

# Energia Elétrica e Sustentabilidade 2

Jaqueline Oliveira Rezende  
(Organizadora)



**Atena**  
Editora

Ano 2018

**JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE**

(Organizadora)

# **Energia Elétrica e Sustentabilidade**

## **2**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**Revisão:** Os autores

#### **Conselho Editorial**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b> <b>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E56	Energia elétrica e sustentabilidade 2 [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Energia Elétrica e Sustentabilidade; v. 2)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-46-8 DOI 10.22533/at.ed.468180110  1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira.  CDD 338.4
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

**Jaqueline Oliveira Rezende**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROKINÉTICOS ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ	
<i>Marcos Aurélio de Araujo</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
TROCADOR DE CALOR – INOVAÇÃO NO AQUECIMENTO DE ÁGUA, FUNCIONAMENTO, RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM TECNOLOGIAS SEMELHANTES	
<i>Odair Deters</i>	
<i>Paulo Valdocci Pereira</i>	
<i>Valério Monteiro</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
SISTEMA ÓPTICO CWDM COMO PLATAFORMA DE MONITORAÇÃO DE ATIVOS E DE COMUNICAÇÃO DE DADOS PARA REDES SMART GRIDS	
<i>João Batista Rosolem</i>	
<i>Danilo César Dini</i>	
<i>Claudio Antonio Hortêncio</i>	
<i>Eduardo Ferreira da Costa</i>	
<i>Rivael Strobel Penze</i>	
<i>João Paulo Vicentini Fracarolli</i>	
<i>Carlos Alexandre Meireles Nascimento</i>	
<i>Vítor Faria Coelho</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>37</b>
PORTAL OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS ESPECIAIS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA FERRAMENTA PARA GESTÃO DA CONFORMIDADE E DA CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	
<i>Rafael Cassiolato de Freitas</i>	
<i>Sadi Roberto Schiavon</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>46</b>
MODERNIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE SAMUEL	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>62</b>
OPERAÇÃO REMOTA DE USINAS PELO CENTRO DE OPERAÇÃO DA GERAÇÃO DA ELETROBRAS ELETRONORTE	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Juliano Cortes de Souza</i>	
<i>Leonardo Siqueira Rodrigues</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>70</b>
ABORDAGEM DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA PARA MODELAGEM PREDITIVA DE EMISSÕES DE NOX E CO DE UMA TURBINA A GÁS DE UMA USINA TERMELÉTRICA DE CICLO COMBINADO	
<i>Eduardo Massashi Yamao</i>	
<i>Juliano Pierezan</i>	

*João Paulo Silva Gonçalves*  
*Marcos Cesar Gritti*  
*Luís Gustavo Tomal Ribas*  
*Flávio Chiesa*  
*Victor Manuel Lopes dos Santos*  
*Marcos de Freitas*  
*André da Silva Orlandi*  
*Leandro dos Santos Coelho*

**CAPÍTULO 8 ..... 82**

CONFIRMAÇÃO DA EFICÁCIA DO ENSAIO DE RESPOSTA DO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E BUCHAS CAPACITIVAS COMO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

*Hugo Rafael Freitas Negrão*  
*Fernando de Souza Brasil*  
*Bárbara Medeiros Campos*  
*Maria Emília de Lima Tostes*  
*Jorge Augusto Siqueira Tostes*  
*Paulo Roberto Moutinho de Vilhena*

**CAPÍTULO 9 ..... 96**

A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA IMPLANTAÇÃO DA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIAGNÓSTICO DE REATORES E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

*Vanessa de Cássia Viana Martins Beltrão*

**CAPÍTULO 10 ..... 113**

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE RONDÔNIA OPERANDO COM CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS EM MÉDIA TENSÃO

*José Ezequiel Ramos*  
*Alexandre Piantini*  
*Ary D'Ajuz*  
*Valdemir Aparecido Pires*  
*Paulo Roberto de Oliveira Borges*

**CAPÍTULO 11 ..... 126**

ESTUDO DE APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO MESQUITA VIANA II

*Alcebíades Rangel Bessa*  
*Lucas Frizera Encarnação*  
*Paulo José Mello Menegáz*

**CAPÍTULO 12 ..... 143**

IMPLANTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA 230KV CIRCUITO DUPLO DA COPEL

*Márcio Tonetti*  
*Ilmar da Silva Moreira*  
*João Nelson Hoffmann*

**CAPÍTULO 13 ..... 153**

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO: ESTUDO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE

*Guilherme Hideki Shibukawa*  
*Eric Eduardo Goveia Pandolfo*  
*Ricardo Andreola*  
*Emerson Charles Martins da Silva*

**CAPÍTULO 14 ..... 168**

TARIFAS HORÁRIAS PARA SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O SINAL LOCACIONAL

*Marcio Andrey Roselli*  
*André Meister*

*Denis Perez Jannuzzi  
Robson Kuhn Yatsu  
André Veiga Gimenes  
Miguel Edgar Morales Udaeta*

**CAPÍTULO 15..... 178**

AVALIAÇÃO DAS LÂMPADAS LED NO MERCADO BRASILEIRO (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza  
Maurício Barreto Lisboa  
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

**CAPÍTULO 16..... 185**

AVALIAÇÃO DO MÉTODO INDEPENDENTE DE MEDIÇÃO DE PERTURBAÇÕES RADIADAS – ANEXO B DA CISPR 15 (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza  
Maurício Barreto Lisboa  
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

**CAPÍTULO 17 ..... 193**

PADRÕES DE QUALIDADE PARA SERVIÇOS DE PINTURA ANTICORROSIVA APLICADOS AO SETOR ELÉTRICO

*Alberto Pires Ordine  
Cristina da Costa Amorim  
Marcos Martins de Sá  
Elber Vidigal Bendinelli*

**CAPÍTULO 18..... 209**

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, PRODUTIVIDADE E CUSTOS DE TECNOLOGIAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA PARA ESTRUTURAS ENTERRADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

*Cristina da Costa Amorim  
Alberto Pires Ordine  
Marcos Martins de Sá  
Wendell Porto de Oliveira*

**CAPÍTULO 19..... 221**

ANÁLISE DE QUASE-ACIDENTES, OCORRIDOS NA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO, COMO MEIO EFICAZ E PROATIVO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES

*Cristiano José Gober  
Cresencio Silvio Segura Salas*

**CAPÍTULO 20..... 235**

PORTAL R3E COMO FERRAMENTA INDUTORA E DISSEMINADORA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

*Clara Ovídio de Medeiros Rodrigues  
Marcelo Bezerra de Melo Tinoco  
Aldomar Pedrini  
Edison Alves Portela Junior  
João Queiroz Krause  
Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira  
Fernando Pinto Dias Perrone*

**CAPÍTULO 21..... 246**

HIERARQUIA DAS NECESSIDADES E RESILIÊNCIA NO PAGAMENTO DE SERVIÇOS PÚBLICOS UTILIZADOS: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO A ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL

*Ana Lúcia Rodrigues da Silva  
Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.  
Carolina Rodrigues de Almeida Prado*

**CAPÍTULO 22 ..... 258**

PROJETO PILOTO PARCELAMENTO PRÓ-ATIVO DE DÉBITOS DE IRREGULARIDADE

*Diego Rivera Mendes*

*Julio Eloi Hofer*

*Rafael Luís de Avila*

**CAPÍTULO 23 ..... 267**

MODELAGEM ESTRATÉGICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ANTECIPAÇÃO DO ATENDIMENTO AO CLIENTE PARA A MELHORIA OPERACIONAL E DE SERVIÇOS

*Carlos Alberto Fróes Lima*

*Anderson Diego Machiaveli*

*Luciano E. A. Peres*

*Tales Neves Anarelli*

**SOBRE A ORGANIZADORA ..... 287**

## SISTEMA ÓPTICO CWDM COMO PLATAFORMA DE MONITORAÇÃO DE ATIVOS E DE COMUNICAÇÃO DE DADOS PARA REDES *SMART GRIDS*

**João Batista Rosolem**

Fundação CPqD

**Danilo César Dini**

Fundação CPqD

**Claudio Antonio Hortêncio**

Fundação CPqD

**Eduardo Ferreira da Costa**

Fundação CPqD

**Rivael Strobel Penze**

Fundação CPqD

**João Paulo Vicentini Fracarolli**

Fundação CPqD

**Carlos Alexandre Meireles Nascimento**

Cemig Distribuição

**Vítor Faria Coelho**

Cemig Telecom

**RESUMO:** Apresentamos neste trabalho um sistema óptico inovador que utiliza a tecnologia CWDM como plataforma de monitoração e comunicação de dados em banda larga para redes Smart Grids. O trabalho descreve a concepção, o desenvolvimento, os testes em laboratório do sistema que foram demonstrados em 50 km de fibra óptica monomodo com 4 canais CWDM transmitindo dados e vídeo em 1,25 GbE simultaneamente ao processo de monitoração e posteriormente a implantação e operação em campo do sistema em um enlace de 17 km de comprimento instalado na UniverCemig, em Sete Lagoas/MG.

### 1 | INTRODUÇÃO

A mais de três décadas as empresas de energia elétrica têm utilizado a tecnologia de fibras ópticas em aplicações distintas tais como telemetria, comunicação de dados, aluguel para as empresas de telecomunicações ou para sensoriamento de ativos diversos, tais como, transformadores, linhas de transmissão aéreas e subterrâneas, chaves seccionadoras, etc. Do ponto de vista de telecomunicações em longa distância as empresas de energia elétrica, sobretudo as empresas transmissoras, usam poucas fibras (em geral dois pares) instaladas em cabos OPGW (Optical Ground Wire) para telemetria/transmissão de dados. Se o restante das fibras do cabo é alugado para as empresas de telecomunicações outras eventuais aplicações que necessitam de fibras ópticas podem não ser possíveis.

Por outro lado, as empresas do setor elétrico têm interesses diversos na monitoração dos seus ativos, como por exemplo, na monitoração das faixas de segurança ou servidão de linhas aéreas de transmissão (LTs) de energia elétrica que são locais que possuem restrições quanto as suas utilizações. Estas restrições se dão por motivos de projeto eletromecânico, segurança e para garantir o acesso das equipes de manutenção às estruturas que sustentam os

condutores das LTs.

Tendo em vista os problemas decorrentes da invasão das faixas de segurança, oriundas da construção de habitações irregulares, principalmente nas áreas próximas aos grandes centros urbanos, a CEMIG em parceria com o CPqD, no âmbito do programa de P&D da ANEEL, desenvolveram uma solução inovadora com a adaptação da tecnologia CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) para o monitoramento da integridade física dos condutores das LTs nos trechos críticos, ou seja, nos trechos invadidos fazendo uso de fibras ópticas compartilhadas com aplicações de comunicações de dados em banda larga.

Uma vantagem e ao mesmo tempo uma premissa do sistema óptico CWDM é o compartilhamento de uma mesma fibra óptica com diversos canais independentes, que podem ser utilizados em diversas funções e aplicações para automatizar os ativos de GTD (Geração, Transmissão e Distribuição). Mas manter a função primordial da fibra óptica que é comunicações em banda larga também foi premissa para definição do projeto, formando assim uma plataforma tecnológica óptica muito robusta para Smart Grids do setor de GTD. Por último, mas não menos importante para atender as premissas definidas no projeto o sistema de monitoração utilizou a tecnologia CWDM que é largamente utilizada em comunicações de dados e que tem um custo de aquisição bem mais competitivo em relação às tecnologias convencionais.

O sistema CWDM desenvolvido tem disponível 16 canais ópticos operando de 1310 nm até 1610 nm, que podem ser divididos para monitoração dos diversos ativos de GTD e para comunicações em banda larga. Tanto a monitoração como a transmissão para comunicações de dados são feitas em apenas uma fibra óptica de forma bidirecional. O sistema de monitoração é baseado na detecção de sinais refletidos por dispositivos ópticos (espelhos em fibra óptica). Estes espelhos são colocados estrategicamente no final de cada segmento de enlace óptico monitorado. A presença dos sinais refletidos ópticos no equipamento de transmissão CWDM indica que o enlace está íntegro e a ausência indica que o cabo foi rompido. Redundâncias são utilizadas para garantir que o sinal detectado seja realmente do cabo rompido nos vãos críticos. O sistema foi desenvolvido com dispositivos de fibra óptica comerciais, tais como, transceivers SFP (Small Form-Factor Pluggable), add/drops CWDM e espelhos em fibra. Transceivers SFP possuem custo muito atraente no mercado além de propiciarem tempo de resposta na recepção abaixo do tempo dos relés tradicionais do mercado. Um cabo condutor e isoladores especiais com fibras ópticas embutidas foram especialmente desenvolvidos para o projeto para serem usados no vão crítico.

Neste trabalho são apresentados: a descrição do sistema óptico inovador que utilizou a tecnologia CWDM como plataforma de monitoração e comunicação de dados em banda larga para redes smart grids, o desenvolvimento e os testes em laboratório do sistema que foram validados e demonstrados em 50 km de fibra óptica monomodo com 4 canais CWDM transmitindo dados e vídeo em 1,25 GbE simultaneamente ao processo de monitoração e posteriormente a implantação e operação em campo do

sistema em um enlace de 17 km de comprimento instalado na UniverCemig, em Sete Lagoas/MG.

## 2 | PLATAFORMA DE MONITORAÇÃO E COMUNICAÇÃO DE DADOS EM BANDA LARGA PARA REDES SMART GRIDS

As premissas definidas para o projeto foram: o sistema deve ser rápido o suficiente para atuar antes do relé de proteção evitando o religamento automático indesejável da LT (com condutor rompido) e deverá ser previsto o compartilhamento da fibra utilizada no sistema de monitoramento com sistemas de telecomunicações de banda larga tradicionais. Considerando estas premissas foi proposto o sistema de monitoramento inovador utilizando a tecnologia CWDM<sup>1</sup> que é largamente utilizada em telecomunicações.

### 2.1 Arquitetura Genérica do Sistema

O sistema de monitoramento será composto por: cabo condutor com fibra sensora (OPPC – OPTical Phase Conductor), dispositivos de interligação (isolador), cabo com fibra de transmissão (ex. OPGW) e a unidade óptica de transmissão/detecção (Transponder CWDM) conforme mostrado na Figura 1. O princípio de funcionamento do sistema baseia-se no fato de que dispositivos reflexivos colocados ao longo da linha de transmissão interrompam a reflexão de luz caso algum dano ocorra ao longo da linha, em particular na seção da fibra sensora, que deve ser instalada nos vãos críticos.

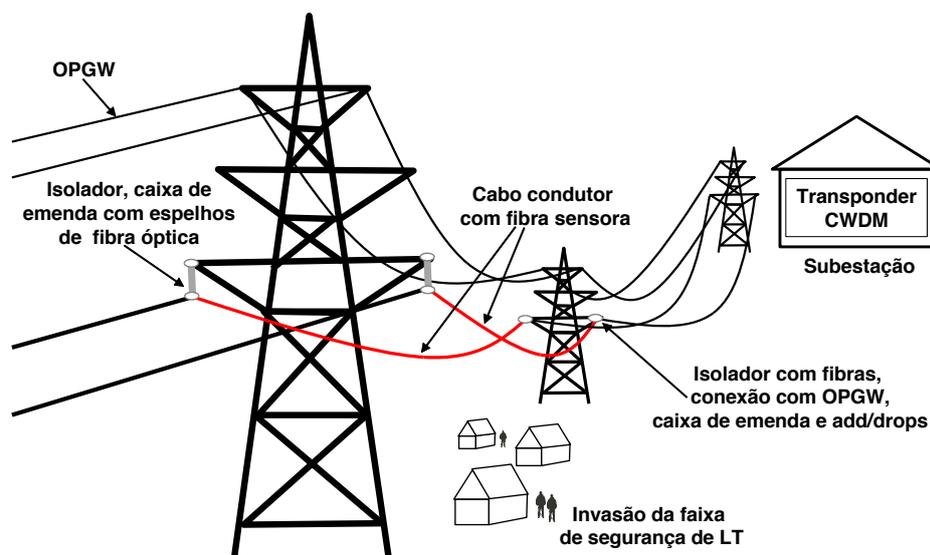


FIGURA 1 – Composição do sistema de monitoramento.

Para que o sistema proposto tenha alta confiabilidade e um tempo de resposta suficientemente rápido, imagina-se que a fibra óptica sensora deva ser conectada diretamente à subestação através de uma fibra óptica de transmissão. A fibra óptica

de interligação entre o cabo sensor e a subestação poderá ser uma fibra de um cabo OPGW ou de um cabo aéreo. Em relação aos isoladores elétricos a serem utilizados para conectar o sinal óptico da baixa tensão para a alta tensão foi desenvolvida uma técnica para passar a fibra óptica pelo núcleo do bastão de fibra de vidro dos isoladores poliméricos, inclusive foram disponibilizados vários protótipos para instalações experimentais no projeto. Entretanto ainda existe a necessidade de adequação dos terminais metálicos dos isoladores para permitir o acoplamento com o cabo de fibra óptica. A adequação dos terminais deve ser realizada de acordo com as necessidades das aplicações específicas e também devem ser considerados os aspectos relativos aos requisitos mecânicos e ópticos para a terminação do cabo no terminal do isolador.

O sistema de detecção utilizará a tecnologia CWDM como mostra a Figura 2(a). Nesta técnica diversos sinais ópticos em comprimentos de onda diferentes são conectados em uma única fibra usando dispositivos conhecidos como multiplexadores (mux). Ao longo de um enlace óptico alguns destes sinais podem ser removidos ou inseridos novamente no enlace por meio do uso de dispositivos conhecidos como add-drops ópticos. Os transmissores são os responsáveis pelas interfaces de transmissão do sistema óptico, tanto para transmitir os sinais de forma apropriada em comprimentos de onda específicos, mas com taxas de transmissão adequadas. Os receptores são os responsáveis pela detecção do sinal de forma adequada.

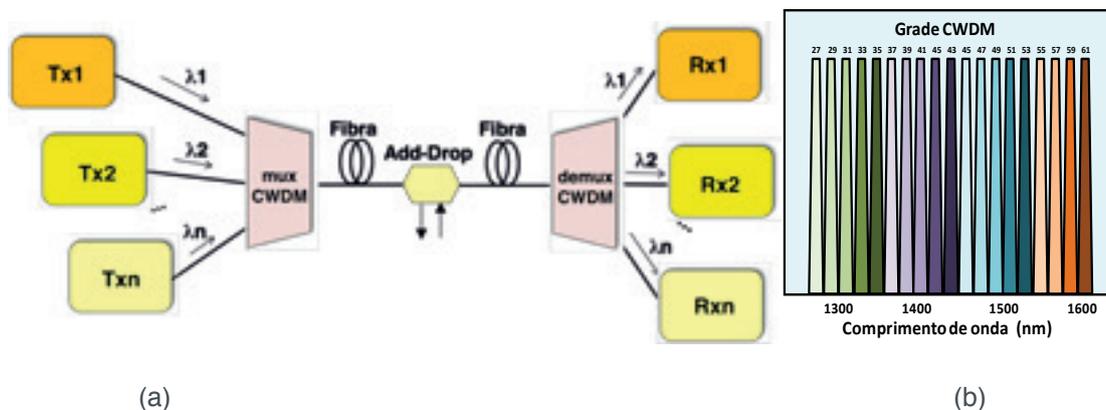


FIGURA 2 – (a) Diagrama genérico da técnica WDM e (b) distribuição espectral do CWDM.

Atualmente transmissores e receptores são integrados em um formato mecânico padronizado que permite uma grande redução do espaço ocupado em estações. Um destes formatos é o SFP<sup>2</sup>.

O espaçamento espectral CWDM é mostrado na Figura 2(b) e foi padronizado pela norma ITU-T G.694.2<sup>3</sup>. Basicamente 18 canais separados por 20 nm são distribuídos entre 1270 a 1610 nm, que é a faixa de transmissão com baixa atenuação na fibra óptica. Uma das grandes vantagens do CWDM é que o mesmo tem custo reduzido em relação a outros sistemas WDM.

## 2.2 Transponder CWDM para Uso em Monitoração e Comunicação de Dados

Para usar a monitoração da LT e simultaneamente permitir o uso de comunicação entre subestações na mesma fibra utilizamos a arquitetura de rede mostrada na Figura 3 que é uma topologia CWDM em barramento. Neste caso são utilizados dois elementos de transmissão/recepção denominados de transponders CWDM em cada subestação. O sinal vindo de qualquer equipamento de transmissão com saída óptica genérica é conectado na entrada (Rx) de um dado transceiver SFP do transponder. O transceiver providencia a adaptação deste sinal no comprimento de onda correto para transmissão no transponder CWDM. Outro transponder situado na estação oposta providencia a entrega deste sinal ao equipamento de transmissão associado.

A unidade Transponder de transmissão tem por função converter os sinais ópticos de até 16 clientes recebidos em suas entradas em até 16 sinais CWDM padronizados na sua saída. A conversão é realizada por unidades transceivers SFP “plugáveis”. Os sinais de entrada chegam ao Transponder de transmissão por meio de cordões ópticos com conectores LC/PC provenientes de equipamentos de transmissão genéricos.

A unidade Transponder de transmissão é composta de uma placa principal (placa mãe) na qual são acopladas duas placas de fonte de alimentação uma placa de supervisão e 16 transceivers SFP CWDM com os seguintes comprimentos de onda 1310, 1330, 1350, 1370, 1390, 1410, 1430, 1450, 1470, 1490, 1510, 1530, 1550, 1570, 1590 e 1610 nm. As interfaces elétricas de entrada e saída de cada transceiver do tipo SFP são internamente e eletricamente conectadas de tal forma a formar um circuito tipo 2R (amplificação e reformatação, mas não de regeneração do sinal). Trilhas de circuito levam informações dos transceivers até a placa de supervisão. Os alarmes de falha de transmissão e ausência de sinal de recepção e comandos para desabilitar o funcionamento do laser são do tipo “0” e “1” TTL. A placa de supervisão exterioriza estes dados via Ethernet 10/100 Base-T/TX.

O transceiver do tipo SFP é um transceptor compacto, hot-pluggable usado tanto para aplicações de telecomunicações como de dados. O fator de forma e interface elétrica é especificado por um acordo multi-source (MSA)<sup>2</sup>. Transceivers SFP são projetados para suportar SDH, SONET, gigabit Ethernet, Fibre Channel, e outros padrões de comunicação.

Cada SFP possui internamente tanto os componentes optoeletrônicos de transmissão como de recepção, bem como circuitos eletrônicos de amplificação de sinal e de detecção de falhas, exteriorização de alarmes e diagnósticos digitais de desempenho dos módulos. Destes alarmes os que são importantes para o sistema de monitoração são de falha do laser (Tx Fault) e perda de sinal de recepção (LOS).

Como pode ser observado na Figura 3 foram adicionados na saída do Transponder dispositivos circuladores ópticos cuja função é permitir o retorno ao receptor de cada transceiver a potência óptica refletida pelos elementos reflexivos (add-drops com espelhos de fibra óptica) instalados ao longo da linha de transmissão.

Os sinais refletidos para os transceivers são a base para a detecção de rompimento do cabo de energia nos vãos críticos ou onde os condutores OPPC estiverem disponíveis nas linhas aéreas. Estes sinais são detectados pelos receptores dos transceivers e um circuito eletrônico interno dos transceivers exterioriza uma saída de nível “1” TTL quando estes sinais não estão presentes, ou seja, quando os elementos refletores por motivo de rompimento do cabo passam a não refletir este sinal. Cada saída TTL de alarmes de cada transceiver é levada a placa de supervisão do Transponder onde por meio de um circuito eletrônico apropriado é verificado se os alarmes correspondem à queda do cabo condutor ou se trata de uma falha de outra natureza. Em caso de confirmação de sinais de queda do cabo condutor esta placa aciona outro sinal usando uma interface elétrica apropriada e que comunica com o relê de proteção da linha de proteção, de forma a evitar o religamento da linha.

Como os sinais de reflexão podem ter sua potência reduzida drasticamente devido a outros fatores, tais como degradação do laser do transceiver e rompimento do enlace óptico da fibra transmissora, prévia ao vão crítico, outros sinais de saída são levados à placa de supervisão para garantir a informação correta dos fenômenos ocorridos. Na topologia da Figura 3 o comprimento de onda de 1470 nm monitora a situação do enlace antes do vão crítico.

Na Figura 3 ainda é mostrado o multiplexador óptico MUX2. Este elemento tem a função de conectar no enlace o sinal de um equipamento OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) que tem como função também de monitoração do enlace óptico principal. Essa funcionalidade do sistema, usando o OTDR, é muito útil na avaliação precisa na localização da ocorrência de qualquer defeito na fibra óptica (ou na integridade do condutor em outras topologias de monitoração), sem a necessidade de uma inspeção terrestre de todo o trecho da linha aérea pela equipe de manutenção. Esta inspeção geralmente demanda várias horas e tem um elevado custo operacional com penalizações regulatórias para a Cemig pela indisponibilidade do ativo.

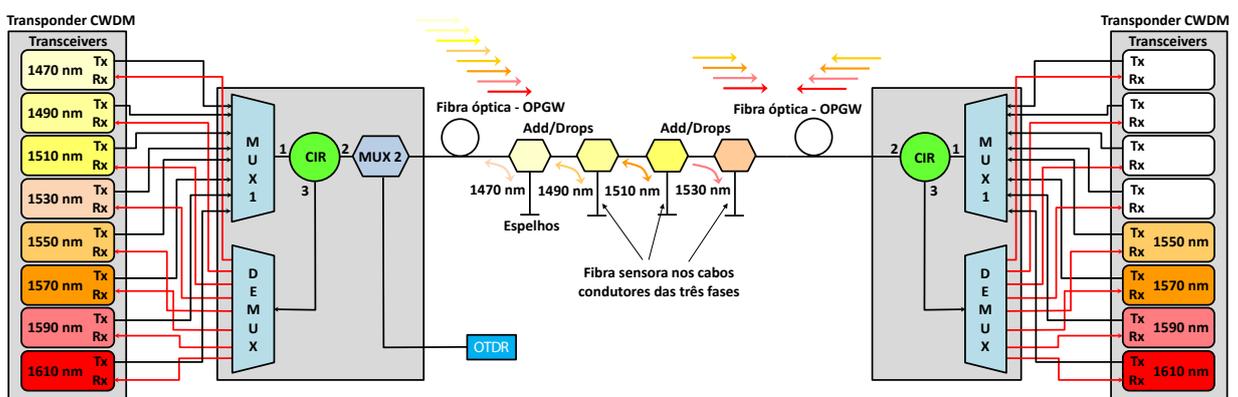


FIGURA 3 - Diagrama de uso do Sistema CWDM para a monitoração do vão crítico e para comunicação de dados.

Existem várias formas e arranjos de dispositivos reflexivos para monitorar um vão crítico de linha aérea de transmissão considerando as três fases. Mostramos na

Figura 3 de forma simplificada um arranjo para monitoração paralela das três fases de um vão crítico. Nesta concepção os comprimentos de onda de 1470 a 1610 nm são transmitidos no enlace óptico, mas somente os comprimentos de onda de 1470 a 1530 nm se destinam a monitoração do vão crítico em questão. Estes comprimentos de onda são enviados para as três fases condutoras A, B e C a partir de add-drops posicionados no enlace óptico. Neste caso cada comprimento de onda refletido no final de cada cabo condutor, em cada fase, retorna pelo mesmo caminho até o Transponder CWDM. A ausência de um destes sinais vincula então o rompimento dos cabos sensores pela queda com rompimento do cabo condutor. O comprimento de onda de 1470 nm é refletido antes dos cabos sensores para sinalizar que a fibra transmissora antes dos cabos sensores se encontra funcionando normalmente. Os outros comprimentos de onda 1550 a 1610 nm podem ser usados para serviços de telecomunicações ou para monitorar outros vãos críticos passam integralmente pelos add-drops e são recebidos na estação oposta independentemente se ocorrer o rompimento do cabo condutor uma vez que estes comprimentos de onda não são derivados para o vão crítico.

### 3 | TESTES EM LABORATÓRIO

O sistema proposto foi submetido a testes de laboratório no CPqD antes da instalação em campo. O sistema apresentado na Figura 3 foi montado com 50 km de fibra monomodo. O valor de 50 km representa o limite de operação do sistema de monitoração com os elementos especificados para o sistema atual. Foram utilizados transceivers com sensibilidade de -35 dBm. Para valores de potência recebida abaixo ou igual a -35 dBm o parâmetro Loss é ativado.

O primeiro teste realizado refere-se ao tempo de resposta do sistema para o comprimento do enlace de 50 km. No diagrama mostrado na Figura 3 o sinal do laser de um transceiver SFP modulado com um pulso elétrico é injetado no enlace de fibras ópticas de 50 km. Para uso no sistema de monitoração que funciona por reflexão o tempo de trânsito do sinal deve ser multiplicado por 2, uma vez que o sinal percorre duas vezes a distância do transceiver até o add-drop/espelho. O sinal é detectado na volta pelo receptor óptico do transceiver SFP sendo processado por seu circuito eletrônico e o sinal de saída elétrico correspondente ao alarme Loss é enviado para a supervisão.

A resposta temporal do sistema de monitoração depende do tempo de propagação do sinal por diversos elementos, sendo que os que mais contribuem com este tempo são: o enlace de fibra óptica, o circuito eletrônico dos transceivers SFP e a placa supervisão que será a unidade interface com o sistema de desligamento/religamento da linha de transmissão da concessionária. A Figura 4(a) mostra os resultados do tempo de resposta do sistema de monitoração com um enlace de fibras ópticas de 50 km. Pode se observar que o tempo de resposta do transceiver mais fibra é da ordem

de 0,52 ms. Já para o tempo de resposta de sistema incluindo a placa de supervisão o valor do atraso seria da ordem de 3,58 ms. Este tempo é mais rápido do que o sistema de atuação do sistema elétrico de proteção<sup>4</sup>.

O sistema foi também testado em termos de desempenho sistêmico do sistema de comunicação de dados. Para tanto cada canal destinado a comunicações de dados foi avaliado pela taxa de erros de bits (BER) usando um gerador e medidor de taxa de erros em 1 Gbit/s. A Figura 4(b) mostra o desempenho livre de erros do sistema (BER < 10<sup>-9</sup>) para os canais de 1550 a 1610 nm).

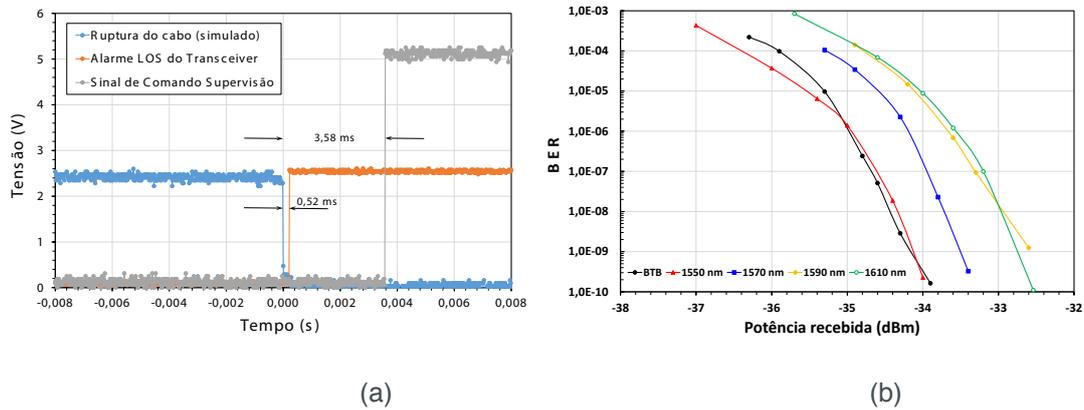


FIGURA 4 – (a) Tempo de resposta para os elementos do sistema de monitoração e (b) taxa de erros de bits dos canais nos testes sistêmicos.

Conforme já relatado o sinal de um OTDR pode ser também transmitido pelo enlace por meio do multiplexador óptico MUX2. O OTDR neste caso tem função complementar de monitoração do enlace óptico principal. No entanto o mesmo não pode ser utilizado na função de monitoração dos vãos críticos em tempo real uma vez que seu tempo de resposta é demasiado lento (> 60 s) devido à necessidade de realização de médias. A Figura 5 mostra o traço do OTDR operando de forma simultânea com o sistema de monitoração de vãos críticos. O OTDR opera na faixa espectral de 1310 nm, onde nenhum canal escolhido para este projeto CWDM opera.

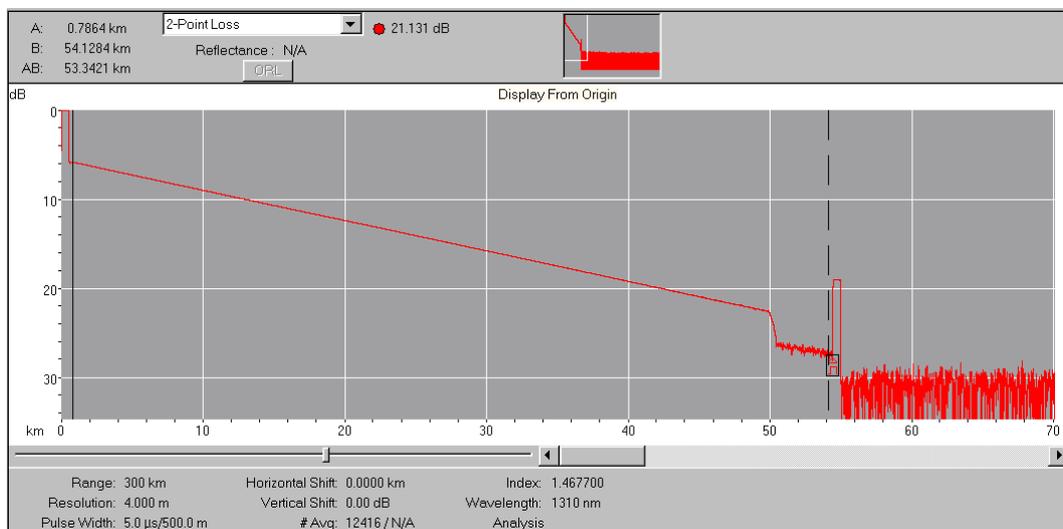


FIGURA 5 - Traço do OTDR operando de forma simultânea com o sistema de monitoração de vãos críticos.

## 4 | IMPLANTAÇÃO EM CAMPO E RESULTADOS

A UniverCemig na cidade de Sete Lagoas em MG foi o local escolhido para instalação e testes das diversas partes que compõe o sistema detalhado nas seções anteriores. A UniverCemig é a universidade corporativa da Cemig que tem como finalidade integrar empregados e esforços em torno do provimento e compartilhamento de conhecimento. Os conhecimentos consolidados e desenvolvidos na UniverCemig são baseados em experiências e tecnologias empregadas na empresa, proporcionando um processo contínuo de aprendizagem e aumento do desempenho no trabalho.

A instalação do sistema compreendeu todos os elementos mostrados na Figura 3 inclusive o cabo sensor que foi especialmente desenvolvido pela Furukawa para esta aplicação, bem como os isoladores elétricos com fibras embutidas desenvolvidos pela Balestro e CPqD. A Figura 6(a) mostra uma foto da realização das emendas na base do isolador com fibras. A Figura 6(b) mostra uma foto da instalação do cabo sensor e dos isoladores em uma das torres de transmissão existentes na UniverCemig. Na Figura 6(c) é mostrado o rack com todos os elementos do sistema CWDM detalhados na Figura 3. Este rack foi instalado na sala de controle.



FIGURA 6 - Instalação na UniverCemig do sistema de monitoração e transmissão de dados: (a) realização das emendas na base do isolador, (b) instalação do cabo sensor e (b) rack do equipamento CWDM.

A Figura 7 ilustra uma foto aérea mostrando a disposição da rede óptica e dos elementos instalados na UniverCemig. Após a implantação da rede de monitoramento, todas as fibras ópticas foram caracterizadas com OTDR para verificação da atenuação óptica ao longo dos enlaces, e foi observado que todas as emendas e a atenuação da fibra óptica ao longo dos enlaces estavam de acordo com os requisitos de operação para o teste de campo. Os dispositivos add-drops e espelhos ficaram instalados na sala de controle no DGO para possibilitar a configuração de diversas topologias de redes ópticas de monitoramento e também permitem simular falhas em pontos distintos do

enlace, bem como as combinações de diferentes tipos de falhas. Em uma aplicação real ficarão instalados em caixas de emendas usadas nos vãos críticos da linha aérea a ser monitorada, como por exemplo a caixa mostrada na Figura 6(a).



FIGURA 7 - Foto aérea mostrando a disposição da rede óptica e dos elementos instalados.

No campo de teste na UniverCemig o cabo sensor foi suportado por duas torres metálicas e um pórtico de madeira (Figura 6(b)). Para validação do sistema de monitoramento de vãos críticos foi adotada uma configuração de rede de cabos ópticos conforme apresentada no esquemático da Figura 7. Foram implantados dois lances de cabos OPPC. Para interligação do OPPC terminado na torre B ao DGO na sala de controle, localizada na sala 70 da UniverCemig, foi implantado um microcabo em duto enterrado. O cabo OPPC terminado na torre A foi interligado ao DGO utilizando um cabo óptico aéreo autossustentado de 12 FO. Algumas fibras saem também da torre A pelo cabo OPPC até a torre C e retornam a torre A pelo mesmo cabo. No DGO foram adicionadas duas bobinas de fibras monomodo de 5 km cada uma. Desta forma o enlace total apresenta 17 km de comprimento. A Figura 8 mostra uma foto da tela do OTDR do sistema com o traço de atenuação do enlace óptico. Os três pontos de reflexão na tela correspondem a reflexão dos add/drops espelhos em 1470, 1490 e 1510 nm. A fase C da linha de transmissão não foi monitorada num primeiro momento.

A partir da aceitação do sistema instalado foram repetidos os testes sistêmicos e de desempenho do sistema de monitoração feitos anteriormente em laboratório.

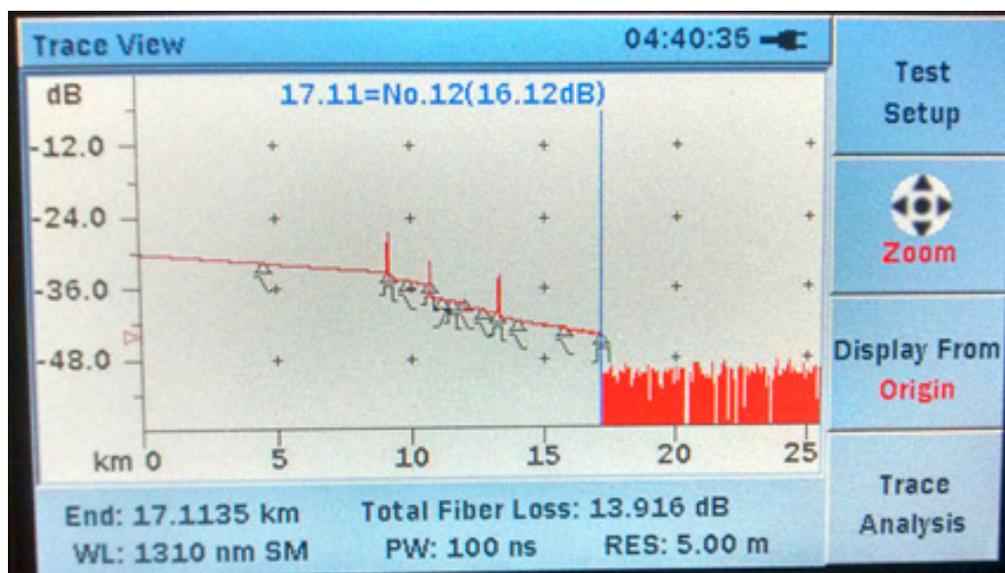


FIGURA 8 - Tela do OTDR do sistema com o traço de atenuação do enlace óptico.

Os testes de monitoração foram realizados basicamente simulando uma ruptura do cabo sensor. Neste primeiro momento isto é feito desconectando no DGO a conexão óptica do add-drop com o espelho, provocando desta forma uma ausência de sinal no transceiver correspondente. Isso foi feito para todas as fases monitoradas e para a simulação de uma eventual falha do cabo AS ou microcabo. Posteriormente deve ser desenvolvido um estudo para simular a atenuação mais realística provocada na queda de um cabo de transmissão.

A Figura 9 mostra as telas do sistema de supervisão para cada falha simulada. A Figura 9(a) indica que o sistema e a rede estão em condições normais de operação (sem falhas), na Figura 9(b) indica que o cabo sensor e a fase B estão com falhas, neste caso não foi indicado alarme do sistema porque a falha ocorreu antes do vão crítico. A Figura 9(c) indica que ocorreu falha no cabo sensor no vão crítico, neste caso foi indicado alarme e o sistema atuará no relê de proteção da linha. Na Figura 9(d) existe a indicação de falha em duas fases e no cabo OPPC antes do vão crítico, neste caso não foi indicado alarme do sistema porque a falha ocorreu antes do vão crítico.

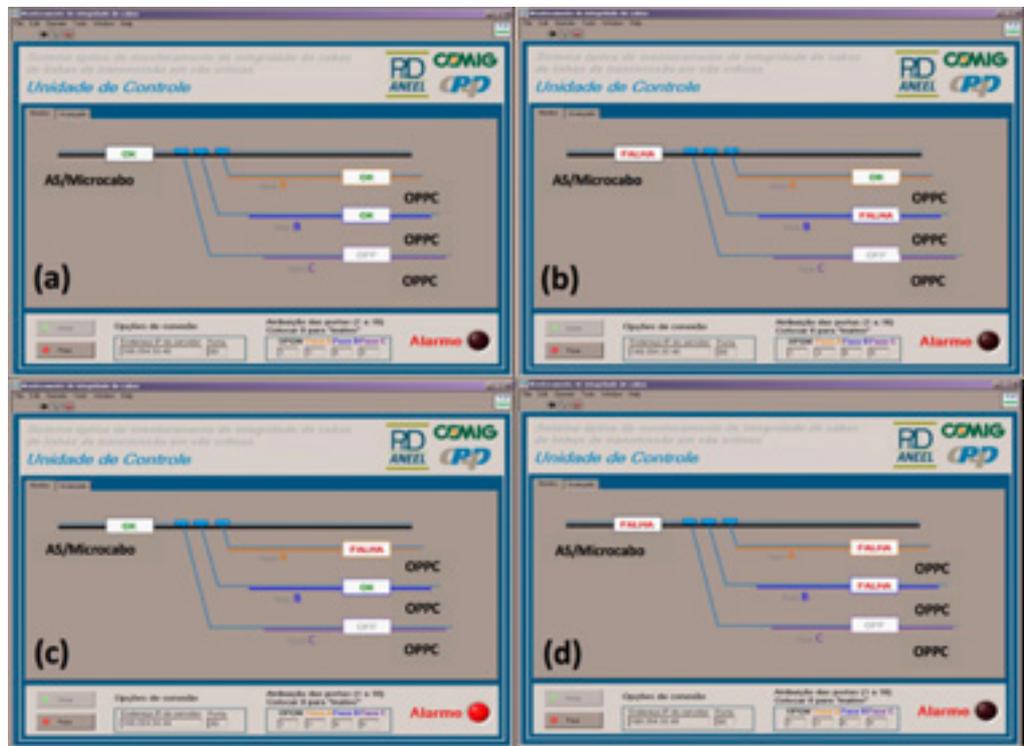


FIGURA 9 - Telas do sistema de monitoração indicando as falhas simuladas.

Os testes do sistema de comunicação de dados foram realizados simultaneamente com a operação do sistema de monitoração. Para a realização dos testes de validação foi utilizado o analisador de redes (modelo Convergente Service Analyzer-CSA) para gerar um tráfego de dados. O tráfego de dados em 1,25 GbE foi inserido em um dos canais de comunicação de dados, e simultaneamente foram transmitidos vídeos de alta resolução em ambos os sentidos do enlace óptico. A Figura 10(a) mostra fotos das telas dos monitores com o sistema de monitoração e os vídeos em andamento e a Figura 10(b) mostra o analisador de dados medindo a taxa de erros no sistema.

O tráfego gerado em ambos os sentidos, downstream e upstream, foi de 100%, 95%, 93%, e 90%, respectivamente. Nos testes executados verificou-se que cada sistema (sistema de monitoração e o de transmissão de dados de telecomunicações) funcionou adequadamente e de forma independente.

Portanto os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da utilização simultânea de uma rede de fibras óptica para operação conjunta do sistema de monitoramento e de transmissão de dados em banda larga. Um vídeo do teste de campo é disponível em<sup>5</sup>.

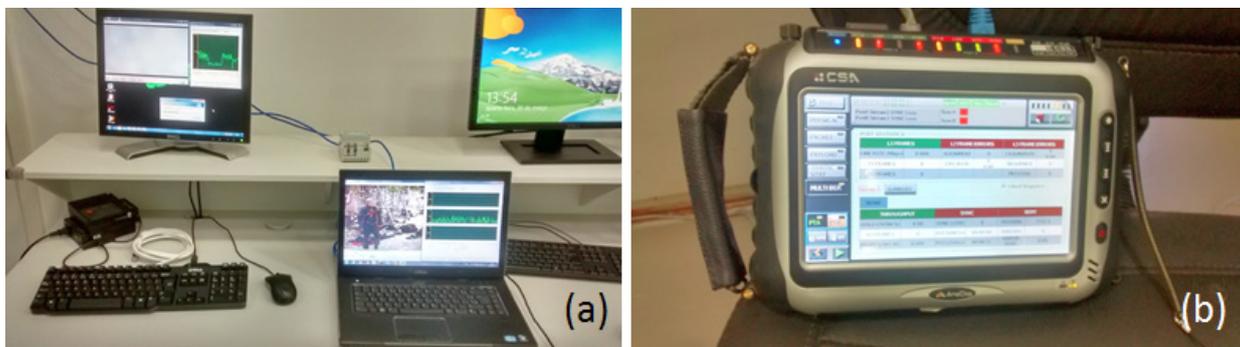


FIGURA 10 - (a) fotos das telas dos monitores com o sistema de monitoração e os vídeos em andamento e (b) analisador de dados medindo a taxa de erros no sistema.

## 5 | CONCLUSÃO

Tendo em vista os problemas decorrentes da invasão das faixas de segurança, oriundas da construção de habitações irregulares, principalmente nas áreas próximas aos grandes centros urbanos, a CEMIG em parceria com o CPqD, no âmbito do programa de P&D da ANEEL, desenvolveram uma solução inovadora com a adaptação da tecnologia CWDM para o monitoramento da integridade física dos condutores das LTs nos trechos críticos, ou seja, nos trechos invadidos fazendo uso de fibras ópticas compartilhadas com aplicações de comunicações de dados em banda larga.

Neste trabalho foram apresentados: a descrição do sistema óptico inovador que utilizou a tecnologia CWDM como plataforma de monitoração e comunicação de dados em banda larga para redes smart grids; o desenvolvimento e os testes em laboratório do sistema que foram validados e demonstrados em 50 km de fibra óptica monomodo com 4 canais CWDM transmitindo dados e vídeo em 1,25 GbE simultaneamente ao processo de monitoração e posteriormente a implantação e operação em campo do sistema em um enlace de 17 km de comprimento instalado na UniverCemig, em Sete Lagoas/MG.

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da utilização simultânea de uma rede de fibras óptica para operação conjunta do sistema de monitoramento e de transmissão de dados em banda larga. Além disso deve-se salientar que outros tipos de sensoriamento ou medição das LTs podem ser integrados ao sistema CWDM, tais como, de corrente, tensão, ou de parâmetros ambientais (temperatura, velocidade do vento, pluviometria etc).

## REFERÊNCIAS

1 ROSOLEM. J. B. et al., Arquiteturas baseadas em WDM para as próximas redes PON, Cad. CPqD Tecnologia, Campinas, v. 6, n. 1, p. 65-76, jan./jun. 2010. Disponível em: [http://comunidade.cpqd.com.br/cadernosdetecnologia/Vol6\\_N1\\_jan\\_jun\\_2010/pdf/artigo6.pdf](http://comunidade.cpqd.com.br/cadernosdetecnologia/Vol6_N1_jan_jun_2010/pdf/artigo6.pdf). Acesso em: 20 maio 2018.

2 SFF Committee, INF-8074i Specification for SFP (Small Form factor Pluggable) Transceiver, Rev

1.0, Maio, 2001.

3 ITU-T, G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid, dezembro de 2003.

4 SILVA, M. G. M., Avaliação de Desempenho de Relés de Proteção Digitais, Monografia de Graduação, Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

5 NASCIMENTO, C. A. M.. Redes Sinérgicas: Sistema óptico de monitoração de linhas de transmissão e comunicação de dados, Vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2LqW1XYYH6M>. Acesso em: 20 maio 2018.

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**Jaqueline Oliveira Rezende** Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-46-8

