraestrutura passiva. A portadora óptica é compartilhada por meio de um divisor passivo entre todos os assinantes. Como consequência, o número de ONUs é limitado por causa da atenuação do divisor e da taxa de bits de trabalho dos transceptores no CO e nas ONUs. Especificações atuais permitem para 32 ONUs uma distância máxima de 20 km a partir do OLT e para 64 ONUs uma distância máxima de 10 km da OLT. A solução WDM-PON oferece escalabilidade já que pode suportar vários comprimentos de onda sobre a mesma fibra, é inerentemente transparente para a taxa de bits do canal, e não sofre perdas da divisão. [22]

Uma rede WDM-PON emprega um comprimento de onda do OLT para cada ONU (cada uma das direções, *downstream* e *upstream*) possui comprimentos de onda diferentes como se mostra na Figura 9; criando um enlace ponto-ponto entre o CO e cada ONU, que difere da topologia de ponto-multiponto das redes TDM-PON. Dentro da WDM-PON da Figura 9, cada uma das ONU pode operar a uma taxa de até a taxa de bits completa de um canal [22]. Além disso, diferentes comprimentos de onda podem operar a diferentes taxas de bits. Em outras palavras, diferentes conjuntos de comprimentos de onda podem ser usados para suportar sub-redes PON diferentes, todas operando através da mesma infraestrutura de fibra.

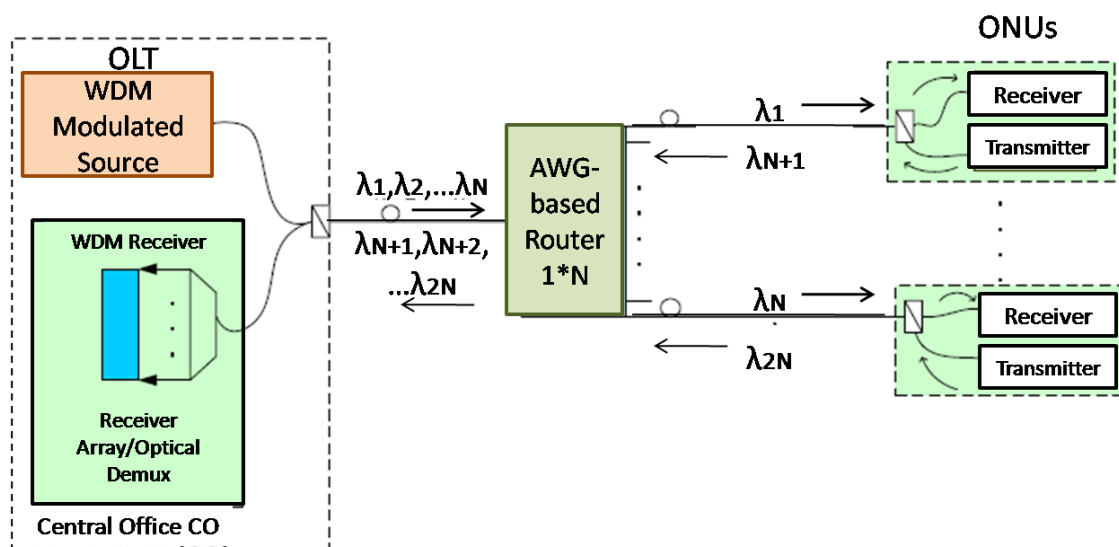


Figura 9. Arquitetura simples de uma rede WDM-PON. [22]

No sentido de *downstream* da WDM-PON, os canais de comprimento de onda são encaminhados a partir do OLT às ONUs por uma grade de guia de onda ordenada em inglês AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*), que é implantado em um "nó remoto" (RN).

Para a direção de *upstream*, o OLT emprega um demultiplexador WDM juntamente com uma matriz receptora. Cada ONU está equipada com um transmissor e um receptor para receber e transmitir em seus respectivos comprimentos de onda.

Para uma rede WDM-PON deve-se decidir sobre os comprimentos de onda apropriados e seu espaçamento já que a seleção dos dispositivos pode diferir significativamente. Existem duas principais opções de comprimento de onda CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*)-PON e DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*)-PON.

O comprimento de onda com espaçamento de mais de 20 nm é geralmente chamado de CWDM. As interfaces ópticas, que foram normalizadas para CWDM, podem ser encontradas na recomendação ITU G.695 [23], enquanto a grade espectral para CWDM é definido na recomendação ITU G.694.2 [24]. Se o intervalo de comprimento de onda de 1271 nm a 1611 nm, tal como definido na recomendação ITU G.694.2, é utilizado com 20 nm de espaçamento, então, um total de 18 canais CWDM estão disponíveis.

DWDM tem espaçamento de comprimento de onda muito menor do que a de CWDM, tipicamente menos que 3,2 nm. Já que DWDM tem sido desenvolvido para transmitir vários comprimentos de onda em uma região limitada do espectro, onde um amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA) pode ser usado.

Numa DWDM-PON, o comprimento de onda de cada fonte óptica e o comprimento de onda central do filtro WDM devem ser monitorados e controlados cuidadosamente para evitar interferências entre canais adjacentes.

2.3.1. AWG /DWDM

O progresso rápido da tecnologia fez ter que lidar com a alta demanda de mais canais a um custo reduzido. Essas tendências acentuaram a necessidade de fabricar filtros mesmo com uma banda passante mais estreita. Desses dispositivos, o AWG é um dos filtros ópticos que teve mais sucesso chegando a ser uma componente chave para as redes ópticas.

O AWG é um dispositivo passivo que opera principalmente na rede WDM-PON sendo capaz de multiplexar / demultiplexar os múltiplos canais através de uma porta de entrada para uma determinada porta de saída baseado no comprimento de onda de um sinal óptico, podendo combinar vários canais diferentes em uma mesma saída.

O AWG foi desenvolvido como um filtro para ser usado em DWDM e consiste em N entradas/saídas, duas placas e grades de guias de onda com uma diferença de caminho constante (espaçamento) ΔL entre as guias de onda vizinhas [25] de forma a aplicar um deslocamento de fase diferente nas saídas de cada fibra. O comprimento de onda central λ_o pode ser determinado por:

$$\lambda_o = \frac{n_c * \Delta L}{m} \quad (1)$$

Onde n_c é o índice de refração do guia de onda, m é um inteiro e ΔL é o espaçamento entre canais. [26]

Cada um dos canais da rede faz uso de um comprimento de onda ligeiramente diferente, então a luz destes sinais pode ser transmitida numa única fibra óptica com um *crosstalk* desprezível entre os canais.

Com a necessidade de aproveitar ao máximo o meio de transmissão, a recomendação da ITU G.692 [27] dentro das janelas define o espectro de frequências entre canais com um espaçamento denso para a utilização da tecnologia DWDM logrando combinar dezenas de canais em uma única fibra, economizando fibras e equipamentos de transmissão.

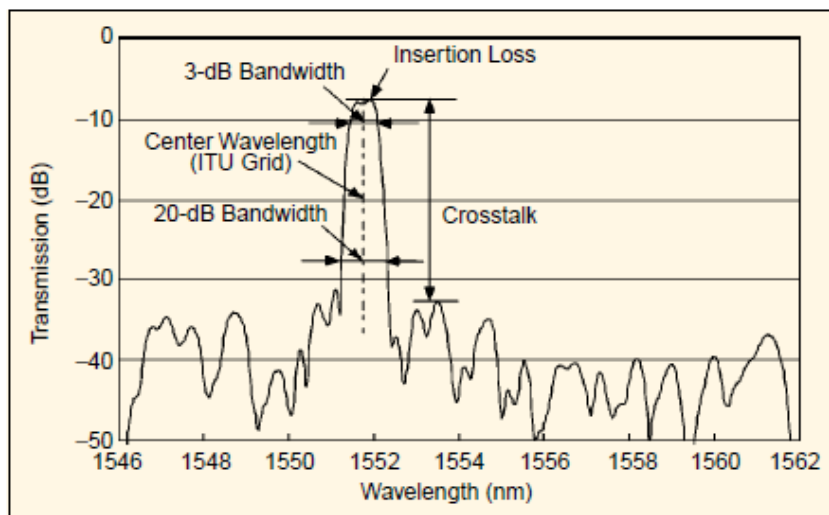


Figura 10. Espectro típico de um filtro óptico de banda estreita para sistemas DWDM com 100 GHz de espaçamento entre canais. [25]

O espaçamento entre canais mais típico definido pela recomendação ITU G.692 [27] é de 100 GHz ou (0.8 nm) como se mostra na Figura 10. Entre outros, se definem 200 GHz (1.6 nm), 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm), podendo chegar a 25 GHz (0,2 nm).

O comprimento de onda da banda passante deve corresponder precisamente às frequências de grade definidas pela ITU (1500 -1600 nm) [27]. Além de precisão de comprimento de onda, devem-se alcançar altos níveis de desempenho, incluindo a baixa perda, baixo *crosstalk* e uma largura do canal ampla.

A propriedade cíclica de comprimento de onda do AWG permite que seja utilizado no RN, tanto como multiplexador quanto como demultiplexador, como mostrado na Figura 11. Quando os transmissores de upstream utilizam comprimentos de onda diferentes do downstream em múltiplos inteiros da faixa espectral livre (FSR) [22] do AWG, a mesma porta de saída AWG pode ser atribuída para ambas transmissões upstream e downstream.

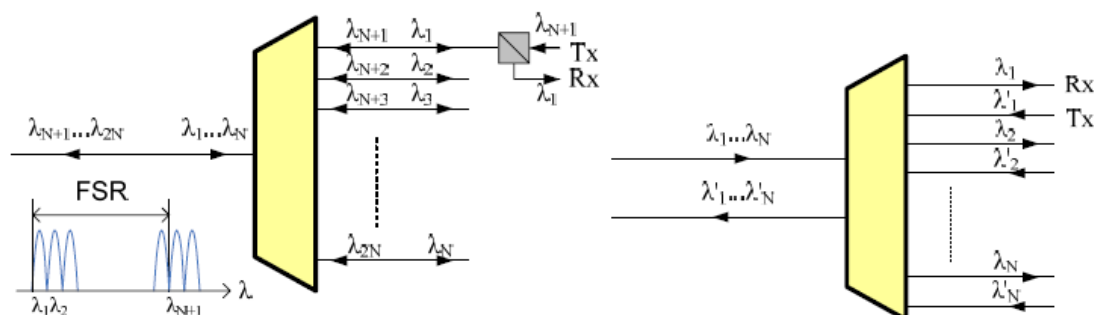


Figura 11. RN baseado na propriedade de comprimento de onda cíclica do AWG, bidirecional e unidirecional. [22]

2.3.2.

Monitoramento de Redes DWDM

A PON baseada em multiplexação por divisão de comprimento de onda WDM tem sido considerada uma poderosa técnica capaz de prover maior vazão. Visando evitar a queda de serviço prestado por tais redes, técnicas de monitoramento vêm sendo adotadas para testar o enlace e verificar possíveis falhas.

Esquemas de detecção de falhas centralizados e automáticos que empregam OTDRs são as soluções naturais que podem potencialmente cumprir com as faixas dinâmicas e requisitos de resolução para o monitoramento de redes WDM-PON.

Na supervisão de redes WDM-PON, o problema ponto-multiponto é resolvido através da utilização de um AWG. Contudo, o monitoramento é feito diretamente numa ramificação da rede e, a seguir, encontra-se uma revisão de algumas técnicas observadas na literatura.

Localização da falha reutilizando a fonte de downstream [28]

Nesta técnica o módulo de supervisão é instalado no CO. São utilizados um TBPF (*Tunable Bandpass Filter*), uma unidade de controle, um gerador de pulsos e um OTDR receptor. Quando a unidade de controle detecta uma perda de potência na luz de upstream o canal de downstream é comutado para transmitir os pulsos do OTDR. A diferença de frequência entre o sinal de monitoramento e o sinal de dados é menor que 4 GHz, e a mudança de frequência é desprezível para o canal do AWG.

Quando uma falha acontece na fibra de alimentação, a unidade de controle seleciona um canal aleatoriamente e realiza o teste de supervisão. Este método interrompe o tráfego normal da rede quando uma falha acontece, mas é um método rentável já que o mesmo transmissor é utilizado como fonte para a realização do monitoramento. Na Figura 12 pode-se observar o diagrama de blocos proposto pela técnica.

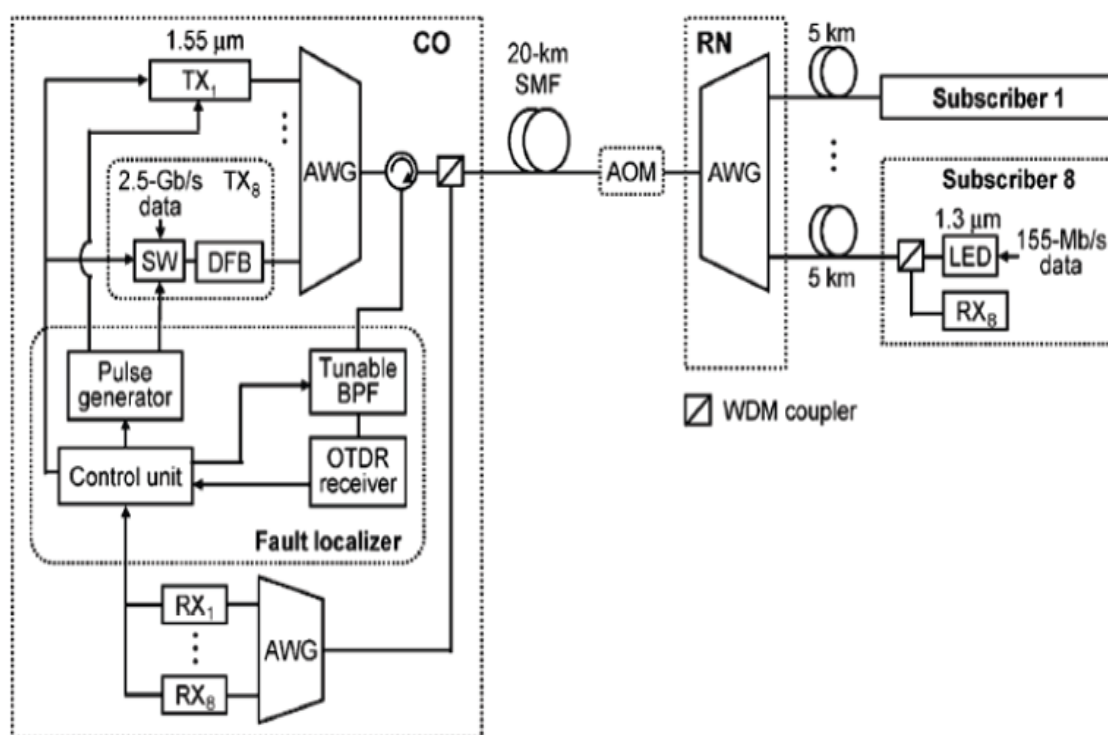


Figura 12. Diagrama de blocos para o monitoramento reutilizando as fontes de downstream. [28]

Supervisão em tempo real incorporando um filtro DWDM [29]

Esta técnica é baseada na filtragem do espectro do OTDR (dado que este é banda larga) com um DWDM. Depois da filtragem do sinal o comprimento de onda é selecionado com um OSW (*Optical Switching Wavelength*) e acoplado para o ODN (*Optical Distribution Network*) no CO. Foi demonstrado que os resultados podem ser avaliados, com uma transmissão de 2,5 Gb/s, para uma distância máxima de 27 km. Nesta técnica, a penalidade da taxa de erros de bits (BER) é desprezível quando o monitoramento é realizado desde que alguns cuidados para não afetar o tráfego normal da rede sejam levados em conta, como por exemplo, a utilização de

um isolador na saída do canal de transmissão e a utilização de um comprimento de onda diferente para o monitoramento. Além disso, um filtro passa banda é utilizado em cada ONU. Na Figura 13 pode ser observado o cenário proposto.

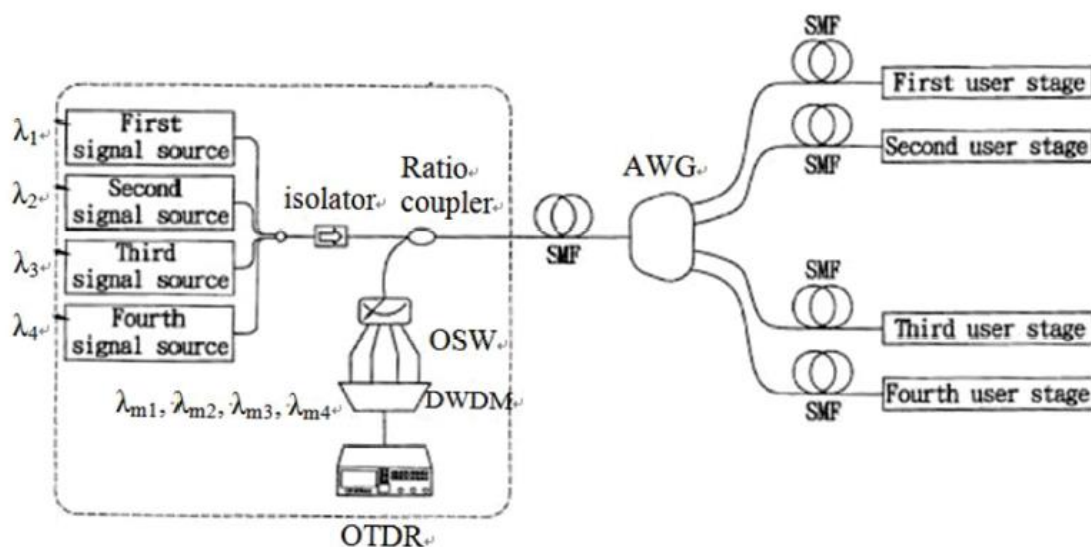


Figura 13. Supervisão utilizando um filtro DWDM. [29]

OTDR sintonizável funcional para redes WDM-PON e Hybrid PON [16]

Procurando a melhor forma de atingir a supervisão de redes WDM-PON realizou-se um esquema de monitoramento centralizado, que não precisa de equipamentos fora do CO. Com o objetivo de supervisionar cada uma das ramificações da rede de forma individual se propõe e demonstra um OTDR sintonizável funcional para redes WDM-PON e Hybrid-PON. A técnica proposta é provada para diferentes fontes de laser sintonizáveis contínuas, e utiliza um SOA como modulador para o sinal de prova.

Na Figura 14 é apresentada a montagem experimental do OTDR sintonizável. Por simplicidade, um OTDR comercial é utilizado para gerar o sinal de disparo, a detecção e o processamento de sinais, já que estes parâmetros estão prontos nas opções do equipamento. O objetivo não é injetar a luz LASER original do OTDR na fibra, mas sim a luz laser com o comprimento de onda de uma ramificação específica da rede WDM-PON. Um circulador óptico de 3 portas foi utilizado na saída do OTDR para que a luz laser seja direcionada para um fotodetector. O pulso detectado dispara o *trigger* de um *driver* que ativa o SOA.

Este último, por sua vez, dispara um novo pulso com a luz do laser sintonizável ou, em inglês, TLS (*Tunable LASER Source*). Finalmente, o novo pulso entra na fibra através de outro circulador óptico. O tempo de processamento dos equipamentos eletrônicos é compensado por uma fibra de atraso (*delay*) que gera um tempo de retorno igual ao tempo de processamento.

Cabe mencionar que, para os devidos fins, este equipamento precisa de uma fibra de lançamento para ultrapassar a zona morta gerada pelo conector na saída do OTDR e as conexões adicionais. Além disso, é preciso de um acoplador para que a banda de monitoramento seja acoplada na fibra de alimentação da rede WDM-PON.

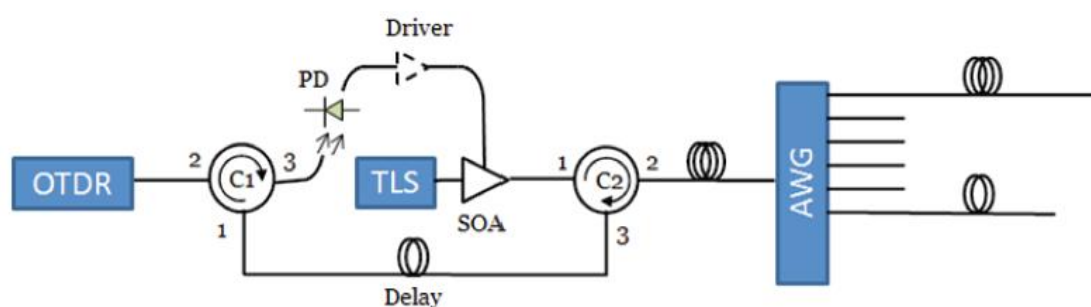


Figura 14. Esquema do OTDR sintonizável. [16]

Além das técnicas de monitoramento descritas anteriormente, na literatura encontram-se também o OTDR contador de fótons sintonizável (T-PC-OTDR) [30], o OTDR sintonizável codificado [31], e o laser de comprimento de onda sintonizável caótico [32], entre outros.

2.4. Redes Híbridas de Acesso

As redes híbridas de acesso tiveram sua origem nas redes de distribuição de televisão a cabo (CATV). A fim de melhorar a qualidade dos sinais recebidos tem sido introduzida a fibra óptica nas linhas principais. Com esta implementação observou-se uma redução considerável de ruído que introduzidos nos primeiros sistemas pelo grande número de amplificadores em cascata usados para manter o nível dos sinais. Uma rede de telecomunicações de acesso físico que combina a

fibra óptica e o cabo coaxial como um meio para a distribuição de sinais aos usuários finais é chamada de HFC (*Hybrid Fiber Coaxial*).

Esta tecnologia permite o acesso à Internet de banda larga fazendo o uso de instalações das redes de CATV. Através da combinação destas tecnologias de acesso, a rede é capaz de aproveitar os benefícios e minimizar o impacto das limitações inerentes de cada uma.

2.4.1. Características das Redes HFC

Os sinais de televisão que geralmente vem de um satélite chegam ao CO, o qual presta o serviço normalmente, para 500 a 2000 usuários [33]. Do CO partem uma série de cabos de fibra óptica monomodo que terminam num nó remoto ou nó zonal onde é conectado um grupo de residências. No nó remoto é feita a conversão opto/elétrica dos sinais que posteriormente são distribuídos mediante uma topologia arborescente constituída por cabos coaxiais, os quais terminam nas residências dos usuários.

Trata-se de uma arquitetura ponto-multiponto, adequada especialmente para serviços de difusão. Na seguinte figura apresenta-se a configuração de uma rede HFC.

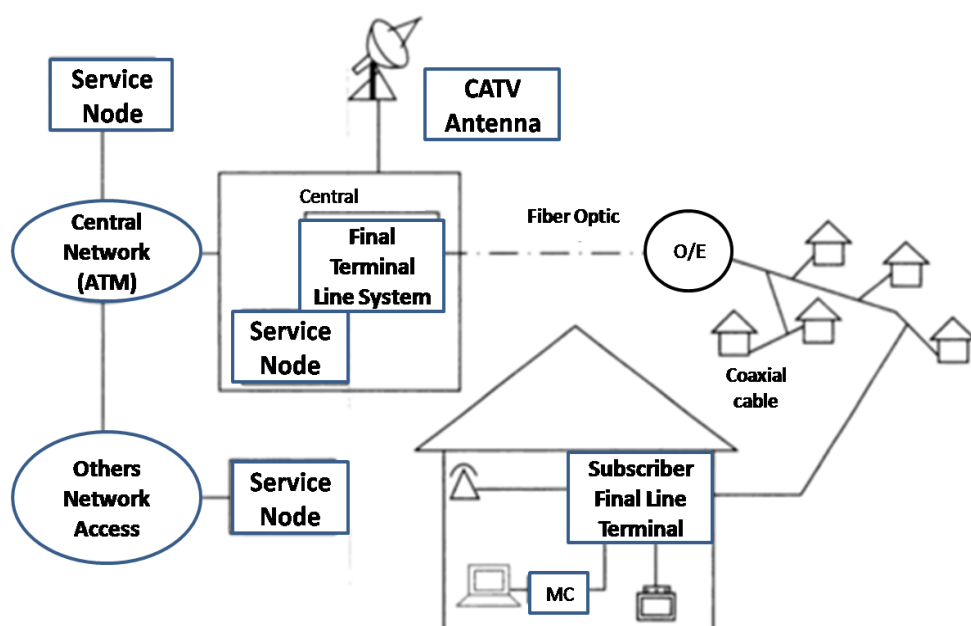


Figura 15. Configuração de uma rede híbrida fibra-coaxial. [33]

Os sinais ópticos são modulados analogicamente em amplitude, onde cada canal tem uma subportadora de rádio frequência diferente, pelo qual a multiplexação dos sinais é feita em frequência, e o formato analógico dos sinais é mantido devido à conversão opto/elétrica no nó zonal. Este tipo de modulação analógica de subportadora é chamado de SCM o qual será discutido mais diante, e difere da modulação digital em banda base usado geralmente nos sistemas ópticos.

A escolha desta modulação analógica é devido a que nos primeiros sistemas HFC, a informação transmitida correspondia a canais de televisão convencional, de natureza analógica, o qual facilitava uma conversão opto/elétrica direta dos sinais.

A capacidade destas redes é muito elevada. A largura de banda disponível no cabo é da ordem de 1 GHz. Entretanto, um canal de televisão analógico ocupa 6 MHz. Com esta grande largura de banda, e com a estrutura já existente, têm surgido motivações para a exploração de novos serviços tais como a telefonia e o acesso à internet. [33]

Na tabela 3 são descritos alguns dos benefícios e limitações de cada uma das tecnologias.

Tabela 3. Benefícios e limitações da fibra óptica e do cabo coaxial como meio de acesso.

Médio de transmissão	Benefícios	Limitações
Fibra Óptica	Atinge longas distâncias com um mínimo de amplificação e regeneração do sinal.	Alto custo.
	Taxas de transmissão de dados maior.	Maior cuidado em quanto à manipulação.
	Imunidade a interferências eletromagnéticas.	
Cabo Coaxial	Capacidade de largura de banda considerável.	Suscetível a interferências externas.
	Fácil instalação.	Precisa de amplificação.
	Baixo custo de manutenção.	Pouca segurança.

No caso das redes híbridas fibra/cobre, o monitoramento da rede torna-se mais complexo porque o sinal de monitoramento do cabo necessita ser transportado opticamente.

2.5.

Técnicas de caracterização de cabos elétricos

A integridade dos cabos de alimentação elétrica é essencial para a segurança do sistema elétrico. Para garantir a saúde dos cabos, uma técnica é necessária tanto para detecção e localização de falhas, e para prever os defeitos rígidos antes que eles ocorram. A reflectometria é a técnica não destrutiva mais desejável para o diagnóstico de cabos elétricos. A teoria e as limitações das técnicas de diagnóstico de cabos clássicas de reflectometria no domínio do tempo TDR [34] e de reflectometria no domínio da frequência FDR são métodos convencionais bem conhecidos que foram usados em vários tipos de aplicações, incluindo, o teste de cabo, o analisador de rede [35], e a medição da impedância característica [36], etc.

Tal como acontece nas técnicas de reflectometria no domínio óptico OTDR e OFDR, descritas no tópico 2.1.3.1, as técnicas de reflectometria no domínio elétrico estão baseadas no mesmo princípio: um pulso de energia de baixa tensão é transmitido para o cabo em teste, e qualquer descontinuidade de impedância gera uma reflexão de modo que se pode detectar e localizar a falha. A amplitude da forma de onda refletida pode ser usada para medir a impedância do defeito, e o tempo de atraso da forma de onda refletida pode ser utilizado para localizá-lo.

O defeito num cabo pode ser descrito pela sua impedância, e a reflexão causada pelo defeito será caracterizado pelo coeficiente de reflexão e a localização do defeito:

$$\Gamma_d = \frac{Z_d - Z_0}{Z_d + Z_0} \quad [15] \quad (2)$$

Onde Z_0 é a impedância característica do cabo e Z_d é a impedância do defeito, ($Z_d = 0$ para curto e $Z_d = \infty$ para aberto). No caso de um defeito rígido, o coeficiente de reflexão é de -1 (curto) ou 1 (aberto), [-1,1] também são os limites inferior e superior de Γ_d . Assim, eles são relativamente fáceis de detectar e localizar.

Na técnica de TDR, um pulso retangular é usado, enquanto que na técnica de FDR, um sinal senoidal serve como o sinal incidente. A Figura 16 mostra um exemplo da técnica de TDR empregando um gerador de forma de onda arbitrária (AWG) para enviar um pulso DC para o cabo em teste. Um defeito incipiente é feito em 7 m de 10 m de comprimento de um cabo coaxial. Embora o início e o fim do cabo são detectados e localizados de forma relativamente fácil, para TDR é quase impossível detectar e localizar o defeito localizado a 7 m. Além disso, a magnitude da reflexão, supostamente requerida para a medição da impedância do defeito é difícil determinar com precisão.

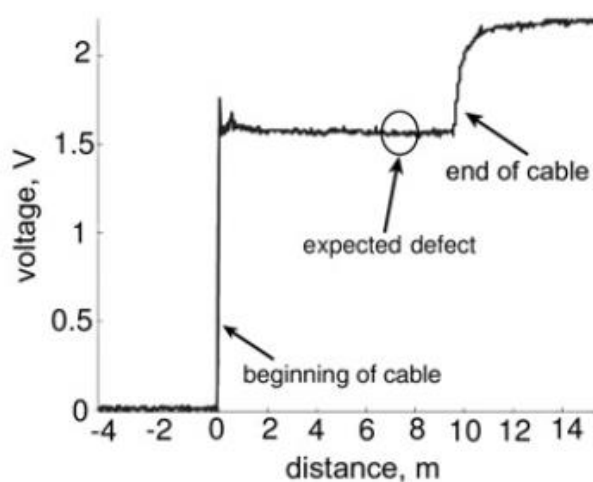


Figura 16. TDR. A forma de onda de reflexão a partir da extremidade do cabo deve ser um pulso de passo ideal, mas pode-se ver que a forma de onda é distorcida após da reflexão. [15] Distância Vs. Voltagem

A Figura 17 mostra um exemplo da técnica de FDR usando o equipamento *Site Master* da *Anritsu* [15]. Um defeito incipiente é feito em 10 m de 15 m de comprimento de um cabo coaxial. A técnica de FDR usa um conjunto de sinais senoidais de frequência por passos (step-frequency), permitindo assim uma excelente localização da frequência. Já que o FDR utiliza uma menor largura de faixa de frequências (400-500 MHz) que do TDR, a distorção do sinal refletido é menor do que o TDR. Os diagnósticos do FDR fornecem a perda de retorno média do sinal incidente em dB em relação à distância.

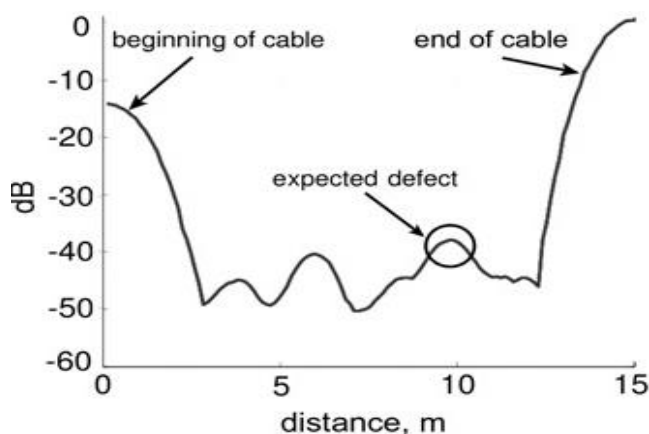


Figura 17. FDR. O início e o fim do cabo são identificados e aproximadamente uma perda de retorno de 40 dB é observada em 6 e 10 m. [15] Distância Vs. Magnitude.

A impedância do defeito deve ser exibida no espectro da impedância, mas a reflexão torna-se distribuída ao longo de um intervalo de frequências, de modo que a magnitude da reflexão em qualquer frequência é pequena. O espectro de impedância obtido é convertido do domínio da frequência para o domínio da distância através da transformada de Fourier Inversa. Na Figura 17 mostra-se que, a resolução espacial do FDR é menor do que do TDR, o que é uma desvantagem do FDR para a localização do defeito.

Diferentes dispositivos podem ser usados para testar os cabos elétricos, um dos instrumentos comumente usados é o analisador de rede. Este instrumento permite medir e caracterizar a resposta de RF em dispositivos de RF e micro-ondas. Existem dois tipos principais de analisadores de rede o SNA (*Scalar Network Analyzer*) e o VNA (*Vectorial Network Analyzer*).

O analisador de rede vetorial VNA (*Vectorial Network Analyzer*), é um tipo de analisador de rede amplamente utilizado para aplicações de desenvolvimento de circuitos de RF. É um sistema de teste que possibilita caracterizar o desempenho de dispositivos de RF e micro-ondas em termos de parâmetros de espalhamento de rede, ou parâmetros S [37]. As informações fornecidas pelo VNA, são então utilizadas para garantir que o circuito de RF seja otimizado para fornecer o máximo desempenho. Dependendo do modelo e das suas características pode-se realizar medições básicas e avançadas, entre suas aplicações estão:

- Análise vetorial de impedância.
- Análise do espectro de frequência.
- Leitura de medida de potência.
- Análises de rede.
- Ganho/Perda em circuitos.
- Análise de circuitos.
- Medições de cabos.
- Localização de falhas em cabos.
- Teste de isolamento de antenas.
- Testes de antenas.

O analisador de rede permite realizar uma caracterização completa de um dispositivo de duas portas como se mostra na Figura 18 com quatro parâmetros S.

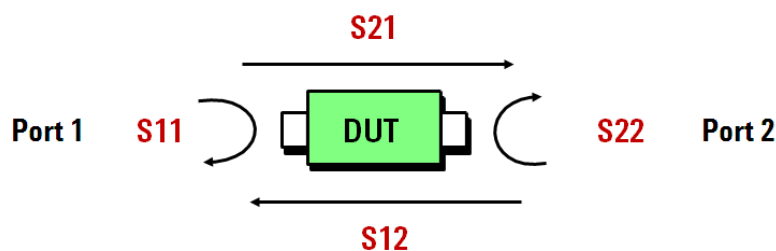


Figura 18. Parâmetros S para caracterizar um dispositivo de duas portas (Port 1 e Port 2) [38].

A continuação mostra-se a descrição dos quatro parâmetros S [38]:

- S_{11} = coeficiente de reflexão *forward* (input).
- S_{22} = coeficiente de reflexão inversa (output).
- S_{21} = coeficiente de transmissão *forward* (ganho ou perda).
- S_{12} = coeficiente de transmissão inversa (isolamento).

Os parâmetros S são inerentemente complexos, e quantidades lineares. No entanto, muitas vezes são expressos no formato de *log magnitude* [38].

O analisador de rede realiza a medição através da varredura de frequências como é mostrado na Figura 19 usando uma quantidade de 1601 pontos como máximo para passar de uma frequência a outra.

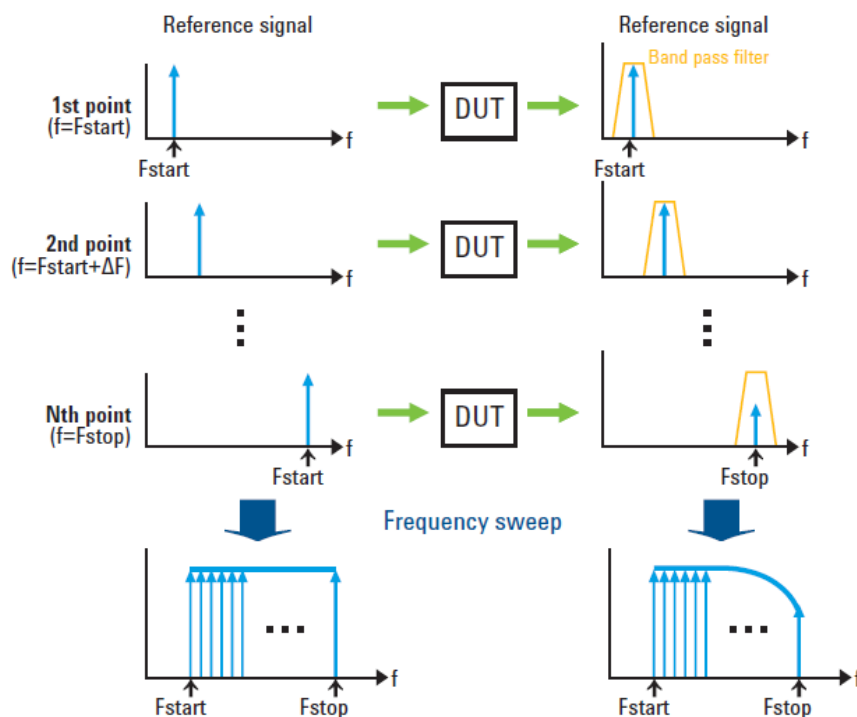


Figura 19. Varredura de frequências no analisador de rede. F_{start} é a frequência inicial e F_{stop} é a frequência final. [38]

A técnica de medição TDR pode ser realizada com o analisador de rede, começando com a varredura no domínio da frequência. A transformada inversa de Fourier IFT é usada para obter o sinal no domínio do tempo. A Figura 20 mostra de forma conceitual simplificada de como o analisador de rede deriva os traços no domínio do tempo. Para uma resposta ao degrau (*step response*) tem-se que chegar a uma resposta como se mostra no lado inferior esquerdo da Figura 20. O analisador de rede reúne os dados no domínio da frequência a partir de uma varredura de frequências de banda larga, é importante mencionar que todos os dados são recolhidos a partir de uma reflexão. De fato o analisador de rede estimula o DUT com uma frequência plana o que equivale a um impulso no domínio do tempo, a resposta de saída do DUT é, por conseguinte a resposta em frequência da sua resposta ao impulso. Já que um passo no domínio da frequência é o integral do impulso, se integrar os dados de resposta em frequência do DUT se terá os dados

no domínio da frequência correspondente à resposta ao degrau no domínio do tempo. Finalmente realiza-se a transformada inversa de Fourier para obter a partir do domínio de frequência o domínio do tempo, e assim, obter a resposta ao degrau. Nota-se que também se pode realizar primeiro a transformada inversa de Fourier, e depois integrar os dados no domínio do tempo, o resultado será o mesmo.

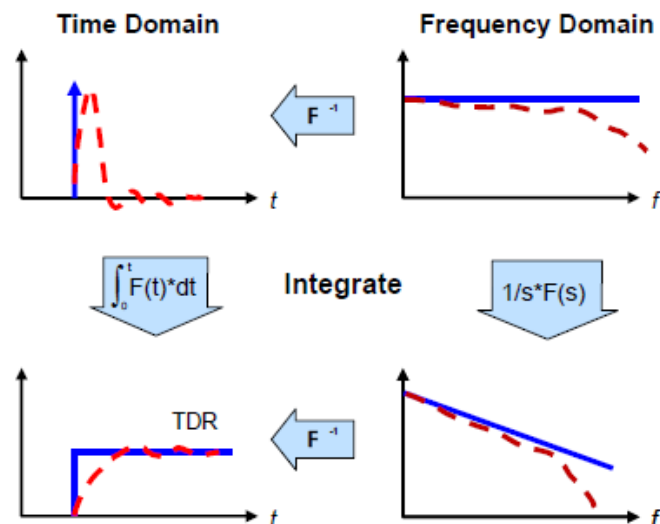


Figura 20. Medição no domínio do tempo e no domínio da frequência usando a transformada Inversa de Fourier (F^{-1}). [38]

2.6. Redes SCM-PON

2.6.1. Rádio sobre Fibra (RoF: Radio Frequency Over Fiber)

RoF está definido como a transmissão de uma forma de onda pela fibra óptica até o sistema de rádio sem que haja mudança da forma de onda durante a transmissão óptica. A forma de onda inclui a informação física para os serviços de rádio comunicações, tais como o formato da onda e o *payload*. [39]

Na Figura 21 pode-se observar que a frequência da portadora do sinal rádio não vai afetar o processamento na banda base. Entretanto, o sinal RoF dever ser considerado como um sinal analógico portando o mesmo sinal de rádio quando visto no domínio óptico. Entretanto a portadora de rádio frequência do sinal RoF pode ser diferente do sinal rádio original.

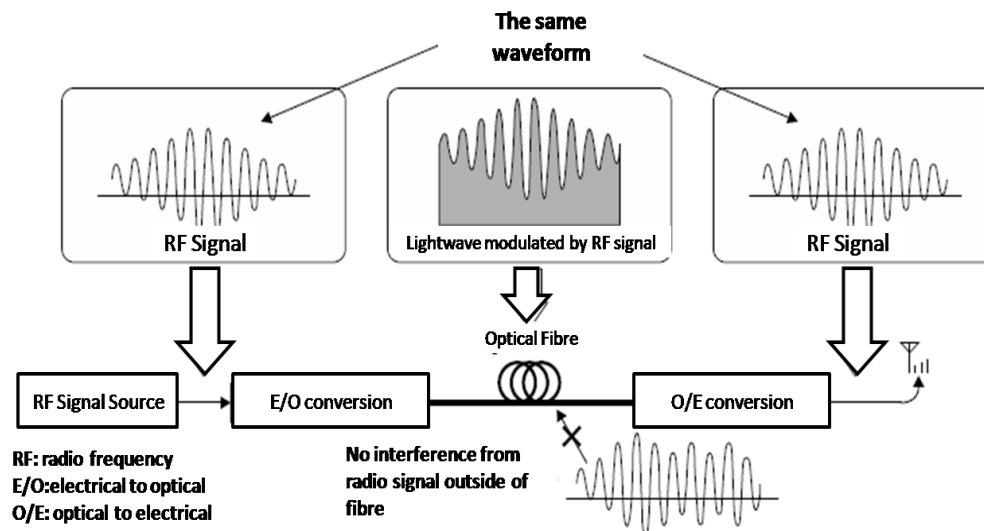


Figura 21. Conceito básico de RoF. [39]

O sistema RoF mostrado na Figura 21, está composto por componentes eletro/ópticos (E/O) e óptico/elétricos (O/E), e uma fibra óptica para a transmissão. RoF tem duas características principais:

- Preservação da forma de onda: a forma de onda do sinal rádio é preservada durante a transmissão óptica sob condições ideais ou perto das condições ideais.
- Tolerância à interferência eletromagnética: os sinais RoF na fibra não são afetados pela interferência de frequência dos sinais de rádio próximos.

Uma vez que o sistema RoF deve ser tratado como um sistema de transmissão analógica, a potência total sinal-ruído e o alcance dinâmico total deveriam ser acrescidos para maximizar o potencial das duas características RoF mencionadas acima através da gestão adequada da figura de ruído e da não linearidade do sistema.[39]

Um método alternativo de transmissão é a transmissão digital de fibra óptica. Rádio sobre fibra digitalizado (D-ROF) [39] é um candidato atraente para transmitir a forma de onda, especialmente nos casos em que tanto a distorção e a baixa sensibilidade dificultam a transmissão analógica em condições de alta figura de ruído e a não linearidade.

Neste caso, tem-se que prestar atenção para o fato de que a sua realização depende fortemente do desempenho da função do processamento do sinal digital, que é influenciada pelo desempenho dos conversores analógico-digital (ADCs) e dos conversores digital-analógico (DACs). Também é difícil de remover o ruído de quantização devido à digitalização, que causa a distorção na forma de onda. Além disso, cada amostra no domínio do tempo é digitalizada em muitos bits quantizados para a transmissão binária em D-ROF, de modo que a eficiência da largura de banda de D-ROF pode ser muito menor do que a de RoF analógico. As interfaces digitais para estações base móveis, tais como a interface CPRI e a OBSAI, fazem um bom uso do conceito da tecnologia D-ROF. [39]

2.6.2. Multiplexação por Subportadora (SCM: Sub Carrier Multiplexing)

Considerado um tipo de sistema analógico de RoF, a multiplexação por subportadoras, do inglês *Sub Carrier Multiplexing* (SCM), é um esquema elétrico de multiplexação para obter um sinal desejado para a modulação óptica através da combinação de várias subportadoras elétricas moduladas analogicamente para serem transmitidas por um único comprimento de onda.

Seguindo o esquema SCM mencionado anteriormente, na seguinte configuração da Figura 22 mostra-se só um canal de dados do sistema SCM, onde os dados são eletricamente misturados com uma subportadora elétrica f_{SC} , produzindo uma soma e uma diferença de frequências como resultado; um filtro elétrico passa banda (*BPF: Band Pass Filter*) é usado para transmitir só um produto, tipicamente a soma de frequências.

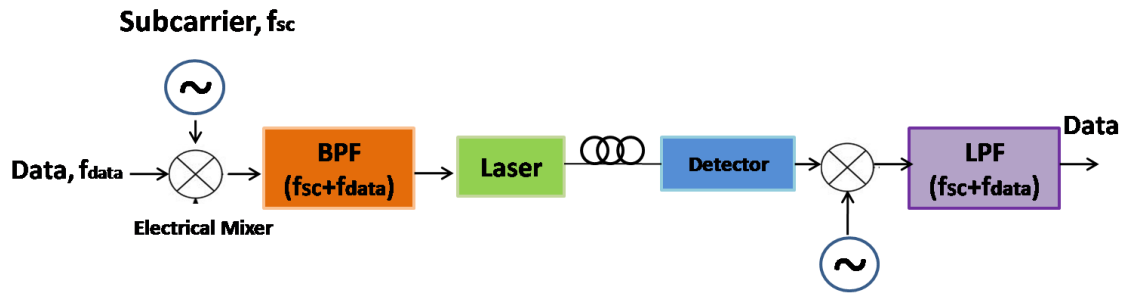


Figura 22. Esquema básico de apenas um canal SCM [40]

A subportadora aparecerá no analisador de espectro como um tom modulado no espectro de frequência elétrica antes da transmissão óptica. Depois da transmissão, a onda óptica é detectada na recepção. Para a recepção do sinal (subportadora e dados) emprega-se o mesmo princípio que na transmissão, no receptor, uma onda na mesma frequência da subportadora f_{sc} é misturada com o sinal transmitido recuperado e novamente se produz a diferença e a soma de frequências. A soma de frequências é $2f_{sc}+f_{data}$ e a diferença de frequências é f_{data} [40]. Um filtro passa baixo (*LPF: Low Pass Filter*) é usado para deixar passar a diferença de frequências, permitindo assim que os dados sejam recuperados. Este método conhecido como filtro casado permite que a multiplexação e a demultiplexação ocorra no domínio elétrico.

Um critério de desempenho chave é conseguir uma alta razão portadora-ruído CNR (*Carrier to noise ratio*), o qual é comparável com a relação de sinal-ruído SNR (*Signal to noise ratio*).

Num sistema típico de transmissão óptica o receptor óptico tem ruído aleatório e ruído térmico, os quais são gerados no fotodetector. Além disso, o laser produz RIN (*Relative Intensity Noise*) sobre a largura de banda. O RIN se produz devido às flutuações aleatórias de fase no laser, as quais são convertidas em flutuações de amplitude pelas reflexões que voltam no laser ou por múltiplas reflexões através da transmissão. É muito importante manter as reflexões sob (<-65 dB) [40] num sistema analógico usando conectores, emendas e isoladores de alta qualidade. O RIN pode ser descrito por flutuações estatísticas na corrente fotodetectada:

$$RIN = \left\langle \frac{i_{ph}^2}{\langle i_{ph} \rangle^2} \right\rangle \quad (3)$$

E a potência de ruído RIN gerada, é:

$$\sigma^2_{RIN} = (RIN)\bar{P}B_e \quad (4)$$

onde P é a média da potência óptica recebida, e B_e é a largura de banda elétrica do receptor. RIN é tipicamente um valor muito pequeno, mas as comunicações em AM requerem um alto CNR para uma boa fidelidade do sinal, requerendo assim que o ruído se mantenha no mínimo e a potência óptica se mantenha no alto.

Para atingir um sinal de alta fidelidade e livre de erros, a CNR tipicamente deve ser > 50 dB, muito mais do que os 20 dB requeridos numa detecção direta ASK (*Amplitude Shift Keying*) em sistemas digitais. [40]

Quando não é usado um modulador externo, o laser atua para converter diretamente o sinal elétrico em sinal óptico, com a modulação da corrente do *bias* do laser produzindo uma modulação direta da potência de saída do laser. Qualquer desvio na linearidade da potência óptica do laser como a função da corrente de bias produzirá um decréscimo na CNR, já que a modulação elétrica não é exatamente replicada pelo sinal de saída óptico. Como a CNR deve ser extremadamente alta num sistema analógico, precisa-se que a saída de luz do laser seja extremamente linear [40] com a corrente de modulação.

Existem algumas limitações nos sistemas SCM, uma delas é o efeito do *clipping* (em português a tradução seria "recortado"). Em geral, para canais de comunicações, é desejável produzir uma corrente de polarização com amplitude de oscilação (*bias swing*) alta na saída do laser para atingir um alto índice de modulação. Além disso, o *bias swing* é necessário para suportar vários canais já que cada canal deve individualmente contribuir a uma amplitude de modulação oscilatória mínima.

Porém, existe um limite para o *bias swing* que pode ser suportado pelo laser já que o laser não produzirá luz quando a corrente de polarização estiver abaixo da corrente limiar e a linearidade do laser se degradará acima de uma certa corrente de polarização [41].

Se a modulação elétrica cai abaixo da corrente limiar, o sinal SCM será "recortado" [40], [42] e a CNR não será suficiente para recuperar o sinal. Se a

modulação está abaixo de uma certa corrente, as não-linearidades vão destruir a fidelidade do sinal e produzirão produtos de intermodulação e distorções na presença dos outros canais SCM.

A vantagem mais importante do SCM é a transmissão simultânea de vários canais num laser só, onde cada canal transmitido tem sua própria frequência de subportadora.

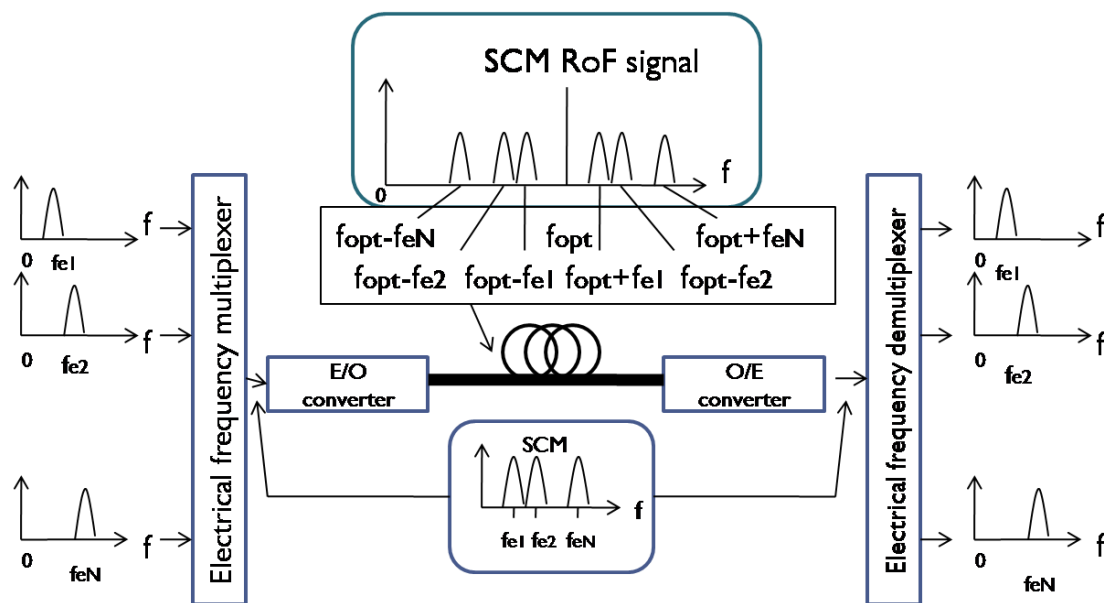


Figura 23. Esquema básico de SCM.[39]

Na Figura 23, é descrito o esquema básico de transmissão de um sistema multicanal SCM, onde f_{en} ($n=1,2,3,...N$) e f_{op} são as frequências centrais dos sinais elétricos e da portadora óptica, respectivamente. Primeiro os sinais elétricos subportadoras cada um com sua respectiva frequência central são combinados num multiplexador para gerar o sinal SCM. O sinal SCM modula a portadora óptica num conversor elétrico/óptico para gerar o sinal SCM RoF. O sinal RoF recebido é fotodetectado com um conversor óptico/elétrico para regenerar o sinal SCM original.

O sinal SCM recuperado é dirigido para o demultiplexador para ser dividida nos N sinais elétricos originais de modulação.

Uma vantagem significativa do SCM é que o baixo nível de ruído de fase dos osciladores RF torna a detecção coerente no domínio RF mais fácil do que a

detecção coerente óptica, e formatos de modulação avançados podem ser facilmente aplicados. Além disso, outra vantagem é que muitos canais compartilham o custo de um hardware óptico caro.

Uma desvantagem do sistema multicanal SCM é que os canais compartilham o mesmo laser e todos estão muito próximos podendo ocasionar sobreposição dos canais.

Uma das razões para utilizar a transmissão óptica analógica é que ela é compatível com uma grande parte da transmissão analógica usada hoje na transmissão de vídeo para sinais de CATV. A modulação AM-VSB (*Amplitude Modulation – Visigal Side Bands*) é usada para CATV, na qual a subportadora é modulada em amplitude, onde as faixas laterais AM são criadas pela modulação são manipuladas para que ocupem um mínimo de largura de banda sem sacrificar a qualidade da transmissão[40]. Em quanto à modulação FM, ela também é compatível, mas precisa-se um sinal de menor potência e uma largura de banda maior [43].

O SCM pode ser usado para transmitir uma grande quantidade de canais analógicos ou digitais, podendo fornecer serviços em dados, voz, televisão de alta definição HDTV, ou qualquer combinação destes. [40]

Modulação Óptica

Conforme ilustrado na Figura 23, em SCM as subportadoras são moduladas no formato desejado e multiplexadas em frequência por um combinador elétrico. O sinal elétrico originado é convertido para o domínio óptico por meio de um transmissor óptico (ou conversor eletro-óptico) para ser transmitido pela fibra. Para essa função podem ser usadas a modulação direta ou a modulação externa.

a) Modulação direta

Neste tipo de modulação, usa-se o laser como conversor eletro/óptico que permite variar a corrente de modulação para que o campo óptico adquira as propriedades do sinal elétrico modulador.

Quanto às vantagens de aplicar a modulação elétrica direta, é que é uma técnica muito mais simples e com maior custo-benefício, já que o único componente

óptico para obter a modulação óptica é o laser, não precisando de um modulador externo.

Da mesma forma que possui vantagens, esta técnica também tem limitações: o laser pode apresentar características intrínsecas, uma relação de não linearidade, oscilação, *chirping*, uma largura de banda limitada do controlador; e o sinal óptico modulado pode ter distorção. Para prevenir isto é necessário usar uma fonte de luz adequada que possa produzir o sistema desejado.

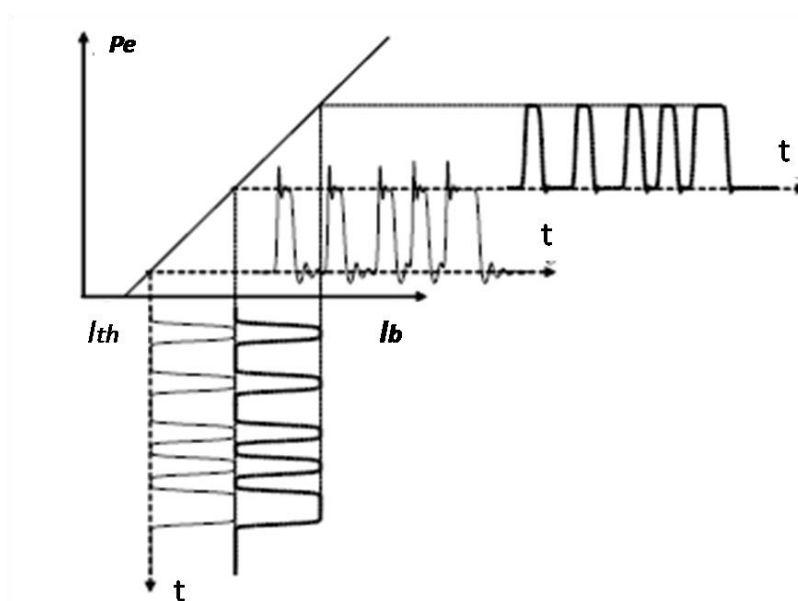


Figura 24. Modulação direta com o Laser. A corrente direta do laser varia de acordo com o sinal modulador, resultando na modulação da potência emitida. A modulação óptica é representada para dois valores da corrente de BIAS, resultando em um melhor comportamento dinâmico, mas uma relação de extinção mais pobre quando a corrente de BIAS aumenta. [44]

Na Figura 24 é mostrada a curva da modulação direta do laser. Primeiro, nenhuma luz (além da emissão espontânea) é emitida pelo laser, até que a corrente atinja o valor de limiar I_{th} . Acima do limiar, a inversão de população é atingida, acionando o laser. A potência do laser, em seguida, aumenta linearmente com o aumento da corrente I_b , até que alguma saturação seja alcançada para valores altos de corrente de *bias*. Esta dependência da potência de saída do laser P_e sobre a corrente de *bias* pode ser explorada para converter a informação a partir do domínio elétrico para o domínio óptico: basta que se deixe a corrente variar de acordo com os dados a serem transmitidos.

b) Modulação externa

No caso da modulação externa, é usado um modulador externo o qual é acoplado a um laser de onda contínua CW onde sua potência é mais ou menos constante no tempo, neste tipo de modulação também pode se usar a corrente ou a voltagem de *bias* para operar o laser na região linear se assim se requer. [39]

As características de fase, amplitude, polarização e potência da portadora óptica podem ser moduladas em proporção com a forma de onda do sinal elétrico. Ao contrário da técnica de modulação direta, precisa-se de um modulador externo além do laser como se descreve na Figura 25.

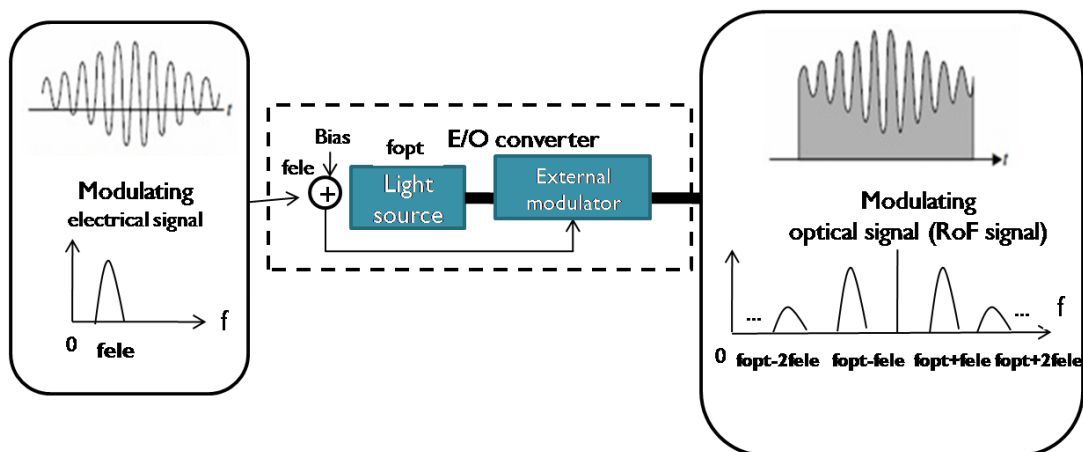


Figura 25. Diagrama de blocos da modulação externa para subportadoras.
[39]

Existem dois tipos de moduladores externos. O primeiro tipo *modulador de eletro- absorção* (em inglês *Electro- absorption modulator*), depende da modificação da absorção do material semiconductor quando um campo externo é aplicado. O segundo tipo *modulador eletro- óptico* (em inglês *electro-optic modulator*) depende da alteração do índice de refração observado para alguns cristais sob um campo elétrico externo. Na literatura, como exemplo de moduladores eletro- ópticos tem-se o *Mach-Zehnder* representado na Figura 26. Sabendo que a variação de fase que experimenta uma onda de luz de comprimento de onda λ propagando-se através de um comprimento L de um meio com índice de refração n :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} nL \quad [44] \quad (5)$$

Uma aplicação simples é a realização de moduladores de fase feita a partir de uma guia de onda eletro- óptica submetida a um campo elétrico dependente do tempo. A tensão aplicada irá modular o índice de refração do material do guia de onda. Por conseguinte, alternando a fase que experimenta uma onda de luz propagando-se ao longo da guia de onda. No entanto, os legados dos sistemas de comunicação óptica normalmente dependem da modulação da intensidade da luz, isto pode ser conseguido, transformando a modulação da fase induzida pelo efeito eletro-óptico para a modulação de intensidade usando um interferômetro. [44]

O interferômetro de Mach- Zehnder Figura 26, é constituído por dois guias de ondas paralelos separados por uma distância d e do mesmo comprimento L , geralmente fabricados por uma liga de Niobato de Lítio (LiNbO_3), que apresenta propriedades que provocam a variação do índice de refração em função do campo elétrico aplicado. A tensão aplicada V (V_1 ou V_2 dependendo do eletrodo) a um dos eletrodos ou braços induz um campo elétrico E proporcional ao sinal aplicado e o dispositivo altera suas características físicas provocando uma variação do índice de refração e consequentemente da fase do sinal. E_i e E_o são os campos ópticos de entrada e saída respectivamente.

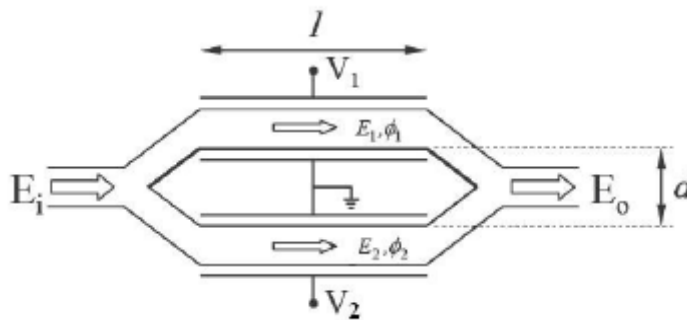


Figura 26. Modulador Mach- Zehnder.

A potência de saída do interferômetro depende da diferença da variação da fase que a luz experimenta $\Delta\varphi = \varphi(t) - \varphi_0$ nos braços da estrutura mostrada acima.

$$P_{out} = P_{in} \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \quad [44] \quad (6)$$

Se uma onda óptica contínua é aplicada à entrada do modulador, a potência de saída irá ser modulada de acordo com a tensão aplicada $V(t)$. O valor do deslocamento da fase criado por uma voltagem externa aplicada depende de diversos parâmetros, incluindo o material eletro-óptico, a orientação do cristal com respeito ao campo elétrico externo, assim como a polarização da onda de luz de entrada, a geometria e as dimensões da guia de onda.

Em qualquer caso, é possível abstrair a implementação real física do modulador e descrever a capacidade do material e da configuração escolhida para responder a uma voltagem aplicada introduzindo uma tensão conhecida como V_π (Voltagem de media onda). [44]

Aplicando uma tensão V_π , o eletrodo resultará em um deslocamento de fase π induzido por voltagem. O desvio da fase induzido por tensão $\phi(t)$ pode ser relacionado com a tensão aplicada $V(t)$ de acordo com:

$$\phi(t) = \pi \frac{V(t)}{V_\pi} \quad [44] \quad (7)$$

Com as duas equações descritas acima pode se calcular a função de transferência P_{out}/P_{in} do modulador como uma função da voltagem aplicada Figura 27.

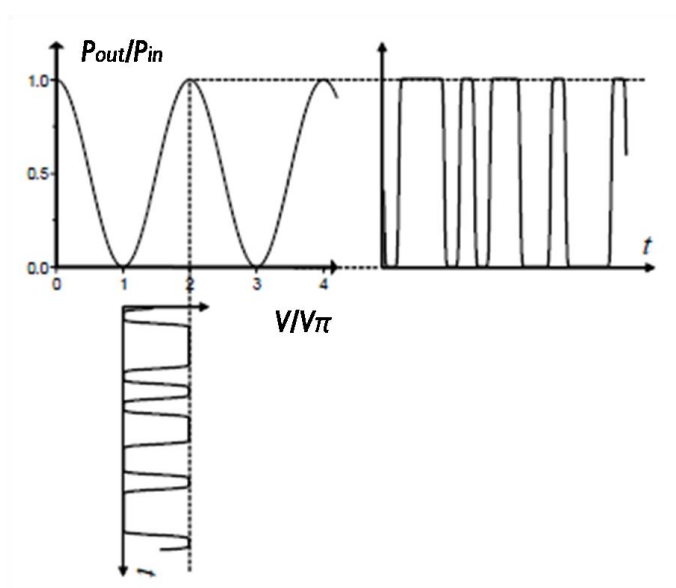


Figura 27. Princípio de funcionamento de um modulador de amplitude eletro-óptico Mach- Zenhder.[44]

2.7.

Monitoramento de fibra óptica usando multiplexação de subportadoras

Este método baseia-se na atribuição de uma banda vazia de subportadora para o monitoramento de enlaces de fibra óptica, esta técnica reusa a transmissão de dados sem nenhum impacto e proporciona a capacidade de realizar medidas de reflectometria em serviço nas linhas de fibra óptica com 10 m de resolução espacial [4].

Suas propriedades promissoras e desempenho permitem a aplicação potencial em redes emergentes como fronthaul móvel analógico de distância relativamente curta.

A Figura 28 apresenta a arquitetura básica de monitoramento instalada na unidade OBT (*Optical Backend Termination*) [4]. A unidade de monitoramento está conectada ao SCM mux usando um dos canais de subportadora de downstream para monitorar a fibra. Na Figura 28 mostra-se por simplicidade apenas um enlace de fibra.

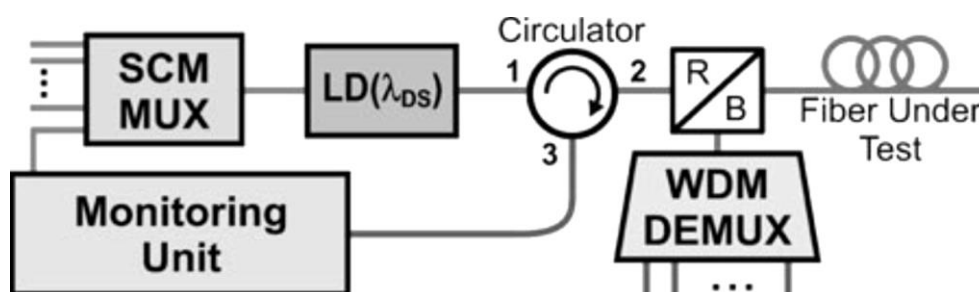


Figura 28 Arquitetura de monitoramento. SCM mux (Multiplexador de Subportadoras), LD: Laser Diode, Circulator: Circulador, R/B: Filtro Vermelho/Azul Monitoring Unit: Unidade de monitoramento, WDM demux: Demultiplexador WDM. [4]

Um circulador óptico é colocado entre o laser de downstream e do RBF para que o sinal retroespalhado volte para a unidade de monitoramento. O RBF trabalha como um espelho dicroico e combina os sinais de upstream e downstream as quais ocupam diferentes comprimentos de onda. A transmissão no sentido de downstream é fornecida através de subportadoras, no caso da transmissão de upstream, esta é fornecida através de WDM.

A frequência é variada passo a passo para que a fase e a amplitude do sinal retroespalhado modulado seja medido. Este esquema de monitoramento é similar ao método de *step frequency* e difere com o método I-OFDR convencional, em que a frequência é varrida linearmente e que o batimento heteródino do sinal retroespalhado e de referência é detectado.

A intensidade do sinal modulado do espalhamento Rayleigh decresce a medida que a frequência de monitoramento aumenta, de modo que diminuir a frequência do canal é melhor.

No entanto, com uma amplificação apropriada, o sinal de monitoramento pode ser conectado a qualquer um dos canais de subportadoras de modo que uma subportadora dedicada não seria necessária.

Modelo analítico

Considere um enlace de fibra de comprimento L e uma potência de entrada modulada a uma frequência angular Ω como $P = P_0 \cos(\Omega t)$ gerando uma intensidade óptica de modulação ao longo da fibra. A intensidade retroespalhada do sinal detectado $S(k)$ do enlace da fibra monitorado está dado pela soma das reflexões que podem ocorrer, por exemplo ao final do enlace, e o sinal retroespalhado Rayleigh ao longo da fibra [4].

$$S(k) = \sum_i D P_0 R_i e^{-2\alpha z_i} e^{j2kz_i} + \int_0^L C(z') m(z) F^2(z') D P_0 e^{-2\alpha z_i} e^{j2kz_i} dz' \quad (8)$$

onde o fator D é a detectividade do fotodetector, α é a atenuação da fibra e R_i é a refletividade a um ponto de reflexão z_i . O fator $C(z)$ representa o coeficiente BS Rayleigh da fibra ao longo do enlace e é uma função constante por partes, eventualmente o seu valor muda quando duas fibras diferentes são conectadas ou emendadas.

A função de perda $F(z)$ é também uma função constante por partes que descreve as perdas e as falhas ao longo da fibra. O seu valor é 1 até a primeira falha, reduzindo a δ_1 depois da primeira falha com perda de δ_1 e é sequencialmente multiplicado por δ_i depois de cada posição de falha z_i .

A função de perda é elevada ao quadrado porque a luz passa duas vezes ao longo do ponto de perda no seu trajeto desde o transmissor óptico para qualquer local depois da falha no enlace de fibra e volta.

O fator $k=n\Omega c$ é o vetor de onda de modulação, onde n é o grupo do índice de refração da fibra. A função delimitada $m(z) < 1$ descreve as flutuações aleatórias da amplitude da intensidade Rayleigh, também chamadas CRN (*Coherent Rayleigh Noise*) [21].

Considerando que a dispersão do coeficiente de espalhamento é diferente de zero só dentro de $0 < z < L$, os limites da integração na equação anterior podem estender-se a $\pm\infty$. Usando a transformada inversa de Fourier IFT dos dados obtidos dentro de uma largura de banda do canal resultará em:

$$\bar{S}(z) = \sum_i D P_o R_i e^{-2\alpha z_i} \frac{1}{2\pi} + \int_{-\infty}^{+\infty} W(k) e^{j2kz_i} e^{-jkz} dk + \frac{A}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^L m(z) F^2(z') e^{-2\alpha z'} e^{j2kz'} W(k) e^{jkz} dz' dk \quad (9)$$

onde pode-se assumir que $C(z)$ tem um valor constante C ao longo do todo o enlace no caso de usar um tipo de fibra só, então pode-se ter a liberdade de simplificar as constantes em $A = CDP_0$. Na prática, as medições sobre o sinal recebido são feitas sobre um conjunto de frequências limitado dentro da banda da subportadora do canal escolhido para a transmissão de dados definindo um conjunto limitado de correspondentes números de onda, que funcionará como a janela para o IFT e está representado por $W(k)$.

Para maior clareza, a expressão na equação 9, está dividida em dois termos $S_{F(z)}$ correspondente às reflexões localizadas e $\bar{S}_R(z)$, correspondente à contribuição contínua de Rayleigh. Deste jeito $\bar{S}(z) = \bar{S}_F(z) + \bar{S}_R(z)$. O primeiro termo $\bar{S}_F(z)$ descreve a soma de reflexões pico, que depois de integrar-se com K tem-se:

$$\bar{S}(z) = \sum_i B_i e^{-2\alpha z_i} W(z - 2z_i) \quad (10)$$

onde $W(z)$ é a função da janela da transformada. Se assume-se que a janela seja suficientemente ampla em frequência como para abarcar todo o enlace de fibra

óptica, sua transformada volta-se estreita na distância e pode ser substituída por $\delta(z-2z_i)$, a função delta de Dirac.

Com a simplificação feita pode-se relacionar a refletividade das reflexões localizadas ao longo do enlace de fibra diretamente com os picos da transformada $\bar{S}_R(z)$. Desprezando a contribuição menor de Rayleigh para a intensidade do sinal na posição z_i , a refletividade está dada por:

$$R_i = \frac{\bar{S}_F(z_i)e^{2\alpha z_i}}{DP_O} \quad (11)$$

Centrando-se no desenvolvimento matemático com respeito ao segundo termo de $\bar{S}(z)$, encontramos que sobre a integração em k , $\bar{S}_R(z)$, volta-se:

$$\bar{S}_R(z) = A \int_{-\infty}^{+\infty} m(z') F^2(z') e^{-2\alpha z'} W(z - 2z') dz' \quad (12)$$

o qual representa a convolução entre a intensidade do sinal e a função da janela. Usando a mesma janela de aproximação usada previamente, a 12 escreve-se como:

$$\bar{S}_R(z) = \frac{A}{2} m\left(\frac{z}{2}\right) F^2\left(\frac{z}{2}\right) e^{-2\alpha z} \quad (13)$$

Em termos práticos, a função medida é $\bar{S}(z)$. Note-se que de qualquer jeito $\bar{S}_R(z)$ iguala $\bar{S}(z)$ com exceção do número discreto dos pontos de reflexão que são usualmente descartados nos cálculos de perda.

Por tanto, substitui-se $\bar{S}_R(z)$ por $\bar{S}(z)$, que são os dados experimentais obtidos, e escreve-se a função de perda $F(z)$ tomando a sua raiz quadrada e utilizando o fator de escala dual OTDR convencional para o eixo Z . A função de perda $F(z)$ pode ser calculada em dB como:

$$5 \log(S(z)) = A|_{dB} + F(z)|_{dB} - \alpha z|_{dB} + \frac{1}{2} m(z) \Big|_{dB} \quad (14)$$

A informação transmitida por as equações 14 e 11 é a que Fourier transforma, $\bar{S}(z)$, da função de transferência da fibra dependente da frequência $S(k)$ obtida pelo analisador de rede (NA), descreve o perfil de retroespalhamento da fibra incluindo as falhas, perdas e reflexões localizadas ao longo do enlace. A razão pela qual este tipo de perda é escassamente observado pode ser atribuído ao fato de que as reflexões individuais são muito mais intensas do que a incoerente Rayleigh BS.

A função CNR $m(z)$ aparece como um ruído aleatório aditivo dependente do comprimento de onda, que também depende da janela RF usada para a recopilação dos dados em bruto. Consequentemente, se as medições dos sinais recebidas são realizadas em diferentes comprimentos de onda ou em diferentes frequências moduladas RF, todos os termos da equação 14 serão mantidos com exceção de $m(z)$, devido a que esta função varia aleatoriamente entre 0 e 1, a média de um grande número de várias medidas convergirá para a constante $1/2$ (-3dB) na escala logarítmica), significa que pode-se calcular a média de CNR ao obter a média da IFT das diferentes séries de medidas.

Deve-se ressaltar que as medidas da função de transferência do sinal retroespalhado não é a igual à técnica de OFDR convencional, onde o sinal retroespalhado bate com um sinal de referência e a escala do tempo está dado pela frequência de varredura RF. Nesta abordagem, a frequência é varrida a partir de um valor inicial (f_1) para um valor final (f_2) que, desde o ponto de vista do NA corresponde a subdividir o intervalo de frequência total em passos de frequência (1600 passos no máximo). O dispositivo mantém o valor de frequência de saída por um tempo antes de definir o valor do seguinte passo. Configurando o tempo de espera como o tempo de ida e volta do sinal dentro da fibra, impor-se uma medida de estado estacionário em cada passo de frequência.

Na Figura 29 mostra-se a configuração experimental da técnica de monitoramento usando SCM a qual será usada neste trabalho. Mais detalhes da parte experimental serão descritos e explicados no Capítulo 3.

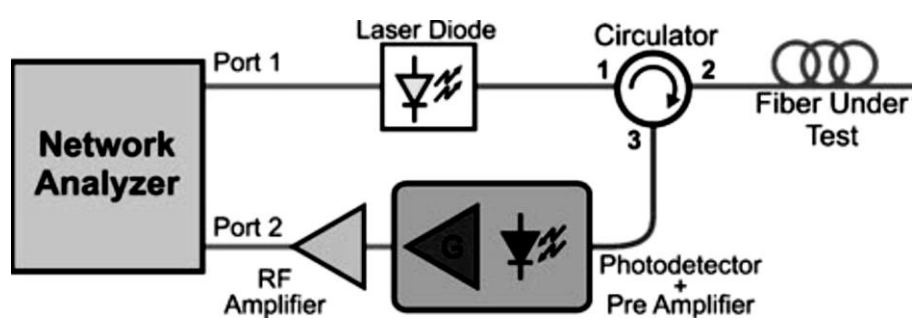


Figura 29 Configuração experimental da técnica de monitoramento usando subportadora. [4]

3 Montagem Experimental.

O Capítulo 3, titulado como Montagem Experimental tem como objetivo principal apresentar o desenvolvimento experimental por etapas do monitoramento híbrido numa rede de acesso de cabo de cobre estendida por fibra óptica de acordo com os objetivos específicos descritos no capítulo 1.

Na primeira etapa descreve-se o setup geral da arquitetura WDM/SCM-PON e do nó remoto de distribuição elétrica que foi experimentalmente montado no laboratório, composto pelo escritório central CO e pelo Conversor cobre-fibra CuFiC, *downstream* e *upstream* respectivamente. Na segunda etapa será apresentado o monitoramento híbrido que estará dividido em duas partes, a primeira parte descreve experimentalmente o monitoramento do enlace de fibra óptica usando o método proposto em [4] e a segunda parte descreve o monitoramento do enlace de cabo de cobre no CuFiC. Na terceira etapa será apresentado o impacto do monitoramento da fibra em serviço assim como o desempenho da comunicação.

3.1. Arquitetura WDM/SCM-PON

A arquitetura WDM/SCM-PON montada no laboratório é apresentada de forma básica num diagrama de blocos na Figura 30 a qual é constituída por um CO conectado mediante um enlace de fibra óptica ao conversor CuFiC onde são conectados os cabos de cobre para cada RH. O CuFiC será o nó de distribuição elétrica do sinal.

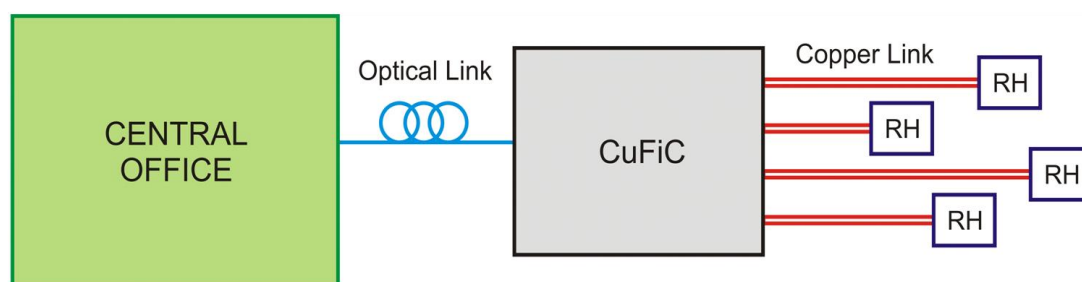


Figura 30. Esquema básico da arquitetura WDM/SCM-PON.

Na Figura 31 apresenta-se o esquema de forma detalhada da arquitetura WDM/SCM-PON que foi montada no laboratório para o desenvolvimento do presente trabalho.

A função do CO é controlar e centralizar o monitoramento da fibra óptica e o monitoramento do cabo usando o mesmo sinal de monitoramento para ambos os casos, no CO também é realizada a transmissão downstream (CO-RH) e a recepção de upstream (RH-CO). No CuFiC é realizada a recepção de downstream (CO-RH), e a transmissão de upstream (RH-CO). O esquema de monitoramento do cabo é elétrico por tanto se encontra no CuFiC como se mostra na Figura 31.

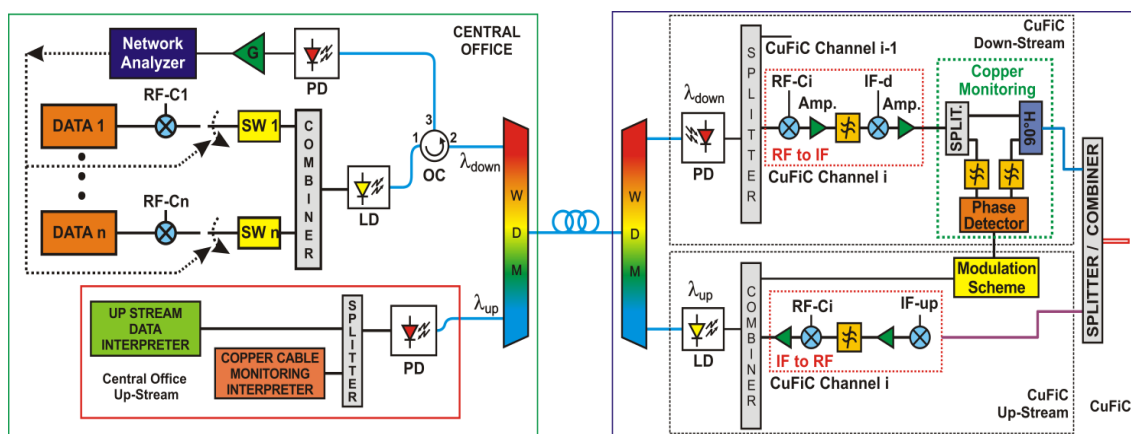


Figura 31. Arquitetura WDM/SCM-PON detalhada, composto pelo CO e o CuFiC. RF-C: Canal de Rádio frequência, SW: switch, LD: diodo laser, PD: fotodiodo, OC: circulador óptico, IF-d: frequência intermediária downstream, IF-up: frequência intermediária upstream, G ganho. [45]

De acordo ao esquema de transmissão downstream detalhado na Figura 31, no CO um sinal RF de 20 MHz de largura de banda é convertido acima de um canal SCM, e combinado com outros canais SCM num combinador elétrico RF; a portadora óptica do laser downstream é modulada externamente pelo sinal de todos os canais de SCM que foram combinados e são enviados pelo circulador ao enlace de fibra. Para a detecção no CuFiC, o sinal é recebido no fotodetector, convertido para uma frequência intermediária determinada e enviada ao longo do esquema de monitoramento do cabo, e através do enlace cabo de cobre que vai até as RHs.

Como se observa no esquema de transmissão de upstream detalhado no CuFiC descrito na Figura 31, o sinal de dados SCM que vem da RH (*CuFiC channel*

i) e o sinal do monitoramento do cabo que sai do esquema de modulação, são combinados eletricamente. O sinal combinado resultante de todos os canais SCM modula o laser de upstream, o sinal passa a través do módulo WDM, a través da fibra e é recepcionado no detector upstream para ser dividido e filtrado e assim conseguir separar o sinal de dados e o sinal de monitoramento.

Para a transmissão downstream e upstream foram usados dois lasers com comprimentos de onda de 1547.06 nm para o canal downstream e 1548.62 nm para o canal de upstream, os comprimentos de onda foram seleccionados para os respectivos canais de DWDM, o canal 39 (CH39) para downstream e o canal 37 para upstream (CH 37). A Figura 32 mostra o espectro dos canais DWDM de downstream e upstream, e o espaçamento entre eles 1.56 nm respeitando o espaçamento de acordo com a recomendação ITU G.692.2.[24]

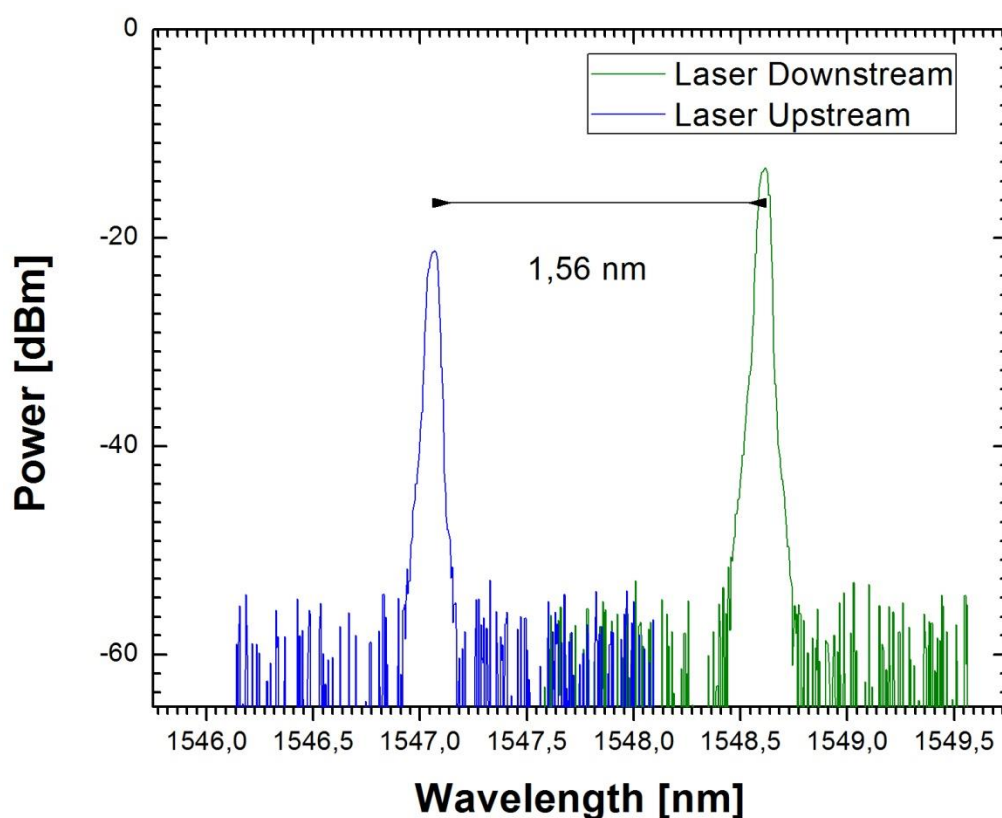


Figura 32. Espectro dos canais DWDM, Downstream e Upstream.

3.2.

Monitoramento da rede de acesso híbrida

O monitoramento consiste em usar o mesmo sinal RF dentro de um canal de subportadora SCM desde o CO para monitorar tanto a fibra óptica como o enlace de cabo de cobre na rede de acesso.

No caso de monitorar a fibra qualquer canal de dados no CO pode ser usado de acordo com a configuração da rede, mas pelo contrário, o monitoramento do cabo só pode ser feito por seu respectivo canal SCM.

3.2.1.

Monitoramento da fibra óptica

Para o monitoramento da fibra óptica, será usado o método proposto em [4] é descrito analiticamente no tópico 2.7 o qual baseia-se na utilização da multiplexação SCM e propõe monitorar a fibra em teste obtendo a função de transferência dela, através do parâmetro de espalhamento S_{21} medido no NA sem a transmissão de dados.

Analisando a Figura 31, no CO é gerado o sinal RF de monitoramento que ocupa um canal de dados de subportadora SCM pelo NA, observa-se que tal sinal pode ser substituído pelo sinal de monitoramento gerado pelo Analisador de Rede mediante um switch localizado no CO. Então, o sinal de monitoramento RF tanto para monitorar a fibra óptica como para o cabo ocupa um único canal de subportadora SCM. Para isso é necessário determinar alguns parâmetros no equipamento, os quais são mostrados na seguinte tabela.

Tabela 4. Parâmetros de configuração do Analisador de Rede (NA).

Nº	Configuração
1	Parâmetro de medição S_{21}
2	Frequência de início (MHz)= 170

Nº	Configuração
3	Frequência de parada (MHz)=190
4	IFBW (Hz)=10
5	Potência (dBm)

O parâmetro S_{21} permite medir a função de transferência, isto é o sinal refletido sobre o sinal incidente; as frequências de início e de parada foram escolhidas de acordo as limitações do fotodetector PIN FPD 510-D [46] usado na recepção downstream, upstream e no monitoramento como se mostra na Figura 33. O valor do IFBW determina o tempo de medição, além de reduzir o ruído de piso (*Noise Floor*) filtrando o ruído que está fora da largura de banda do filtro digital. Reduzindo o valor do IFBW pode-se obter uma melhor faixa dinâmica e acrescentar o SNR. A potência define a amplitude do sinal, esse valor deve ser a amplitude requerida para a utilização de um canal SCM de acordo com a profundidade de modulação do laser (1/M) que neste trabalho foi de 125 mVp por canal.

Depois de configurado o equipamento, o sinal de monitoramento é gerado, fazendo uma varredura de frequência dentro de uma banda de 20 MHz entre as frequências f_1 e f_2 , esse sinal modula diretamente o Laser de downstream e é conectado à porta 1 do circulador óptico. O sinal sai pela porta 2 do circulador e viaja pelo enlace de fibra em teste.

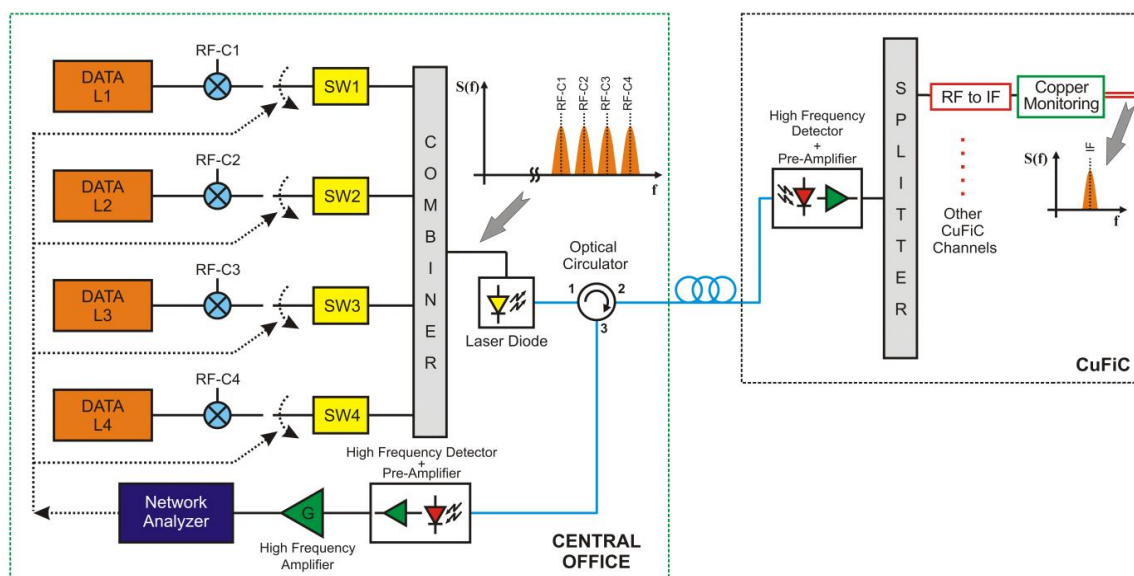


Figura 33. Estrutura da transmissão downstream desde o CO e a recepção downstream no CuFiC. SW: switch, RF-C: Canal de rádio frequência.

O sinal retroespalhado da subportadora volta pela porta 3 do circulator, sendo detectada no fotodetector PIN o qual faz a conversão opto/elétrica e pré-amplifica o sinal. O sinal é amplificado eletricamente, e conectado à entrada do analisador de rede como se observa na Figura 33.

Para que os efeitos refletivos no circulator sejam excluídos, é feita a medição da função de transferência como medida de referência do sistema sem a fibra conectada. De este jeito qualquer efeito externo à fibra pode ser excluído e assim a fibra seja caracterizada.

O sinal de monitoramento foi varrido dentro da largura do canal SCM na banda de 20 MHz, e foi repetido 10 vezes no NA em intervalos de 10 MHz, por exemplo, 160-170 MHz, 161-171 MHz e assim até 170-180 MHz. As medidas foram feitas para dois diferentes enlaces de fibra óptica com o objetivo de verificar a sensibilidade da técnica proposta. Os resultados experimentais serão apresentados no Capítulo 4.

3.2.2.

Monitoramento do cabo no CuFiC

Como foi descrito no tópico anterior, no CuFiC é recebido o sinal de monitoramento SCM no fotodetector downstream PIN, onde é realizada a conversão opto/elétrica (o/e) do sinal.

O sinal RF é misturado com um oscilador local para obter uma frequência intermediária (IF) de 55 MHz, foram usados filtros e dois amplificadores elétricos de acordo com as necessidades da configuração.

Na Figura 34-a pode-se observar o esquema do monitoramento do cabo, o qual está composto por 3 componentes principais, um separador (*splitter*), um híbrido (90° H) que funciona como um circulador elétrico e um detector de fase. (*Phase Detector*) O sinal é dividido no separador, um dos sinais é dirigido para o híbrido o qual será o sinal que realize o monitoramento do cabo. No caso que o cabo apresente defeitos causará que uma parte do sinal seja refletida de volta no híbrido e seja direcionado para o detector de fase.

Por outro lado, o outro sinal que sai do separador é dirigido diretamente ao detector de fase como um sinal de referência. O detector de fase recebe o sinal de referência e o sinal refletido realizando a medição de reflectometria no domínio da frequência (FDR) do cobre cada vez que o sinal de monitoramento é selecionado pelo CO.

Os sinais de monitoramento de cobre são modulados, sendo dirigidos para as entradas de osciladores controlados por tensão (VCO) centrados em frequências arbitrárias de monitoramento; as frequências centrais são espaçadas de modo que não há sobreposição da largura de banda dos canais de monitoramento respectivos como se mostra na Figura 34b. O sinal de FM é misturado com um oscilador local correspondente a um canal dedicado SCM upstream; o canal SCM upstream é filtrado e logo combinado com o canal de dados upstream; Finalmente, o sinal resultante é dirigido para modular o laser upstream.

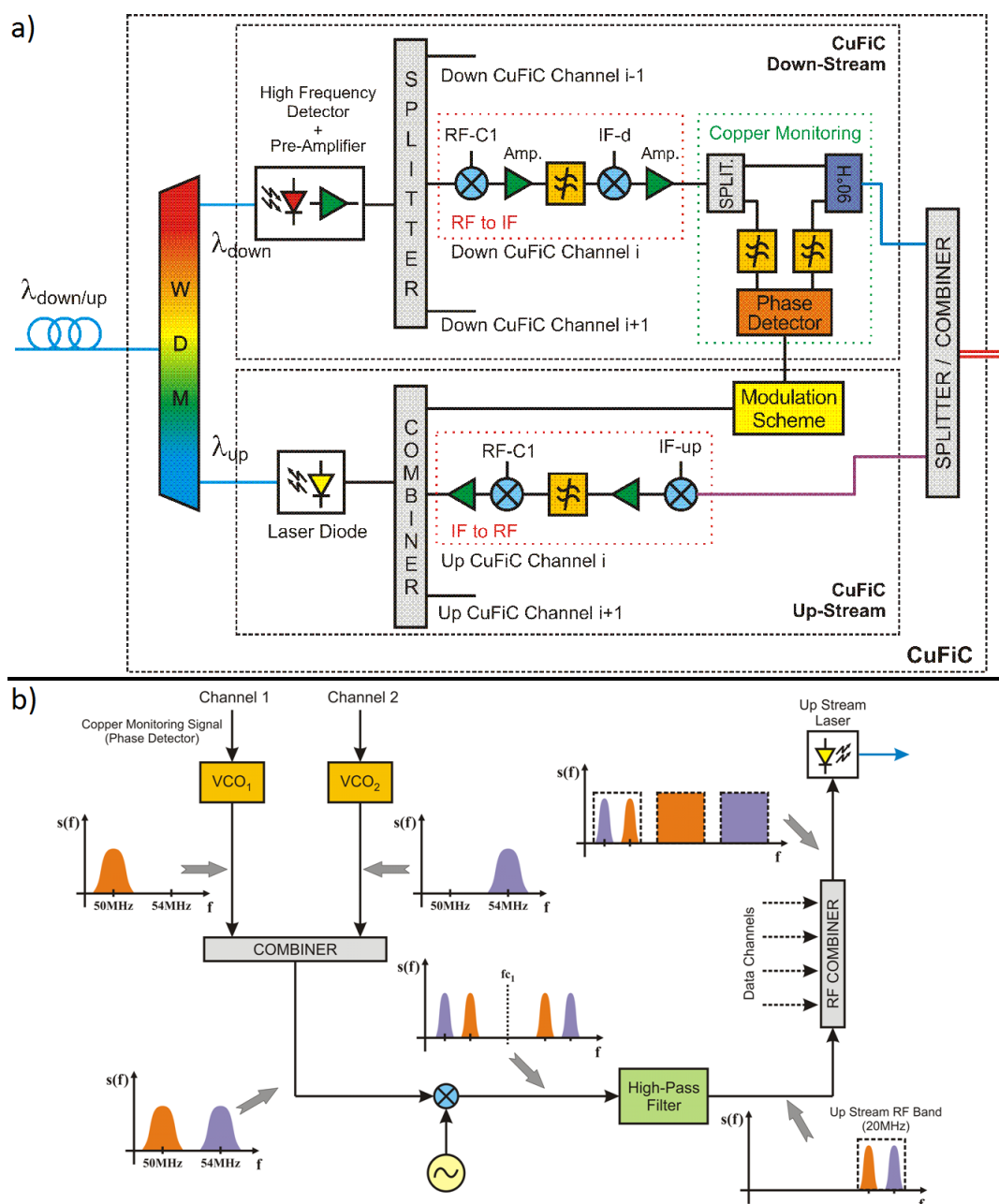


Figura 34. a) CuFiC Downstream e Upstream; b) Esquema de modulação do sinal de monitoramento do cabo.

No CO, o sinal é recebido no fotodetector PIN onde é realizada a conversão opto/elétrica para logo separar o sinal eletricamente em canais de dados e em canais de monitoramento como é mostrado na Figura 35.

Na Figura 35, foi ilustrada a recepção upstream de dois canais de monitoramento e dois canais de dados para entender melhor como funciona a rede com a transmissão de dados e o monitoramento, mas cabe mencionar que no

laboratório só foi realizada a recepção upstream de um canal de monitoramento sendo incluída a recepção de dados apenas de forma ilustrativa.

O sinal de monitoramento é convertido para um sinal RF dentro da banda de frequências de FM mixando o sinal com um sinal RF de 100 MHz.

Já que estes sinais são interpretados como sinais de FM, então um rádio convencional FM (88 MHz-108 MHz) é usado para a interpretação de esses sinais, isto é cada canal FM recebido no CO corresponde a um canal da banda do rádio FM, onde ajustando com precisão a frequência do rádio pode-se selecionar o canal que se quer monitorar. Por exemplo, se quer-se monitorar um canal que tem uma frequência FM de 100.2 MHz, ajustando a frequência no rádio para a mesma frequência se poderá pegar o canal e assim monitorá-lo.

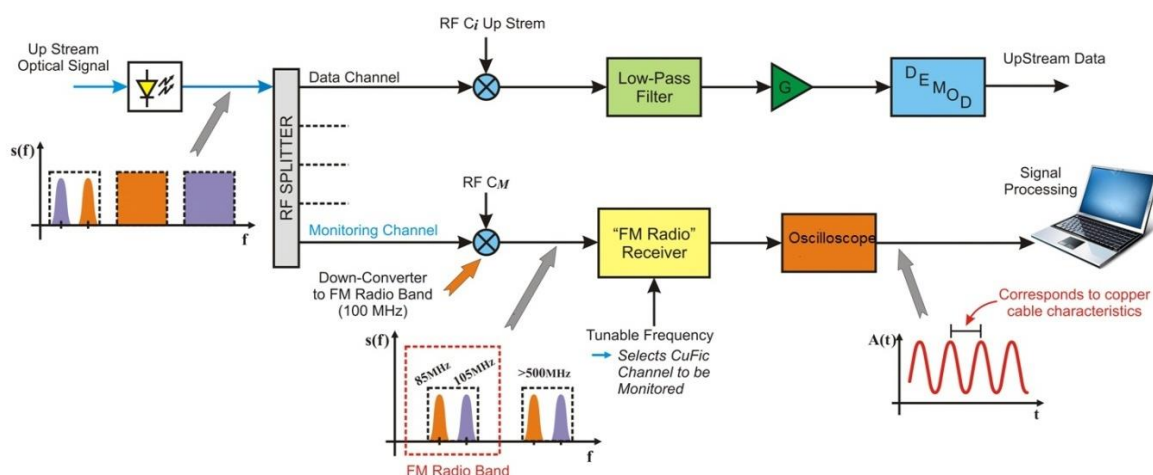


Figura 35. Upstream no CO. Interpretação do Monitoramento do cabo. Low-pass filter (filtro passa baixa), DEMOD (demodulador), FM Radio Receiver (rádio FM), Oscilloscope (osciloscópio).

Uma vez escolhido o canal de monitoramento no rádio FM convencional, no osciloscópio é obtido o sinal para seu respectivo processamento e interpretação.

3.3. Monitoramento em serviço

Uma visão distinta do sistema de monitoramento, é que o monitoramento da fibra pode ser feito em serviço, mas devido às limitações da arquitetura do CuFiC, o monitoramento do cabo de cobre em serviço está fora do alcance deste trabalho.

Para confirmar que o monitoramento seja transparente à transmissão de dados, é preciso avaliar o impacto do monitoramento sobre a transmissão de dados, e a sua viabilidade dentro da arquitetura de comunicação proposta.

Para a transmissão de dados um gerador de sinais vetorial VSG (*Vector Signal Generator*) é colocado no CO, gerando um canal de subportadora RF em 140 MHz de frequência central; dito canal é fornecido com uma largura de banda de 20 MHz o qual transporta sinais LTE OFDM mapeadas em 64-QAM; o espectro do canal a ser transmitido é apresentado na Figura 36.

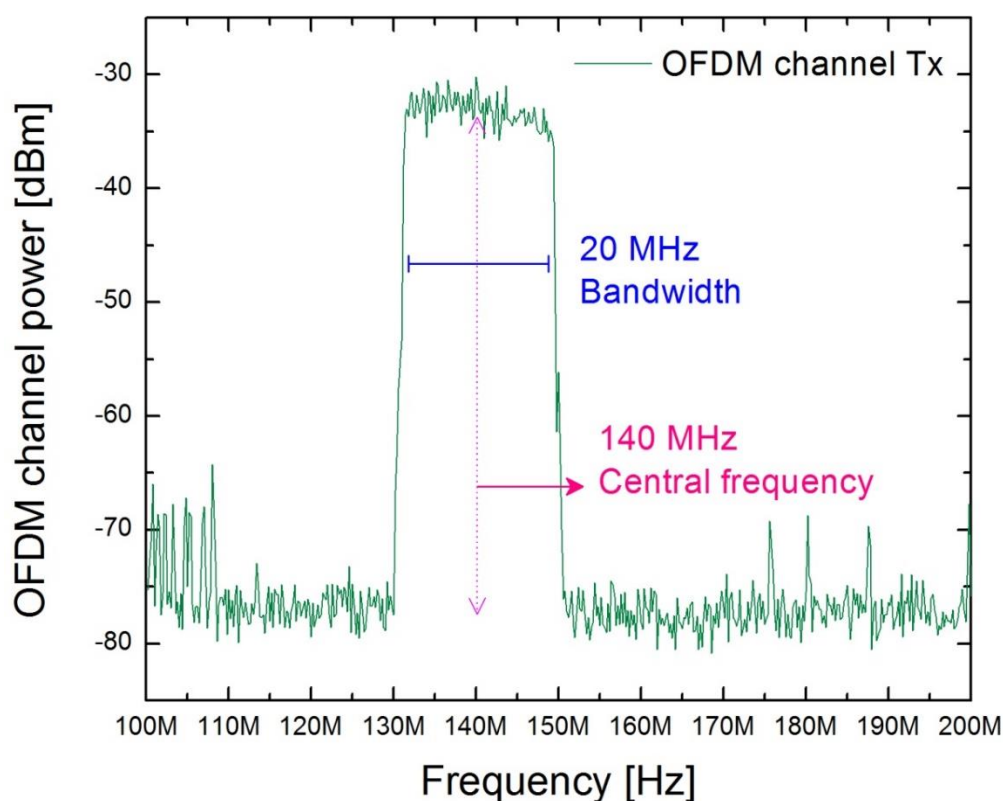


Figura 36. Espectro do canal OFDM gerado pelo Vector Signal Generator VSG.

O sinal OFDM é gerado pelo transmissor (VSG) no CO, o sinal passa através da fibra óptica, do CuFiC, através do enlace de cabo, e chega finalmente ao receptor do lado de downstream.

A fim de avaliar o impacto do monitoramento na transmissão de dados, é avaliado o EVM (% rms) das constelações QAM. Para medir o EVM, um analisador vetorial de sinais (VSA) foi colocado na recepção, isto é no fim do enlace de cabo.

4

Resultados Experimentais

No desenvolvimento deste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos no laboratório de acordo com a montagem experimental descrita no capítulo 3. Com o fim de avaliar e validar a técnica do monitoramento híbrido e do monitoramento em serviço.

4.1.

Monitoramento da rede de acesso híbrida

4.1.1.

Monitoramento da fibra óptica

Neste item são apresentados os resultados das medidas realizadas do monitoramento da fibra óptica como foi descrito no tópico 3.2.1.

Para interpretar os dados adquiridos pelo NA, foi realizado o processamento do sinal no *Matlab* de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 37, onde os dados adquiridos no domínio da frequência (amplitude e fase) são convertidos para o domínio do tempo usando a transformada rápida inversa de Fourier IFFT, logo, é feita a média aos traços da IFFT para obter um resultado mais claro e mais fácil de interpretar. Finalmente, com a velocidade da luz podem-se obter os dados no domínio da distância e assim obter a posição e a magnitude das falhas no enlace de fibra em teste.

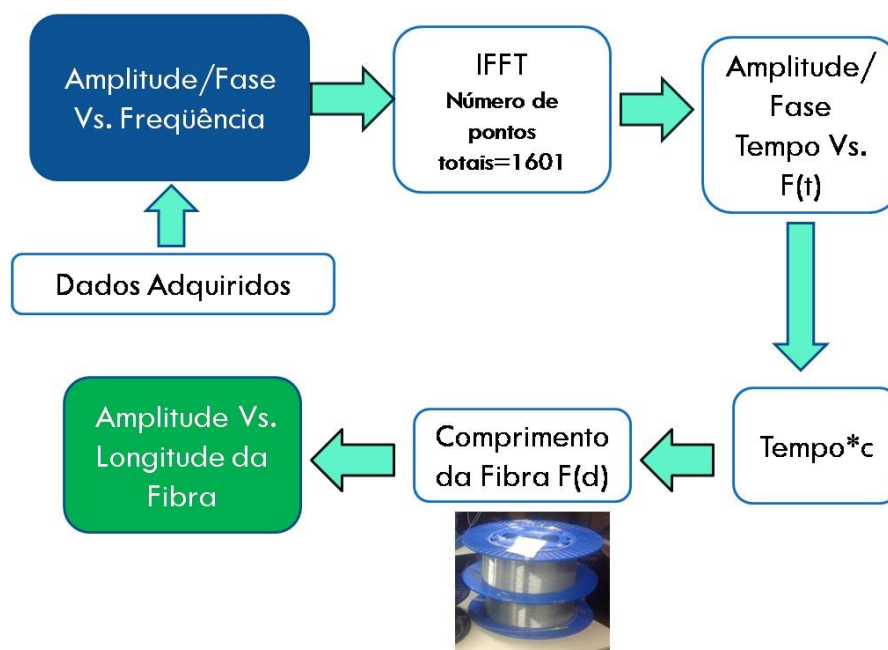


Figura 37. Diagrama de blocos para o processamento do sinal de monitoramento.

As medidas experimentais foram feitas em dois diferentes comprimentos de fibra óptica, o primeiro enlace de 1.7-km aprox. de comprimento composto por duas fibras soldadas (0.9 + 0.8 km) e o segundo enlace de aprox. 3.2 km de comprimento composto também por duas fibras soldadas de (1.1 + 2.1 km).

Na Figura 38, mostra-se o sinal de monitoramento do primeiro enlace de fibra de 1.7 km aprox. onde a curva vermelha representa o enlace da fibra limpo, sem falhas, mostrando o fim da fibra em 1.76 km aprox. e tem-se a curva preta que representa o mesmo enlace com falhas, onde claramente pode-se observar uma perda em 0.91 km, a perda foi induzida dobrando a fibra.

O resultado do sinal de monitoramento da fibra para o segundo enlace apresenta-se na Figura 39, onde a curva vermelha apresenta uma falha de menor intensidade que da curva preta, ambas as falhas foram perdas induzidas por curvatura da fibra na mesma posição. A figura mostra que as falhas foram detectadas na posição de 1.13 km e o fim da fibra na posição 3.2 km onde nota-se uma reflexão alta.

Para comparar os resultados obtidos, com um dispositivo OTDR convencional foram monitorados os dois mesmos enlaces descritos anteriormente como medidas de referência.

O resultado de monitoramento de referência obtido com o dispositivo OTDR convencional para o primeiro enlace indica que para o fim da fibra a posição é 1.77 km e a posição da falha encontra-se na posição 0.92 km como se mostra na Figura 40 e para o segundo enlace o monitoramento realizado com o OTDR apresentado na Figura 41 mostra que as perdas se encontram na posição 1.14 km e o fim da fibra na posição 3.2 km.

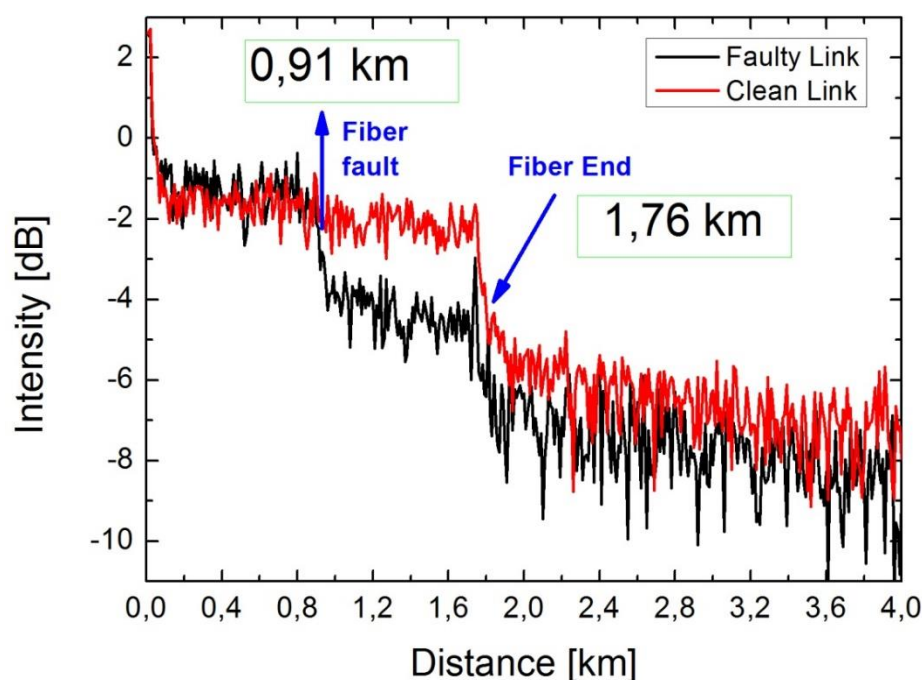


Figura 38. Curva do monitoramento da fibra no primeiro enlace sem falhas e com falhas.

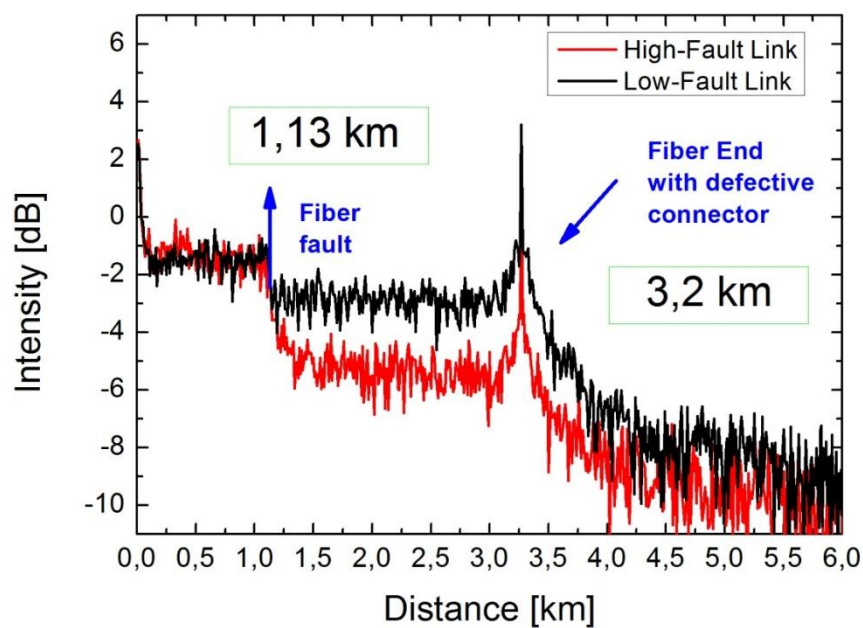


Figura 39. Curva do monitoramento da fibra no segundo enlace, com diferentes intensidades de falhas.

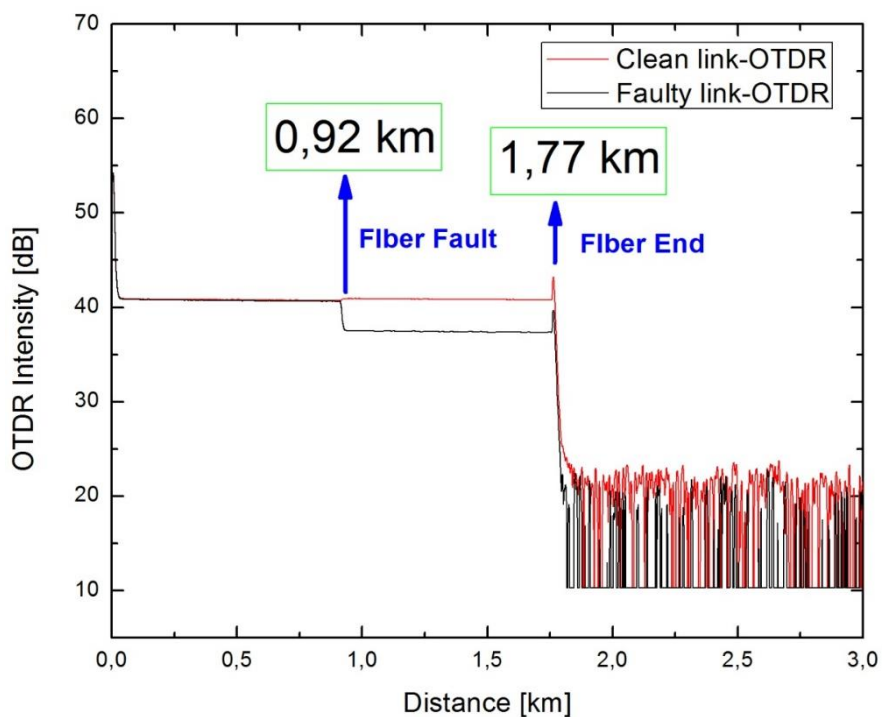


Figura 40. Medida de referência do monitoramento feita com o dispositivo OTDR convencional.

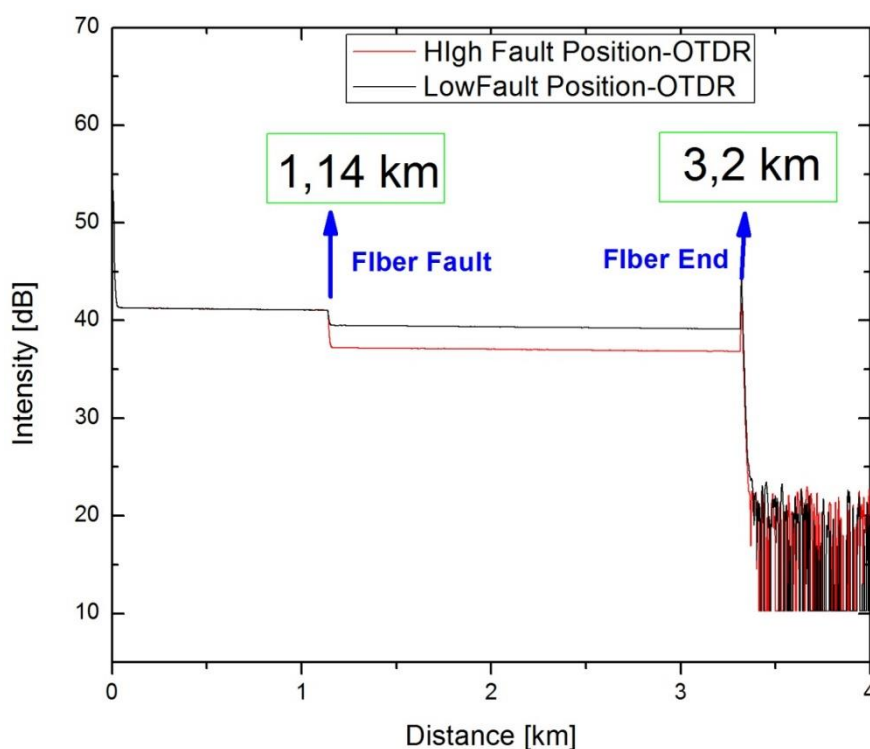


Figura 41. Curva do monitoramento da fibra do segundo enlace usando o OTDR convencional.

É necessário clarificar que a medida da função de transferência retroespalhada obtida no NA não é igual que uma medida da técnica OFDR, onde o sinal retroespalhado bate com um sinal de referência e a escala do tempo é dada pelo rango do sinal de varrido RF. Neste trabalho a técnica faz uma varredura dentro de uma frequência inicial e uma final onde desde o ponto de vista do NA corresponde a dividir o intervalo de frequências em passos, no máximo 1601. O NA segura o valor da frequência por um tempo dado antes de passar para o valor do próximo passo.

Inicialmente, o laser KAP-10 o qual foi usado para o monitoramento da fibra e do cabo, era o único laser com modulação direta que estava disponível no laboratório, deixando esse laser como uma única opção. Em seguida, outro laser encontrou-se disponível, o laser Mitsibushi, o qual uma vez caracterizado apresentou uma resposta mais linear como se observa na Figura 42 em quanto à resposta do laser KAP-10 Figura 43.

Neste contexto, estendendo a região linear do laser e sua potência óptica de saída é de grande interesse pela mesma razão: estas duas características

possibilitariam primeiro, aumentar a potência de amplitude de pico de cada canal de subportadora e, com isso, aumentar a potência óptica detectada no canal de monitoramento desejado.

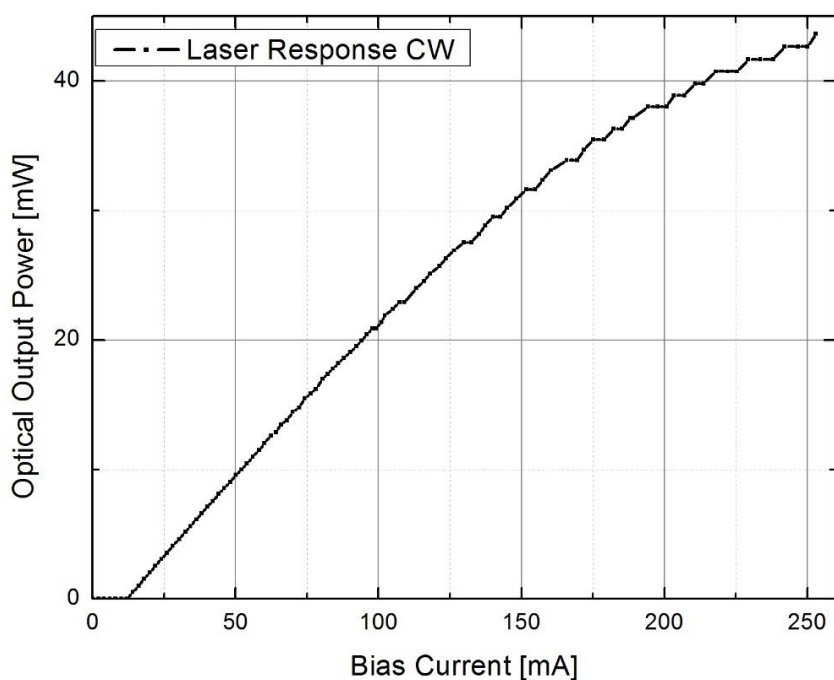


Figura 42. Resposta do Laser Mitsubishi. Potencia óptica de saída (mW) Vs. Corrente de bias (mA).

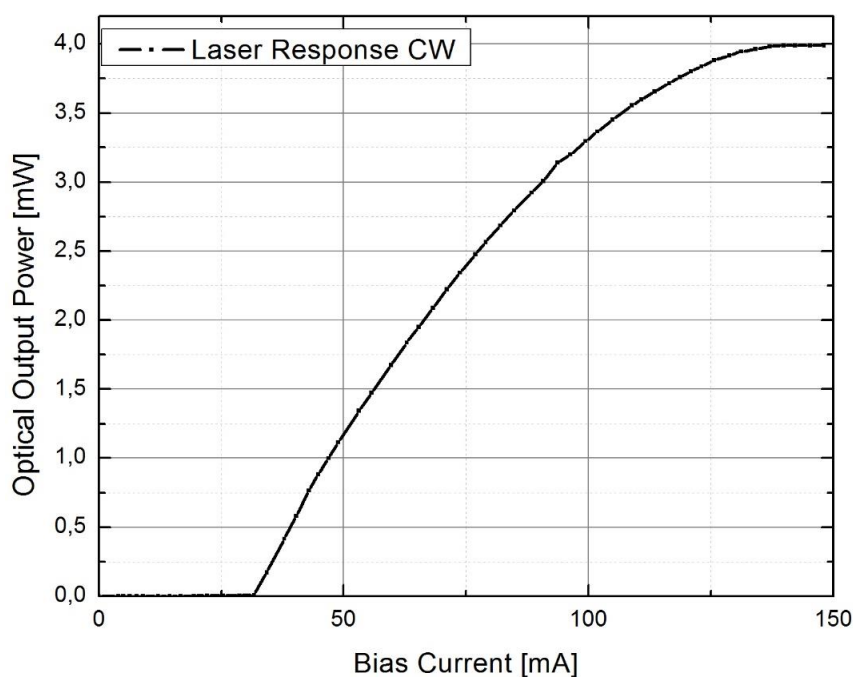


Figura 43. Resposta do Laser KAP-10. Potencia óptica de saída (mW) Vs. Corrente de bias (mA).

Na montagem foi substituído o laser KAP-10 pelo Mitsubishi e foi realizado o monitoramento da fibra para o primeiro enlace de fibra (0.9+0.8 km) mostrado na Figura 38.

Para um desempenho ótimo, o laser KAP-10 foi alimentado com uma corrente de bias de 55 mA e a tensão de oscilação máxima foi determinada entre 100 e 150 mVp para cada canal de subportadora. No caso do laser Mitsubishi, a corrente de bias foi de 90mA com uma tensão de oscilação máxima entre 325 e 375 mVp.

Foram feitas duas medições a fim de obter uma melhor faixa dinâmica. Na Figura 44 mostra-se o resultado do monitoramento com o laser Mitsubishi, de duas situações distintas, no mesmo enlace de fibra, onde a curva preta mostra o enlace da fibra sem falhas e, a curva vermelha mostra o enlace da fibra com uma falha (perda induzida) no meio do enlace.

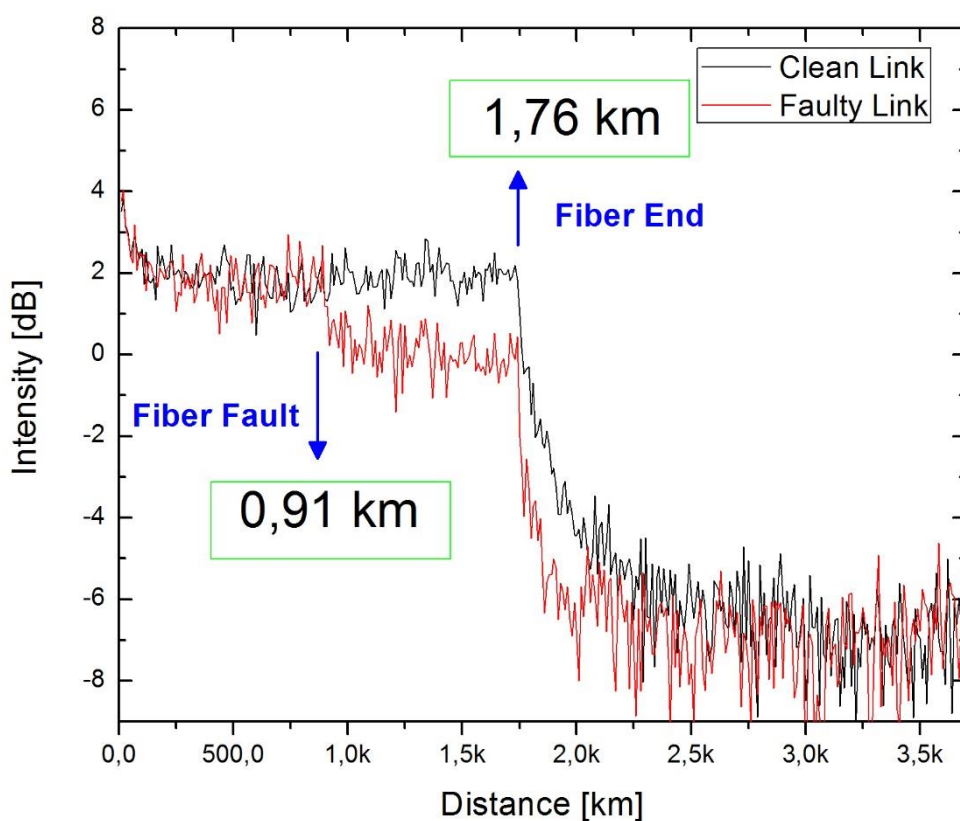


Figura 44. Curva de monitoramento da fibra óptica realizada com o laser Mitsubishi.

Finalmente, obtidos os resultados anteriores usando as duas fontes ópticas (o laser KAP-10 e o laser Mitsubishi), a continuação mostra-se na Figura 45 uma comparação do monitoramento dos dois resultados obtidos, onde se observa que o monitoramento feito com o laser Mitsubishi apresenta uma faixa dinâmica de ~ 9 dB maior do que ~ 6 dB do KAP-10.

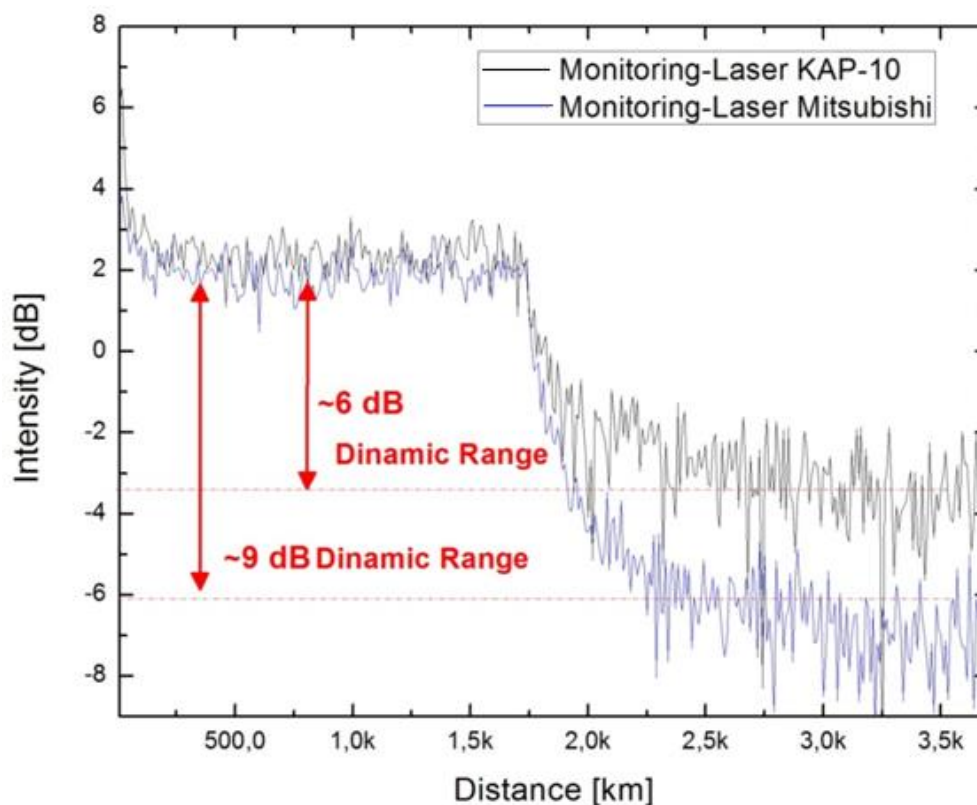


Figura 45. Curva de monitoramento com o laser Mitsubishi e o KAP-10 apresentando a faixa dinâmica.

4.1.2. Monitoramento do cabo no CuFiC

Neste item serão apresentados os resultados do monitoramento do cabo de cobre feitos pelo CuFiC que foram interpretadas no CO de acordo com a configuração proposta no tópico 3.2.2.

Em primeiro lugar, foram testados seis diferentes comprimentos de cabo de $50\ \Omega$ para investigar as características do sinal quando a terminação fosse definida como aberta (*open*), o qual foi determinado para simular as falhas na linha de

transmissão e assim qualquer diferença de impedância no cabo possa ser detectada. [47]

Foram caracterizados os diferentes trechos de cabos medindo o parâmetro S_{11} com o NA que executa uma técnica FDR mais confiável para usá-la como referência para os nossos sinais de monitoramento. Deve-se mencionar, que o parâmetro S_{11} [37] do NA mede o coeficiente de reflexão entre o sinal incidente e o sinal refletido através do dispositivo em teste, neste caso do cabo de cobre, portanto só é necessária a conexão de uma das terminações do cabo ao equipamento (NA) como se mostra na Figura 46.

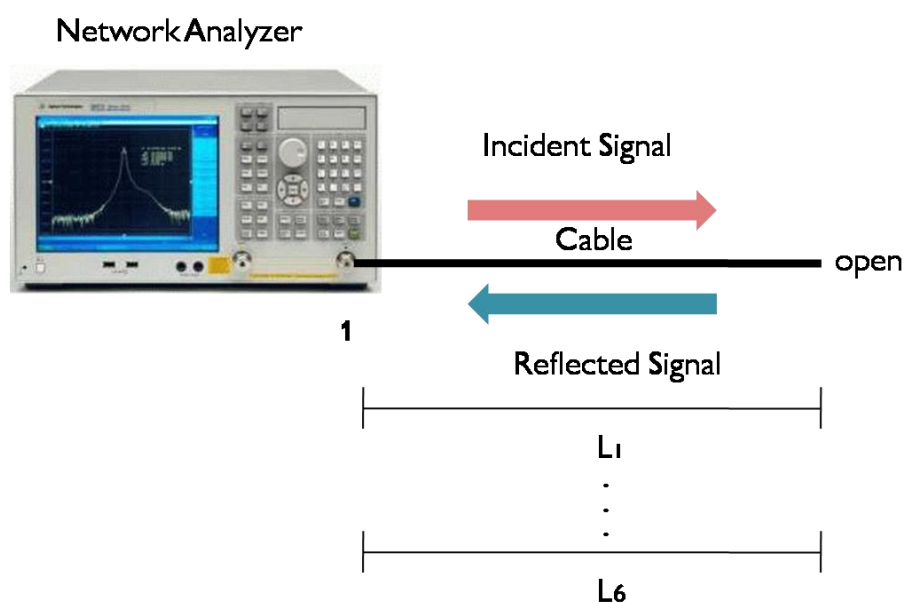


Figura 46. Configuração para obter medidas de referência de seis diferentes comprimentos de cabo com o NA. L: comprimento.

Na Figura 47 seis diferentes gráficos são apresentados, cada um deles corresponde às medições do parâmetro S_{11} no domínio da frequência (eixo horizontal), onde o eixo vertical representa a variação de fase entre 180° e -180° dos diferentes trechos de cabo.

Determinando o intervalo de frequência Δf em um período de tempo t para cada cabo, usando a velocidade da luz $c=3*10^8 [m/s]$ e o índice de refração do cabo $n=1.219512$, pode-se calcular o comprimento L do cabo de cobre usando a seguinte relação:

$$L = \frac{c}{\Delta f 2n} \quad (15)$$

Na Tabela 5 mostra-se o intervalo de frequências Δf calculado a partir da Figura 47 e o comprimento de cada trecho de cabo L, isto é a posição da falha.

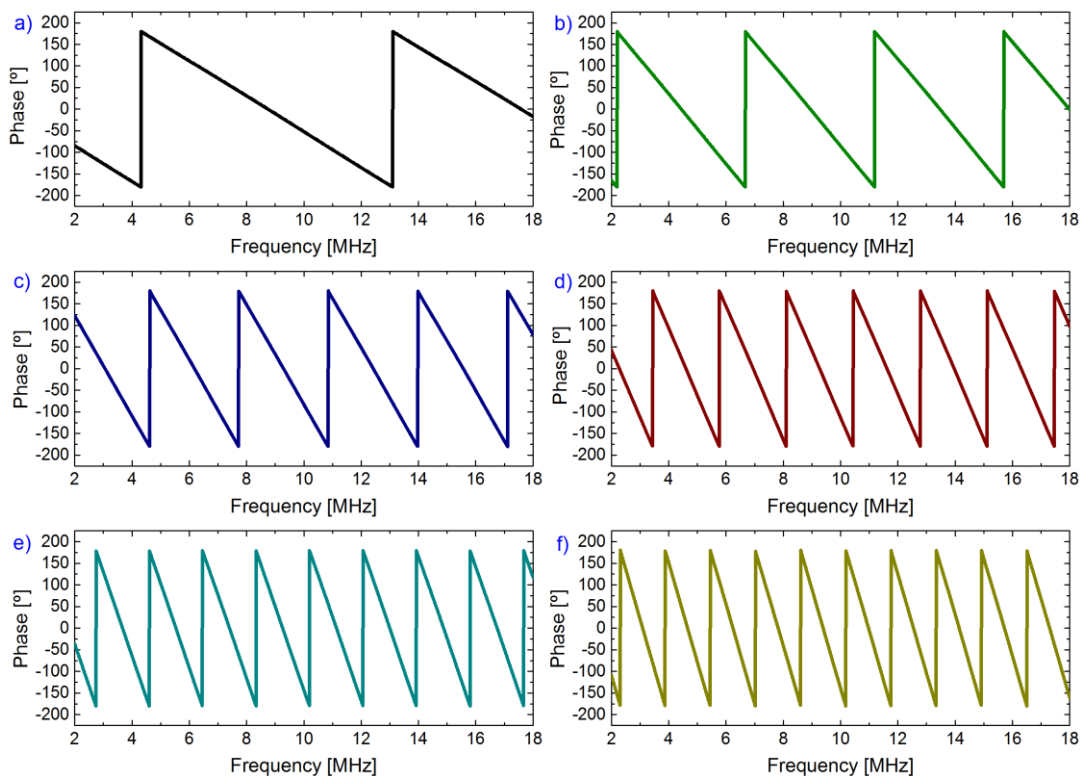


Figura 47. Medidas de referência do parâmetro S_{11} obtidas pelo Analisador de rede para os seis diferentes trechos de cabo em teste (a)-(f).

Tabela 5 Resultados de referência do monitoramento do cabo usando o NA.

Cabo	Δf [MHz]	L [m]
A	8.79	13.99
B	4.48	27.46
C	3.11	39.55
D	2.32	53.02

Cabo	Δf [MHz]	L [m]
E	1.87	65.78
F	1.60	76.88

Uma vez obtidos os dados de referência, o passo seguinte foi conectar os diferentes cabos no CuFiC para realizar o monitoramento desde o CO e interpretar o sinal recebido no osciloscópio que é adquirido em unidades de Amplitude [v] Vs. Tempo [s].

Uma vez adquirido o sinal de monitoramento para os diferentes trechos de cabo, o processamento dos sinais foi feito utilizando a ferramenta *Matlab*.

Para o processamento dos dados, foram usadas duas funções principais: a função *decimate* para remover os componentes de alta frequência do sinal e a transformada rápida de Fourier FFT para obter a posição da falha no domínio da distância respeito à variação da fase do sinal.

Antes de realizar a FFT foi feita uma relação entre o intervalo da varredura de frequências Δf e o número de pontos do sinal, em outras palavras uma relação de hertz por ponto para obter dados que relacionem a frequência com a distância.

Se $\Delta f = 20$ MHz para um vetor de 500 pontos, para um vetor de 16384 pontos a frequência máxima será:

$$f(\text{max}) = \frac{20 \text{ MHz} * 16384}{500}$$

$$f(\text{max}) = 655.36 \text{ MHz}$$

E o intervalo do tempo:

$$\Delta t = \frac{1}{f(\text{max})}$$

$$\Delta t = \frac{1}{655.36 \text{ MHz}}$$

$$\Delta t = 1.52 \text{ ns}$$

Substituindo a velocidade da luz $c=3*10^8$ [m/s] e o índice de refração do cabo $n=1.219512$, na relação 15 pode-se calcular quantos metros tem-se por ponto:

$$\Delta L = \frac{c * \Delta t}{2n}$$

$$\Delta L = \frac{3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1.52 \text{ ns}}{2 * 1.219512}$$

$$\Delta L = 0.1876 \text{ m}$$

O seguinte passo é usar a transformada de Fourier FFT para converter os dados do domínio do tempo ao domínio da frequência. Na Figura 48 tem-se a FFT de cada sinal de monitoramento. Note-se que o eixo X se encontra em pontos/Hz, isto devido a relação feita anteriormente.

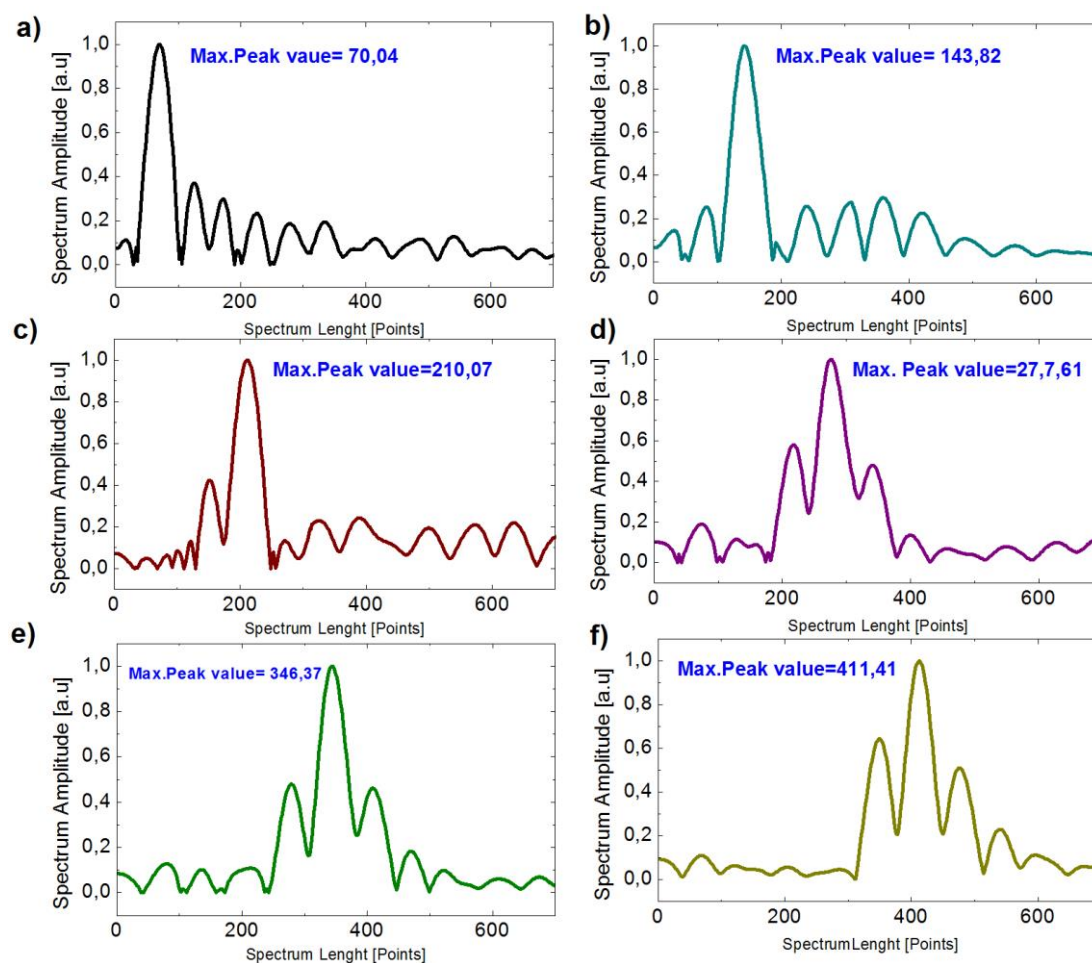


Figura 48 FFT dos sinais de monitoramento do cabo, em ordem de menor a maior comprimento a)-f). Relação pontos/Hz.

Uma vez feita a FFT como se mostra na Figura 48, o último passo é converter o eixo x para o domínio da distância com a seguinte relação e assim determinar as posições das falhas para cada cabo:

$$f(d) = \text{valor do pico de maior intensidade} * \Delta L$$

Depois de processar os sinais adquiridos pelo NA, na Figura 49 são apresentados em ordem (a)-(f) de menor a maior comprimento, os resultados do monitoramento do cabo realizado pela técnica FDR no CO, mostrando as posições das falhas no cabo. A curva vermelha mostra a transformada de Fourier FFT linear em função da distância $f(d)$, e a curva preta mostra a forma (*bell curve*) de uma distribuição Gaussiana mostrando um grande pico arredondado afinado em cada extremidade da intensidade dos sinais do monitoramento do cabo.

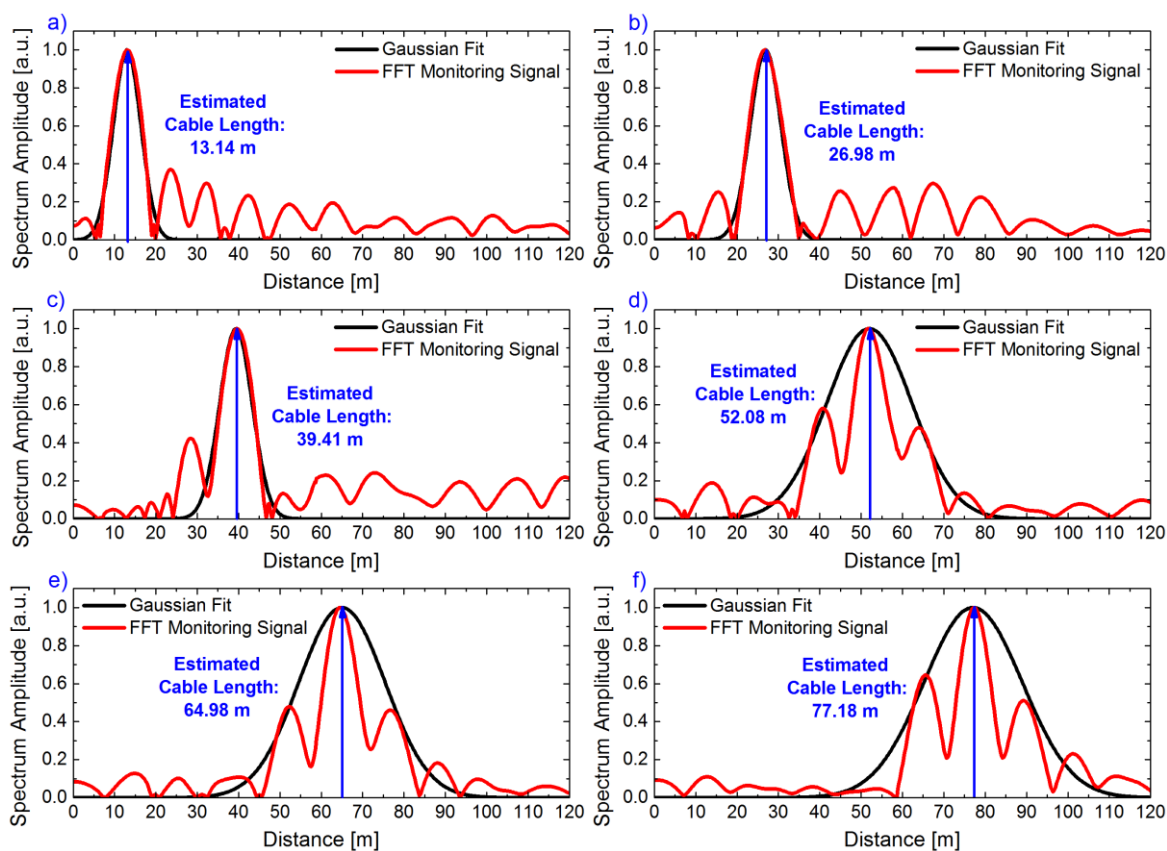


Figura 49. Resultados do monitoramento do cabo para diferentes trechos, em ordem de menor a maior comprimento (a) – (f).

Para esclarecer melhor os resultados, na Tabela 6 incluiu-se os dados de referência que representam o parâmetro S_{11} obtido pelo NA mostradas na Figura 47 e as medidas do CuFic mostradas na Figura 49 que são os resultados da técnica FDR proposta dos seis diferentes comprimentos de cobre.

Comparando os resultados da Tabela 6, pode-se apreciar que a diferença mínima é de 0.14 metros e a máxima de 0.94 metros.

Tabela 6. Comparação das medidas obtidas para o monitoramento do cabo.

Trecho de Cabo	Medidas do Monitoramento FDR [m]	Medidas de referência (NA) [m]	Erro [m]
A	13.14	13.99	0.85
B	26.98	27.46	0.48
C	39.41	39.55	0.14
D	52.02	53.02	0.94
E	64.98	65.78	0.80
F	77.18	76.88	0.31

4.2.

Impacto do monitoramento em serviço

Para quantificar o desempenho da comunicação na nossa arquitetura e o impacto do monitoramento da fibra em serviço, foi medido o EVM (% rms).

Neste item serão apresentados os resultados experimentais obtidos do EVM de acordo o descrito no tópico 3.3.

É importante mencionar que o valor do EVM (% rms) mínimo requerido de acordo com a 3ª Generation Partnership Project (3GPP) para o formato da modulação 64-QAM é de 8% [48].

De acordo com a configuração inicial da arquitetura WDM/SCM- PON, o sinal de dados SCM recebido no CuFic é convertido para banda base antes de ser convertido para uma frequência intermediária IF. O espectro da Figura 50, mostra o canal OFDM transmitido esperado, outro canal adjacente e, em frequências um pouco mais altas um espelho desses canais com menor amplitude e maior distorção.

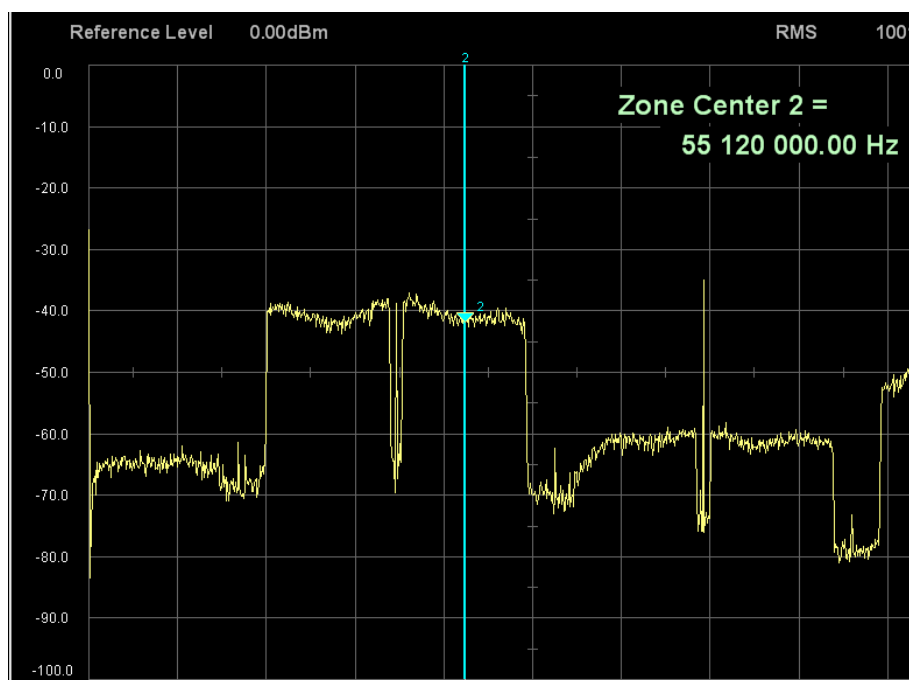


Figura 50. Espectro do sinal recebido no VSA.

Os valores medidos do EVM, para a transmissão de dados e para o monitoramento em serviço são apresentados na Figura 51 e na Figura 52 respectivamente com as constelações de QAM; tem-se um valor de 6.90 % de EVM para a transmissão de dados com o monitoramento desligado, e uma vez ligado, o EVM medido foi de 7.12 %.

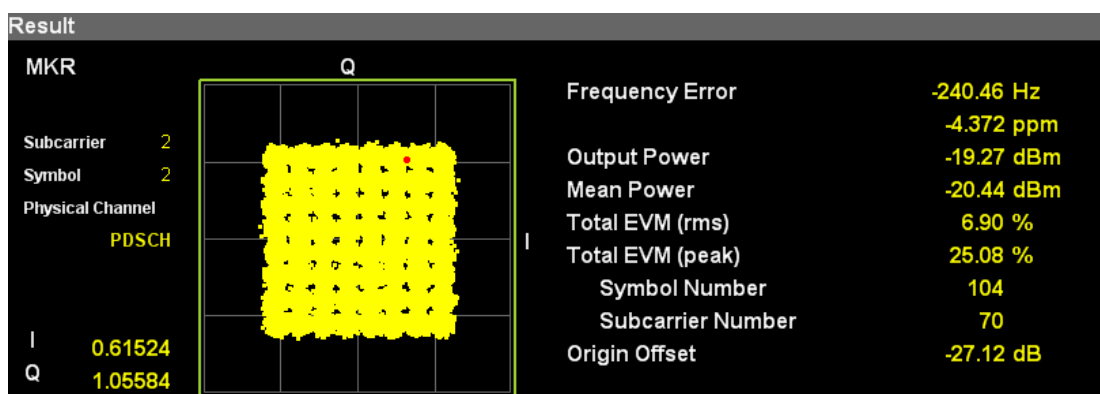


Figura 51. Constelação e EVM do sinal de dados recebido no VSA com o monitoramento desligado.

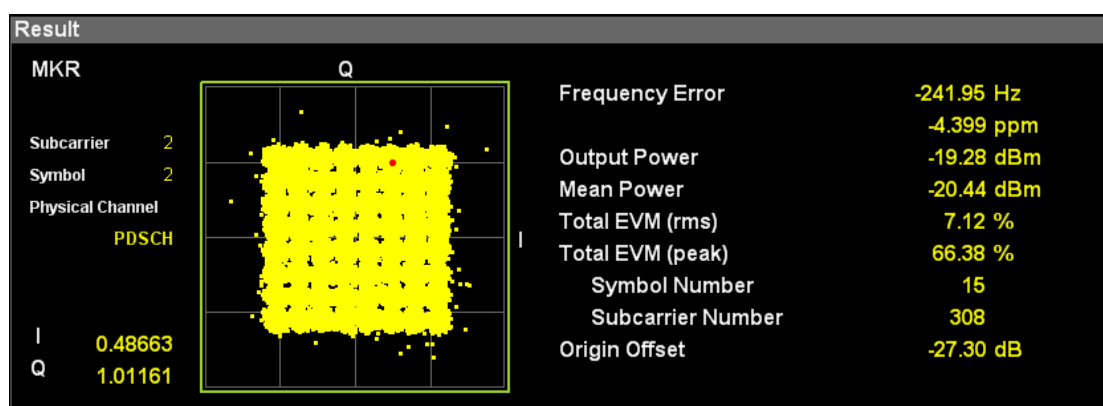


Figura 52. Constelação e EVM do monitoramento em serviço.

Analisando os valores obtidos, foram realizadas novas medidas com o fim de melhorar a qualidade da comunicação, é de reduzir o impacto do monitoramento em serviço, para isso foi necessário modificar a configuração do CuFiC.

Como foi descrito anteriormente, o sinal SCM de RF recebido no CuFiC era convertida para banda base antes de convertê-la para IF, isso foi modificado como se descreve na Figura 53, convertendo diretamente o sinal recebido para uma frequência intermédia IF, simplificando assim a configuração.

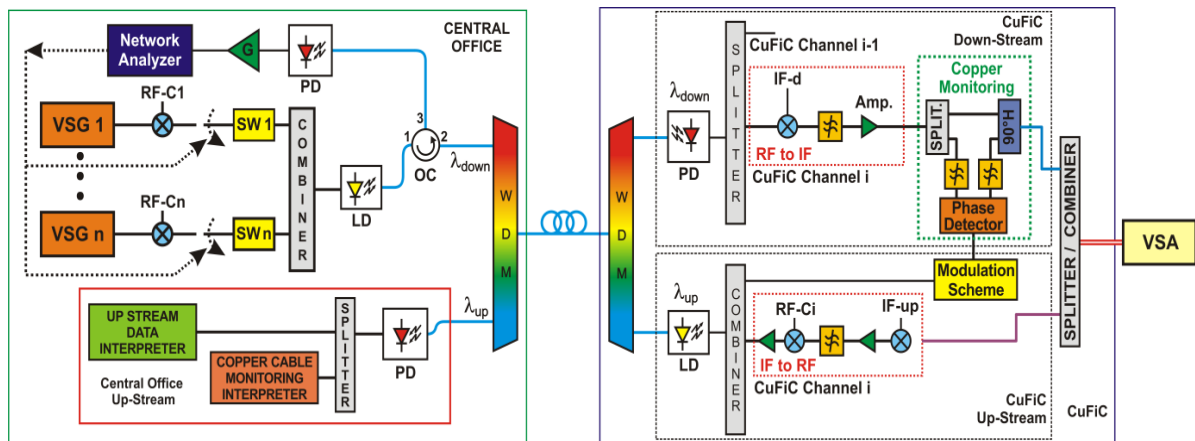


Figura 53. Diagrama de blocos do setup experimental da arquitetura WDM/SCM-PON para o monitoramento em serviço.

Modificada a configuração do CuFic, foi medido novamente o parâmetro EVM e obtidas as constelações no VSA. Para melhorar e clarificar os resultados, na Figura 54 é mostrado numa curva os diferentes valores do EVM em relação à amplitude de modulação do canal OFDM mostrado na Figura 36.

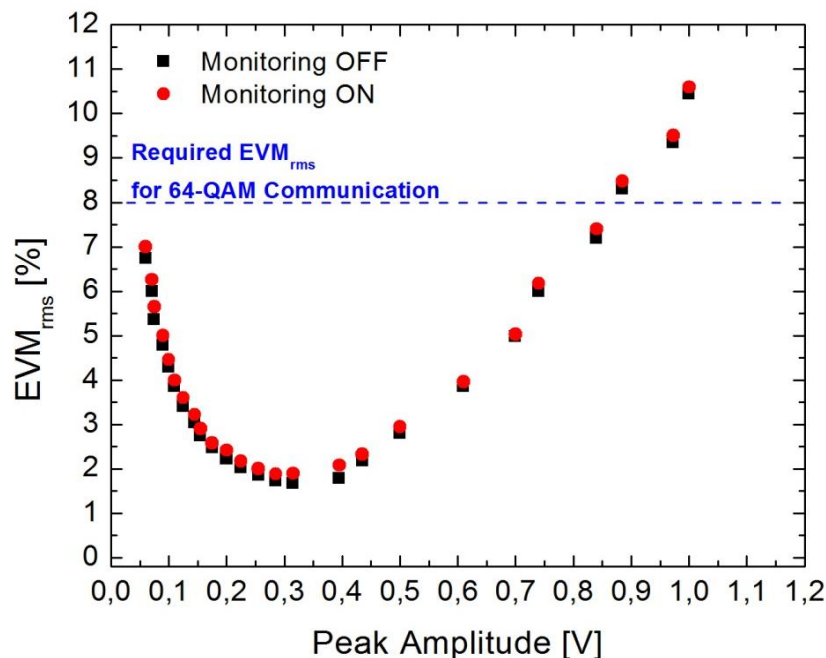


Figura 54. Curva do EVM Vs. Amplitude pico do canal OFDM.

Analisando a Figura 54, existe um ponto ideal para o qual o desempenho da comunicação é o melhor. Estas condições de trabalho dependem, principalmente,

da potência de entrada de RF, e da corrente de polarização do laser. O EVM medido para diferentes amplitudes de entrada do canal mostra que o ponto de trabalho ótimo do sistema está entre 270 mVp e 310 mVp atingindo um EVM de ~2%; mantendo a amplitude de pico do canal de monitoramento (~100-150 mVp) dentro de 1/8 do limite de profundidade de modulação do laser ao igual que o canal de dados, o EVM atinge um valor de ~ 3 %.

É interessante notar que o monitoramento foi validado pelos resultados mostrados; uma vez que ao ligar o sinal de monitoramento não se observa quase nenhum impacto sobre a transmissão de dados.

A fim de confirmar que o impacto nos dados é insignificante, apresenta-se, na Figura 55 e na Figura 56 as constelações do sinal de dados recebido quando o sinal de monitoramento é ligado e desligado respectivamente. Para a transmissão de dados observa-se um EVM de 3.42 % e, para o monitoramento em serviço, o EVM tem uma insignificante variação em relação ao valor anterior, apresentando um valor de 3.6 %.

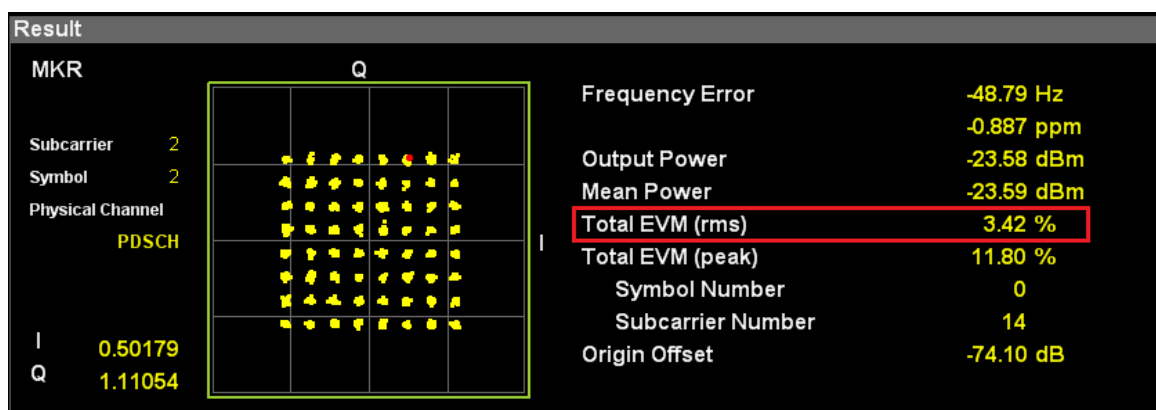


Figura 55. Valor do EVM e constelação 64-QAM adquirida do sinal recebido no VSA com o monitoramento desligado.

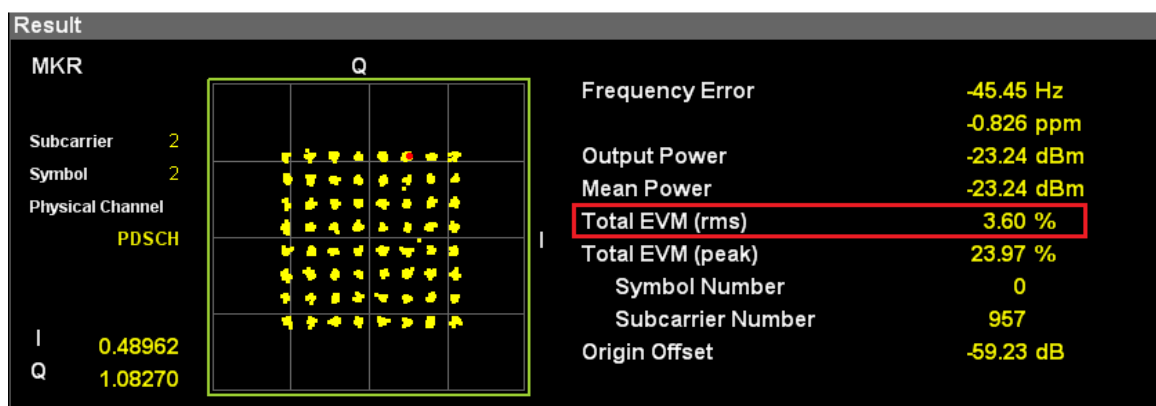


Figura 56. Valores do EVM e a constelação 64-QAM adquirida do sinal recebido no VSA com o monitoramento ligado.

Foram de 130-150 MHz e 170-190 MHz as frequências usadas para o canal de dados SCM e para o canal de monitoramento SCM respectivamente, mantido a largura de banda de 20 MHz e respeitando o uso de 1/8 de amplitude de modulação por cada canal.

5 Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho de acordo com os objetivos específicos estabelecidos, foi possível chegar às seguintes conclusões.

- Demonstrou-se experimentalmente que a unidade denominada CuFiC proposta como nó de distribuição elétrica, é compatível com a arquitetura da rede de acesso WDM/SCM-PON, conseguindo assim uma interface óptico/elétrica remota capaz de alimentar eletricamente as antenas de rádio RH.
- Comparando os resultados obtidos tanto pela técnica de OTDR como pela técnica de monitoramento da fibra proposta neste trabalho, com relação à localização da posição das falhas, a comparação mostra uma diferença de apenas 10 metros no máximo, por tanto, a técnica de monitoramento baseada no sinal de retroespalhamento de uma subportadora RF dentro de um sistema de transmissão multiplexado por subportadoras SCM foi alcançada com sucesso.
- Para o monitoramento do enlace de cabo de cobre foi usado o mesmo sinal RF do monitoramento da fibra óptica, onde diferentes trechos de cabos que alimentam às RHs foram caracterizados pelo NA, a fim de obter medidas de referência confiáveis de FDR para serem comparadas com os resultados obtidos pela técnica FDR proposta neste trabalho para o monitoramento do cobre FDR. A comparação apresenta uma diferença máxima de 0.94 m e mínima de 0.14 m o qual demonstra que a técnica FDR realizada no CuFiC foi precisa e alcançada com sucesso.
- Além do monitoramento da rede de acesso, avaliou-se o desempenho da transmissão de dados e o impacto do monitoramento em serviço. Para a configuração inicial do CuFiC, os dados do EVM foram melhorados com a modificação feita da configuração, com valores de 6.9 % para 3.6 % em quanto à transmissão de dados e de 6.42% para 3.41% no caso do

monitoramento em serviço. Concluindo claramente que a segunda configuração oferece uma melhoria notável e significativa do EVM, mostrando que a transmissão de dados e o monitoramento da fibra podem coexistir com um impacto insignificante na qualidade de comunicação.

Desta forma e como uma conclusão geral pode-se dizer que os objetivos de monitoramento desta pesquisa foram atingidos, dado que a arquitetura do CuFiC montada como o nó de distribuição elétrica do sinal, permite ao escritório central CO centralizar o monitoramento da rede usando o mesmo sinal subportadora SCM, tanto para a fibra como para o cabo de cobre, além de permitir que o monitoramento seja efetuado varrendo a frequência de um canal com uma determinada largura de banda que ocupa um canal único vazio de dados, ou um canal extra SCM. Embora a faixa dinâmica é limitada a $\sim 8\text{dB}$, a proposta de curto alcance SCM-PON é compatível com o desempenho do monitoramento do sistema.

Recomendações

Para o monitoramento do cobre, se sugere estudar as características do cabo de cobre de $100\ \Omega$ com o fim de aplicar a técnica de monitoramento FDR proposta, e atingir uma maior cobertura em quanto a redes de rádio acesso, já que nesta pesquisa o monitoramento foi limitado para cabos de $50\ \Omega$.

Para o monitoramento se recomenda manter e respeitar a amplitude de profundidade de modulação para cada canal SCM, para isto é preciso caracterizar a fonte óptica e determinar a região linear do laser de acordo com a variação da corrente de polarização.

Com relação à transmissão de dados, o monitoramento do cabo a arquitetura do CuFiC proposta não permite realizar o monitoramento em serviço portanto para monitorar o cabo é necessário substituir o sinal de dados pelo sinal de monitoramento, isto é tem-se que trocar de canal para realizar o monitoramento ou transmitir.

- [1] "Optical Communications Market Research Company, News & Reports." [Online]. Available: <http://www.lightcounting.com/Mobile.cfm>.
- [2] Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification, 2013.
- [3] A. Pizzinat, P. Chanclou, T. Diallo, and F. Saliou, "Things you should know about fronthaul," in *2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2014, pp. 1–3.
- [4] P. J. Urban, G. C. Amaral, and J. P. von der Weid, "Fiber Monitoring using a Subcarrier Band in a Subcarrier Multiplexed Radio-over-Fiber Transmission System for applications in Analog Mobile Fronthaul," *J. Light. Technol.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.
- [5] S. LALLUKKA and P. RAATIKAINEN, "Passive Optical Networks: Transport Concepts.," 2007.
- [6] "G.983.1 : Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas." [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.1-200501-I/es>.
- [7] "IEEE SA - 802.3ah-2004 - IEEE Standard for Information technology Local and metropolitan area networks- Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks." [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3ah-2004.html>.
- [8] "IEEE 802.3 ETHERNET." [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/>.
- [9] "G.984.1 : Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics." [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1/en>.
- [10] "G.987 : 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms." [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987-201206-I/en>.
- [11] "IEEE P802.3ba 40Gb/s and 100Gb/s Ethernet Task Force." [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/ba/>.

- [12] “Redes ópticas 10G, 40G, 100G y ¿pronto 400G?,” *Telesemana*, 30-May-2013. [Online]. Available: <http://www.telesemana.com/blog/2013/05/30/redes-opticas-10g-40g-100g-y-pronto-400g/>.
- [13] “Review of the efficiency and prudence of NBN Co’s fibre, wireless and satellite network design, Analysis Mason report, 2012”.
- [14] K. Yuksel, V. Moeyaert, M. Wuijpart, and P. Mégret, “Optical layer monitoring in passive optical networks (PONs): A review,” in *Proceedings of 10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2008), Athens, Greece, 2008*, pp. 92–98.
- [15] J. Wang, P. E. C. Stone, Y.-J. Shin, and R. A. Dougal, “Application of joint time–frequency domain reflectometry for electric power cable diagnostics,” *IET Signal Process.*, vol. 4, no. 4, p. 395, 2010.
- [16] D. V. Caballero, “Supervisão de redes ópticas passivas WDM-PON.” DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA PUC-Rio, 2013.
- [17] “L.53 : Optical fibre maintenance criteria for access networks.” .
- [18] D. Derickson, *Fiber Optic Test and Measurement*. Prentice Hall PTR, 1998.
- [19] J. Nakayama, K. Iizuka, and J. Nielsen, “Optical fiber fault locator by the step frequency method,” *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 3, pp. 440–443, 1987.
- [20] D. W. Dolfi, M. Nazarathy, and S. A. Newton, “5-mm-resolution optical-frequency-domain reflectometry using a coded phase-reversal modulator,” *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 8, pp. 678–680, 1988.
- [21] K. Yuksel, M. Wuijpart, V. Moeyaert, and P. Megret, “Optical frequency domain reflectometry: A review,” in *2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2009, pp. 1–5.
- [22] A. Banerjee, Y. Park, F. Clarke, H. Song, S. Yang, G. Kramer, K. Kim, and B. Mukherjee, “Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited],” *J. Opt. Netw.*, vol. 4, no. 11, p. 737, 2005.
- [23] “G.695 : Interfaces ópticas para aplicaciones de multiplexación por división aproximada en longitud de onda.” [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.695-201501-I/es>.
- [24] “G.694.2 : Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda.” [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/es>.

- [25] Y. Hibino, "An array of photonic filtering advantages: arrayed-waveguide-grating multi/demultiplexers for photonic networks," *IEEE Circuits Devices Mag.*, vol. 16, no. 6, pp. 21–27, Nov. 2000.
- [26] P. Munoz, D. Pastor, and J. Capmany, "Modeling and Design of Arrayed Waveguide Gratings," *J. Light. Technol.*, vol. 20, no. 4, p. 661, Apr. 2002.
- [27] "G.692 : Interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos." [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.692-199810-I/es>.
- [28] K. W. Lim, E. S. Son, K. H. Han, and Y. C. Chung, "Fault localization in WDM passive optical network by reusing downstream light sources," 2005.
- [29] Y.-S. Hsieh, S.-K. Liaw, Y.-T. Lai, C.-L. Chang, and others, "Real time monitoring in a WDM PON based on array waveguide grating incorporated a DWDM filter," in *Opto-Electronics and Communications Conference, 2008 and the 2008 Australian Conference on Optical Fibre Technology. OECC/ACOFT 2008. Joint conference of the 2008*, 2008.
- [30] G. C. Amaral, L. E. Herrera, D. Vitoreti, G. P. Temporão, P. J. Urban, and J. P. der von Weid, "WDM-PON monitoring with tunable photon counting OTDR," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 13, pp. 1279–1282, 2014.
- [31] J. Lee, J. Park, J. G. Shim, H. Yoon, J. H. Kim, K. Kim, J.-O. Byun, and N. Park, "In-service monitoring of 16 port x 32 wavelength bi-directional WDM-PON systems with a tunable, coded optical time domain reflectometry," *Opt. Express*, vol. 15, no. 11, p. 6874, 2007.
- [32] A. Wang, N. Wang, Y. Yang, B. Wang, M. Zhang, and Y. Wang, "Precise fault location in WDM-PON by utilizing wavelength tunable chaotic laser," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 21, pp. 3420–3426, 2012.
- [33] M. C. E. Boquera, *Servicios avanzados de telecomunicación*. Ediciones Díaz de Santos, 2003.
- [34] "Time Domain Reflectometry" *Application note, 62, Hewlett hp Packard*. [Online]. Available:
- [35] H. Yamada, M. Ohmiya, Y. Ogawa, and K. Itoh, "Superresolution techniques for time-domain measurements with a network analyzer," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 39, no. 2, pp. 177–183, Feb. 1991.
- [36] "Agilent Impedance Measurement Handbook" [Online]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>.

- [37] “Medición de Parámetros de Dispersión S.” [Online]. Available: <http://docplayer.es/2302630-Medicion-de-parametros-de-dispersion-s.html>.
- [38] “Perform Cable Test with a Network Analyzer final” [Online]. Available: http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Perform_Cable_Test_with_a_Network_Analyzer_final.pdf.
- [39] “G.Sup55: Radio-over-fibre (RoF) technologies and their applications.” [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup55-201507-I>.
- [40] L. G. Kazovsky, *Optical Fiber Communication Systems*. Artech House, 1996.
- [41] A. A. M. Saleh, “Fundamental limit on number of channels in subcarrier-multiplexed lightwave CATV system,” *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 12, pp. 776–777, Jun. 1989.
- [42] W. A. N. 6 and 3540 Lynge, “Designing Hearing Aid Technology to Support Benefits in Demanding Situations, Part 1,” *Hearing Review*. [Online]. Available: <http://www.hearingreview.com/2013/03/designing-hearing-aid-technology-to-support-benefits-in-demanding-situations-part-1/>.
- [43] W. I. Way, M. W. Maeda, A. Yi-Yan, M. J. Andrejco, M. M. Choy, M. Saifi, and C. Lin, “160-Channel FM-video transmission using optical FM/FDM and subcarrier multiplexing and an erbium doped optical fibre amplifier,” *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 2, pp. 139–142, Jan. 1990.
- [44] C. Peucheret, “Direct and external modulation of light,” *Tech. Univ. Den. Den.*, 2009.
- [45] G. C. Amaral, A. B. Baldivieso Andrea, G. D. J. Joaquim D. Garcia, P. J. U. Urban, and J. P. von der W. von der Weid Jean Pierre, “Single-Ended In-Service Hybrid Monitoring of Fibre-Extended Copper Lines,” *Eur. Conf. Opt. Commun. ECOC*, 2016.
- [46] “MENLO FPD510” data sheet. [Online]. Available: http://www.menlosystems.com/assets/datasheets/MENLO_FPD510-D-EN_2015-03_3w.pdf
- [47] R. A. Bjork, J. T. Chapman, H. L. Cochrane, and T. L. Wilson, Jul. 7 1992, uS Patent 5,128,619. “System and method of determining cable characteristics.”
- [48] “3GPP specification: 36.521-1.” [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/dynareport/36521-1.htm>.