

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA - GGT

SENSORES ÓPTICOS PARA MONITORAMENTO DE USINAS TERMELÉTRICAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

JOSEMIR COELHO SANTOS(1);CARLOS ALEXANDRE MEIRELES DO NASCIMENTO(2);JOÃO BATISTA ROSOLEM(3);RIVAEEL STROBEL PENZE(3);MARCIO REZENDE SINISCALCHI ESCOLA POLITÉCNICA(1);CEMIG(2);CPQD(3)

RESUMO

São notáveis as grandes vantagens que as tecnologias de sensoriamento baseadas em fibras ópticas apresentam frente às tecnologias convencionais, tais como: resposta em frequência mais larga, redes passivas, imunidade a interferências eletromagnéticas (IEM), não geram ruídos externos, operação em multibandas, baixa latência e barreiras físicas naturais contra ataques cibernéticos, dentre outras. Esse artigo objetiva apresentar exemplos práticos de uso da tecnologia óptica para sensoriamento e monitoramento de equipamentos em SEP. O intuito é motivar a geração termelétrica a utilizar essa tecnologia, basicamente, facilitando aplicar em usinas termelétricas o que já foi feito em 20 anos na área de linhas e redes de energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE

Usinas Termelétricas, SmartGrid; Redes Inteligentes; Redes Ópticas; Redes Sinérgicas.

1.0 INTRODUÇÃO

Visando melhorar a segurança e o desempenho de equipamentos do setor de energia elétrica, as empresas têm investido em sistemas que permitem monitorar as características físicas dos equipamentos em tempo real, como é requerido pelos sistemas inteligentes. As técnicas usuais de monitoramento são baseadas em sensores elétricos ou eletrônicos convencionais que monitoram de forma pontual, as grandezas elétricas e mecânicas, principalmente. Já os sensores baseados em tecnologias ópticas também permitem fazer essa mesma função de forma discreta, mas por meio de transdutores atuando em dispositivos ou sensores ópticos, os quais podem ser inscritos ou acoplados em fibras ópticas modificadas em sua constituição (interna ou externa) para modular a luz e obter essa funcionalidade sensora, sendo que as fibras ópticas podem agregar, em alguns casos, a sua utilização primordial em comunicação de dados em alta velocidade 1(1)-(4).

As técnicas de monitoramento pontual ou quase-distribuído, convencionais e/ou ópticas, levaram a um novo patamar tecnológico as atividades das equipes de gestão de ativos. Aplicadas aos setores de linhas e redes de energia elétrica geraram avanços notáveis e estão em pleno desenvolvimento nas últimas duas décadas, com destaques para a necessidade de monitoramento ao longo das extensas linhas e redes de energia elétrica, subterrâneas e aéreas. Porém, mais recentemente, abriu-se a possibilidade do sensoriamento contínuo ao longo de grandes dimensões, devido às diversas aplicações dos sensores chamados de "distribuídos a fibra óptica". Dois tipos de sistemas de sensoriamento têm sido constantemente abordados na literatura e já contam com diversas aplicações comerciais: (i) sensor distribuído de temperatura, mais conhecido pela sigla DTS, do inglês "distributed temperature sensor" e, (ii) sensor distribuído de temperatura e deformação mecânica, conhecido pela sigla DTSS, que significa "distributed temperature and strain sensor" (5).

Ante as grandes vantagens que as tecnologias em sensoriamento óptico apresentam frente às tecnologias convencionais, torna-se motivador e importante estender tal avanço para as instalações de usinas termelétricas (6).

2.0 OBJETIVO

Esse artigo visa, primeiramente, apresentar exemplos práticos de algumas alternativas em uso da tecnologia óptica para sensoriamento e monitoramento de equipamentos, em redes externas em sistemas de potência, como forma de disseminar o conhecimento sobre a prática de uso em campo dessas tecnologias. Em seguida, objetiva também apresentar uma simulação teórica de como seria a monitoração completa de uma planta de usina termelétrica por meio de redes de sensores ópticos integradas às redes de uma planta industrial de Usina Termelétrica. A meta desse trabalho é motivar os especialistas do setor de geração para a aplicação de tecnologias ópticas nas usinas térmicas, facilitando a rápida transferência e adaptação do que já foi desenvolvido em termos dos conceitos de sensoriamento e dos sensores ópticos para linhas e redes de energia nos últimos 20 anos.

3.0 ELEMENTOS DE UMA USINA TERMELÉTRICA

A FIGURA 1 apresenta, simplificada, uma planta de usina termelétrica a ser monitorada. Como as variáveis de interesse nem sempre são fáceis de serem monitoradas, serão indicadas as mais importantes de cada equipamento e/ou subsistema. Em geral, numa usina termelétrica, independentemente do tipo de combustível utilizado (carvão, petróleo, gás natural, etc.), a produção de energia elétrica segue a sequência apresentada no quadro à direita da FIGURA 1.

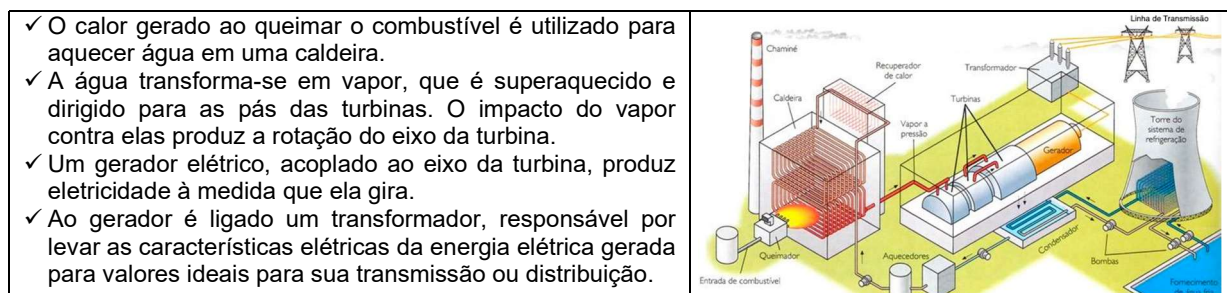


FIGURA 1 - Diagrama esquemático de uma usina termelétrica.1(15)

Além dos elementos citados, como pode ser visto no esquema da FIGURA 1, existe um sistema de refrigeração que permite reconverter o vapor de água que passou pelas turbinas em água líquida, para então reinicializar-se o ciclo a partir da energia térmica obtida dos combustíveis. Como forma alternativa de apresentar os sistemas e as variáveis de interesse, podem-se detalhar as grandezas físicas, conforme explicitado na TABELA 1, a seguir.

TABELA 1 - Características das grandezas físicas dos componentes de uma Usina Termelétrica.

Componentes	Variáveis de Interesse
Entrada de combustível:	Temperatura (ambiente), fluxo, massa de combustível, pressão (0-100 psi)
Queimador:	Temperatura do fogo (100-1500 °C), fluxo de ar (500-1000 cfm), fluxo de combustível, massa de combustível, massa de ar, pressões.
Caldeira:	Temperatura na parte externa e espessura dos tubos, temperatura da água na entrada e na saída, temperatura do fogo no interior da caldeira.
Recuperador de calor:	Temperaturas na superfície (30-600 °C) e pressões (100-2500 psi) na entrada e na saída dos tubos
Moto-Bomba de alimentação de água para a caldeira:	Vibração da bomba (0-10 mils), temperatura (10-100 °C) e nível de óleo dos mancais (0-10 cm), vibrações do motor na carcaça (0-5 g) e proximetros no eixo (0-140 microns), corrente (0-100 A) e tensão no motor (0-15000 V), temperaturas do estator (0-200 °C) e dos mancais (0-100 °C).
Aquecedores:	Temperaturas na entrada e na saída (0-600 °C), pressão na entrada (0-500 psi) e na saída (0-1000 psi), Fluxo de água e de vapor.
Condensador:	Vácuo (760-0 mmHg), Pressão da água de resfriamento na entrada (0-100 psi) e saída (0-500 psi), Temperatura da água de resfriamento na entrada (0-50 °C) e saída (0-100 °C), temperatura do vapor na saída da turbina (100-500 °C), sensores de condutividade e de oxigênio dissolvido na água condensada, nível do poço do condensador (poço quente).
Vapor à pressão:	Temperatura (0-500 °C), fluxo de vapor, pressão (0-2500 psi) e massa de vapor.
Moto bombas:	Vibrações da carcaça em 3 eixos (0-15 mils), temperatura (0-100 °C) e nível de óleo (0-10 cm) dos mancais, vibrações do motor (0-15 mils) na carcaça (0-5 g) e no eixo (0-150 mils), corrente (0-200 A) e tensão no motor (0-15000 V), temperaturas do estator (0-200 °C) e dos mancais (0-100 °C).
Torre de refrigeração:	Temperaturas (0-50 °C) e pressões (0-100 psi) das águas de resfriamento e a ser resfriada.
Motores dos ventiladores da torre de refrigeração:	Vibração da carcaça do ventilador em três direções (0-15 mils), temperatura (0-100 °C) e nível de óleo (0-10 cm) dos mancais, vibrações do motor: acelerômetros na carcaça (0-5g) e proximetros no eixo (0-150 microns), motor: corrente (0-500 A), tensão (0-15000 V), temperaturas do estator (0-200 °C) e dos mancais (0-100 °C).
Turbina a vapor:	Fluxo de vapor, temperaturas de vapor na entrada (0-500 °C) e na saída (0-300 °C), vácuo na saída das turbinas de baixa pressão(0-760 mmHg), temperaturas dos mancais (0-300 °C), deslocamento do mancal de escora na direção axial (0-200 mm), vibração nas três direções de cada mancal (0-15 mils), pressão do óleo nos mancais (0-50 psi), deslocamentos axiais nas turbinas de alta e de baixa pressão (0-100 mm), sistema de monitoramento e análise de tendências das vibrações.
Gerador e excitatriz:	Monitoramento do rotor (excentricidade e curtos entre espiras), descargas parciais no estator, vibração nas cabeças das bobinas, ponto de orvalho do hidrogênio, temperaturas e pressões na entrada e saída dos trocadores de calor do gerador, pressão (0-80 psi) e pureza (0-100%) do hidrogênio de resfriamento do gerador, temperatura dos mancais (0-100 °C), temperatura do estator (0-200 °C), vibrações nas 3 direções (0-5g) e proximetros (0-150 microns), pressão (0-100 psi) e temperatura do óleo de selagem nos mancais (0-50 °C), tensão e corrente na saída (0-25 kV) (indicador, oscilógrafo e com registros), tensão gerada na excitatriz (0-100 V), temperaturas do ar dentro da excitatriz (0-80 °C), corrente de excitação (DC) (0-100 A), temperaturas (0-50 °C) e pressões (0-100 psi) na entrada e saída dos trocadores de calor da excitatriz.

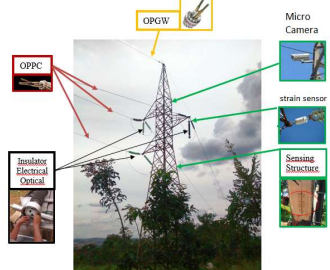
Transformador de Potência:	Tensão no primário (0-25 kV) e secundário (0-600 kV), corrente no primário (0-15 kA) e secundário (0-1 kA), sistema de monitoramento dos gases dissolvidos, nível e umidade do óleo, monitoramento das buchas de alta tensão, temperaturas do transformador (carcaça e óleo).
----------------------------	---

4.0 LEGADO DAS REDES DE SENSOREAMENTO ÓPTICO EM T&D

Nos últimos 15 anos, a Cemig em parceria com CPqD têm investido em diversos projetos de P&D na área de monitoramento e controle de ativos de T&D, para modernizar esses ativos com uso de tecnologia óptica, como elemento sensor e como meio de transmissão de dados em fibra óptica. A TABELA 2 apresenta as possibilidades de uso do conceito nomeado por Linhas e Redes Sinérgicas (LRS) e com sua representação, geométrica e didática para linhas aéreas de transmissão. Para redes de distribuição de energia elétrica, o conceito de Rede Sinérgica (RS) é uma continuidade aos trabalhos realizados pela Cemig e o CPqD, desde 2002. Esses projetos desenvolvidos culminaram no conceito de redes sinérgicas por meio do desenvolvimento de novos elementos de rede, tanto para a baixa tensão quanto para a média tensão, utilizando a tecnologia óptica como infraestrutura de rede. Para tal, foram especificados novos produtos de rede e desenvolvidos procedimentos para a sua utilização. Além disso, foram realizados os testes de funcionalidade e validação, em laboratório e em campo, dos novos produtos desenvolvidos. O conceito RS encaixa-se dentro da visão de “Smart Grid” óptico, utilizando uma rede cabeada e fechada por meio de fibras ópticas. Os três novos elementos principais da RS são: os cabos condutores com fibras ópticas integradas (OPDC), os cabos multiplex sinérgicos e os isoladores óptico/elétrico. A FIGURA 2 apresenta os protótipos desses elementos. Sua implantação nas redes de distribuição de média e baixa tensão possibilita os seguintes ganhos e benefícios estimados:

- ✓ Rede de comunicação de alto desempenho e disponibilidade quando comparado com outras tecnologias de comunicação RF, o que é fundamental para a automação das redes elétricas inteligentes tornando as redes de distribuição elétricas mais confiáveis;
- ✓ Permite o sensoramento amplo da rede elétrica utilizando as fibras ópticas (FOs) que estão integradas aos cabos condutores;
- ✓ Reduz a poluição ambiental das redes de distribuição de energia elétrica (RDEE) sem gerar RF;
- ✓ Redes mais robustas em relação a vandalismo, uma vez que, as redes de grande velocidade podem estar dentro dos cabos de Média Tensão.

TABELA 2 – Representação e aplicações do conceito LRS como uma infraestrutura compartilhada.

Representação	Elemento	Função Primária	Função Secundária
	cabo OPGW	<ul style="list-style-type: none"> • Telecomunicações em banda larga (“backbone”) • Redundância de canais para teleproteção • Infraestrutura de rede inteligente • intranet ou Internet • (redes internas ou externas) 	<ul style="list-style-type: none"> • IoT e Indústria 4.0 • Sensoramento pontual ou distribuído • (tensão, temperatura e vibração) • Integridade física do condutor • Vídeo Monitoramento • Detecção de fumaça e fogo • Medição de Ruído
	condutores – OPDC e OPDC		
	Isolador óptico e elétrico		
	Partes Estruturais: Torres e Fundações		

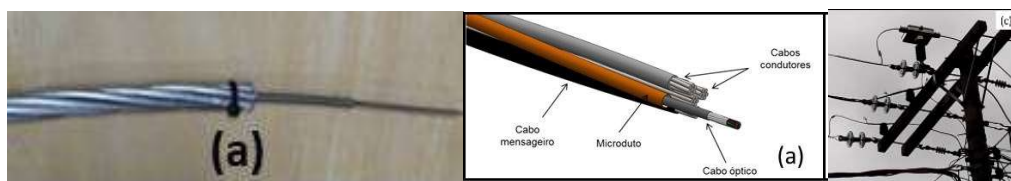


FIGURA 2 - (a) Cabos OPDC 1/0 Fase nu - (b) Cabo Multiplex Sinérgico baixa tensão, e - (c) ponto de emenda ou derivação óptica e elétrica de média tensão.

5.0 TECNOLOGIAS ÓPTICAS DE SENSOREAMENTO

5.1 Sistemas Distribuídos em Fibras Ópticas

A partir da técnica conhecida como BOTDA (“Brillouin Optical Time Domain Analysis”) (1)(8) esse sistema foi desenvolvido pelo CPqD em parceria com a Cemig por meio do projeto P&D Aneel (5). O DTSS é composto basicamente por uma fonte elétrica, sistema de lasers para viabilizar a técnica BOTDA, circulador óptico e receptor, conforme mostra o diagrama simplificado da FIGURA 3(a). A técnica BOTDA se caracteriza pelo uso de dois lasers distintos que são inseridos cada um em uma das pontas de um lance de fibra óptica. Dessa forma, não somente o sistema de lasers, mas a óptica necessária para viabilizar a técnica BOTDA tem sua construção mais complexa, do que comparada às outras técnicas, como por exemplo a medição da temperatura distribuída ao longo de fibras ópticas, ou seja, o DTS (“distributed temperature sensor”), que usa o efeito Raman. Essa técnica DTS é capaz de

medir, em tempo real, a temperatura ao longo de um cabo óptico de até 8 km de comprimento, com temperaturas variando de modo não-uniforme, em um intervalo de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$. A FIGURA 3(b) mostra a LD subterrânea BH ADELAIDE - BH CARLOS PRATES, 138 kV, que opera de forma experimental com o DTS. Outra técnica promissora seria medir o efeito Rayleigh ("Distributed Acoustic System" - DAS) que fornece informações sobre a vibração mecânica por meio de ruídos sonoros percebidos na alteração do feixe de luz, que podem estar correlacionados à presença de descargas parciais anormais em cabos isolados.

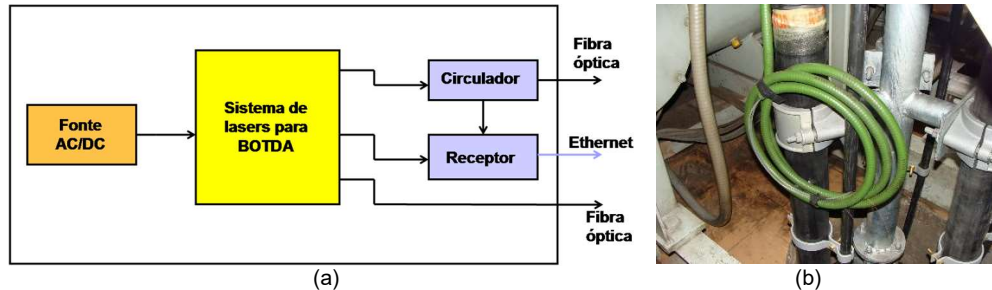


FIGURA 3 – (a) Diagrama esquemático do interrogador DTSS. (b) Fase central da nova LD LD BH ADELAIDE - BH CARLOS PRATES, 138 kV, com fibras ópticas lançadas junto à camada de blindagem do cabo isolado de 138 kV

Entretanto, quando é requerido medir deformação ou força, as medições do sensor de deformação BOTDA ou DTSS correlacionam com os dados de intensidade Brillouin, por comprimento de fibra óptica, para cada frequência de batimento promovida entre o laser de sintonia e a banda Stokes do espalhamento. A FIGURA 4 apresenta as instalações que foram mobilizadas no CPqD para realização do vão de teste com o cabo óptico disposto em 6 voltas. Dessa forma, os dados obtidos dão origem à uma figura tridimensional que contempla essas três informações. A FIGURA 5 apresenta os resultados obtidos a partir das formas de onda medidas em situações distintas: (a) quando não há deformação aplicada; (b) quando a deformação aplicada é de 150 mm e (c) para deformação de 300 mm.

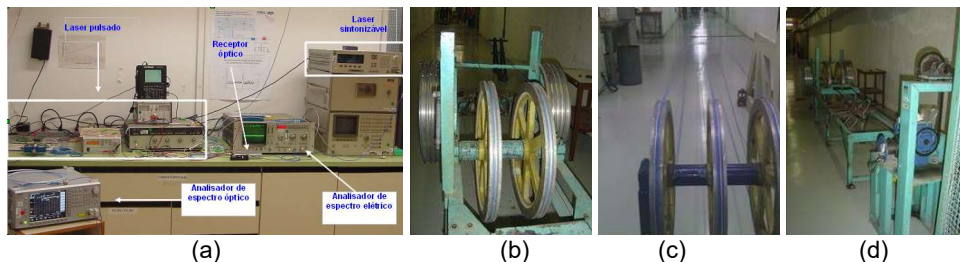


FIGURA 4 - (a) Sistema aquisição DTSS e (b) (c) bobinas de apoio acopladas à máquina de tração e (d) dispositivo de tração de cabos e fibras ópticas 1(5).

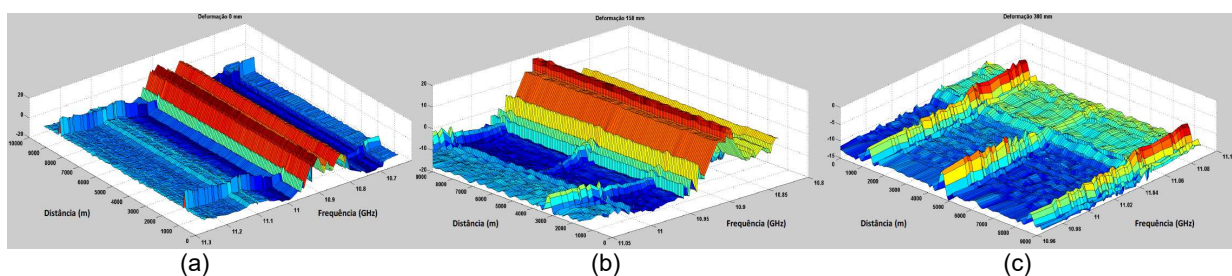


FIGURA 5 - Intensidade de espalhamento Brillouin em função da diferença de frequência e da posição na fibra óptica, sendo (a) fibra óptica sem deformação, (b) com 150 mm deformação e (c) com 300 mm deformação.

Os mapas de intensidade devem ser analisados levando-se em conta a intensidade medida, a posição e o valor da frequência associada. Na FIGURA 5(a), verificou-se um valor de intensidade elevado, ao longo de toda a extensão do lance de fibra óptica, para diferença de frequência de 10,88 GHz que corresponde a frequência ordinária do espalhamento Brillouin, o que leva a concluir que, nesse caso, não há tração aplicada no cabo óptico. Por outro lado, em cada uma das FIGURA 5 (b) e (c) verifica-se uma pequena região que apresenta um aumento súbito de intensidade quando a frequência de sintonia está entre 10,95 e 11,00 GHz, demonstrando que estas regiões do cabo óptico estão sujeitas a tração mecânica. A frequência em que o espalhamento Brillouin apresenta seu máximo de intensidade se relaciona com a deformação mecânica aplicada.

5.2 Redes cabeadas e suas vantagens

Uma característica importante das redes de dados em operação industrial, de maior impacto sistêmico para “Smart Grid” é a característica de ser cabeada e, se possível, completamente fechada em fibras ópticas, o que torna muito mais restrito o acesso indevido ou tentativa de ataques cibernéticos aos dados operativos no campo. A FIGURA 6(a) apresenta uma forma didática de como é bem mais complexa a tentativa de acesso a uma rede cabeada quando comparada a uma rede sem fios. A FIGURA 6(b) mostra uma aplicação experimental de equipamentos ópticos de corrente e tensão em rede fechada fisicamente, na rede sinérgica da UniverCemig (14).

Outra grande vantagem para o monitoramento óptico amplo, de plantas industriais, é a possibilidade de medir-se a temperatura usando o efeito Raman DTS, que não é afetado pela deformação do condutor, sendo que a sua extensão de medição pode chegar até 50 km. De outra forma, usando o efeito Brillouin (“Distributed Temperature and Strain Sensing” - DTSS) é possível medir a temperatura e a deformação mecânica (ou a força) em comprimentos que podem atingir até 150 km. Por último, o efeito Rayleigh (“Distributed Acoustic System” - DAS) fornece informações sobre a vibração mecânica por meio de ruídos sonoros percebidos na alteração do feixe de luz e ao longo da fibra óptica.

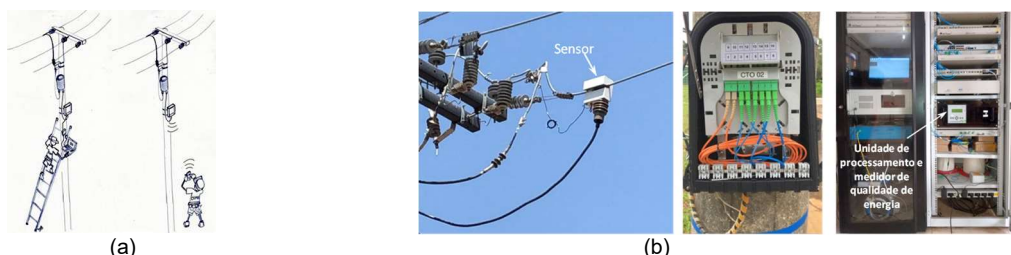


FIGURA 6– (a) Representação didática do acesso às redes de dados cabeadas e wireless e (b) medição de corrente e tensão elétricas em redes fechadas.

6.0 APLICAÇÕES PRÁTICAS

6.1 Compartilhamento de sensoriamento e de dados na mesma fibra óptica

Uma tecnologia largamente utilizada em sistemas de transmissão de dados, em banda larga, é a tecnologia “Coarse Wavelength Division Multiplexing” (CWDM) (7). Nesta técnica, diversos sinais ópticos em diferentes comprimentos de onda são conectados em uma única fibra óptica por meio de dispositivos conhecidos como multiplexadores (mux). Alguns desses sinais podem ser removidos ou reinseridos no link de fibra óptica usando dispositivos conhecidos como “add-drops” ópticos. Assim, para monitorar dados e simultaneamente permitir a transmissão de dados na mesma fibra óptica, entre duas subestações, uma arquitetura de rede mostrada na FIGURA 7 foi desenvolvida pelo CPqD. Neste caso, dois terminais de transmissão/recepção CWDM são utilizados em cada subestação para multiplexar o sinal de monitoramento e comunicação. O sinal proveniente de qualquer equipamento de transmissão externo com saída óptica genérica é conectado à entrada óptica de um determinado SFP (“Small Form-factor Pluggable”) (8) usado para aplicações de telecomunicações e comunicação de dados em cabos de fibra óptica. O mesmo é feito na outra extremidade do transceptor SFP do terminal CWDM, sendo este um sistema econômico em comparação com outros sistemas WDM (9).

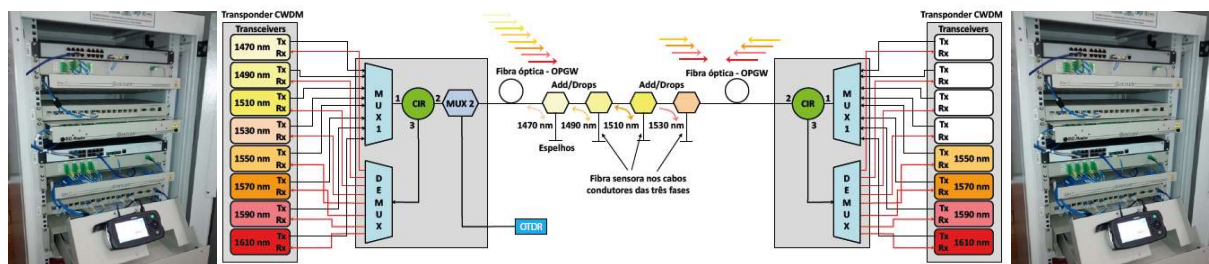


FIGURA 7 - Diagrama de uso do Sistema CWDM para compartilhar canais de sensoriamento com a comunicação de canais para dados em banda larga entre as terminações das fibras ópticas.

6.2 Sensores de deformação e de vibração usando Grades de Bragg em Fibra

A FIGURA 8 mostra o sistema de medição de deformação ou força por meio da técnica óptica de Grades de Bragg em Fibra (FBG - do Inglês “Fiber Bragg Grating”) utilizando sensores junto ao corpo da estrutura metálica de uma linha aérea. Nestes pontos, o hardware de detecção FBG não precisa ser energizado e isolado. Esta é a primeira grande vantagem desse tipo de tecnologia de sensor FBG conectado ao enlace de fibra óptica. O sensor óptico FBG permite medir a deformação, ou a força atuante, na torre e no condutor. Normalmente, o interrogador óptico pode ser instalado em um site de telecomunicações e o ponto da monitoração pode estar a até 100 km de

distância. Nesse contexto, na implementação de um programa mais amplo de monitoramento para a gestão desses ativos, estima-se um custo OPEX menor com o uso da tecnologia de redes ópticas, pois esta é a segunda grande vantagem na infraestrutura de rede óptica inteligente quando comparada às tecnologias convencionais. A FIGURA 9 apresenta algumas construções do empacotamento de sensores ópticos.



FIGURA 8 - Interrogador de sensores a Grade de Bragg aplicados em uma linha real de 138 kV da Cemig.

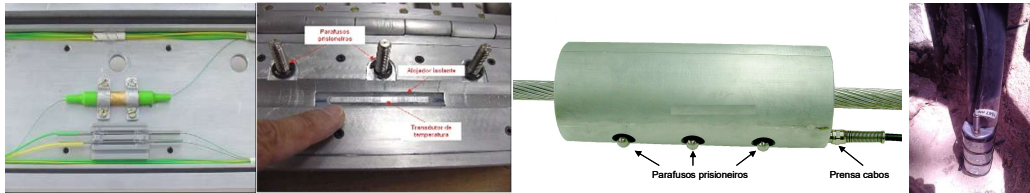


FIGURA 9 - Construção dos transdutores dos sensores de vibração e temperatura em condutores e cabos.

6.3 Medição da integridade física de condutores

O colapso ou rompimento de condutores, tanto em alta quanto em média tensão, pode ter consequências danosas se ocorrer em áreas com algum tipo de uso indevido da faixa de segurança dessas redes de energia elétrica. Este é um problema clássico e sem solução plausível no setor elétrico mundial. As premissas definidas para o problema da identificação de condutor rompido, em tempo real, são as seguintes: i) o sistema deve ser rápido o suficiente para operar antes do relé de proteção atuar, isto é, evitar o indesejável religamento automático com condutor rompido, e ii) compartilhar na mesma fibra óptica canais de monitoramento para os serviços tradicionais de telecomunicações. O princípio de operação do sistema é baseado na medição da potência refletida dos dispositivos espelhos de fibra óptica instalados nas fibras ópticas dentro da caixa de emendas ópticas. A interrupção da energia da luz refletida causada por qualquer dano nas fibras ópticas embutidas em condutores OPPC (10) será detectada pelo terminal CWDM. A FIGURA 10 ilustra essa representação de forma simplificada. Em caso de confirmação de rompimento do condutor OPPC, o SCADA não realiza o religamento automático dessa linha, e essa informação é obtida em alguns milissegundos, mesmo antes da tomada de decisão da proteção atuar ou não. Essa é outra grande vantagem da tecnologia óptica, isto é, a velocidade de detecção é proporcional à velocidade do deslocamento da luz no núcleo da fibra óptica.

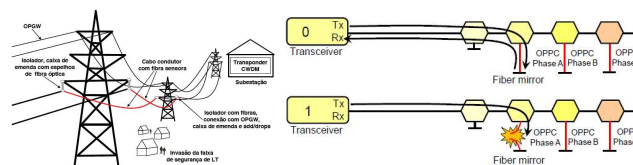


FIGURA 10 - Representação da falha do link óptico dentro condutor tipo OPPC.

6.4 Sistema Óptico de Monitoramento por Câmeras Alimentadas por Fibra Óptica

As concessionárias de energia elétrica convivem com o uso indevido das faixas de segurança de linhas de transmissão. Nessas regiões não existe infraestrutura de energia elétrica disponível para excitar uma câmera digital convencional. Esse cenário foi um dos motivadores para o uso da fibra óptica nessa nova função. A câmera de vídeo é fixada na torre da linha e a transmissão do sinal de vídeo é feita por uma fibra óptica pertencente a um cabo OPGW ("Optical Ground Wire") ou a um condutor OPPC, que fazem parte da representação hipotética mostrada na FIGURA 11. Este sistema permite a transmissão de sinais de vídeo por até 10 km de enlace óptico. Nenhuma bateria é utilizada junto à câmera remota. A transmissão de vídeo feita pela micro câmera tem modulação do tipo FM, sem prejuízo na qualidade da imagem. Dessa forma, os sensores poderiam ser instalados em locais a diferentes distâncias da central de monitoramento sem necessidade de ajustes das intensidades dos sinais recebidos, devido ao fato da modulação FM utilizar a técnica de portadora suprimida, retirando o sinal de vídeo NTSC como sub-portadora transmitida pelo laser. Em relação ao consumo de energia elétrica, os circuitos eletrônicos apresentaram consumo inferior a 0,5 W de potência óptica para sua completa operação de forma a possibilitar o uso da técnica "PoF – Power over Fiber", ou alimentação pela fibra óptica.

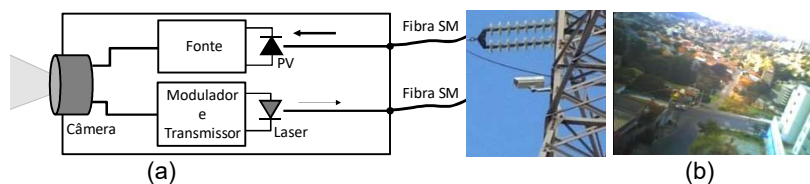


FIGURA 11 - (a) Camera PoF circuito eletro/óptico e (b) teste de campo na LT Bonsucesso – Gutierrez, 138 kV

6.5 Outras aplicações com fibras ópticas sensoras.

A tecnologia de sensoriamento óptico por meio da técnica de interferometria (11)-(13) é aplicada em cabos de fibras ópticas convencionais para a detecção imediata de tentativas de intrusões físicas em qualquer perímetro de instalações críticas, conforme mostra um exemplo na FIGURA 12. A tecnologia é aplicada por meio de um equipamento interrogador de luz utilizando laser, que transforma o cabo de fibra óptica em um microfone distribuído de altíssima sensibilidade. A fibra óptica, tal como um microfone, capta as assinaturas de vibração da superfície em que está instalada e um software permite traduzir essas vibrações e diferenciar ameaças de intrusões dos demais eventos irrelevantes, tais como: vento, chuva, ruído de veículos, etc.

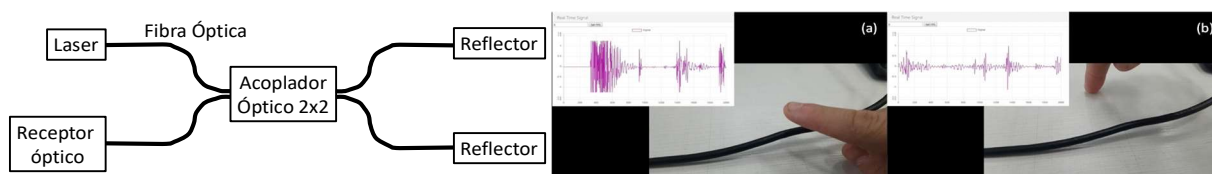


FIGURA 12 - Demonstração do esquema (esquerda) e da sensibilidade (direita) do sistema de intrusão: (a) sinal detectado quando toca-se o cabo óptico e (b) sinal detectado quando toca-se uma estrutura distanciada do cabo.

7.0 SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO DOS SISTEMAS OPTICOS EM UMA USINA TERMELÉTRICA

7.1 Fibras ópticas para uso em altas temperaturas.

As fibras ópticas à base de sílica sem revestimento podem suportar temperaturas superiores a 1000 °C. No entanto, estas fibras precisam ser protegidas do meio ambiente. As fibras para telecomunicações são normalmente revestidas com acrilato, que permite seu uso em temperaturas de até 85 °C. As fibras ópticas especiais podem ser produzidas com revestimento de poliimida, o que permite que essas fibras ópticas sejam utilizadas em ambientes a temperaturas de até 300 °C. Este tipo de fibra tem sido amplamente utilizado na indústria de petróleo e gás para propiciar comunicação e funções de sensoriamento para o gerenciamento de reservatórios. Para temperaturas acima de 300 °C, os revestimentos de metal, tais como cobre, alumínio ou mesmo ouro, podem ser atraentes. Mas, fibras recobertas com metal podem apresentar atenuação extra. Esta atenuação extra é atribuída às microcurvaturas e à grande incompatibilidade dos coeficientes de expansão térmica entre o revestimento de metal e a fibra de vidro. De uma forma geral estão disponíveis os revestimentos de fibras ópticas conforme as faixas de temperatura de acordo com a 0.

TABELA 3 – Família de materiais de revestimento de fibras ópticas em função da temperatura do meio.

Material	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)
Acrilato	-40 °C	+85 °C
acrilato de alta temperatura	-40 °C	+150 °C
Silicone	-40 °C	+180 °C
Poliimida	-190 °C	+385 °C
Alumínio	-269 °C	+ 400 °C
Ouro	-269 °C	+ 700 °C

7.2 Simulação de aplicação rede óptica didática em planta de Usina Termelétrica.

A FIGURA 13 apresenta uma proposta, num contexto didático, para aplicação de redes ópticas na supervisão e controle de uma planta industrial de Usina Termelétrica.

i) Supervisão e Controle	ii) Plantas Ópticas na Usina Termelétrica	iii) Linhas e Redes Sinérgicas
--------------------------	---	--------------------------------

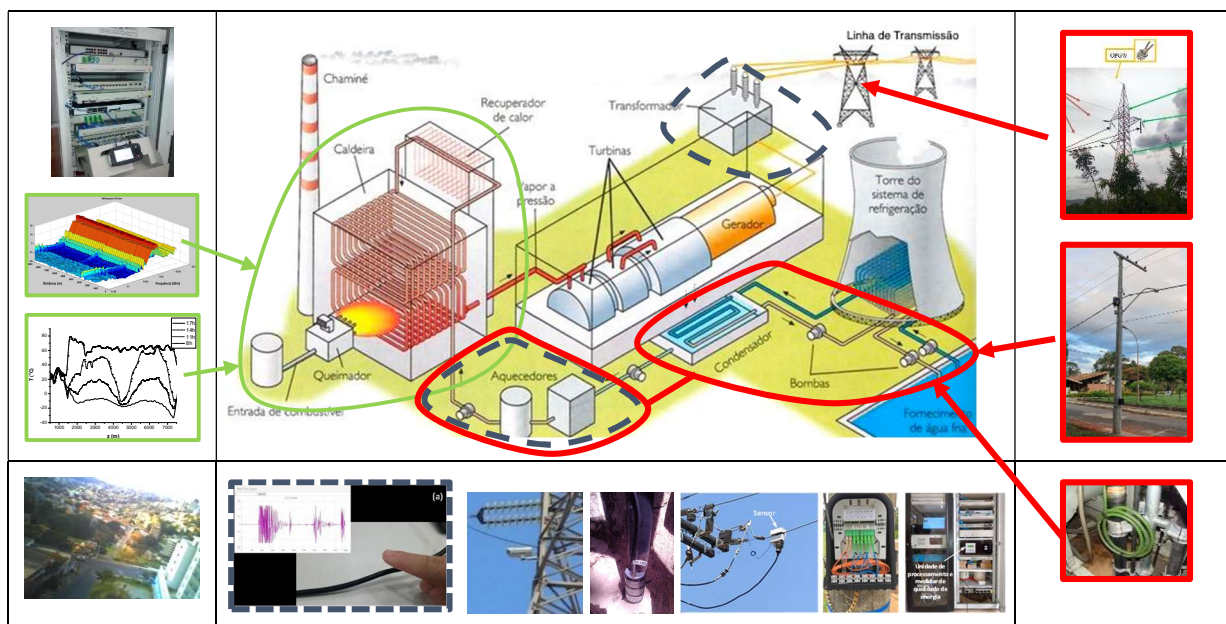


FIGURA 13 - Diagrama teórico de uma usina termelétrica com amplo monitoramento via redes ópticas.

Três dimensões básicas são exploradas, a saber: i) Supervisão e controle das redes ópticas; ii) os equipamentos e sensores das redes ópticas de sensoriamento, e iii) o legado das Linhas e Redes Sinérgicas para formação das redes híbridas com adição da transmissão de dados simultânea. Propositadamente, a FIGURA 13 mistura, na sua representação didática, as redes de energia elétrica com as redes de fluidos e as redes de comunicação de dados, por meio de uma infraestrutura compartilhada e em sinergia. Isso é a essência do conceito das Linhas e Redes Sinérgicas. Outros destaques que emergem da FIGURA 13 são as diversas possibilidades em que as redes da planta industrial de uma Usina Termelétrica podem ser colaborativas entre si. Como por exemplo, uma rede elétrica sinérgica, com fibras ópticas integradas, no limite de contorno ou em qualquer área interna da planta industrial, torna-se um importante sistema de sensoriamento óptico contra intrusões. Essa mesma rede sinérgica, com fibras ópticas sensoras, pode conectar-se a outras redes ópticas para medição de temperaturas e deformações pela técnica DTSS, ao longo de todos os sistemas da planta industrial. Da mesma forma, com a agregação e generalização de redes sinérgicas de energia elétrica e fluidos com transmissão de dados simultâneos, forma-se o conceito da Usina Termelétrica Sinérgica.

8.0 CONCLUSÃO

Este artigo apresenta um leque de tecnologias de sensoriamento óptico aplicado junto ao conceito de Linhas e Redes Sinérgicas em T&D, que motivam novas aplicações desse conceito para as Usinas Termelétricas no Brasil. A presença de fibras ópticas integradas aos condutores de energia elétrica abre novas possibilidades para as redes de monitoramento em "Smart Grid" (como compartilhamento de infraestrutura e melhoria no monitoramento amplo das redes de energia elétrica e de fluidos) na geração, transmissão e na distribuição, com seus diversos sistemas e equipamentos de proteção, manobra e medição. Pode-se, além disso, reduzir drasticamente tentativas de invasões cibernéticas na planta industrial em campo, dentre tantas outras vantagens agregadas à tecnologia óptica.

Um breve resumo com as principais variáveis de uma planta de usina termelétrica foi apresentado, com destaque para as necessidades de medição de temperatura, vazão, pressão, corrente, tensão, deformação, etc., em diversas partes da planta industrial. Nesse contexto, as medições em ambiente industrial de uma termelétrica irão requerer sensores e fibras ópticas especiais para operar em elevada temperatura, o que é um excelente escopo para um programa de pesquisa e desenvolvimento para o Brasil. Finalmente, o objetivo desse artigo foi atingido quando uma planta industrial hipotética de uma usina termelétrica com amplo monitoramento via redes ópticas foi concebida de forma didática, utilizando diversas técnicas e tecnologias de sensoriamento óptico já disponíveis no mercado. Dessa forma, com a agregação e generalização de redes sinérgicas de energia elétrica e de fluidos com transmissão simultânea de dados, é proposta a formação do conceito de Usina Termelétrica Sinérgica.

9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Nascimento, C.A.M., Penze, R.S., Floridia, C., Rosolem, J.B., Hortencio, C.A., Dini, D.C., Elias K. Tomiyama, E.K. Redes Sinérgicas: Uma nova concepção tecnológica para a integração de fibras ópticas e cabos condutores

- de energia elétrica; XI Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos (SIMPASE); 16 a 19/ago/2015; Campinas-SP.
- (2) Nascimento, C.A.M., Coelho, Vítor F.; Obara, V.F.; Yoshida, L.S.; Dellallibera, F.T.; A., Hortencio, C.A.; Aires, B.N.; Rosolem, J.B.; Dini, D.C.; Aguiar, J.G.D.; Peres, R.; Floridia, C.; Penze, R.S. e Fracaroli, J. P. V. Desenvolvimento da Rede Sinérgica Experimental utilizando Cabos Condutores de Energia Elétrica com Fibras Ópticas Integradas; IX CITENEL Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, agosto de 2017-João Pessoa -PB.
- (3) Projeto P&D ANEEL PD-4950-0520/2014; Sistema óptico de monitoramento da integridade física de cabos de linhas de transmissão em vãos críticos; CEMIG Distribuição S/A; Entidade executora: CPQD; 2014.
- (4) Projeto P&D ANEEL / CEMIG D0613, CEMIG D566 Continuidade Fase II: Desenvolvimento de redes sinérgicas para aplicações em redes de distribuição de energia; CEMIG Distribuição S/A; Entidade executora: CPQD e Balestro; 2018.
- (5) Projeto de P&D: D382 "PA - Sistema óptico para sensoramento distribuído de temperatura e tensão mecânica de LT aéreas e subterrâneas"; ANEEL PD-382-Programa 2010; 'Proponente: CEMIG D'; 'Executora: Fundação CPQD;
- (6) Valiati, A. S. e Mendes Junior, O. F. Modelagem e simulação da usina termelétrica de viana visando o diagnóstico termodinâmico, UFES – 2013;
- (7) "CWDM Technology, Standards, Economics & Applications". Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.195.9690&rep=rep1&type=pdf>. "NGCP: Informal settlers hamper transmission line projects". Disponível em: <https://www.rappler.com/business/industries/173-power-and-energy/101137-ngcp-informal-settlers-transmission-lines>.
- (8) SFF Committee, "INF-8074i Specification for SFP (Small Form factor Pluggable) Transceiver", Rev 1.0, 2001.
- (9) "Wavelength multiplexing (WMD) for electricity utilities", CIGRE Publication Ref. TB 131, 2011.
- (10) Huang, Y. and Zhu, Y. "Application of Optical Phase Conductor in Smart Grid Construction," 2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2020, pp. 702-706, doi: 10.1109/ITAIC49862.2020.9338858.
- (11) Griffiths, B. "Development in and applications of fibre optic intrusion detection sensors," Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers 29th Annual 1995 International Conference, p. 325-330, 1995
- (12) Szustakowski, M.; Ciurapinski, W.; Palka, N. and Zyczkowski, M. "Recent development of fiber optic sensors for perimeter security", Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Proceedings, p. 158-162, 2002
- (13) Allwood, G.; Wild, G. and Hinckley, S. "Optical fiber sensors in physical intrusion detection systems: A review," IEEE Sensors J., vol. 16, no. 14, pp. 5497–5509, Jul. 2016.
- (14) Bassan, F., Rosolem, J.B., Floridia, C., Aires, B., Peres, R., Aprea, J., Nascimento, C.A.M., Fruett, F. Power-over-Fiber Smart Sensor Fully-Connected in a Hybrid Fiber/Power Distribution Cable; The 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2021); Online; Japan; Apr. 19 - 22, 2021.
- (15) Martins, M. de C. O. Usina Termelétrica. Cola da Web, 2021. Disponível em: <https://www.coladaweb.com/geografia/fontes-de-energia/usina-termoeletrica>. Acesso em: 10/out/2021.

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) JOSEMIR COELHO SANTOS. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo, mestrado em Engenharia Elétrica pela USP, doutorado em Engenharia Elétrica pela The University Of Tokyo e Livre Docente pela USP. É Professor Associado junto ao Depto. de Eng. de Energia e Automação Elétricas da EPUSP. Tem experiência nas áreas de Sistemas Elétricos de Potência e Circuitos Elétricos, Magnéticos e Eletrônicos, atuando em pesquisa, desenvolvimento e inovação principalmente nos temas: sistemas energéticos inteligentes, alta tensão, automação, metrologia, instrumentação eletrônica e óptica, fotônica aplicada, sensores a fibras ópticas, medidas ópticas, sensores eletro-ópticos por efeito Pockels, sensores magneto-ópticos por efeitos Faraday e magneto-estrictivos.

(2) CARLOS ALEXANDRE MEIRELES DO NASCIMENTO. Engenheiro de TECNOLOGIA da Cemig D. Doutor em Engenharia Elétrica pela UFMG (2009), com graduação e mestrado em engenharia mecânica. Experiência em Engenharia de Energia Elétrica, com ênfase em Inovações, atuando: monitoramento de ativos GTD, projetos de linhas e redes, ampacidade, fibras ópticas, condutores especiais, supercondutores. Atua nos estudos de tecnologias emergentes, tais como: Energias Alternativas; Hidrogênio; Robótica Aplicada; Digitalização; Redes Inteligentes e Eletrificação. Premiação: Prêmio Cigre Internacional Distinguished Member Awards 2020; Paper Award Japão 2021 em Tecnologias Ópticas; 1º. Prêmio Mineiro de Inovações e outros prêmios internacionais e nacionais. Possui 15 registros de patentes, marcas e softwares no INPI.

(3) JOÃO BATISTA ROSOLEM. Concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo em 2005. Atualmente é pesquisador do CPQD. É líder técnico do laboratório LSMO (Laboratório de Sensoramento e Monitoração Óptica) do CPQD. Suas áreas de atuação em sensoramento são: dispositivos de fibras ópticas, sensores de fibra óptica, sensores para sistemas de energia Elétrica. Desde 2020 coordena o grupo de trabalho

Low Power Instrument Transformers (LPIT) do CIGRE Brasil. É bolsista de Produtividade e Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora do CNPq - Nível 1D. Em 2021 foi nomeado como Embaixador do CPQD.

(4) RIVAEI STROBEL PENZE. É doutor em Engenharia Elétrica pela UNICAMP desde 2016. É pesquisador da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD). Suas áreas de atuação são: IoT, Comunicações ópticas, Sensores de fibra óptica (Power over Fiber, Fiber Bragg Grating, Distributed Temperature Sensing, Bending fibers). Já participou de mais de 20 projetos de pesquisa e desenvolvimento, tem participação em mais de 27 artigos em periódicos. Ele possui mais de 8 registros de softwares, mais de 10 pedidos de patentes no Brasil. É também Bolsista de Produtividade Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora do CNPq - Nível 2.

(5) MARCIO REZENDE SINISCALCHI. Engenheiro Eletricista pela Unifei desde 1978 e com mestrado em engenharia nuclear pela COPPE. Trabalhou no comissionamento da usina nuclear de Angra 1 e depois como engenheiro de testes e manutenção eletromecânica em motores, geradores, disjuntores, barramentos, turbogeradores. Foi secretário e coordenador do comitê de máquinas rotativas do Cigre Brasil. Atualmente trabalha no grupo de extensão da vida útil da usina de Angra 1 pela Fundação Pátria.