

SOLUÇÃO EM FIBRA ÓPTICA PARA DETECÇÃO DE CHEIAS E FOGOS FLORESTAIS

Francisco Ganhão¹, Margarida Rosado², Eduardo Nabais³, Armando Cerqueira⁴

¹ Infraestruturas de Portugal, EI-INN - Inovação, Praça da Portagem 2809-013 Almada

email: francisco.ganhao@infraestruturasdeportugal.pt <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/>

^{2,3} Infraestruturas de Portugal, SS-SGR - Segurança Rodoviária, Praça da Portagem 2809-013 Almada

⁴ IP Telecom, NSOC, Rua do Passeio do Báltico, n4 1990-036 Lisboa

Assistimos, cada vez mais à instalação de sistemas de monitorização baseados na tecnologia de fibra óptica em infra-estruturas. São usados para verificação de diversas variáveis, para análise da geometria de estruturas ou para recolha de informação acústica ou sísmica. Os sistemas de monitoria usam a análise no tempo (com Reflectómetro Óptico no Domínio do Tempo) ou comprimento de onda (Analisador Espectral) ou ambos. Os diversos tipos de monitorização usam as propriedades e as imperfeições da própria fibra e, outros usam as deformações geométricas da fibra.

No âmbito do projecto H2020 Safeway para detecção e avaliação da situação de incêndios florestais e cheias, foram instalados dois tipos de sensores em fibra óptica, uns mecânicos e outros FBG. No decorrer do piloto, foram relevadas algumas questões ou problemas que são comuns aos sistemas de telecomunicações.

Pretende-se evidenciar a utilização dos princípios e técnicas, usadas em telecomunicações, para melhorar o desempenho da monitorização em fibra óptica.

Palavras-chave: Safeway; Fibra óptica; FBG.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Técnicas de Fabrico e Propagação Guiada

A propagação guiada da luz é um fenómeno conhecido há já alguns séculos, mas a sua aplicação em telecomunicações só teve desenvolvimento nas últimas décadas do século passado.

Os conhecimentos e técnicas, no fabrico de semicondutores, no que concerne à obtenção de materiais com elevados graus de pureza e a deposição, por vaporização, de outros materiais que alteram ou adicionam diferentes propriedades foram utilizados no fabrico de fibra óptica. Foi assim possível obter fibras ópticas com diferentes propriedades no que concerne:

- Atenuação, nos diferentes comprimentos de onda;
- Nos raios de curvatura;
- Tensões mecânicas;
- Outras;

Todas as propriedades, tolerâncias de fabrico, testes e utilização são estabelecidas em algumas entidades de normalização tal como a *Telecommunication Standardization Sector* [ITU-T]. Podemos consultar, como exemplo a recomendação G.655 no sítio do ITU-T [1].

Os conhecimentos e experiência na propagação guiada em guias metálicos (Faixas em SHF (ondas centimétricas) e EHF (ondas milimétricas)) e componentes passivos e activos foi transposta para o estudo e construção de fibra óptica, de geometria cilíndrica, e componentes passivos e activos ópticos tais como amplificadores, divisores, acopladores, etc. [2][3][4].

1.2 Sensores baseados em fibra óptica – Discretos

Sensores discretos baseados em fibra óptica e Fiber Bragg Grating [FBG] [5] já são usados há algumas décadas. Os sensores mecânicos tipo on-off já são usados há alguns anos mas têm uma limitação, depois de actuados podem limitar a recolha de informação dos sensores a jusante.

O princípio dos sensores FBG é o deslizamento de um padrão gravado no núcleo de uma fibra óptica que produz uma reflexão num determinado comprimento de onda. Este padrão cria uma alteração do índice de refração da fibra. Quando se produz uma tensão longitudinal na fibra, o padrão desloca-se e é passível de ser medido com muito rigor por um analisador espectral.

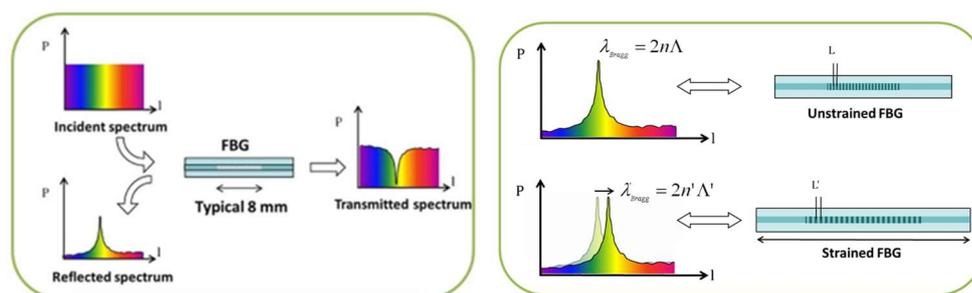


Fig.1. Princípio de funcionamento dos sensores FBG

O deslocamento do comprimento de onda reflectido associado é proporcional à distensão. O deslocamento é muito pequeno e não provoca atenuação adicional.

Os sensores mecânicos usam os princípios contrários às regras estabelecidas para uma boa instalação, isto é, em vez de não ultrapassar o raio limite de curvatura máxima para cada tipo de fibra, as fibras são dobradas, ou esticadas, de modo a afectar os limites do modo de propagação e provocar atenuação.

Para cada tipo de fibra, (Recomendação ITU-T G.6XX) há um raio máximo de curvatura (*Macro Bending*) a partir do qual a atenuação passa a ser significativa e compromete um funcionamento do sistema. Isto designa-se por *macro bending*, quando se ultrapassa a curvatura máxima admissível a luz deixa de estar contida na fibra e é mesmo visível no exterior. Existe *micro bending* quando há esmagamento da fibra devido a condutas mal executadas ou quando há uma sobrecarga na conduta provocando o esmagamento das próprias fibras. A deformação da fibra provoca alteração dos limites geométricos do modo de propagação das ondas, provocando atenuação. Em ambos os casos pode-se medir com rigor os valores da atenuação e das deformações que as causam.

1.3 Sensores baseados em fibra óptica – Distribuídos

Os sensores distribuídos têm vindo a ser desenvolvidos nos últimos anos e podem detectar variações de temperatura, ondas acústicas ou sísmicas e distensões longitudinais. Podem ser usados cabos de telecomunicações ou especiais no caso da detecção de ondas sísmicas. Os sensores distribuídos são baseados nas propriedades intrínsecas das fibras, isto é, dependem da sua composição química bem como do grau de impurezas. Estas propriedades são usadas para obter sensores distribuídos de temperatura [DTS], acústicos ou sísmicos [DAS] ou de deslocamento [DSS]. Para obter medidas usam-se a análise no domínio do tempo, espectral e do desvio de fase. Os fenómenos medidos são as dispersões de Rayleigh, Ramam e Brillouin e o desvio de fase [6].

1.4 Análise da informação

Na fibra óptica usa-se a análise espectral, no caso dos sensores FBG.

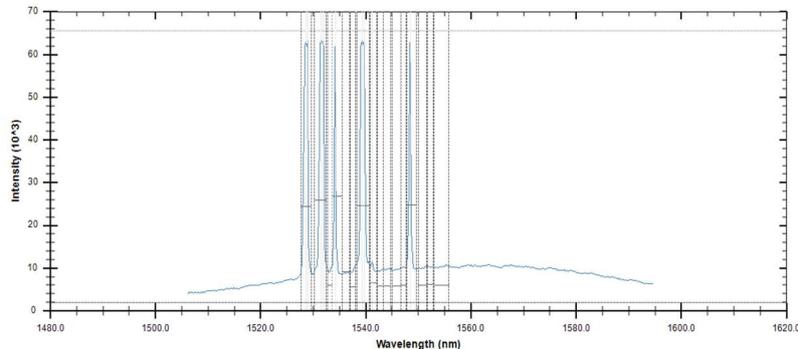


Fig.2. Analisador Espectral

No caso dos sensores mecânicos usa-se a análise no domínio do tempo. Esta análise é baseada num outro tipo de dispersão extrínseca ou seja é causada por impurezas no processo de fabrico da fibra, a dispersão de Rayleigh.

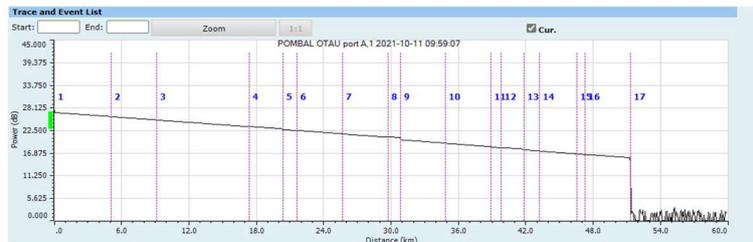


Fig.3. Análise no domínio do tempo - Reflectometria óptica no domínio do tempo [OTDR]

No caso dos sensores distribuídos podem usar-se os dois métodos de análise combinados e ainda a análise do desvio de fase.

2 SENSORES MECÂNICOS NO IC8 PARA PROTECÇÃO DE FOGOS FLORESTAIS

No âmbito do projecto H2020 Safeway foram colocados quatro sensores mecânicos em fibra óptica com o objectivo de proteger o troço do IC8 entre os quilómetros 42 e o 77.

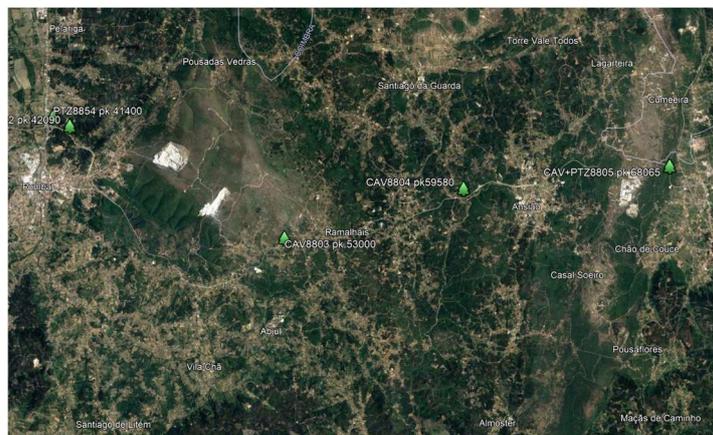


Fig.4. Localização dos sensores mecânicos no IC8

Foi usado um OTDR, do sistema de monitoria de fibra óptica da IP Telecom, e criada uma rota óptica desde Pombal até ao pk 77 do IC8. Inicialmente pretendia-se ter uma atenuação elevada, tipo on-off, mas essa solução comprometia os sensores a jusante, que deixariam de ser lidos. Optou-se por usar *splitters* e criar ramos na rota principal, evitando o problema atrás referido. Além disso experimentou-se outra abordagem, em vez de sensores on-off usaram-se sensores com atenuação variável dependentes da temperatura com recurso a termo-pares, sendo assim possível obter pequenas variações na atenuação dependentes da temperatura ambiente.

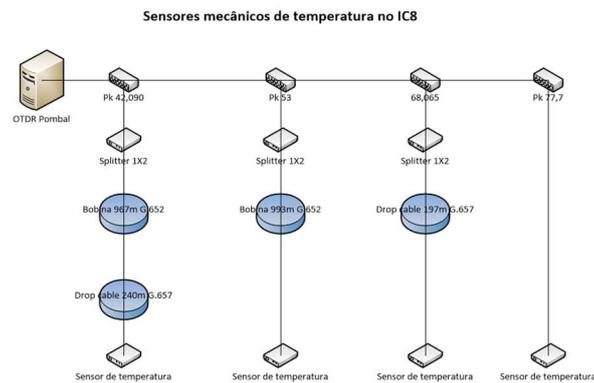


Fig.5. Esquema dos sensores mecânicos no IC8

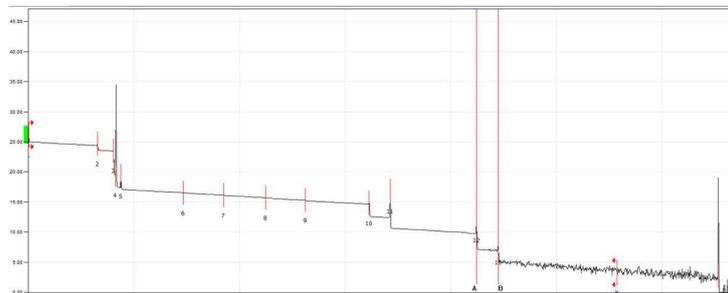


Fig.6. Diagrama OTDR

No diagrama da Fig.6. podemos identificar todos os elementos do sistema:

- *Splitters* que permitem criar a arquitectura em árvore, mas que introduzem cerca de 4dB de atenuação;
- Bobinas de “carga” G.655 que simulam cerca de 1000m por ramo e permitem a resolução e identificação dos elementos a jusante;
- Bobinas de cabo de distribuição G.657 que simulam algumas dezenas de metros, permitem a resolução e identificação dos elementos a jusante;
- Sensores que no funcionamento normal, não introduzem atenuação para as temperaturas, neste caso abaixo dos 26°C, mas que são identificados pelos picos de atenuação provocados pelo modo como é terminado cada um dos ramos.

De notar que o diagrama é uma função contínua e não é possível observar os ramos e sensores sem a introdução dos elementos atrás descritos. O uso de *splitters* permite a continuidade do sinal, podendo continuar a receber as medidas dos sensores a jusante em caso do corte ou queima do cabo óptico. Em caso de incêndio em algum ramo o marcador final de cada ramo deixa de se poder observar sendo o comportamento da terminação de cada ramo imprevisível. Apenas será visível alguma atenuação se forem colocados mais de que um sensor por ramo. Sendo a principal causa de atenuação as perdas dos *splitters* Esta solução em árvore tem o mérito de possibilitar ter ramos

com alguns quilómetros e algumas dezenas de sensores o que permite proteger uma área de largas centenas de metros ao redor do IC8.

Dado o nível de ruído não é adequado proceder à amplificação óptica.

Dos vários termopares estudados e avaliados, tanto sólidos como líquidos, foram escolhidos dois tipos de polietileno com coeficientes um de 200 e outro com $108\mu\text{m}/\text{mK}$. Para este termopar obtém-se uma diferença de 2,35cm para uma variação de $23,5^\circ\text{C}$, entre os 26 e os $49,5^\circ\text{C}$. Nesta gama de temperaturas a relação entre a temperatura e a dilatação é linear. No protótipo ajustou-se o deslocamento da fibra de modo a provocar um aumento total de 0,1dB que foi possível de se observar nos testes de bancada. Até ao momento foi possível observar diversos eventos correspondentes a aumentos de temperatura nos relatórios observados nos diagramas do OTDR na rota óptica em monitoria.



Fig.7. Protótipo de sensor mecânico

Na construção do protótipo foi usada uma caixa de aparelhagem eléctrica 10X10X5cm, os elementos do termopar são constituídos por um tubo de PVC com 16mm de diâmetro e por um fio de PVC 2,5mm de diâmetro. O tubo e o fio foram colados num extremo, o tubo colado à entrada da caixa e ficaram livres 2,5cm do fio onde se colou uma ponta do laço, visível na Fig.7. A fibra usada é G.657D que tem um raio de curvatura máxima admissível de 5mm.

3 SENSORES FBG NO VALE DO TEJO

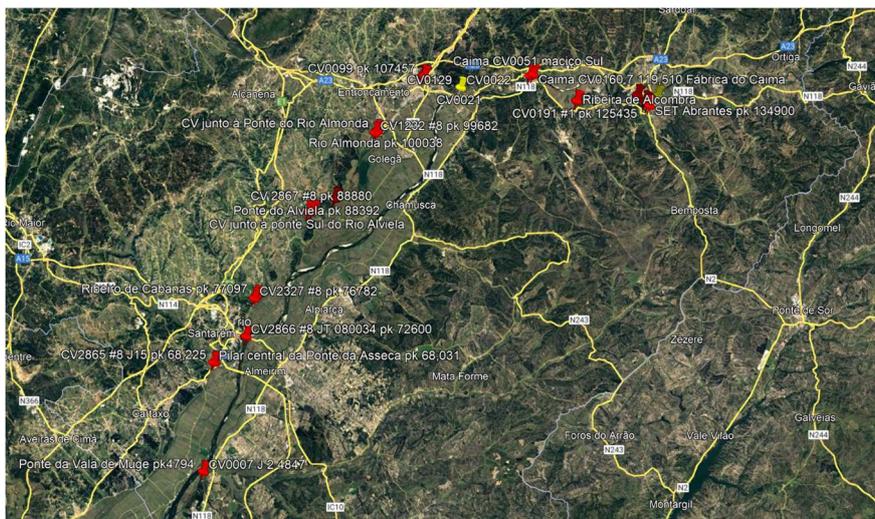


Fig.8. Sensores FBG no vale do Tejo

3.1 Objectivos

No âmbito do projecto H2020 Safeway foram instalados doze sensores de deslocamento e quatro de temperatura, todos do tipo FBG, no vale do Tejo. O objectivo foi a detecção atempada de cheias no rio Tejo e cheias rápidas nos afluentes. Pretendia-se medir o nível do rio Tejo e o caudal dos afluentes.

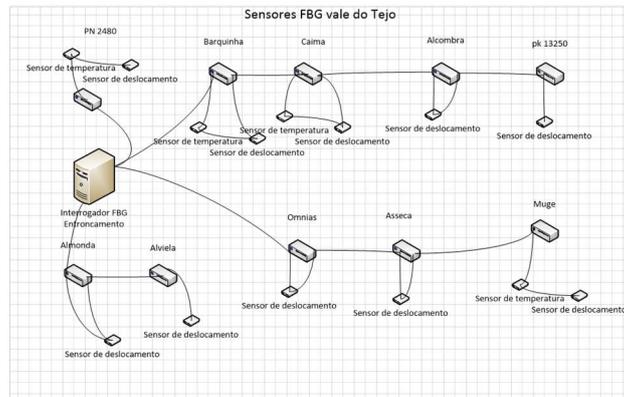


Fig.9. Sensores FBG no vale do Tejo

Esquema das quatro rotas ópticas com os sensores nos locais escolhidos. É uma arquitectura em série se houver uma falha num sensor, que não o último, deixará de haver qualquer informação de todos os sensores a jusante.



Fig.10. Sensor FBG de temperatura Fig.11. Sensor FBG de deslocamento



Fig.12. Aplicação do interrogador FBG

Os sensores depois de detectados pelo analisador espectral do interrogador são calibrados e etiquetados.

Name	Value	Template
PN 2480 t	17.883	Temperature, 2nd grade[°C]
PN 2480 Dt	36.424	Temperature, 2nd grade[°C]
PN 2480 D	NaN	Total Strain, basic formula[μm]
Barquinha t	13.943	Temperature, 2nd grade[°C]
Caima Dt	22.649	Temperature, 2nd grade[°C]
Caima t	18.708	Temperature, 2nd grade[°C]
Muge t	18.105	Temperature, 2nd grade[°C]
Alvieta 2 Dt	15.427	Temperature, 2nd grade[°C]
Alvieta 1 Dt	20.486	Temperature, 2nd grade[°C]
Assoca Dt	20.05	Temperature, 2nd grade[°C]
Muge Dt	19.333	Temperature, 2nd grade[°C]
Barquinha D	72.483	Total Strain, basic formula[μm]

Fig.13. Coleção completa dos sensores

3.2 Medição indirecta da velocidade e nível do rio

Os sensores de deslocamento medem exactamente o deslocamento em μm e são usados para controlar as dimensões de fissuras em betão ou o deslocamento dos elementos das construções metálicas ou ainda verificar a geometria das mesmas. Para medir a velocidade do rio é necessário converter o deslocamento dos sensores em velocidade.

O aço usado no sensor, o SS304, tem um módulo de elasticidade de 193 GPa, válido para compressão ou distensão.

Para obter o nível do rio Tejo podem-se usar as tabelas disponíveis obtendo a velocidade média a partir do caudal. Para obter a velocidade é necessário usar um Sistema que converta o deslocamento, medido no sensor FBG, em velocidade.

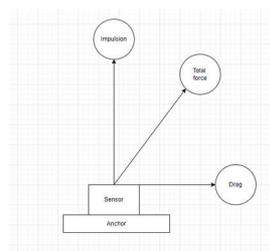


Fig.14. Esquema de forças

Deslocamento do sensor ϵ : $\epsilon = \Delta L / L$

O perfil da lâmina de aço tem 0,2mm por 15mm, e o deslocamento ϵ é medido directamente pelo interrogador FBG em $\mu\epsilon$.

Para obter a velocidade do rio é necessário saber a tensão total a que o sensor está submetido.

Das seguintes relações obtém-se a força total:

$$F_{total} = F = \sigma A$$

$$F_{total} = \sigma A = \epsilon EA$$

Onde σ é tensão:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Módulo de Young:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Para obter a força total usou-se uma bóia esférica em esferovite com 10cm de diâmetro e 9g.

Para simplificar o cálculo a bóia ficou submersa.

A impulsão, nestas condições é: $I = \rho Vg - mg$

O arrasto total é: $F_a = \frac{1}{2} C\rho Av^2$

E a força total é então: $F_{total}^2 = (\frac{1}{2} C\rho Av^2)^2 + (\rho Vg - mg)^2$

A força horizontal, ou arrasto obtém-se considerando que a força total é: $F_{total} = (\epsilon EA)$

Onde ϵ é o deslocamento, lido no interrogador, e E o módulo de Young.

Então a força horizontal, ou arrasto é: $F_h^2 = (\frac{1}{2} C\rho Av^2)^2 = (\epsilon EA)^2 - (\rho Vg - mg)^2$

E a velocidade horizontal é:
$$v = \sqrt[4]{\frac{(\epsilon EA)^2 - (\rho Vg - mg)^2}{(C\rho A)^2}}$$

Esta fórmula foi usada para criar um sensor virtual, baseado no deslocamento do sensor.

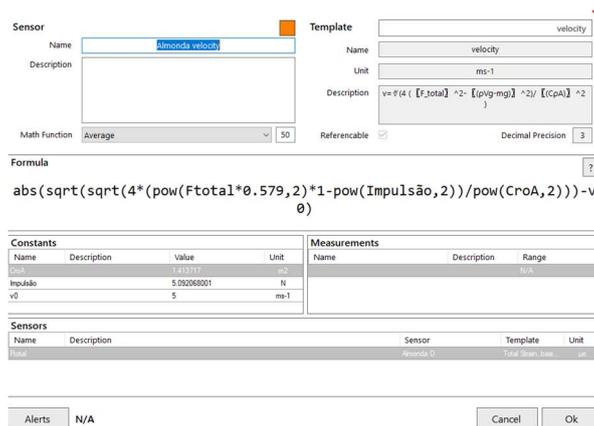


Fig.15. Criação do sensor virtual

A fórmula obtida, bem como o sensor real usado, são introduzidos no interrogador FBG, que usa uma sintaxe própria. De seguida é necessário calibrar os valores recorrendo à observação da corrente do rio e dos seus afluentes.

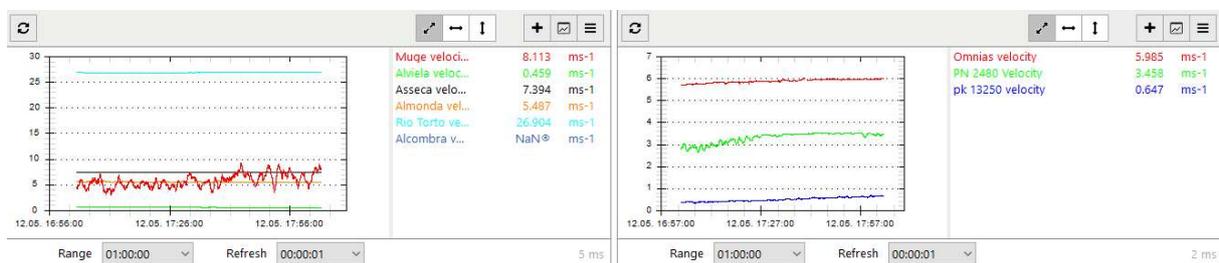


Fig.16. Leituras da velocidade dos afluentes à esquerda, e do rio Tejo à direita

Na Fig.16. pode-se observar variações da velocidade sobretudo devidas às descargas das barragens e não à quantidade de precipitação. Os sensores não foram calibrados e alguns foram vandalizados pelo que as medidas podem não corresponder às velocidades reais.

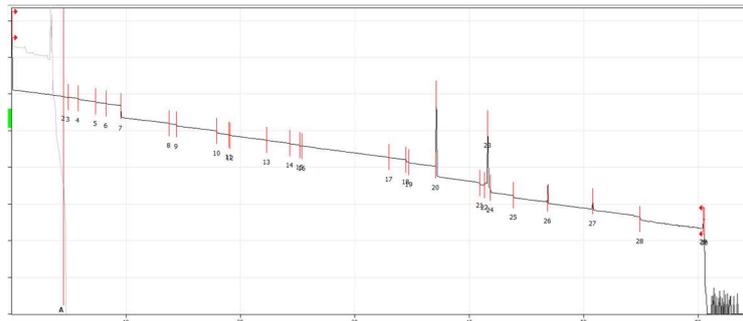


Fig.17. Diagrama OTDR onde se podem identificar algumas deficiências e os sensores na rota óptica. O alcance da solução, nesta rota foi de 60,5km

A análise da rota óptica é importante para garantir que não existem falhas, atenuações ou reflexões elevadas bem como identificar, na rota os locais onde estão colocados os sensores FBG.

Ainda se tentou usar um amplificador óptico nesta rota mas sem sucesso. No entanto, e considerando que a solução usa apenas uma fibra foi necessário construir um sistema que permitisse proteger o amplificador e possibilitasse a recepção dos sinais reflectidos nos sensores de modo a obter as respectivas leituras no interrogador FBG.

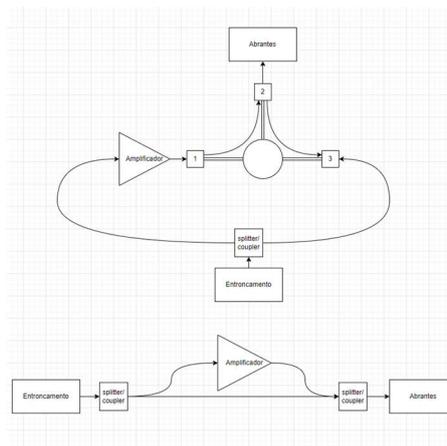


Fig.18. Sistema com um *splitter/coupler* e um circulator que permite manter bidireccionalidade dos sinais ópticos

O sistema é constituído por um circulator que transmite o sinal da porta 1 para a 2, da porta 2 para a 3 e introduz apenas uma atenuação de 1dB. Nos restantes sentidos a atenuação do circulator é superior a 50dB pelo que a potência óptica disponível é desprezável ou inexistente. O *splitter/coupler* permite comunicação bidireccional entre a porta de entrada e as outras duas portas, com uma perda de aproximadamente 4dB mas não entre as portas de saída, dito de outro modo a atenuação é superior a 50dB pelo que a potência óptica pode ser considerada nula.

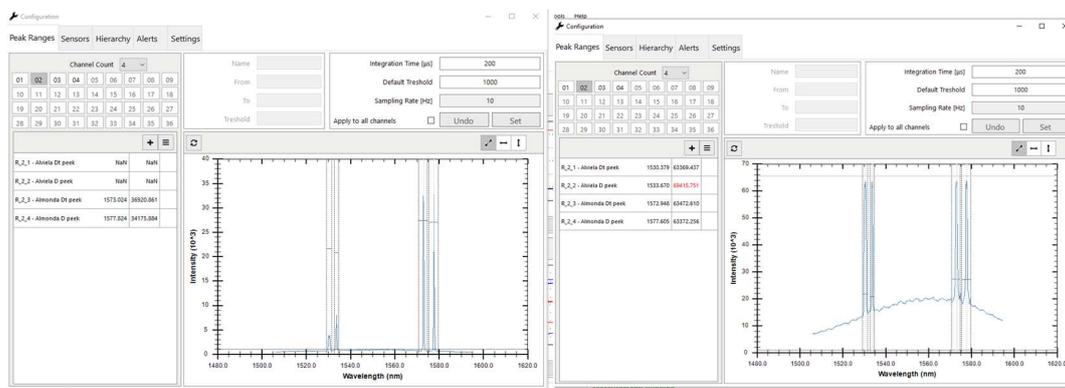


Fig.19. Rota 2 com sistema circulador/*splitter* à esquerda e sem o sistema à direita

Pode-se observar na Fig.19 o funcionamento do sistema circulador/*splitter/coupler* com a atenuação esperada. Quando se introduz o amplificador só se observa ruído devido à saturação do interrogador FBG em virtude de o amplificador escolhido ter um ganho fixo de 30dB.

4 CONCLUSÕES

Pelos trabalhos desenvolvidos no projecto H2020 Safeway demonstrou-se que é possível colocar sensores FBG a 60km de distância e obter leituras com significado usando interrogadores FBG comerciais.

É possível criar sensores virtuais, usando sensores FBG comerciais, de modo a obter outras grandezas físicas derivadas ou relacionadas sem a necessidade de alimentação eléctrica ou instalações dedicadas.

Constatou-se a possibilidade da utilização de *splitters/couplers* nas rotas ópticas permitindo a implementação de uma arquitectura em árvore salvaguardando a continuidade das comunicações e alargando a área em monitoria.

5 TRABALHOS SEGUINTE

Continuar a investigar a possibilidade de estender as rotas ópticas em observação, usando amplificadores ópticos de ganho variável, resolvendo o problema de saturação no interrogador FBG.

Há ainda a melhorar a construção dos sensores mecânicos e de velocidade, bem como proceder à sua calibração e certificação.

AGRADECIMENTOS

Projecto H2020 Safeway

REFERÊNCIAS

1. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/en>
2. M. Hashimoto, GEOMETRICAL OPTICS OF GUIDED WAVES IN WAVEGUIDES, Progress In Electromagnetics Research, PIER 13, 115–147, 1996
3. Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback); 0-471-2-1374-8 (Electronic)
4. Henry F. Taylor and Amnon Yariv, PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 62, NO. 8, Guided Wave Optics, 1974
5. Carlo Edoardo Campanella, Antonello Cuccovillo, Clarissa Campanella, Abdulkadir Yurt, Vittorio M. N. Passaro, Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications, Photonics Research Group, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, Politecnico di Bari, Bari, Italy, 2018
6. Ping Lu, Nageswara Lalam, Mudabbir Badar, Bo Liu , Benjamin T. Chorpening, Michael P. Buric, and Paul R. Ohodnicki, Distributed optical fiber sensing: Review and perspective Appl. Phys. Rev. 6, 041302 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5113955>, 2019