



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ
CAMPUS FORTALEZA
DIRETORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

KELVIA ARAGÃO FRAGOSO

**ESTUDO DE UM NOVO MODELO DE MONITORAMENTO REMOTO
DE PON UTILIZANDO GRADES DE BRAGG E OCDMA EM FASE**

FORTALEZA

2018

KELVIA ARAGÃO FRAGOSO

ESTUDO DE UM NOVO MODELO DE
MONITORAMENTO REMOTO DE PON UTILIZANDO
GRADES DE BRAGG E OCDMA EM FASE

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Alencar Mendonça

Fortaleza
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F811e Fragoso, Kelvia Aragão.
 Estudo de um novo modelo de monitoramento remoto de PON utilizado grades de Bragg e OCDMA
em fase / Kelvia Aragão Fragoso. - 2018.
 56 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações,
Campus Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

Coorientação: Prof. Dr. Fábio Alencar Mendonça.

1. Grades de Bragg. 2. Monitoramento de falhas em PON. 3. OCDMA em fase. I. Título.

CDD 621.382



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

Kelvia Aragão Fragoso

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Glendo de Freitas Guimarães

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

IFCE - Instituto Federal do Ceará

Fábio Alencar Mendonça

Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Alencar Mendonça

IFCE - Instituto Federal do Ceará

Alisson da Conceição Ferreira

Prof. Dr. Alisson da Conceição Ferreira

IFCE - Instituto Federal do Ceará

Cícero Saraiva Sobrinho

Prof. Dr. Cícero Saraiva Sobrinho

UNILAB – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

A Deus, por sua infinita bondade na minha vida. Aos meus pais, irmãos e avós: Nem todos os trabalhos, pela sua natureza, são próprios para serem oferecidos. Este é, certamente, daqueles que não se oferecem, mas dedicando-vo-lo só tive em vista compensar-vos um pouco das horas que me afastei do vosso convívio, absorvida neste trabalho.

Agradecimentos

A Deus, que é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos meus pais, Almir e Luciana, pelo amor, carinho e apoio incondicional na minha vida profissional e pessoal.

Aos meus irmãos, Lia e Felipe, pelo afeto, companheirismo e constantes incentivos.

Ao meu orientador, professor Dr. Glendo, pelos ensinamentos e ajuda na condução deste trabalho, e pelo exemplo de dedicação.

Ao meu co-orientador, professor Dr. Fábio, pelo suporte e encorajamento.

Às minhas amigas e bolsistas desta pesquisa, Raiane e Millena, pela constante ajuda e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de sala de aula e laboratório, que estiveram ao meu lado e dispostos a colaborar em todas as etapas do mestrado.

Aos amigos pessoais, que contribuem, constantemente, com meu crescimento pessoal.

Ao laboratório Fotônica e membros, pela assistência durante a elaboração deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações, seu corpo docente, direção e administração, que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

À CAPES, pelo auxílio financeiro para realização desta pesquisa.

Resumo

A necessidade de implementação de técnicas monitoramento de *links* de fibra óptica em redes ópticas passivas (PON's), baseadas no princípio da reflectometria, tem motivado diversos estudos, especialmente quando se refere a redes com topologia árvore, ou topologia hierárquica, em razão da dificuldade em determinar precisamente em qual ramo de fibra houve ruptura. Um modelo baseado em grades de Bragg em fibras ópticas (FBG), usando técnicas de múltiplo acesso por divisão de códigos ópticos em fase (OCDMA), é proposto para monitoramento de PON's, visando solucionar a complexidade no monitoramento de redes ponto-multiponto. Nesta dissertação, foi desenvolvido um modelo cuja detecção de ramos de fibra óptica com falha é analisada por meio da autocorrelação dos pulsos ópticos refletidos pelas grades de Bragg, que estão estrategicamente dispostas nas unidades terminais da rede (ONU). Os resultados obtidos através de simulações no *software* Matlab demonstram a viabilidade do modelo de monitoramento de PON, cuja implementação proposta para 63 *chips* da grade de Bragg identificam 8, 16, 32 ou 63 usuários na rede. Destarte, este sistema visa auxiliar um monitoramento de PON eficiente, proporcionando, ao usuário, um menor custo em relação a outros modelos encontrados na literatura, além de possibilitar a flexibilização da topologia.

Palavras-chaves: Grades de Bragg, Monitoramento de Falhas em PON, OCDMA em Fase.

Abstract

The need to implement techniques to monitor optical fiber links in passive optical networks (PONs), based on the principle of reflectometry, has motivated various research projects. Such studies are especially important for networks with tree topology or hierarchical topology, due to the difficulty to determine in which specific fiber branch there was rupture. This work proposes a model based on Fiber Bragg grating to solve the complexity in the monitoring of point-multipoint networks. This mode uses multiple access techniques by division of optical codes in phase(OCDMA), to monitor the PONs. The work involved developing a novel PON monitoring model to detect fiber optic branches with problems that are analyzed by means of autocorrelation of optical pulses reflected by Bragg gratings. These Bragg gratings are strategically arranged in network terminal units. The results obtained through simulations demonstrate the viability of the proposed approach applied in Bragg grating 63 chips for identifies fault, in real time, in the network with 8, 16, 32 or 63 users. Thus, this system aims to support an efficient PON monitoring, providing the user with a lower cost in relation to other models found in the literature, to make it possible to flexibilize the topology.

Keywords: Fiber Bragg Grating; PON Failure Monitoring; OCDMA in Phase.

Lista de Figuras

1	Esquematisação da grade de Bragg em fibra óptica, com apresentação do índice modulado.	15
2	Interferência construtiva e destrutiva resultante da radiação espalhada por cristais.	16
3	Esquematisação da técnica de máscara de fase.	18
4	Gráfico de autocorrelação e correlação cruzada entre duas sequências PN geradas pelos polinômios $f(x) = x^3 + x + 1$ e $g(x) = x^3 + x^2 + 1$	21
5	Técnicas de monitoramento PON.	23
6	Sistema de monitoramento remoto baseado em caminho ativo.	24
7	Diagrama do modelo de monitoramento remoto de PON baseado na codificação óptica em fase de grades de Bragg.	30
8	Estrutura esquemática do processo de codificação e decodificação de pulsos ópticos.	31
9	Soma dos 64 pulsos codificados nas ONU's com suas respectivas alterações de fase.	33
10	Decodificação da soma dos 64 pulsos codificados nas ONU's.	34
11	Estrutura esquemática do processo de codificação e decodificação de pulsos curtos para PON com mais de uma ramificação.	36
12	Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (8 usuários).	39
13	Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (16 usuários).	42
14	Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (32 usuários).	43

15	Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (64 usuários).	44
16	Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (63 usuários).	45

Lista de Tabelas

1	Polinômios primitivos de grau $n \leq 8$	22
2	Codificação de 63 ONU's.	32
3	Valores utilizados nas simulações.	36
4	Codificação de 8 ONU's.	40
5	Equações de tendência de 8 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.	41
6	Equações de tendência de 16 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.	42
7	Equações de tendência de 32 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.	43
8	Equações de tendência de 64 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.	44
9	Equações de tendência de 63 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.	46
10	Comparação de técnicas de monitoramento PON através de indicadores de performance.	49

Lista de Abreviações

ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BFS	<i>Brillouin frequency shift</i>
BPF	<i>Band pass filter</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
CO	<i>Central Office</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DUT	<i>Device Under Test</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
MCVD	<i>Modificated Chemical Vapour Deposition</i>
MEMS	<i>Micro-electromechanical System</i>
NMS	<i>Network Management System</i>
OCDMA	<i>Optical Code Division Multiple Access</i>
OFDR	<i>Optical Frequency Domain Reflectometry</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Units</i>
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>
OTDR-T	<i>Optical Time Domain Reflectometer Tunable</i>
PN	<i>Pseudonoise</i>

PON	<i>Passive Optical Network</i>
PSC	<i>Passive Splitter Combiner</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RN	<i>Remote Node</i>
RSOA	<i>Reflective Semiconductor Optical Amplifier</i>
SL-RSOA	<i>Self-Injection Locked Reflective Semiconductor Optical Amplifier</i>
SNR	<i>Signal To Noise Ratio</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
TDL	<i>Tapped Delay Line</i>
TLS	<i>Tunable Laser Source</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexer</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>

Lista de Símbolos

A_b	Amplitude contrapropagante
A_f	Amplitude copropagante
κ	Coeficiente de acoplamento
R^2	Coeficiente de determinação
λ_b	Comprimento de onda de Bragg
δ	Dessintonia
β_2	Dispersão de velocidade de grupo
n_{eff}	Índice efetivo do núcleo da fibra
β_1	Inverso da velocidade de grupo
N	Ordem de interação entre modos
γ	Parâmetro não-linear
α	Perdas do sistema
Λ	Período da grade
t	Tempo

Sumário

1	Fundamentação teórica e revisão bibliográfica	14
1.1	Fundamentação teórica	14
1.1.1	Grade de Bragg em fibra óptica	14
1.1.2	Geração analítica de códigos	19
1.1.3	Sequência m	20
1.2	Revisão bibliográfica	23
1.2.1	Único comprimento de onda	23
1.2.2	OTDR sintonizável	25
1.2.3	Brillouin OTDR (BOTDR)	26
1.2.4	Reflectômetro de domínio de frequência óptica (OFDR)	27
1.2.5	Codificação óptica	27
1.2.6	SL-RSOA	28
1.2.7	Sinal refletivo	28
1.2.8	Conclusão	28
2	Monitoramento PON baseado em OCDMA em Fase	29
2.1	Princípio	29
2.2	Codificação do sinal	31
2.3	Decodificação do sinal	33
2.4	Decisão de usuário com falha	34
2.5	Flexibilização da topologia	35
2.6	Estudo numérico	35

2.7	Conclusão	37
3	Resultados e estudo comparativo com outras tecnologias	38
3.1	Resultados	38
3.1.1	8 ONU's	38
3.1.2	16 ONU's	41
3.1.3	32 ONU's	42
3.1.4	64 ONU's e 63 ONU's	43
3.2	Comparação de modelos de monitoramento	46
3.3	Conclusão	48
4	Conclusões	50
4.1	Trabalhos futuros	50
	Referências Bibliográficas	52

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

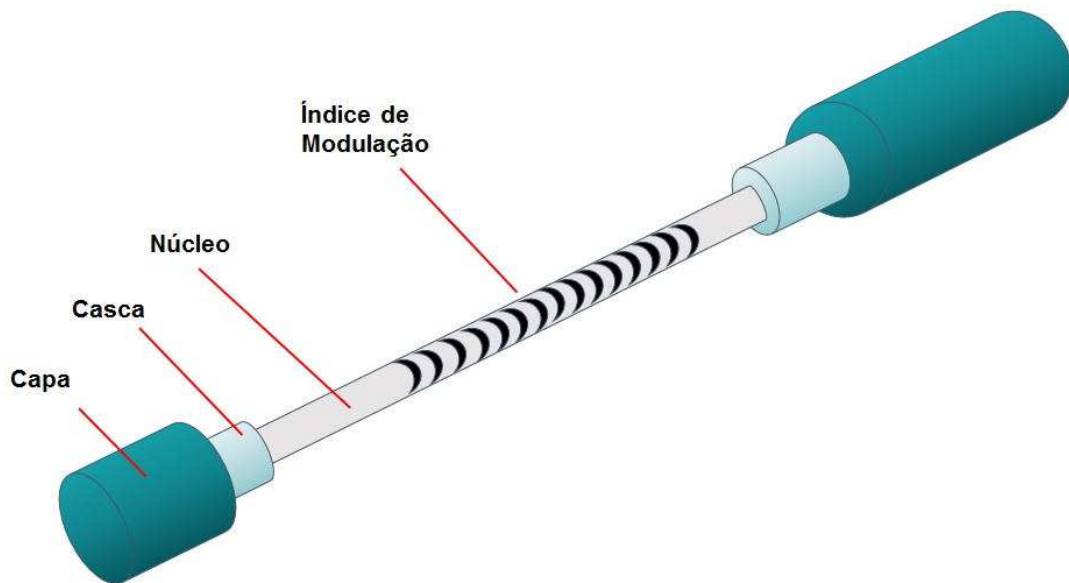
Neste capítulo são abordados os principais conceitos de grade de Bragg em fibra óptica, as técnicas de fabricação e a análise numérica das equações de propagações de pulsos ópticos que simulam a grade de Bragg. Além disso, é exemplificada a geração de sequência de *bits* pseudoaleatórias, que possui boas características de autocorrelação. Em seguida, na seção 2.2, são elencadas e descritas algumas técnicas de monitoramento PON encontradas na literatura.

1.1 Fundamentação teórica

1.1.1 Grade de Bragg em fibra óptica

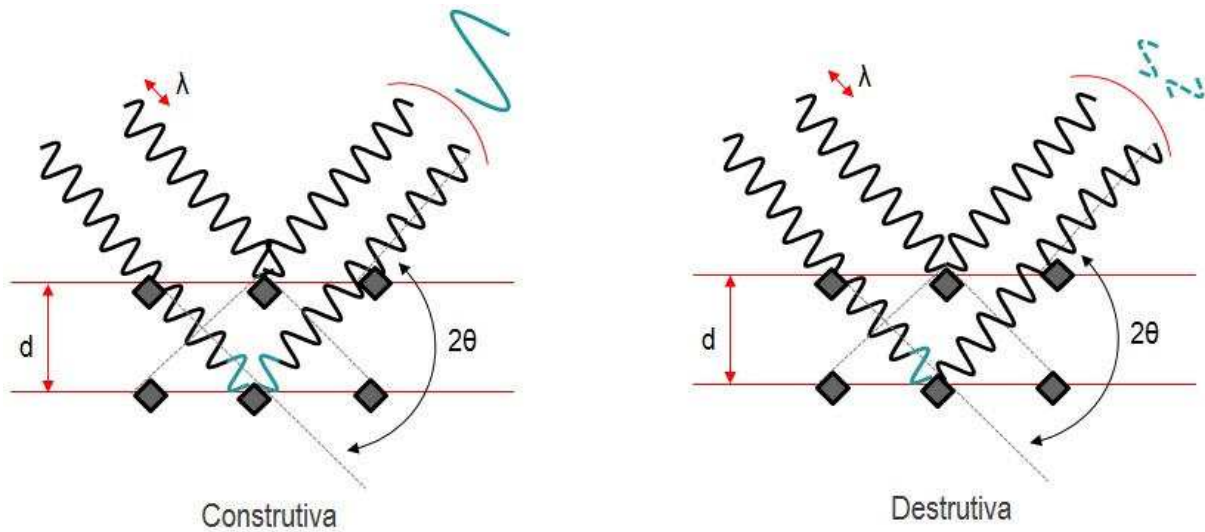
Uma grade de Bragg em fibra óptica, conforme Guimarães (2010), consiste na alteração do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica. Agrawal (2009) relata que qualquer elemento óptico que produza uma variação periódica, seja na amplitude ou na fase, pode ser considerado uma grade de difração. Uma esquematização do modelo de grade de Bragg é ilustrada na Figura 1, na qual é possível observar a apresentação do índice modulado (ou índice de refração) ocasionado pela dopagem da fibra.

Figura 1: Esquemática da grade de Bragg em fibra óptica, com apresentação do índice modulado.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2010).

O termo Fibras de Grades de Bragg surgiu a partir da Lei de Bragg, descoberta pelo físico britânico William Lawrence Bragg, que explicava o padrão de interferência construtiva resultante da radiação espalhada por cristais. Bragg percebeu que, ao incidir feixe óptico sobre sólidos cristalinos separados a uma determinada distância, as ondas eram espalhadas e interferiam construtivamente, caso o comprimento do caminho de cada onda fosse igual a um número múltiplo inteiro do comprimento de onda (WERNECK; NAZARE; ALLIL, 2017). Na Figura 2 são ilustrados os raios incidentes com mesmo comprimento de onda λ , a uma distância d de planos de rede cristalina. Quando o ângulo de incidência se iguala ao ângulo de reflexão, as fases dos feixes coincidem e ocasionam uma interferência construtiva, satisfazendo, portanto, a condição de Bragg.

Figura 2: Interferência construtiva e destrutiva resultante da radiação espalhada por cristais.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2010).

Em 1978, a formação de grades em fibra óptica foi demonstrada em um experimento que consistiu na incidência de um feixe óptico, gerado por laser de argônio, em uma fibra dopada com germânio. Através deste teste, percebeu-se a ocorrência de uma interferência com uma luz-contrapropagante, proveniente de uma reflexão da grade, o que gerou alterações nas características do sinal. Com isso, ocorreu a formação de um filtro de Bragg estreito ao longo de 1 metro de comprimento de fibra. Observou-se, também, uma reflexão de 4% nas interfaces entre ar-fibra, criando um padrão de absorção de luz laser nas regiões brilhantes (GUIMARÃES, 2010). Após algum tempo, a intensidade da luz refletida, que inicialmente era baixa, começou a crescer, de modo que quase toda a luz incidente era refletida. Este fenômeno pode ser explicado através do efeito chamado fotossensibilidade (WERNECK; NAZARE; ALLIL, 2017).

1.1.1.1 Fotossensibilidade

A fotossensibilidade é um efeito não linear em fibra óptica e foi descoberta em 1978 por Hill e outros colegas de trabalho, no *Communication Research Center*, no Canadá. Após uma década, Meltz e seus colegas de trabalho investigaram a fotossensibilidade das fibras de sílica dopadas com germânio por meio da técnica de MCVD (*Modified Chemical Vapour Deposition* - Deposição de Vapor Químico Modificado), que consiste na combinação de germânio e sílica na forma de gases, sob altas temperaturas (WERNECK; NAZARE; ALLIL, 2017).

Em termos mais amplos, a fotossensibilidade consiste na alteração permanente do índice de refração, ou opacidade, quando há exposição de certos materiais à radiação luminosa. Um

exemplo de fotossensibilidade pode ser encontrado em óculos que modificam a cor da lente ao serem expostos à radiação ultravioleta e ao calor (KASHYAP, 2010).

De fato, a descoberta da fotossensibilidade da fibra óptica ampliou os campos de desenvolvimentos de sistemas de telecomunicações, em virtude da possibilidade da evolução dos dispositivos ópticos, como fibras de grade de Bragg de Fabry-Perot, grades *chirped*s, e do progresso da utilização de fibras ópticas em sistemas de sensores (OTHONOS *et al.*, 2006).

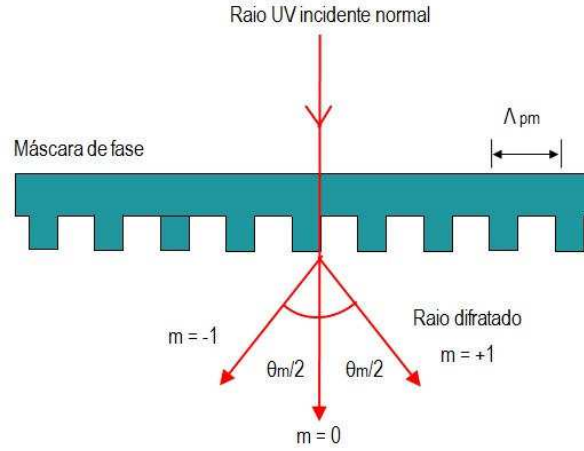
1.1.1.2 Fabricação de grade em fibras

De acordo com Agrawal (2009), dentre as diversas técnicas usadas para a fabricação de grades de fibra, ressaltam-se as seguintes: técnica interna de feixe único, técnica holográfica de feixe duplo, técnica de máscara de fase e técnica de fabricação ponto a ponto.

A técnica interna de feixe único consiste no lançamento de um único feixe de laser, na faixa de 488 nm, em uma fibra óptica de sílica e dopada com germânio. A reflectividade inicialmente é de 4%, podendo exceder os 90%, que é quando a grade de Bragg é formada. A desvantagem desta técnica é que a grade fica restrita a um determinado comprimento de onda, que é o comprimento de onda do laser usado para fabricá-la. Dessa forma, os fabricantes de grades que utilizam esta técnica necessitam de vários lasers diferentes para fabricação de grades com variação de comprimentos de ondas, o que aumenta o custo destas grades. Uma outra desvantagem é o fato de que fibras de sílica dopadas com germânio possuem a fotossensibilidade baixa para as redes de comunicação, que operam na faixa de 1,3 a 1,6 μm (GUIMARÃES, 2010). Entretanto, este problema foi solucionado com o desenvolvimento da técnica holográfica de feixe duplo, que faz uso de um esquema interferométrico, no qual dois feixes ópticos, na faixa do ultravioleta, obtidos do mesmo laser, incidem em lentes cilíndricas, formando um ângulo de 2θ , que interferem no núcleo da fibra óptica. Uma lente cilíndrica faz com que haja a expansão do feixe ao longo da fibra, criando o índice da grade, cujo período é definido de acordo com o comprimento de onda do laser utilizado e o ângulo 2θ formado pelos feixes interferentes (AGRAWAL, 2001).

A técnica de máscara de fase consiste no uso de um elemento óptico de difração, que modula espacialmente o feixe de inscrição, na faixa do ultravioleta, podendo ser fabricada de forma fotolitográfica ou litografia por feixe de elétrons. O raio normal incidente, mostrado na Figura 3, é difratado em $m=0$ e $m=\pm 1$ (SUCHAT; YUPAPIN, 2003).

A principal vantagem desta técnica é que, devido à natureza não-interferométrica, as necessidades das coerências espacial e temporal são menores, permitindo o uso de lâmpadas

Figura 3: Esquemática da técnica de máscara de fase.

Fonte: Suchat & Yupapin (2003).

ultravioletas. Outra vantagem é a possibilidade de variar o período (grades com *chip*) e também o comprimento de onda de Bragg em um intervalo (AGRAWAL, 2001).

Já a técnica ponto por ponto é feita diretamente na fibra, expondo-a a pulso de alta energia (raio laser ultravioleta), fazendo que a seção exposta a este feixe altere seu índice de refração. Todo o processo é realizado período por período, sendo esta uma grande limitação da técnica, uma vez que é possível a fabricação de grades curtas (< 1cm), já que é difícil o controle de deslocamento dos feixes de alta energia ao longo da fibra. Outra limitação consiste na dificuldade ao se focalizar o laser ultravioleta em uma fração do período da grade.

1.1.1.3 Estudo analítico da Grade de Bragg

O índice de refração apresentado pelo núcleo de uma grade de Bragg em fibra óptica age como um filtro rejeita-faixa, ou seja, quando um feixe de luz incide, uma faixa espectral estreita é refletida por espalhamentos sucessivos, que são decorrentes das variações do índice (HILL; MELTZ, 1997). O comprimento de onda de Bragg, que ocorre quando há interação mais forte (modo acoplado), é dado por

$$\lambda_b = \frac{2\Lambda n_{eff}}{N}, \quad (1.1)$$

em que n_{eff} é o índice efetivo do núcleo da fibra, Λ é o período da grade e N é a ordem de interação entre modos (CHAN *et al.*, 2007; AGRAWAL, 2009). As equações de modo acoplado no domínio do tempo, descritas em (1.2) e (1.3), permitem a solução da propagação de um sinal óptico dentro de uma FBG (GUIMARÃES, 2010):

$$\frac{\partial A_f}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_f}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_f = i\delta A_f + i\kappa A_b + i\gamma(|A_f|^2 + 2|A_b|^2)A_f \quad (1.2)$$

$$-\frac{\partial A_b}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_b}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_b = i\delta A_b + i\kappa A_f + i\gamma(|A_b|^2 + 2|A_f|^2)A_b, \quad (1.3)$$

em que A_f e A_b são amplitudes copropagantes (*forward*) e contrapropagantes (*backward*), respectivamente, β_1 e β_2 o inverso da velocidade de grupo e dispersão de velocidade de grupo, γ o parâmetro não-linear, $\alpha/2$ são as perdas inseridas pelo sistema e o coeficiente de acoplamento κ é definido como $\kappa = 2\pi\delta n_1/\lambda$ para grades transversalmente uniformes. Ambas Equações (1.2) e (1.3) incluem os efeitos não lineares SPM (*Self-Phase Modulation* - Automodulação em fase) e XPM (*Cross-Phase Modulation* - Modulação de fase cruzada).

Segundo Agrawal (2009), a refletividade máxima da grade, que ocorre no centro da banda rejeitada, é representada por:

$$R_{max} = \tanh^2(\kappa L) \quad (1.4)$$

O produto da constante de acoplamento κ pelo comprimento da grade são fatores determinantes para a refletividade, em que valores iguais ou maiores que 3 ($\kappa L \geq 3$) aproximam a refletividade da grade a 100%.

1.1.2 Geração analítica de códigos

A implementação objetivada pelo sistema de monitoramento, proposto neste trabalho, demandou a busca pela geração de uma sequência de *bits*, que fosse capaz de apresentar boas características de autocorrelação. Dessa forma, foram analisados os esquemas de codificação óptica OCDMA existentes, para eleger o modelo que melhor atendesse as características solicitadas. Segundo Bertarini (2012), as categorias de codificação óptica são divididas nos seis tipos a seguir elencados:

1. Codificação de intensidade no domínio temporal;
2. Codificação de intensidade no domínio espectral;
3. Codificação de fase espectral;
4. Codificação de fase temporal;
5. Codificação espacial;

6. Codificação híbrida.

Cada tipo de codificação pode ser classificada como sistemas OCDMA incoerentes ou sistemas OCDMA coerentes, dependendo da fonte óptica e de outros parâmetros. No caso das codificações 1, 2 e 5, referem-se a sistemas incoerentes e as codificações 3 e 4 constituem sistemas coerentes. Para os sistemas híbridos, a classificação de coerente e incoerente dependerá de cada caso, uma vez que sistemas híbridos utilizam uma combinação dos tipos de codificação (BERTARINI, 2012).

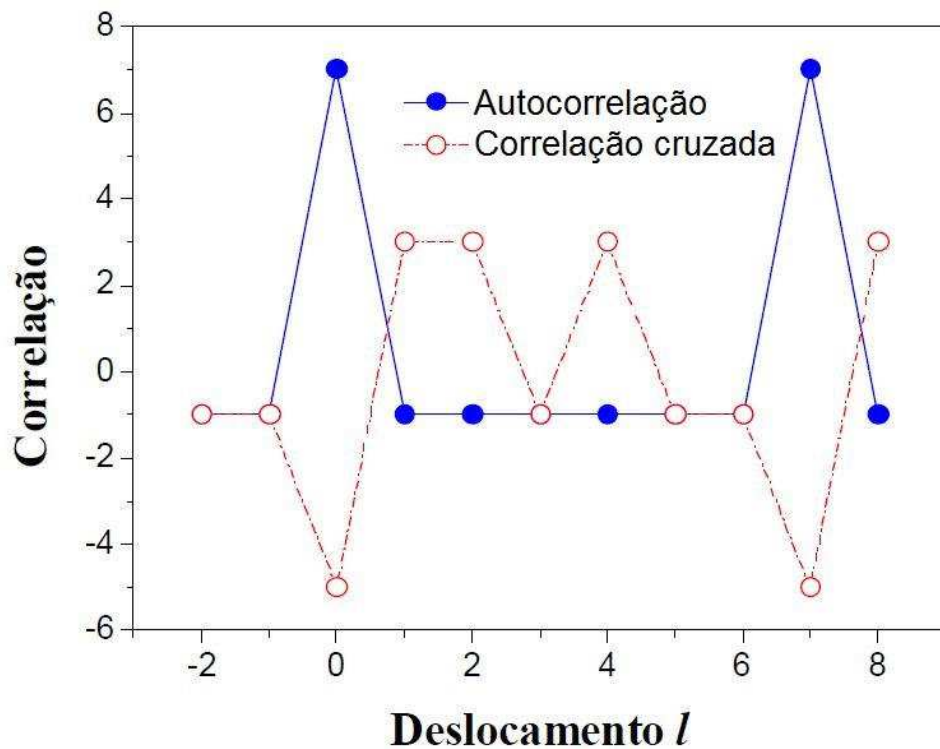
O foco principal deste trabalho consiste em utilizar sistemas coerentes, pelo fato de apresentarem um desempenho mais elevado que os sistemas com processamento incoerente (MARHIC, 1993). Além disso, as codificações coerentes permitem a utilização de códigos ortogonais bipolares, como por exemplo: sequência *m*, códigos de Walsh e códigos Gold.

A seguir, é apresentado o método de desenvolvimento da sequência de *bits* $\{S1\}$, utilizada nas simulações desta dissertação.

1.1.3 Sequência *m*

As sequências pseudoaleatórias (ou sequência PN - *pseudonoise*) consistem em representações binárias com propriedades aleatórias semelhantes, periódicas e são boas escolhas em sistemas *Spread Spectrum*, pelo fato de garantir boa propriedade de autocorrelação (DINAN; JABBARI, 1998). Guimarães (2010) observou que a correlação cruzada de duas sequências pseudoaleatórias tem picos elevados quando comparada a autocorrelação, conforme gráfico apresentado na Figura 4, cujos pontos de maior autocorrelação (pico igual a 7) correspondem aos pontos de menor correlação cruzada (picos igual a -5).

Figura 4: Gráfico de autocorrelação e correlação cruzada entre duas sequências PN geradas pelos polinômios $f(x) = x^3 + x + 1$ e $g(x) = x^3 + x^2 + 1$.



Fonte: Guimaraes (2010).

As sequências PN, pelo fato de serem periódicas, são classificadas como sequência m - ou sequência de comprimento máximo - quando elas possuem o maior período da sequência. As sequências m são caracterizadas e geradas a partir de um polinômio gerador e apresentam período máximo como $N = 2^n - 1$, em que n representa o grau do polinômio (GOLDSMITH, 2005).

São mostrados na Tabela 1, a seguir, os polinômios primitivos, apresentados em Ziemer (2007), sob forma octal. Eles possuem a características de apresentar sequência de comprimento máximo.

Tabela 1: Polinômios primitivos de grau $n \leq 8$.

Grau n	Representação em octal
2	7
3	13
4	23
5	45, 75, 67
6	103, 147, 155
7	211, 217, 235, 367, 277, 325, 203, 313, 345
8	435, 551, 747, 453, 545, 537, 703, 543

Fonte: Ziemer (2007).

Para o desenvolvimento de uma sequência de 63 *bits*, por exemplo, o grau do polinômio deve ser $n=6$ ($N = 2^6 - 1 = 63$). Logo, de acordo com a tabela, os polinômios de sequência máxima são representados pelos números, em octal, 103₈, 147₈ e 155₈, que constituem a sequência binária abaixo representada e seus respectivos polinômios:

- 103₈ $\rightarrow$ 1000011 $\rightarrow f(x) = x^6 + x + 1$;
- 147₈ $\rightarrow$ 1100111 $\rightarrow g(x) = x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$;
- 155₈ $\rightarrow$ 1101101 $\rightarrow h(x) = x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$.

Foi utilizada, para fins de geração da sequência $\{S1\}$, o polinômio referente ao octal 103₈, $f(x) = x^6 + x + 1$, e como conteúdo inicial, foi definido o polinômio $a(x) = x^4 + x^2 + 1$, sugerido por Guimarães (2010), uma vez que para os polinômios primitivos, qualquer conteúdo inicial gerará uma sequência pseudoaleatória de comprimento máximo. Para os octais 147₈ e 155₈, é esperado o mesmo resultado, uma vez que ambos apresentam boas propriedades de autocorrelação. A seguir, é mostrado o passo a passo da obtenção da sequência $\{S1\}$ a partir do polinômio gerador e do conteúdo inicial citados anteriormente:

- PASSO 1: Cálculo do polinômio recíproco

Para o polinômio $f(x) = x^6 + x + 1$, a sequência binária correspondente é 1000011. A sequência recíproca é dada por 1100001, que equivale ao polinômio $f_r(x) = x^6 + x^5 + 1$.

- PASSO 2: Multiplicação do polinômio recíproco pelo conteúdo inicial

$$a(x) * f_r(x) = (x^4 + x^2 + 1) * (x^6 + x^5 + 1) = x^{10} + x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + 1.$$

É considerado apenas o polinômio com grau $\leq n-1$, ou seja, $6 - 1 = 5$. Portanto, o polinômio a ser considerado é:

$$j(x) = x^5 + x^4 + x^2 + 1.$$

- PASSO 3: Divisão do polinômio $j(x)$ pelo recíproco $f_r(x)$:

$$\frac{x^5 + x^4 + x^2 + 1}{x^6 + x^5 + 1} = 1 + x^2 + x^4 + x^6 + x^7 + x^8 + x^9 + x^{10} + x^{11} + x^{17} + x^{22} + \dots$$

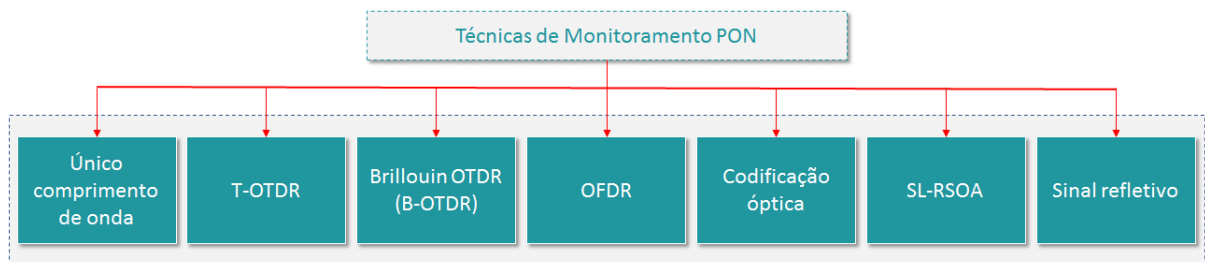
Este polinômio gera exatamente a sequência $\{S1\}$, de 63 *bits*, a seguir descrita:

Sequência $\{S1\}$: [1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1].

1.2 Revisão bibliográfica

Diversos métodos para monitoramento de PON's têm sido discutidos e publicados, em virtude da expansão de redes PON's, aliada a dificuldade de mapeamento de clientes com falhas. Entretanto, apesar de desempenharem satisfatoriamente o seu papel de monitoramento, atrelam à gestão da rede um alto custo de desenvolvimento, tornando-se, muitas vezes, impraticáveis. Dentre as técnicas mais comuns de monitoramento de PON, destacam-se as ilustradas na Figura 5.

Figura 5: Técnicas de monitoramento PON.



Fonte: Adaptado de Esmail & Fathallah (2013).

1.2.1 Único comprimento de onda

As chamadas técnicas com único comprimento de ondas implementam modelos de supervisão de rede constituídos por uma única faixa de frequência, normalmente banda-U, para sinais de monitoramento, enquanto os sinais de dados utilizam outra faixa distinta. Dentre as diversas técnicas que utilizam um único comprimento de onda para monitoramento, ressaltam-se as seguintes:

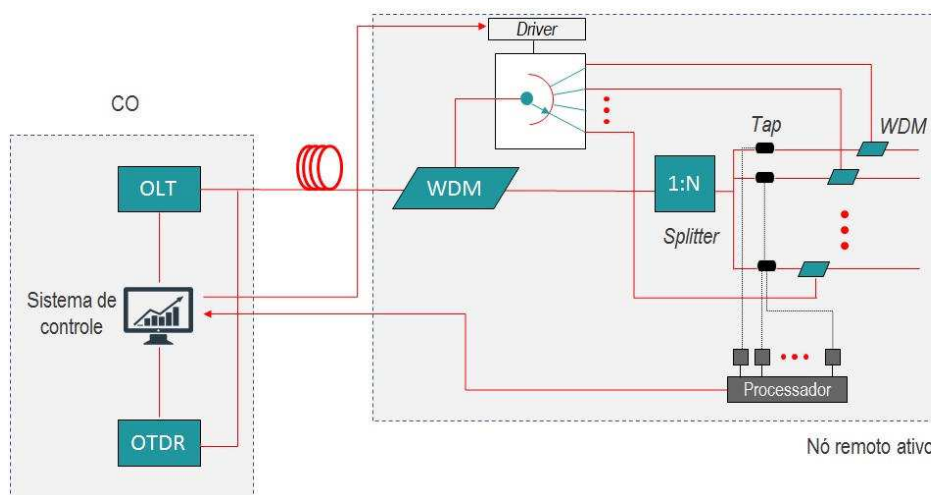
- Técnicas de medição com OTDR

Os sistemas que utilizam Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo (OTDR) normalmente são sistemas descentralizados, uma vez que o monitoramento da rede não é realizado no escritório central (CO), necessitando, portanto, o deslocamento de uma equipe técnica até a Unidade de Rede Óptica (ONU) para injetar um pulso óptico do assinante até o escritório central. Dois exemplos de produtos que implementam técnica com OTDR são: FTB-300E OTDR (EXFO Company, Quebec City, Canadá) e o T-BERD/MTS-4000 (JDSU Company, Milpitas, Califórnia, EUA). Ambos os modelos possuem a grande desvantagem de atrasar o tempo de manutenção e reparo, consequentemente aumentam os custos operacionais (OpEx).

- Técnicas de caminho ativo

Referem-se a sistemas que usam um caminho ativo alternativo para realizar o monitoramento da rede. Chen & Chi (1994) sugerem, por exemplo, um sistema de controle que usa fios de cobre no mesmo cabo de fibra e, através do sinal retroespalhado, é possível comparar este sinal com um valor de referência para definir se há falha (ruptura) em algum dos braços da fibra. A estrutura da rede proposta por Chen & Chi (1994) é ilustrada na Figura 6.

Figura 6: Sistema de monitoramento remoto baseado em caminho ativo.



Fonte: Adaptado de Esmail & Fathallah (2013).

Uma outra abordagem utilizando técnica de caminho ativo, sugerida por Ab-Rahman *et al.* (2009), consiste no uso de *switch* óptico, um microcontrolador, um módulo *Ethernet* e um esquema de restauração. Quando a ruptura ocorrer, o sistema de monitoramento, presente no nó remoto (RN), roteará o sinal de dados para a linha de proteção e enviará a

informação para o CO por meio da conexão *Ethernet*. Estes dois modelos têm a vantagem de poder detectar exatamente o local da falha através do uso de componentes ativos no RN. Entretanto, possui a desvantagem de exigir energia, o que contraria o princípio de rede óptica passiva.

- Técnicas de caminho semi-passivo

Esta abordagem sugere a implementação de componentes ativos no RN, mas sendo alimentados por uma fonte remota. A técnica de caminho semi-passivo proposta por Urban & Dahlfors (2011), por exemplo, sugere a ativação do *switch* óptico através de um sinal óptico de alta potência paralelo ao sinal de dados, transmitido do CO até o RN. Dessa forma, o *switch* óptico consegue selecionar o sinal vindo do divisor/combinador passivo (PSC - *Passive Splitter/Combiner*) e repassar para o OTDR presente no CO. A medição do OTDR é comparada com um valor de referência e, então, é realizada a decisão de status da fibra.

- Técnica baseada em refletores

A metodologia usada em técnicas baseadas na reflectometria óptica consiste, geralmente, no uso de refletores no fim de cada ramo da rede óptica, atuando como um filtro, um seletor de comprimento de onda ou como um espelho no ramo de um dispositivo Multiplexador por Divisão de Comprimento de Onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexer*) (CAVIGLIA; BIASE; GNAZZO, 1999). A detecção da presença de falha é realizada por meio da comparação da variação do pico do sinal refletido com um valor de referência pré-determinado. Uma aplicação sugerida por Temporao *et al.* (2013) utiliza grades de Bragg e circuladores para isolar comprimentos de onda e realizar a detecção de falha através de um OTDR sintonizável localizado no CO. Apesar de esta técnica ser relativamente simples, um dos maiores problemas encontrados é a impossibilidade na determinação exata do local da falha. Além disso, a quantidade de refletores pode fazer com que não haja custo-benefício quando comparada a outras técnicas de monitoramento.

1.2.2 OTDR sintonizável

Uma outra alternativa ao OTDR convencional é o uso de um OTDR sintonizável, localizado no CO, para o monitoramento de redes ópticas passivas. As duas técnicas a seguir são exemplos de implementações deste modelo:

- Técnica baseada em roteamento de comprimento de onda

A possibilidade de rotear os comprimentos de onda foi patenteada por Cohen & Winter (1994), que propôs a instalação de um dispositivo WDM, localizado ao lado do *splitter*, no RN, cuja função é atribuir um comprimento de onda diferente, na faixa de monitoramento, a cada ramo da rede óptica. Um OTDR sintonizável analisa os sinais retroespalhados de cada um dos ramos e, dessa forma, é capaz de detectar falhas na rede óptica. Uma grande limitação imposta pela técnica é o fato de a capacidade do sistema estar sempre limitada pela largura de banda de monitoramento, posto que cada ramo tem um determinado comprimento de onda diferente dos demais ramos da rede. Foi devido à complexidade e à dispendiosidade de implantação de sistema WDM, que esta técnica não encontrou espaço na indústria.

- Técnica baseada em refletores

Outra abordagem utilizando OTDR sintonizável no CO, proposta por Ozawa *et al.* (2000), utiliza refletores seletivos de comprimento de onda nas ONU's, conhecidos como grades de Bragg. Cada ONU recebe uma grade de Bragg pré-configurada para refletir um determinado comprimento de onda para o CO. Como cada ONU reflete uma frequência diferente, quando os pulsos retornam ao CO, a identificação da falha é feita de forma a analisar a ausência ou presença de uma frequência. Quando determinar a falta de uma frequência, o sistema anuncia a falha e relaciona ao cliente que possui a grade pré-configurada para refletir a frequência faltante. O maior entrave desta técnica é a limitação da capacidade do sistema determinado pela largura de banda, implicando, diretamente, na redução do número de clientes.

1.2.3 Brillouin OTDR (BOTDR)

Esta técnica, proposta por pesquisadores na NTT Honda *et al.* (2009), implementa a mudança de frequência de Brillouin (BFS) em cada um dos ramos da PON, visando distinguir cada ONU pela frequência atribuída ao ramo. Para realizar a BFS, cada ramo é fabricado com uma concentração de dopante diferente no núcleo. Dessa forma, quando uma luz é aplicada, cada um dos ramos fará uma retrodifusão com BFS de acordo com sua dopagem, permitindo, assim, identificar o ramo defeituoso a partir da análise de um OTDR, no CO, que mede a variação do pico de potência. Quando o valor medido difere do nível de referência inicial, é reconhecida a falha do ramo. Entretanto, essa abordagem requer uma fibra diferente para cada cliente, e isso exige uma mudança total na infraestrutura PON, tornando o CapEx extremamente alto.

1.2.4 Reflectômetro de domínio de frequência óptica (OFDR)

As técnicas de OFDR são divididas em dois importantes grupos: Incoerente OFDR e Coerente OFDR. Yuskel *et al.* (2009) apresentam o princípio operacional de cada método, cuja distinção principal entre os dois é que no método incoerente uma onda contínua (CW) é modulada por um sinal RF constante, enquanto que no método coerente é usada uma fonte de laser sintonizável (*Tunable Laser Source* - TLS). Ambos os sistemas transmitem o sinal, que se dividem em dois caminhos: uma parte para o dispositivo sobre teste (*Device Under Test* - DUT) e outra, designada como sinal de referência, para um ramo com um espelho no final. Os dois sinais interferem no acoplador e esta interferência possui frequências de batimento como picos no analisador de rede. Esta técnica para monitoramento de PON foi apresentada por Zou *et al.* (2007), Effenberger & Meng (2008) e Yuskel, Wuilpart & Moeyaert V. Megret (2010).

1.2.5 Codificação óptica

O objetivo desta técnica, conforme Fathallah & Rusch (2007), é usar codificação óptica nas ONU's, ou seja, cada ONU gera um código específico que o identifica na rede, sem usar componentes ativos ou módulos inteligentes. Dessa forma, não existe a necessidade de um OTDR no CO, e sim a implantação de um sistema decodificador. Uma vez que o sinal de monitoramento é decodificado, o sistema de monitoramento da rede (*Network Management System* - NMS) decide o status da rede. Diferentes tipos de codificadores são usados para monitoramento PON, por exemplo: codificadores que usam linhas de *delay* de tempo (*Tapped Delay Line* - TDL) (RAD; FATHALLAH; RUSCH, 2010); codificadores que usam FBG's (RAD; FATHALLAH; RUSCH, 2010); codificadores que usam multiníveis periódico (FATHALLAH; RAD; RUSCH, 2008); e codificadores que usam BPF's (RAD; FATHALLAH; RUSCH, 2008; RAD *et al.*, 2011). Algumas vantagens da codificação óptica são:

- Fácil implantação, pois não é necessário alterar a estrutura da rede completamente;
- Sem necessidade de elementos ativos na rede, o que ratifica o conceito de rede óptica passiva;
- Sistema centralizado no CO, proporcionando maior facilidade de monitoramento, sem a necessidade de deslocamento de equipe técnica;
- Barateamento de custos devido ao uso de componentes mais simples como: espelho, refletores, codificadores e decodificadores.

1.2.6 SL-RSOA

A técnica de amplificador óptico semiconductor refletivo bloqueado auto-injetado (*Self-injection Locked Reflective Semiconductor Optical Amplifier* - SL-RSOA) consiste em implementar, na ONU, um transmissor que utiliza SL-RSOA, para gerar dois sinais: o de dados e o de monitoramento. O sinal de monitoramento é gerado devido a existência de uma cavidade externa, acoplada à ONU e composta por uma FBG, ocorrendo quando o transmissor da RSOA começa a gerar ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE) e ao chegar na FBG da cavidade, ela é retroespalhada, bloqueando, dessa forma, o sinal de *upstream*, numa determinada frequência, que identifica a ONU na rede. Esta solução, no entanto, não é atrativa para um cenário prático com mais de 16 clientes, em razão da desnecessária quantidade de energia no tráfego de dados *upstream* (THOLLABANDI *et al.*, 2009).

1.2.7 Sinal refletivo

A ideia principal desta técnica é a implementação de dois componentes no cliente: um sistema interruptor óptico micro-eletromecânico (*Micro-electromechanical System* - MEMS), que tem por função modular o sinal de monitoramento vindo do CO, e um espelho, cujo papel é refletir o sinal modulado para o CO. Como cada MEMS instalado nas ONU's gera um padrão de sinal de pulsos deslocados diferentes, é possível identificar cada cliente a partir do sinal modulado recebido. Entretanto, a problemática da técnica está no uso de um interruptor óptico, que é um componente ativo, o que contraria o princípio de rede passiva (KO; LIN; HUANG, 2011).

1.2.8 Conclusão

O referencial teórico supracitado fornece o embasamento necessário para o esclarecimento do método de monitoramento PON apresentado no capítulo subsequente. A revisão bibliográfica descreve vantagens e desvantagens das técnicas de gerenciamento da rede óptica, especialmente da codificação óptica, que será abordada detalhadamente a seguir.

MONITORAMENTO PON BASEADO EM OCDMA EM FASE

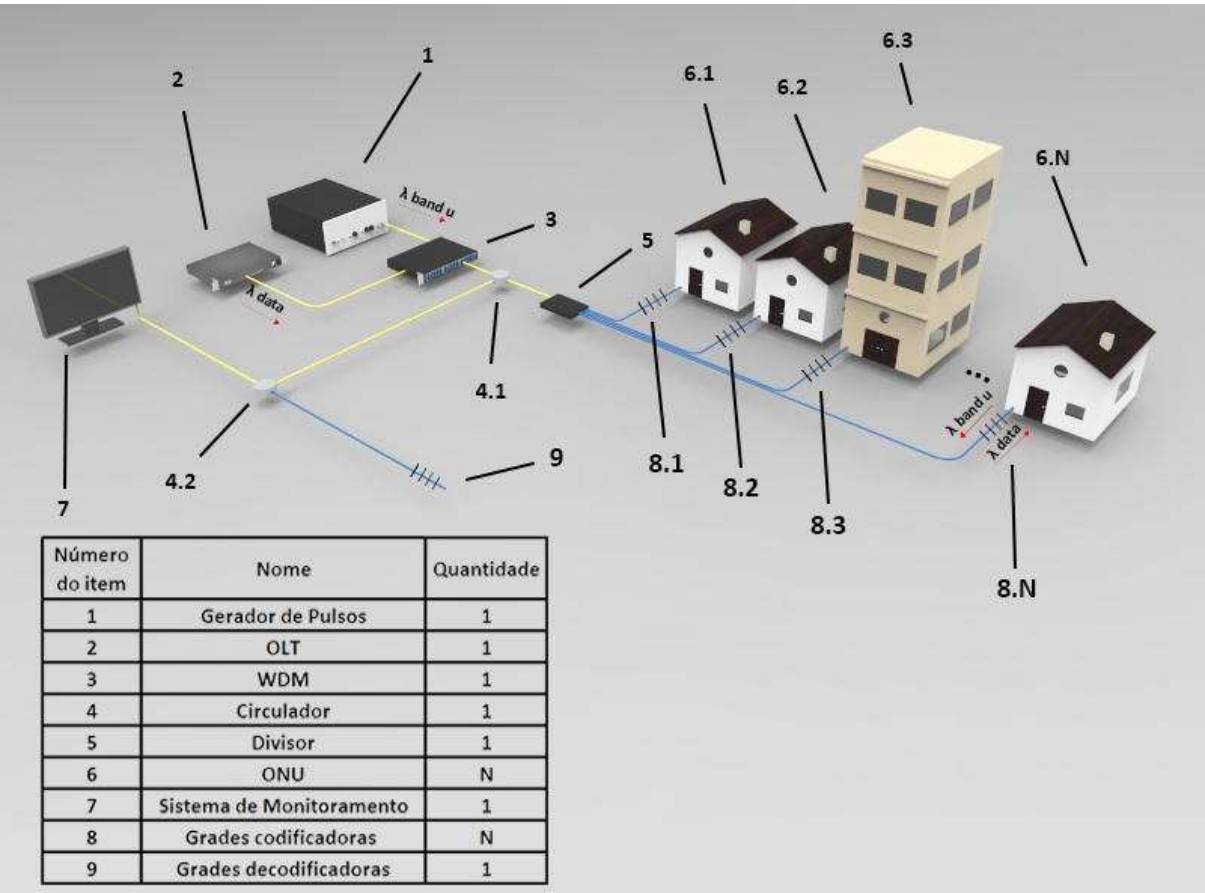
Este capítulo discorre sobre a metodologia usada no desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto, descrevendo, detalhadamente, o princípio do método, o sistema de codificação e decodificação de pulsos, a análise do sinal de autocorrelação e a interpretação de sinais para detecção de falhas. Por último, são apresentados os materiais e parâmetros utilizados para as simulações dos cenários PON's.

2.1 Princípio

O princípio do método proposto de monitoramento de PON, utilizando grades de Bragg e OCDMA em fase, baseia-se em assinantes de serviços de fibra para o lar (FTTH - *Fiber To The Home*), cujo monitoramento da rede depende da infraestrutura fornecida pelo provedor, bem como do sistema de análise de falhas presente no escritório central, conforme ilustrado na Figura 7. A técnica de monitoramento do sistema consiste na multiplexação do sinal de monitoramento (banda-U), representado pelo gerador de pulsos (1), ao sinal de dados (banda C), representado por (2). Após a multiplexação no WDM (3), a combinação do sinal de monitoramento com o sinal de dados é enviada no sentido *downstream*, ou seja, sentido provedor-cliente, passando, inicialmente, por um circulador óptico (4.1) e em seguida por um PSC (*passive splitter/combiner* - divisor/combinador passivo) 1:N (5), cuja função é dividir o sinal de entrada em N sub-sinais e direcioná-los a cada ONU que está ligada ao PSC. Os N sub-sinais percorrem um mesmo comprimento de fibra óptica até chegar nas grades de Bragg, que implementam a técnica de fabricação máscara de fase. Estas grades, dispostas nas ONU's, permitem passar o sinal de dados para o cliente, enquanto o sinal de monitoramento, por estar em banda diferente do sinal de dados, é codificado, conforme inscrição de fabricação, e refletido por cada grade de Bragg. Todos os sinais, agora codificados e refletidos, estão no sentido *upstream* (cliente-provedor), e retornam ao PSC, que é responsável, neste momento, por combinar o N sub-sinais ópticos em um único sinal óptico e enviar para o circulador (4.1),

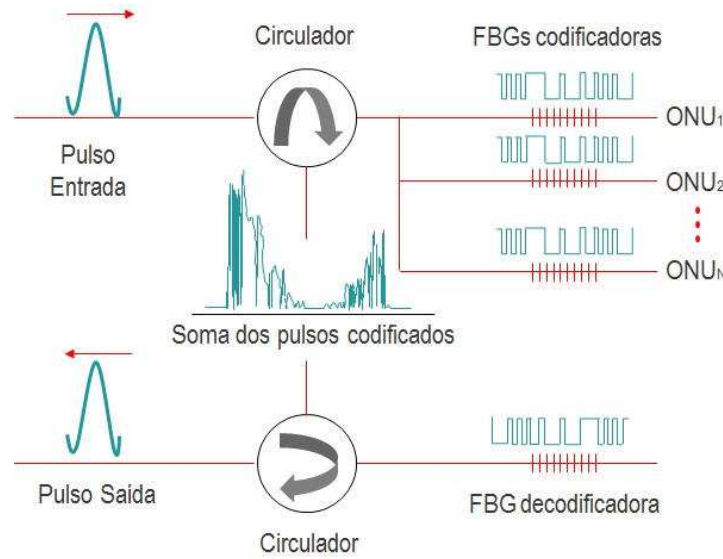
que encaminha o sinal até outro circulador (4.2). Ao chegar no segundo circulador (4.2), o sinal óptico codificado é encaminhado para a grade de Bragg decodificadora, que, após realizar a decodificação, reflete todo o sinal para o sistema de análise no provedor (7). Este sistema analisará o valor de pico de autocorrelação do sinal decodificado e compara com valores de referência para detecção exata do ramo de fibra com a falha, caso haja. Quando a falha é de fato detectada, o sistema emite um alarme e um relatório de rede, especificando qual ramo rompeu e qual o seu posicionamento dentro da rede.

Figura 7: Diagrama do modelo de monitoramento remoto de PON baseado na codificação óptica em fase de grades de Bragg.



Fonte: Produção do próprio autor.

A seguir, na Figura 8, é esquematizado o processo de codificação e decodificação do sinal ao passar pelas grades codificadoras e decodificadora, respectivamente. O pulso de entrada percorre até o circulador óptico, posteriormente é dividido N sinais, cuja codificação é feita em cada ONU e refletida para o circulador. Agora todos os pulsos somados e codificados passam por um segundo circulador óptico, em direção à grade decodificadora, que após decodificar o sinal, retorna o pulso de saída. Observa-se que o sinal de saída - após decodificação - é o próprio sinal da análise de autocorrelação, que possibilita, ao sistema, a identificação de falha na rede.

Figura 8: Estrutura esquemática do processo de codificação e decodificação de pulsos ópticos.

Fonte: Produção do próprio autor.

2.2 Codificação do sinal

Com objetivo de codificar o sinal de monitoramento, proveniente do provedor de *Internet*, foi estabelecida uma grade de Bragg codificadora para cada uma das 64 ONU's. Dessa forma, a sequência de *bits* $\{S1\}$, estabelecida no Capítulo 2, é definida como a sequência de *bits* de monitoramento a ser codificada por cada grade de Bragg nas ONU's:

Sequência $\{S1\}$: [1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 1].

Esta sequência possui o comprimento 63 *bits*, e cada *bit* é referido como *chip* de 0,66 mm de comprimento, totalizando 41,58 mm (0,66mm x 63 *bits*). A cada 0,66 mm, é aplicada uma alteração de fase, conforme configuração predefinida na FBG. Com o comprimento total de 41,58 mm, os efeitos de dispersão e não-linearidade são imperceptíveis, considerando os parâmetros da fibra e a potência óptica, podendo ser desprezados na codificação ou decodificação dos pulsos.

Cada grade de Bragg disposta nas ONU's possui uma codificação diferente, na qual a primeira ONU, por exemplo, codifica o sinal sem alterar nenhum *bit* da sequência $\{S1\}$, já a segunda ONU altera a fase de 1 *bit* da sequência $\{S1\}$, enquanto a terceira ONU altera a fase de 2 *bits* e assim por diante, até que a última ONU altere a fase de todos os *bits* da sequência, conforme exemplificado na Tabela 2.

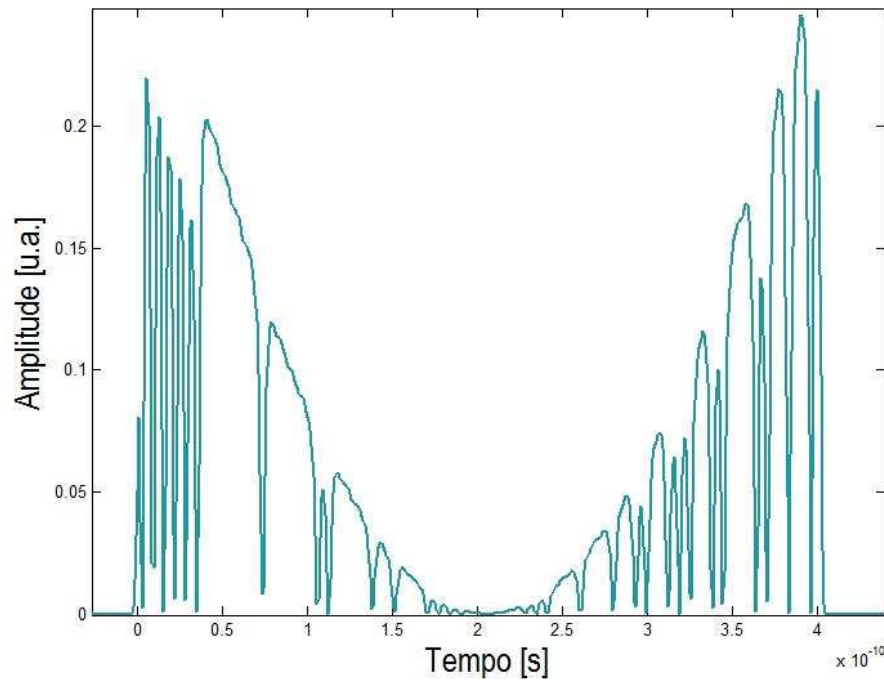
Tabela 2: Codificação de 63 ONU's.

ONU	Sequência de <i>bits</i> codificados	Inversão de fase
1	[101010111111000001000011000101001111010001110010010110111011001]	Nenhuma
2	[101010111111000001000011000101001111010001110010010110111011000 0]	1
3	[10101011111100000100001100010100111101000111001001011011101101 0]	2
4	[1010101111110000010000110001010011110100011100100101101110111 1 0]	3
...	...	...
30	[1010101111110000010000110001010011 00101110001101101001000100110]	29
31	[101010111111000001000011000101001 000101110001101101001000100110]	30
32	[10101011111100000100001100010100 0000101110001101101001000100110]	31
...	...	...
62	[1 001010000000111110111100111010110000101110001101101001000100110]	61
63	[1 101010000000111110111100111010110000101110001101101001000100110]	62
64	[010101000000111110111100111010110000101110001101101001000100110]	63

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 9 é representada a simulação - a ser explicada detalhadamente no Capítulo 4 - da soma dos pulsos codificados em todas as ONU's, com suas respectivas alterações de fases, após a combinação dos 64 pulsos no PSC.

Figura 9: Soma dos 64 pulsos codificados nas ONU's com suas respectivas alterações de fase.



Fonte: Produção do próprio autor.

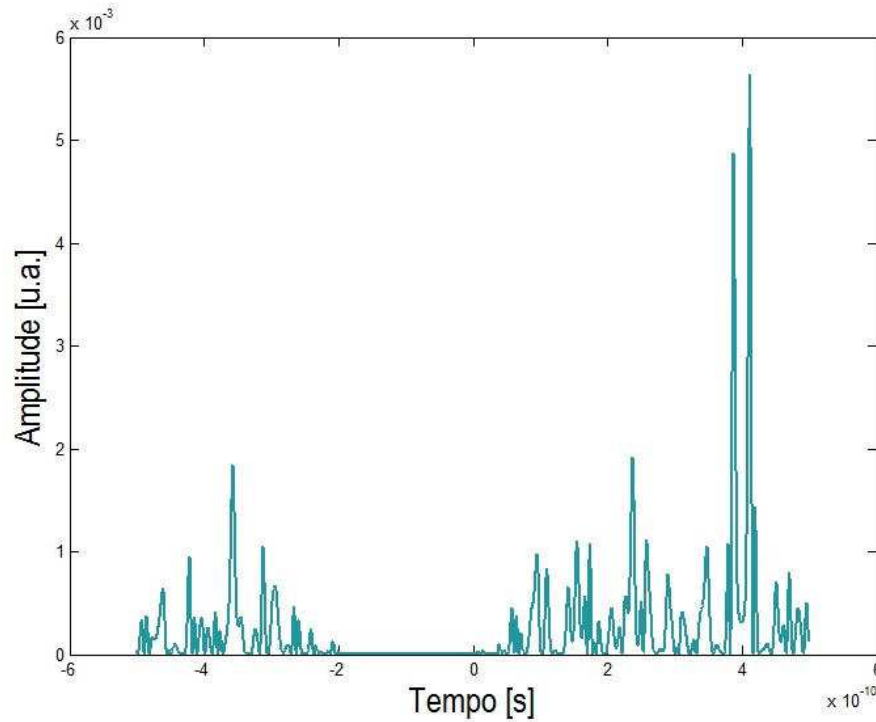
2.3 Decodificação do sinal

Após a codificação, os pulsos são combinados, ao mesmo tempo no PSC, formando um único sinal óptico, que consiste na soma de 64 pulsos codificados. Esta soma é então encaminhada à grade decodificadora, que possui um processo de decodificação similar ao processo de codificação, uma vez que é utilizada uma FBG com as mesmas características físicas das grades codificadoras, como: comprimento, constante de acoplamento, coeficiente não-linear e índice de refração efetivo. Entretanto, a diferença entre a grade codificadora e a decodificadora está no modo de recepção dos códigos, pois quando uma determinada sequência de *bits* é decodificada, os *bits* são inseridos de maneira inversa aos *bits* inseridos na grade codificadora, pois é dessa forma que o pulso de entrada é recuperado (GUIMARÃES, 2010). Para a decodificação do pulso codificado da Figura 10, por exemplo, utiliza-se a sequência invertida $S1^{-1}$:

Sequência invertida $S1^{-1}$: [1 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1]

Na Figura 10 é ilustrada a decodificação dos pulsos codificados apresentados na Figura 9, ou seja, a decodificação do sinal obtido com a soma dos 64 pulsos codificados nas ONU's e combinados no PSC.

Figura 10: Decodificação da soma dos 64 pulsos codificados nas ONU's.



Fonte: Produção do próprio autor.

2.4 Decisão de usuário com falha

A rotina para monitoramento do sistema consiste, inicialmente, na medição e análise da potência óptica de retorno, que pode ser realizada periodicamente ou por demanda. Este sinal recebido é comparado com dados de referência, e, caso haja violação do limite, o sistema emite um alarme de detecção de falha e inicia rotina de detecção de qual ramo da PON está rompido.

Para a detecção exata do *link* com falha, o sistema de monitoramento analisa o sinal decodificado pela grade decodificadora. A autocorrelação apresentada pelo sinal decodificado é o parâmetro pelo qual se identifica em qual ramo de fibra ocorreu a falha, ou seja, a partir desse valor é possível identificar qual das N ONU's está com o *link* rompido. Esta análise de autocorrelação é viável devido a grade decodificadora possuir a sequência de *bits* sem erro. Logo, cada sinal que retorna da grade codificadora apresenta um valor de autocorrelação, pois as sequências com menos erros de *bits* apresentam maior autocorrelação, enquanto as sequências com mais erros de *bits* possuem menor autocorrelação.

Dessa forma, como a inserção de erros de *bit* em cada ONU é gradual, conforme descrito no item 2.3, foi possível estabelecer uma curva de tendência, cuja falha nas primeiras ONU's acarretará um valor de autocorrelação baixo, enquanto falhas nas últimas ONU's, que possuem mais *bits* errados, implicarão em maiores valores de autocorrelação. Observa-se, no entanto, que este modelo de monitoramento aqui proposto não abrange casos em que há mais de uma ruptura simultaneamente. Caso haja ruptura de dois ou mais links concomitantemente, o sistema apresentará comportamento aleatório, podendo emitir alerta de falha em um link saudável ou não emitir nenhuma alerta, como se a rede toda estivesse saudável.

2.5 Flexibilização da topologia

O modelo de monitoramento remoto de PON proposto possui uma vantagem relevante em relação a outros modelos encontrados na literatura e considerados neste trabalho, que é a possibilidade da escalabilidade da rede, ou seja, este modelo oportuniza realizar o monitoramento e detecção de falhas em redes que utilizam a topologia árvore.

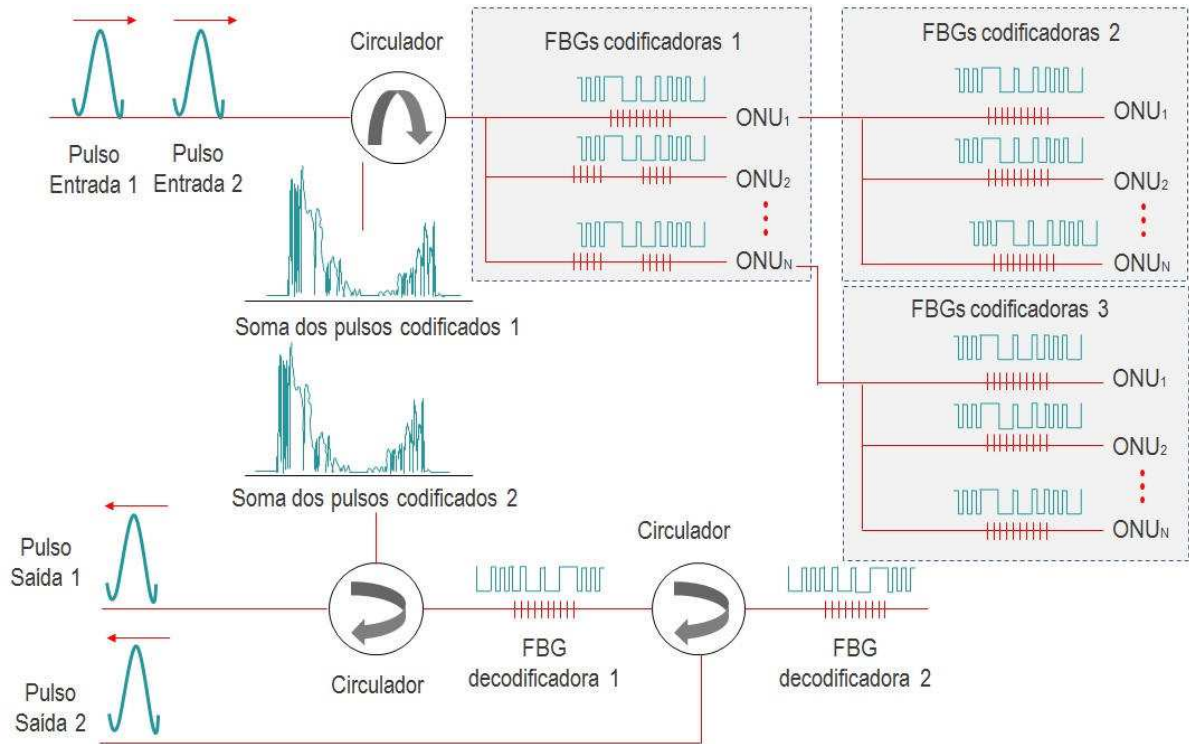
Para implementar a ramificação em um dos ramos, é necessária a utilização de comprimento de onda diferente dos comprimentos de onda já usados nas redes, bem como a inserção de uma segunda grade decodificadora para identificação e monitoramento da nova ramificação. Tal estrutura está esquematizada na Figura 11.

Do exposto na Figura 11, tem-se que a cada ramificação é necessária a implementação na rede de um novo comprimento de onda e uma nova grade decodificadora. A flexibilização da topologia apresentada é importante para casos de expansão da rede, ou seja, quando a rede está operando com sua capacidade máxima de usuários e ainda há demanda de novos usuários para acesso. Outra aplicação ocorre nos casos em que é necessário distribuir estrutura de fibra em mais de um ponto no mesmo endereço físico, por exemplo, nos apartamentos de um condomínio, nos departamentos de universidades, em salas de empresas de grande porte, entre outros.

2.6 Estudo numérico

O estudo numérico proposto consiste na implementação de um algoritmo no *software* Matlab (versão R2014a e licença 898894), para simular a codificação e decodificação de pulsos ópticos e a análise de picos de autocorrelação. Os valores dos parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 3.

Figura 11: Estrutura esquemática do processo de codificação e decodificação de pulsos curtos para PON com mais de uma ramificação.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 3: Valores utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor	Unidade
P_0 , potência de entrada	1	mW
n_{eff} , índice efetivo do núcleo da fibra	1,452	-
κ , constante de acoplamento	24,05	m^{-1}
L_{bragg} , comprimento da grade de Bragg	0,04158	m
Quantidade de <i>chips</i>	63	-

Fonte: Produção do próprio autor.

O sinal de entrada (pulso de entrada) foi representado matematicamente pela função do tipo Secante Hiperbólica e, para solucionar as equações de modo acoplado (1.2) e (1.3), com a dispersão de velocidade de grupo (β_2) e o coeficiente de não-linearidade (γ) desprezados, devido aos efeitos serem imperceptíveis na grade, considerando os parâmetros da fibra e a potência óptica. O método numérico Runge-Kutta de 4ª ordem foi aplicado para resolução das equações.

2.7 Conclusão

A partir da metodologia acima citada é possível analisar e entender a composição das PON's e a estrutura necessária para constituição do sistema de monitoramento. A disposição dos equipamentos e componentes ópticos estrategicamente inseridos na rede fazem com que o monitoramento funcione corretamente, e quaisquer alterações podem comprometer a performance do sistema.

A codificação do sinal óptico é essencial para a identificação de cada usuário na rede. Entretanto, outros códigos de monitoramento podem ser inseridos no sistema, desde que possuam boas propriedades de autocorrelação.

A flexibilização da topologia compõe umas das vantagens do sistema, diante das redes saturadas encontradas nas grandes metrópoles. No entanto, cabe ao engenheiro responsável da rede analisar o quão ramificada é a rede, as perdas inseridas ao longo do caminho e qual a sensibilidade do receptor, a fim de que o sinal de monitoramento alcance a grade decodificadora com intensidade suficiente para verificação decodificação do pulso.

O esclarecimento do método proposto e a apresentação dos materiais utilizados em simulações proporcionam a fundamentação essencial à compreensão dos resultados apresentados no capítulo subsequente.

RESULTADOS E ESTUDO COMPARATIVO COM OUTRAS TECNOLOGIAS

Este capítulo expõe os resultados obtidos através de simulações para 5 cenários de PON's: 8, 16, 32, 63 e 64 usuários finais. Nos gráficos apresentados são discutidas as equações da curva de tendência dos picos de autocorrelação, bem como os coeficientes de determinação de cada curva. Por fim, na seção 3.2, é realizada uma comparação final dos resultados obtidos com os resultados de outras técnicas de monitoramento semelhantes ao sistema de proposto.

3.1 Resultados

Nas simulações a seguir, é demonstrada a performance do modelo de monitoramento de PON, que faz uso da sequência $\{S1\}$, apresentada na subseção 1.1.3, e dos parâmetros apresentados na Tabela 3. Complementarmente, foi variada a quantidade de ONU's, bem como a refletividade da grade, visando analisar o comportamento dos picos de autocorrelação em cada uma das situações.

3.1.1 8 ONU's

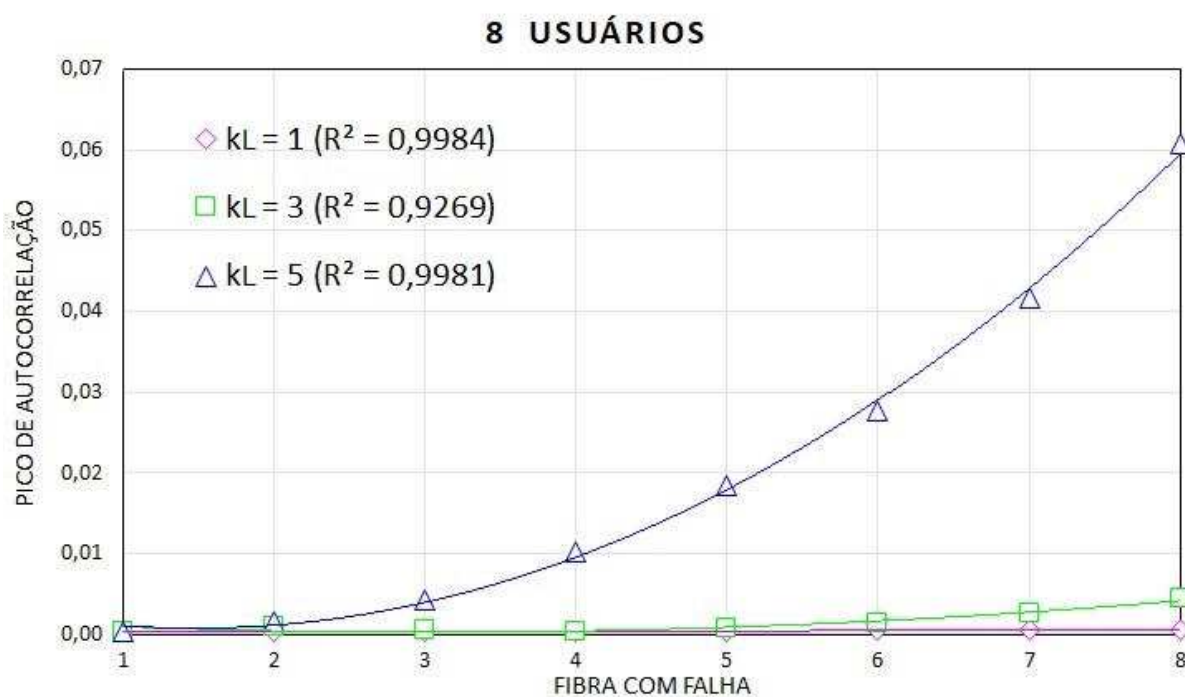
Inicialmente, foram usados os 63 *chips* da grade de Bragg para obter o gerenciamento de 8 ONU's, cujas alterações de fase foram incrementadas em passos de 8 em 8 na sequência $\{S1\}$. Dessa forma, cada ONU possui uma grade codificada que inverte a fase de 8 *bits* da sequência $\{S1\}$, de acordo com a lógica exemplificada na Tabela 4.

Desta maneira, os 63 *chips* foram divididos para 8 ONU's, na qual a grade de Bragg da primeira ONU não altera a fase de nenhum *bit*, a grade da segunda ONU altera a fase de 8 *bits*, a terceira altera a fase de 16 *bits* da sequência e assim ocorre até a grade da oitava ONU, que é a última, altere a fase de 56 *bits* da sequência $\{S1\}$. Vale salientar que as alterações de fase são realizadas inversamente, pois as grades de Bragg codificadoras possuem uma sequência inversa

à grade de Bragg decodificadora.

A princípio, para o caso de 8 ONU's, foi simulada a ausência de cada ONU como um *link* rompido e obteve-se o gráfico da Figura 12. A curva de tendência apresentada fornece parâmetros que possibilitam correlacionar o rompimento de um dos usuários na rede com um valor de pico de autocorrelação, permitindo, portanto, a detecção do ramo de fibra com falha. Isso decorre do fato de que quando a falha ocorre nas primeiras ONU's, que possuem poucos erros de *bits*, o sinal de autocorrelação é menor, pois restam apenas as grades que possuem maior erro de codificação do sinal. Na mesma lógica, quando falha uma das ONU's com maior erro de *bits*, restam apenas as grades que inserem menos erros, aumentando, deste modo, o pico de autocorrelação.

Figura 12: Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (8 usuários).



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 4: Codificação de 8 ONU's.

ONU	Sequência de <i>bits</i> codificados	Inversão de fase
1	[101010111111000001000011000101001111010001110010010110111011001]	Nenhuma
2	[1010101111110000010000110001010011110100011100100101101 00100110]	8
3	[10101011111100000100001100010100111101000111001 1101001000100110]	16
4	[1010101111110000010000110001010011110101 110001101101001000100110]	24
5	[10101011111100000100001100010101 10000101110001101101001000100110]	32
6	[10101011111100000100001 0111010110000101110001101101001000100110]	40
7	[101010111111000 110111100111010110000101110001101101001000100110]	48
8	[1010101 00000111110111100111010110000101110001101101001000100110]	56

Fonte: Produção do próprio autor.

Outro estudo realizado foi em relação à refletividade da grade ($\kappa L = 1, 3$ e 5), no qual é perceptível a facilitação de identificação de usuários com falha quanto maior for a refletividade, uma vez que o espaçamento entre os valores de autocorrelação tornam-se maiores, ou seja, a probabilidade de falso alarme de falha diminui, já que os valores de autocorrelação estão mais distantes.

As três curvas de tendência para cada valor de refletividade da grade obedecem às equações de segundo grau, descritas na Tabela 5, e possuem o coeficiente de determinação (R^2) maior que 90% em todos os casos, ou seja, a equação se ajusta à amostra em 90% das vezes.

Tabela 5: Equações de tendência de 8 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.

Refletividade (κL)	R^2	Equações
1	0,9984	$y = 3 * 10^{-6}x^2 - 1 * 10^{-5}x + 1 * 10^{-5}$
3	0,9269	$y = 2 * 10^{-4}x^2 - 1 * 10^{-3}x + 1,4 * 10^{-3}$
5	0,9981	$y = 1,4 * 10^{-3}x^2 - 4,1 * 10^{-3}x + 3,4 * 10^{-3}$

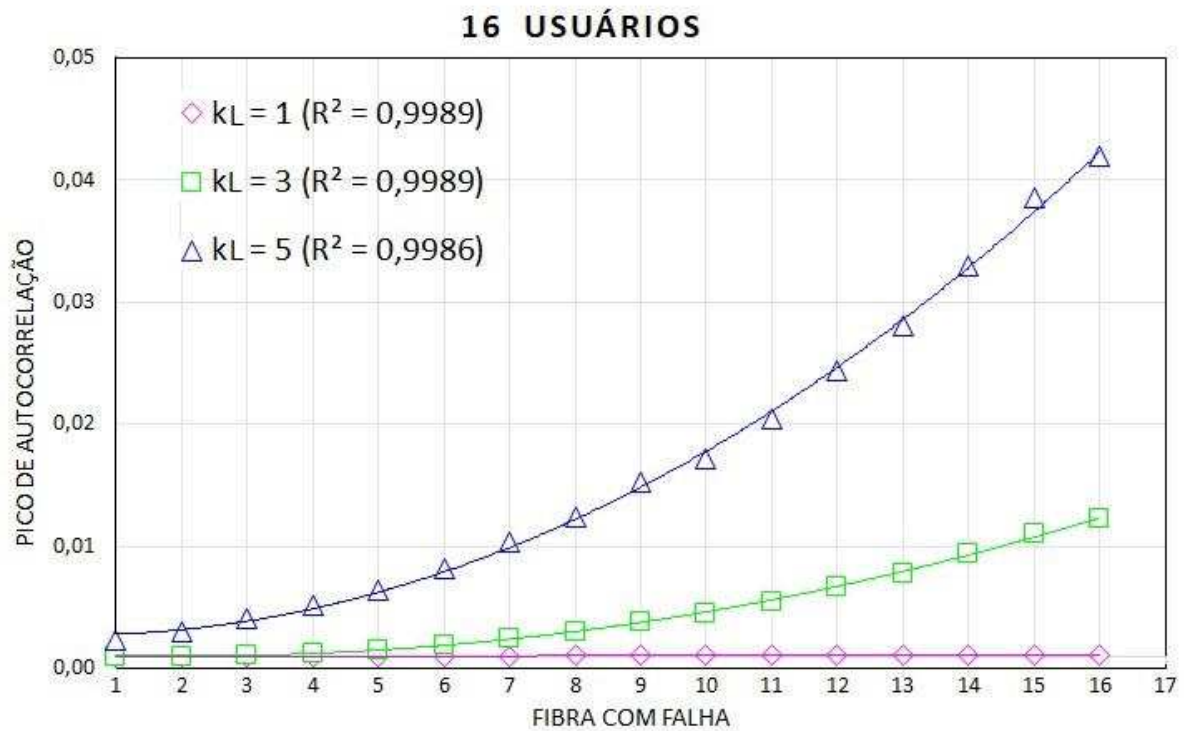
Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.2 16 ONU's

No caso de 16 ONU's, a quantidade de usuários foi aumentada de 8 para 16, logo os 63 *chips* da grade foram divididos para 16 usuários, cujo primeiro usuário não possui inversão de *bits* e o último usuário faz 60 alterações de fase na sequência $\{S1\}$, ou seja, o incremento de alteração de fase de *bits* ocorreu em um passo de 4 *bits* para cada grade. É apresentado na Figura 13 o gráfico de simulação de ausência de cada uma das 16 ONU's como um *link* rompido. Da mesma maneira que ocorreu nos testes de 8 ONU's, o sinal de autocorrelação aumenta quando há falha nas grades que realizam maiores inversões de fase na sequência $\{S1\}$.

As três curvas de tendência para cada valor de refletividade obedecem às equações de segundo grau, descritas na Tabela 6, juntamente a cada coeficiente de determinação R^2 . Novamente os coeficientes de determinação, para cada valor de refletividade, são superiores a 99%, ratificando que a equação de tendência se ajusta à amostra em 99% das vezes.

Figura 13: Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (16 usuários).



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6: Equações de tendência de 16 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.

Refletividade (κL)	R^2	Equações
1	0,9989	$y = 8 * 10^{-7}x^2 - 4 * 10^{-6}x + 6 * 10^{-6}$
3	0,9989	$y = 6 * 10^{-5}x^2 - 3 * 10^{-4}x + 3 * 10^{-4}$
5	0,9986	$y = 2 * 10^{-4}x^2 - 1 * 10^{-4}x + 1,7 * 10^{-3}$

Fonte: Produção do próprio autor.

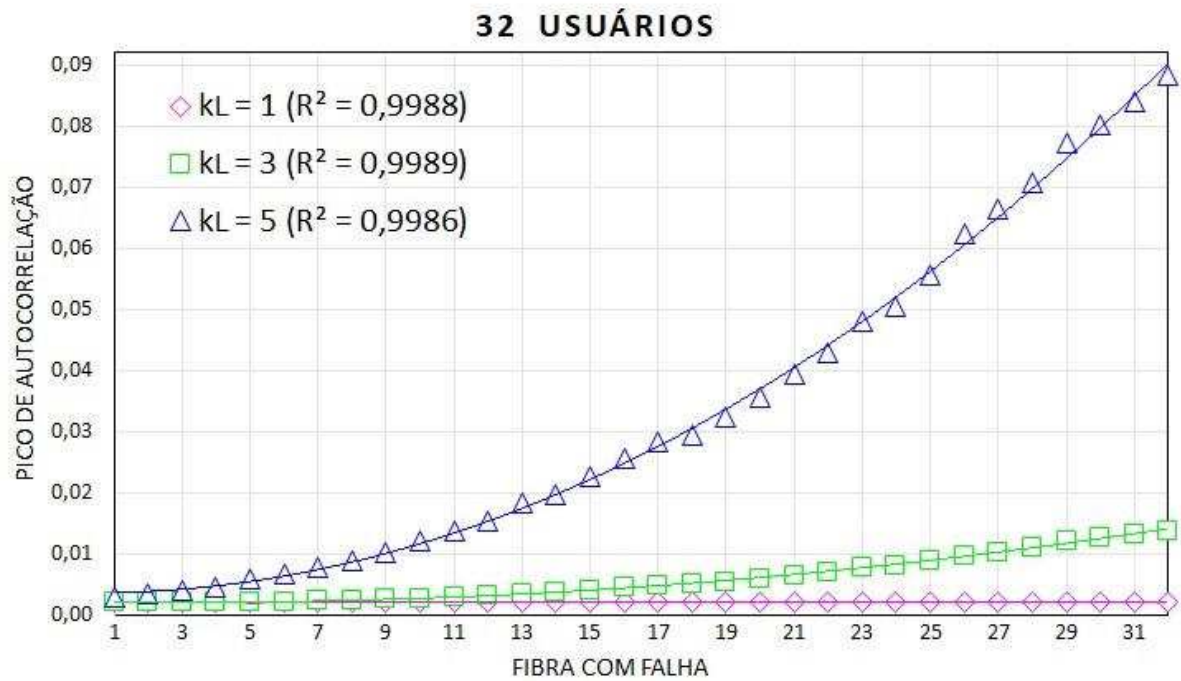
3.1.3 32 ONU's

Foram realizadas simulações para 32 usuários, de forma que os 63 *chips* distribuem-se de forma que o primeiro usuário (ONU1) possui nenhuma inversão de fase e o último possui 62 *bits* inversões de fase, ou seja, as alterações de fase são inseridas de 2 em 2 *bits*. Na Figura 14 é apresentado o gráfico que simula *link* rompido pelo gráfico de autocorrelação para cada largura de banda.

As três curvas de tendência para cada valor de refletividade obedecem às equações de

segundo grau, descritas na Tabela 7, juntamente a cada coeficiente de determinação R^2 . Os coeficientes de determinação, para cada valor de refletividade, são superiores a 99%, ratificando que a equação de tendência se ajusta à amostra em mais 99% das vezes.

Figura 14: Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (32 usuários).



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7: Equações de tendência de 32 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.

Refletividade (κL)	R^2	Equações
1	0,9988	$y = 2 * 10^{-7}x^2 - 2 * 10^{-6}x + 5 * 10^{-6}$
3	0,9989	$y = 1 * 10^{-5}x^2 - 1 * 10^{-4}x + 2 * 10^{-4}$
5	0,9986	$y = 9 * 10^{-5}x^2 - 6 * 10^{-5}x + 1,6 * 10^{-3}$

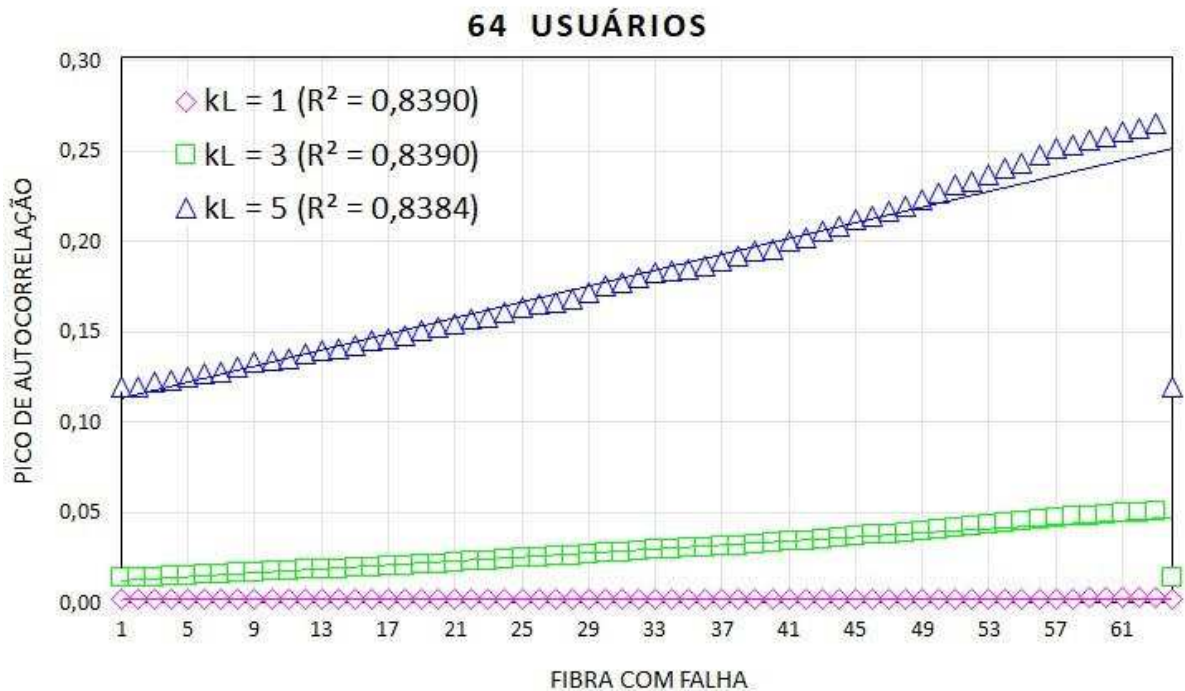
Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.4 64 ONU's e 63 ONU's

Por último, utilizando a quantidade máxima de *chips* disponíveis na grade, totalizando 64 usuários, os 63 *chips* distribuem-se de forma que o primeiro usuário não possui inversão de fase e o último possui 63 *bits* inversões. Na Figura 15 é mostrada a simulação de rompimento de *link* de fibra para cada um dos 64 usuários.

No entanto, verifica-se que o último usuário, o 64º, não obedece à linha de tendência como as demais ONU's. Isso decorre do fato de que o usuário número 64 possui todos os *bits* com alteração de fase, fazendo, portanto, com que o OCDMA, que é em fase, retorne o ciclo e não consiga, de fato, diferenciar o primeiro e o último usuário.

Figura 15: Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (64 usuários).



Fonte: Produção do próprio autor.

É notável na curva de tendência, apresentada pelas equações descritas na Tabela 8, que o coeficiente de determinação R^2 cai para 83%.

Tabela 8: Equações de tendência de 64 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.

Refletividade (κL)	R^2	Equações
1	0,8390	$y = 7 * 10^{-9}x^2 + 7 * 10^{-6}x + 9 * 10^{-5}$
3	0,8390	$y = 3 * 10^{-7}x^2 + 5 * 10^{-4}x + 9,8 * 10^{-3}$
5	0,8384	$y = -7 * 10^{-7}x^2 + 2,2 * 10^{-3}x + 1,1 * 10^{-1}$

Fonte: Produção do próprio autor.

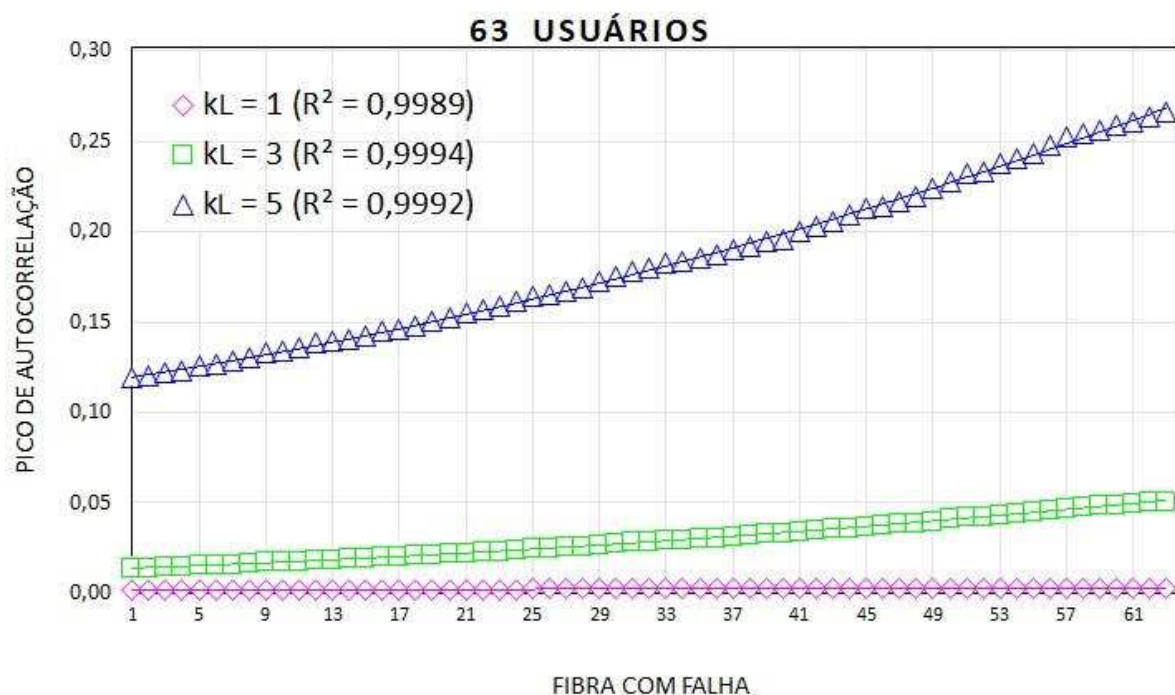
Apesar de um coeficiente de determinação ser considerado bom a partir de 70%, neste caso o problema não seria resolvido, pois ao romper o primeiro usuário ou o último, o sistema não

seria capaz de identificar qual das duas ONU's está com falha, sendo necessário uma despesa adicional ao encaminhar equipe técnica aos dois possíveis locais de falha, o que contraria o objetivo do sistema de monitoramento proposto.

Do exposto, conclui-se que quando é usado o número máximo de *chips* da grade de Bragg, a capacidade máxima de usuário no sistema é de N ONU's, em que N é quantidade de *chips* da grade.

É ilustrada na Figura 16 a nova curva de tendência obtida para a quantidade máxima de ONU's (63 ONU's para uma grade de 63 *chips*):

Figura 16: Gráfico de identificação de fibra com falha através do pico de autocorrelação e a influência da refletividade da grade (63 usuários).



Fonte: Produção do próprio autor.

As novas curvas de tendência, bem como as equações das curvas e os coeficientes de determinação R^2 são apresentados na Tabela 9 para cada valor de refletividade da grade. É possível notar que ao eliminar o último usuário proposto anteriormente, o coeficiente de determinação R^2 sobe para mais de 92%, ou seja, o sistema torna-se mais preciso.

Tabela 9: Equações de tendência de 63 ONU's e coeficiente de determinação para cada valor de refletividade da grade.

Refletividade (κL)	R^2	Equações
1	0,9989	$y = 6 * 10^{-8}x^2 + 4 * 10^{-6}x + 1 * 10^{-4}$
3	0,9994	$y = 4 * 10^{-6}x^2 + 3 * 10^{-4}x + 1,2 * 10^{-2}$
5	0,9992	$y = 2 * 10^{-5}x^2 + 1,4 * 10^{-3}x + 1,2 * 10^{-1}$

Fonte: Produção do próprio autor.

É válido ressaltar que em todas as situações simuladas, se houver o aumento da largura de banda, é possível identificar, com maior precisão, qual o ramo está com defeito, uma vez que a diferença entre picos de autocorrelação de ONU's vizinhas torna-se maior.

3.2 Comparação de modelos de monitoramento

Diversos métodos para monitoramento de PON's têm sido discutidos e publicados. Entretanto, apesar de desempenharem satisfatoriamente o seu papel de monitoramento, atrelam a essa atividade um alto custo de desenvolvimento, tornando-se, muitas vezes, impraticáveis. Na Tabela 10 são apresentados alguns modelos de monitoramento de redes ópticas passivas, onde são comparadas as abordagens de técnicas semelhantes ao estudo proposto nesta dissertação, que fazem uso de componentes passivos e empregam FBG no sistema de monitoramento e/ou codificação óptica, cujas principais características abordadas e relacionadas são definidas a seguir:

1. Centralizado: permite que todo o monitoramento da rede seja realizado no CO, sem a participação do cliente, diferentemente dos modelos distribuídos, cuja detecção de falhas não é realizada no CO e sim em pontos específicos da PON.

2. Transparente: possibilita funcionamento paralelo do sistema de monitoramento juntamente com a transmissão e recepção de dados para o cliente, ou seja, não há necessidade de interromper de tempos em tempos a transmissão de dados para que o sistema verifique os estados de ramos de fibra óptica e defina se houve rompimento ou não.

3. Quantidade de comprimentos de onda por rede: possibilita a alteração do custo do sistema em virtude da largura de banda necessária para operação. Para sistemas que demandam vários comprimentos de onda no monitoramento, é necessária uma maior disponibilidade de alta largura de banda, e quanto mais densa a rede, mais oneroso será o sistema.

4. Detecção de falha: permite que o sistema de monitoramento identifique, com precisão, o ramo com defeito dentro da rede.

5. Localização da falha: possibilita a localização exata de onde ocorreu o rompimento.

6. Quantidade máxima de ONU: característica que permite quantificar a robustez da rede.

7. Escalabilidade: garante que sejam adicionados e monitorados novos usuários, mesmo que a rede esteja operando em sua capacidade máxima. Esta característica é essencial para implementar a expansão da rede para adequação de novos padrões (XG-PON1, 10G-PON, NG-PON2 e demais padrões futuros), além de permitir a inclusão de novos clientes em uma mesma área.

8. Quantidade de grades de Bragg por usuário: quantifica o número de grades de Bragg necessário na rede para realizar o monitoramento, implicando diretamente no custo da técnica.

9. Custo: um dos principais indicadores de sucesso da técnica, uma vez que se torna um fator crítico para o cenário mercadológico. Todos os custos foram estimados em relação a quantidade de elementos necessários (grades de Bragg, circuladores e demais equipamentos necessários) em cada uma das técnicas estudadas na tabela.

10. Limitações: determina as restrições impostas pelo sistema.

Pela Tabela 10, destacam-se 3 características importantes do modelo proposto em relação aos outros modelos, que são:

- Quantidade de λ : para o modelo proposto, é necessário apenas um comprimento de onda para o monitoramento, enquanto as outras técnicas necessitam de todo o espectro ou dependem da quantidade de ONU's na rede. A vantagem de utilizar somente um comprimento de onda para o gerenciamento da rede deve-se à economia do espectro, o que impacta numa possível redução de custos para o provedor.
- Quantidade máxima de ONU: para provedores de *Internet*, quanto maior a taxa de penetração dos serviços prestados por área, maiores os rendimentos da empresa. Dessa forma, o monitoramento que dependa apenas da quantidade de *chips* na grade de Bragg pode ser um fator decisivo no momento da implantação de um sistema de monitoramento. As técnicas que dependem da quantidade de comprimento de onda para monitorar possuem a limitação de número de usuários determinada pela largura de banda do sistema, enquanto que sistemas que utilizam correlação das equações de distância necessitam sempre de clientes com distâncias fixas, a fim de garantir correlação entre pulsos, o que pode dificultar a implantação do sistema de monitoramento em uma rede em operação.

O modelo proposto, no entanto, determina que a quantidade de usuários finais seja de acordo com o número de *chips* da grade, facilitando, desse modo, a inserção de novos clientes na rede, como também a implantação de monitoramento em redes densas.

- Escalabilidade: garantir a inserção e monitoramento de novos usuários em uma rede óptica passiva saturada pode ser um fator decisivo na escolha do método, sendo esta uma vantagem relevante em relação as outras técnicas de monitoramento, que não apresentam a possibilidade de gerenciamento na escalabilidade.

3.3 Conclusão

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir a viabilidade do método proposto para identificação de 8, 16, 32 e 63 usuários na rede, quando há utilização de grade de Bragg com 63 *chips* e a aplicação da técnica de OCDMA em fase. Assim, entende-se que a quantidade de usuários monitorados será igual ao número de *chips* presente nas grades utilizadas para a codificação. A refletividade da grade é outro parâmetro importante para a precisão do sistema, facilitando a identificação dos usuários. Há impraticabilidade do monitoramento em rompimentos simultâneos, entretanto são raros os casos em que esta situação ocorre, uma vez que as fibras ramificadas normalmente não estão distribuídas de forma tão próxima.

Tabela 10: Comparação de técnicas de monitoramento PON através de indicadores de performance.

Técnicas	Características									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Centralizado	Transparente	Quant. λ	Detecção de falha	Localização de falha	Quant. máx de ONU	Escalabilidade	Custo	Quant. de grade/ONU	Limitações
Monitoramento com T-OTDR e seletor de comprimento de ondas Tempora <i>et al.</i> (2013)	Sim	Sim	Det. pela largura de banda	Sim	Não	Det. pela quant. de λ	Não	1	Médio	Sensível a erros; Distância de usuários limitada (4 a 15 km); Quant. de λ .
Monitoramento baseado em grade de Bragg em divisor PLC Zhang <i>et al.</i> (2016)	Sim	Sim	N+1, (N é nº de <i>chips</i>)	Sim	Não	2N, (N é nº de <i>chips</i>)	Não	2 n-1, (n é o nº de estágio)	Alto	Usuários equidistantes; Complexidade do algoritmo; Quant. de grades.
Monitoramento por codificação 2D utilizando grades de Bragg e codificadores ópticos Zhu <i>et al.</i> (2016)	Sim	Sim	3	Sim	Não	Det. pela correlação da eq. de distância	Não	3	Alto	Complexidade do algoritmo; Quant. de grades.
Monitoramento baseado em codificação óptica 2D por salto periódico em frequência Zhou, Zhang & Sun (2013)	Sim	Sim	Igual a quant. de ONU's	Sim	Não	Det. pela quant de λ	Não	1	Médio	Quant. de λ .
Monitoramento utilizando grades de Bragg e codificação óptica em fase	Sim	Sim	1	Sim	Não	N, (N: nº de <i>chips</i>)	Sim	1	Baixo	Usuários equidistantes.

Fonte: Produção do próprio autor.

CONCLUSÕES

Ao longo dos meses de atividades que motivaram esta dissertação, foi desenvolvido um estudo de viabilidade de um sistema de monitoramento de redes ópticas passivas, implementando grades de Bragg e técnicas de múltiplo acesso por divisão de códigos ópticos em fase. A técnica abordada permite a identificação exata de usuário com falha em redes ramificadas, por meio do estudo do sinal de autocorrelação decodificado. Os resultados obtidos através de simulações demonstram a viabilidade do modelo de monitoramento de PON, cuja implementação proposta para 63 *chips* da grade de Bragg identificam 8, 16, 32 ou 63 usuários na rede. Foi identificado que os picos de autocorrelação possuem menores distâncias à medida que são inseridas ONU's na rede, logo, quanto mais grades disponíveis por usuários, mais facilmente cada usuário é identificado. A refletividade da grade é outro parâmetro ligado diretamente a precisão de identificação de usuário com falha, uma vez que quanto maior a refletividade da grade, com maior exatidão atuará o modelo.

Ademais, evidencia-se o aprimoramento oferecido pela técnica de monitoramento proposta nesta dissertação, posto que ela permite a escalabilidade da rede, ao passo que nenhuma das outras técnicas consideradas neste trabalho apresentam esta possibilidade.

Com relação a implementação do modelo de monitoramento sugerido, evidencia-se o fato de que ele não detecta falhas simultâneas, podendo gerar ou um falso alarme de detecção de falha em ramo saudável ou a não apresentação de falhas no sistema.

Diante do exposto, conclui-se que os objetivos pretendidos foram alcançados, contribuindo com o estudo de um novo modelo de monitoramento de redes ópticas passivas.

4.1 Trabalhos futuros

Embora os objetivos desta pesquisa tenham sido concretizados, existem outras oportunidades a serem estudadas e analisadas. A seguir, são elencadas propostas para pesquisas futuras, com o intuito de ampliar e aprofundar a técnica de monitoramento proposta:

- Esquema de codificação: Apesar das vantagens elencadas nesta dissertação sobre a codificação óptica em fase, é interessante analisar o comportamento de outras codificações ópticas (codificação OCDMA em amplitude, por exemplo), códigos que possuam melhores características de autocorrelação ou outros códigos de implementação mais simples e rápida;
- Localização de falhas: Este modelo, apesar de identificar qual ramo está com falha, não detecta o local exato da falha, tornando a manutenção onerosa - embora menor que a de um provedor sem o sistema - devido ao tempo gasto pela equipe técnica para localizar a falha e, então, fazer o reparo. A análise dos sinais que retornam ou a implementação de um terceiro comprimento de onda exclusivo para localização de falhas pode fazer com que o sistema obtenha um melhor desempenho.
- Técnica para detecção de rompimento simultâneo: O modelo apresentado nesta dissertação não contempla casos em que há rompimentos simultâneos. A proposta de redes inteligentes que analisem automaticamente as N combinações de autocorrelação de todos os usuários na rede pode ser uma alternativa para tratar casos específicos de rompimentos simultâneos;
- Simulação da técnica com todos os componentes da rede: o modelo proposto foi validado com implementação das grades codificadoras e decodificadoras. Entretanto, é interessante analisar a rede com inserção dos demais equipamentos que a compõem, como: *drop* de fibra, circuladores e divisores;
- Validação experimental da técnica: apesar o modelo ter sido validado em ambiente de simulação por meio de *software* específico, as validações experimentais são importantes para explorar o modelo detalhadamente e validá-lo em ambiente prático de PON.

Referências Bibliográficas

- AB-RAHMAN, M.S.; NG, B.C.; PREMADI, A.; JUMARI, K. Transmission surveillance and self-restoration against fibre fault for time division multiplexing using passive optical network. **IET Communications**, v. 3, n. 12, 2009.
- AGRAWAL, G. P. **Applications of nonlinear fiber optics**. [S.l.]: Academic Press, 2001.
- AGRAWAL, G. P. **Applications of nonlinear fiber optics**. 2nd. ed. [S.l.]: Second Edition, 2009.
- BERTARINI, P. L. L. **Sistemas CDMA opticos coerentes baseados em codificacao de fase espectral**. Tese (Doutorado) — Universidade de Sao Paulo, 2012.
- BUTT, R. A.; IDRUS, S. M.; QURESHI, K. N; ZULKIFLI, N.; MOHAMMAD, S.H. Improved dynamic bandwidth allocation algorithm for XGPON. **Journal Opt. Commun. Netw.**, v. 9, n. 1, 2017.
- CARVALHO, M. C. **Redes de Bragg em Fibras Opticas Polimericas (FOP)**. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, 2010.
- CAVIGLIA, F.; BIASE, V. C. D.; GNAZZO, A. Optical maintenance in PONs. **Optical Fiber Technology**, v. 5, 1999.
- CHAN, C. F.; CHEN, C.; JAFARI, A.; LARONCHE, A.; THOMSON, D. J.; ALBERT, J. Optical fiber refractometer using narrowband cladding-mode resonance shifts. **Journal Applied Optics**, v. 46, n. 7, 2007.
- CHEN, Y.K.; CHI, S. Fault-locating and supervisory technique for multistaged branched optical networks. **Journal IEEE Photonics Technology Letters**, v. 6, n. 7, 1994.
- L.G. Cohen & J. H. Winter. **Optical communication network with passive monitoring**. February 1994. 5285305. Disponível em: <<https://www.google.ch/patents/US5285305>>.
- DINAN, E. H.; JABBARI, B. Spreading codes for direct sequence CDMA and wideband CDMA cellular networks. **Journal IEEE Communications Magazine**, 1998.
- EFFENBERGER, F. J.; MENG, S. In-band optical frequency domain reflectometry in PONs. **Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference**, 2008.
- ESMAIL, M. A.; FATHALLAH, H. Physical layer monitoring techniques for TDM - passive optical networks: a survey. **Journal IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 15, 2013.

- FATHALLAH, H.; RUSCH, L. A. Code-division multiplexing for in-service out-of-band monitoring of live FTTH-PONs. **Journal of Optical Networking**, v. 6, n. 7, 2007.
- FATHALLAH, H. A.; RAD, M. M.; RUSCH, L. A. PON monitoring: periodic encoders with low capital and operational cost. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 20, n. 24, 2008.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communication**. [S.l.: s.n.], 2005.
- GUIMARAES, G. F. **Análise de desempenho de sistema modulado PPM-PAM operando com codificacao OCDMA e códigos gold sob efeitos ópticos nao-lineares**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceara, 2010.
- HILL, K. O; MELTZ, G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, 1997.
- HONDA, N.; IIDA, D.; IZUMITA, H.; YUIJI, Azuma. In-service line monitoring system in PONs using 1650-nm brillouin OTDR and fibers with individually assigned BFSs. **Journal of Lightwave Techonology**, v. 27, n. 20, 2009.
- HOUTSMA, V.; VEEN, D. Van. A study of options for high-speed TDM-PON beyond 10g. **Journal of Lightwave Technology**, v. 35, n. 4, 2017.
- HSING, C. Y.; CHIA, C. W.; CHE, L. Y.; LI, C. W; I-CHENG, L.; CHEN, J. Frequency- and time-domain nonlinear distortion compensation in high-speed OFDM-IMDD LR-PON with high loss budget. **Journal Opt. Express**, v. 25, n. 5, 2017.
- KASHYAP, R. **Fiber bragg gratings**. 2nd. ed. [S.l.]: Second Edition, 2010.
- KO, S.; LIN, S.; HUANG, U. A fiber fault monitoring design for pon system using reflective signal. **16th OptoEletronics and Communications Conference (OECC)**, 2011.
- LI, C.; GUO, W.; WANG, W.; HU, W.; XIA, M. Bandwidth resource sharing on the XG-PON transmission convergence layer in a multi- operator scenario. **Journal J. Opt. Commun. Netw.**, v. 8, n. 11, 2016.
- LUO, Y.; ZHOU, X.; EFFENBERGER, F.; YAN, X.; PENG, G.; QIAN, Y.; MA, Y. Time-and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2), journal = Journal of Lightwave Technology, year = 2013, volume = 4, page = 53-66, number = 4,.
- MARHIC, M. E. Coherent optical CDMA networks. **Journal of Lightwave Technology**, v. 11, n. 5-6, 1993.
- OTHONOS, A.; KALLI, K.; PUREUR, D.; MUGNIER, A. **Wavelength filters in fibre optics**. [S.l.: s.n.], 2006.
- OZAWA, K.; SHIGEHARA, M.; BAN, A.; NAITOU, T.; SHIMOURA, K. Field trial of in-service individual line monitoring of PONs using a tunable OTDR. **OFS2000: 14th International Conference on Optical Fiber Sensors, Florence, Italy**, v. 4185, 2000.
- RAD, M. M.; FATHALLAH, H. A.; MAIER, M.; RUSCH, L. A.; UYSAL, M. A novel pulse-positioned coding scheme for fiber fault monitoring of a PON. **IEEE Communications Letters**, v. 15, n. 15, 2011.

- RAD, M. M.; FATHALLAH, H. A.; RUSCH, L. A. Fiber fault monitoring for passive optical networks using hybrid 1-d/2-d coding. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 20, n. 24, 2008.
- RAD, M. M.; FATHALLAH, H. A.; RUSCH, L. A. Fiber fault PON monitoring using optical coding: effects of customer geographic distribution. **IEEE Transactions on Communications**, v. 58, n. 4, 2010.
- SUCHAT, S.; YUPAPIN, P.P. A phase mask fiber grating and sensing applications. **Songklanakarin J. Sci. Technol.**, v. 25, n. 5, 2003.
- TEMPORAO, G. P.; FARIA, G. Vilela de; URBAN, P. J.; WEID, J. Pierre Von Der. Fault location in passive optical networks using T-OTDR and wavelength-selective isolators. **Journal IEEE Communications Magazine**, 2013.
- THOLLABANDI, M.; BANG, H.; SHIM, K.W.; HANN, S.; PARK, C. S. An optical surveillance technique based on cavity mode analysis. **Optical Fiber Technology**, v. 15, n. 5-6, 2009.
- URBAN, P.J.; DAHLFORT, S. Cost-efficient remote PON monitoring based on OTDR measurement and OTM functionality. **Proceedings of the 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**, Stockholm, Sweden, 2011.
- URBAN, P. J.; VALL-LLOSERA, G.; MEDEIROS, E.; DAHLFORT, S. Fiber plant manager: an OTDR -and OTM - based PON monitoring system. **Journal IEEE Communications Magazine**, 2013.
- VEEN, D. van; HOUTSMA, V. High speed TDM-PON beyond 10g. **Optical Fiber Communication Conference**, 2016.
- WERNECK, M.M.M.; NAZARE, F. V. B.; ALLIL, R. C. S. B. **Fiber bragg gratings: theory, fabrication, and applications**. [S.l.: s.n.], 2017.
- XIONG, Y.; SUN, P.; LI, Z. Novel ring-based architecture for TWDM-PON with high reliability and flexible extensibility. **Optics Communications**, n. 384, 2017.
- YUSKEL, K.; MOEYAERT, V.; WUILART, M.; MEGRET, P. Optical layer monitoring in passive optical networks (PONs) ; a review. **Journal Transparent Optical Networks**, 2008.
- YUSKEL, K.; WUILPART, M.; MOEYAERT, V.; MEGRET, P. Optical frequency domain reflectometry: a review. **11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**, 2009.
- YUSKEL, K.; WUILPART, M.; MOEYAERT V. MEGRET, P. Novel monitoring technique for passive optical networks based on optical frequency domain reflectometry and fiber bragg gratings. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 2, 2010.
- ZHANG, X.; LU, F.; ZHAO, S. C. X.; ZHU, M.; SUN, X. Remote coding scheme based on waveguide bragg grating in PLC splitter chip for PON monitoring. **Journal Optics Express**, v. 24, n. 5, 2016.
- ZHOU, X.; ZHANG, F.; SUN, X. Centralized PON monitoring scheme based on optical coding. **Journal IEEE Photonics Technology Letters**, v. 25, n. 9, 2013.

ZHU, M.; ZHANG, J.; WANG, D.; SUN, X. Optimal fiber link fault decision for optical 2D coding-monitoring scheme in passive optical networks. **Journal Opt. Communication. Network**, v. 8, n. 3, 2016.

ZIEMER, R. E. **Fundamentals of Spread Spectrum Modulation**. [S.l.]: University of Colorado at Colorado Springs, 2007.

ZOU, N.; NAMIHARA, Y.; NDIAYE, C.; ITO, H. Fault location for branched optical fiber networks based on OFDR technique using FSF laser as light source. **Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference**, 2007.