



## **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

### **MONITORAMENTO ESTRUTURAL DE GRANDES ESTRUTURAS CIVIS**

**CARLOS ALEXANDRE MEIRELES DO NASCIMENTO(1);JOÃO BATISTA ROSOLEM(2);RODRIGO PERES(2);RIVAEEL STROBEL PENZE(2);HERMES CARVALHO(3);CLAUDIO ANTONIO HORTENCIO CEMIG(1);CPQD(2);UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS(3)**

#### **RESUMO**

Os desafios das empresas de geração de energia elétrica, pelas extensas e complexas estruturas civis das barragens das usinas hidrelétricas, passam principalmente, por iniciativas de aumento de eficiência e segurança operacional. Esse artigo explora a técnica de sensores ópticos distribuídos - DTSS "distributed temperature and strain sensor", que fisicamente está correlacionado aos efeitos Raman e Brillouin presentes na onda de luz, no núcleo de fibras ópticas. A simulação da monitoração de uma barragem nova e/ou em modernização/reforma, de usinas hidrelétricas, por meio de uma rede interna de sensores ópticos distribuídos em fibras ópticas será apresentada.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Usinas hidrelétricas, barragens, monitoramento em tempo real, tecnologia óptica e sensoriamento óptico distribuído.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Os desafios das empresas de geração de energia elétrica para operar, no mercado regulado do sistema elétrico brasileiro, passam por iniciativas de aumento da segurança e eficiência operacional com atualização tecnológica junto aos seus ativos. Com uma rede de usinas de geração hidráulica abrangendo diversas bacias hidrográficas no Brasil, as empresas de geração de energia elétrica devem gerenciar uma extensa base de ativos do sistema elétrico, com diversas instalações de SEP até as suas estruturas civis, que são extensas e complexas junto às barragens das usinas hidrelétricas. De fato, o monitoramento dessas barragens já é feito com tecnologias de sensores convencionais (1), mas se torna um desafio para novos projetos e ou projetos de renovação, conceber e operar em tempo real um sistema de monitoramento mais amplo e mais eficiente junto a esses importantes ativos. A história recente no Brasil tem mostrado acidentes com barragens de rejeitos, do setor de mineração, que geram fatos novos e requerem atenção científica especial dos engenheiros de grandes estruturas civis, como também é o caso do setor de barragens de usinas de energia elétrica. Com o objetivo de propor sistemas de monitoramento para sistema complexo de barragem esse artigo irá explorar, de forma didática, a técnica em sensores ópticos distribuídos, os quais podem ser inscritos ou acoplados em redes de fibras ópticas modificadas em sua constituição (interna ou externa) para modular a luz e obter essa funcionalidade sensora (2). Sendo que, as fibras ópticas podem conservar, em alguns casos, sua utilização primordial para comunicação de dados em alta velocidade, sendo uma função adicional de comunicação das informações entre o transdutor até central de interrogação que podem estar distantes, sem nenhuma interferência externa. Em geral, as técnicas de monitoramento distribuído podem levar a um novo patamar tecnológico as atividades das equipes de engenharia de gestão de ativos do setor de energia elétrica.

Aplicados aos setores de linhas e redes elétricas, avanços notáveis em sensoriamento óptico estão em pleno desenvolvimento, nas últimas duas décadas, com destaques importantes para a oportunidade de monitoramento ao longo das extensas linhas e redes de energia elétrica, subterrâneas ou aéreas (3) (4). Nesse contexto, a técnica óptica distribuída de monitoração continua vem sendo desenvolvida para viabilizar a medição de variações da temperatura e força mecânica ao longo de grandes extensões de redes, a saber, da ordem de quilômetros. Esta técnica baseia-se na monitoração óptica de efeitos não lineares que são sensíveis a variações de temperatura e deformação mecânica que ocorrem no interior de fibras ópticas, as quais podem ser incorporadas à parte interna de cabos ou implantadas ao longo de seu exterior, mas também podem estar alojadas e fixadas em partes estratégicas das grandes estruturas civis. Devido às diversas aplicações possíveis dos sensores chamados de "distribuídos a fibra óptica", esse artigo apresentará os conceitos básicos e didáticos dos sistemas ópticos DTSS, como forma de disseminar o conhecimento sobre o uso dessa técnica. Dessa forma, serão apresentados casos reais de monitoramento óptico DTSS em usinas hidrelétricas internacionais. E por último, uma simulação de como poderia ser a monitoração ampla por meio de uma rede interna de sensores ópticos distribuídos em fibras ópticas, seja para um projeto novo e/ou na modernização/reforma, de usinas hidrelétricas em operação no Brasil.

## 2.0 - MOTIVAÇÃO

Para a segurança nas barragens de usinas hidrelétricas é necessário controlar sua integridade física por meio de extensas estruturas civis e, consequentemente, permitir operar esse complexo ativo para geração de eletricidade por meio hidráulico. Geralmente, isto já é feito com monitoração contínua de alguns parâmetros que apontam informações sobre as condições estruturais e deformações de projeto das barragens. É conhecido que as técnicas de sensoriamento por fibras ópticas permitem a monitoração de toda a extensão de uma estrutura de grande porte, como é o exemplo da barragem de uma usina hidrelétrica (5)(6), mas como também, é o caso do monitoramento dos condutores ao longo de grandes extensões de linhas aéreas (7). As técnicas de monitoração óptica em fibra sensora permitem medições de temperatura, deformação mecânica ou força e as vibrações mecânicas, de forma distribuída por meio da variação de alguns parâmetros ópticos correlacionados às grandezas físicas de interesse. Ressalta-se que a tecnologia óptica distribuída de sensoriamento representa o estado da arte a nível mundial, e que atualmente é possível identificar várias possibilidades de uso desses sistemas de monitoramento em tempo real, conforme será brevemente apresentada nesse artigo algumas aplicações, que objetiva também motivar a sua aplicação em barragens de usinas hidrelétricas no Brasil.

## 3.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DTSS

O sistema interrogador do DTSS, como transdutor de sensor óptico de deformação mecânica, será apresentado de forma resumida nesse artigo. A partir da técnica conhecida como BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) (8). Esse sistema foi desenvolvido pelo CPQD em parceria com a Cemig por meio do projeto P&D Aneel (9). O DTSS é composto basicamente por uma fonte elétrica, sistema de lasers para viabilizar a técnica BOTDA, circulador óptico e receptor, conforme mostra a FIGURA 1. 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", pelo efeito Raman.

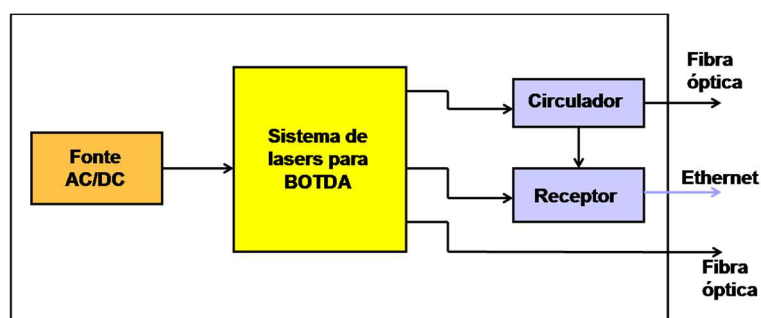


FIGURA 1 - Diagrama esquemático do interrogador DTSS.

### 3.1 - Sistema de laser para BOTDA ou DTSS

O sistema de laser é composto por um gerador de pulsos ópticos de alta potência, um laser de prova de emissão contínua e outro de baixa potência com um dispositivo utilizado para medir a diferença de comprimento de onda entre esses dois lasers e informá-la ao receptor, conforme está representado na FIGURA 2. O gerador de pulsos ópticos de alta potência opera a cerca de 3 dB. O sistema de bombeamento desenvolvido para o sensor de deformação foi projetado de modo a ser o responsável pela geração do espalhamento Brillouin, presente no interior da fibra óptica sensora. Sendo assim, ele é composto por laser de alta coerência e estabilidade, que emite em modo pulsado ou que possibilite modulação externa. O laser de alta coerência é responsável pela geração de espalhamento Brillouin Stokes e anti-Stokes, que são fundamentais para o interrogador DTSS interpretar as grandezas físicas relacionadas nas medições. Um gerador de pulsos ajustado em 200 ns e com taxa de repetição de até 10 kHz, é utilizado para atuar em um modulador eletro-óptico, responsável por gerar os pulsos ópticos. O laser pulsado tem sua potência amplificada por meio de um EDFA (potência média = 60 mW) para gerar espalhamento Brillouin na fibra óptica sensora. O gerador de pulsos elétricos possibilitou a geração de pulsos com até 10 ns de duração (limite físico do sensor Brillouin) e ajuste de frequência da ordem de kHz. Este laser é incidido na fibra óptica monomodo, por meio de um circulador óptico. Um segundo laser sintonizável, de potência mais baixa é incidido na fibra óptica no sentido contra-propagante. Este segundo laser deve ser escolhido de modo a possibilitar a sintonia fina de comprimentos de onda, com passos de cerca de 5 a 10 MHz, pois isto somado à estabilidade dos lasers proporciona a resolução na medição da deformação e temperatura por meio do DTSS. Inicialmente, a diferença de frequência de emissão entre os dois lasers utilizados deve ser de 10,88 GHz, a partir desse valor são investigados cerca de 2 GHz para mais e para menos. As variações de frequência realizadas ao longo das medições são obtidas por meio de

detecção óptica coerente. Toda variação realizada é medida por meio do medidor de diferença de frequências, e esta informação é fornecida para o receptor.

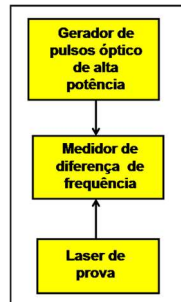


FIGURA 2 - Diagrama esquemático do sistema de lasers para BOTDA utilizado no interrogador DTSS.

### 3.2 - Receptor

No sistema de sensoriamento baseado em BOTDA ou DTSS, o receptor é desenvolvido de modo a obter medições da intensidade proveniente do espalhamento Brillouin por unidade de comprimento de fibra óptica, para cada valor de diferença de frequência ajustada entre os lasers, conforme já foram descritos anteriormente. O sistema de detecção da intensidade óptica por posição da fibra óptica tem os requisitos típicos da montagem de um equipamento OTDR, ou seja, consiste de um fotodetector seguido por um sistema de amplificação com largura de banda da ordem de 100 MHz, que possibilita resolução espacial de até 1 m, e com capacidade de monitorar potências mais elevadas do que no caso do espalhamento Raman, ou seja, valores de potência de retorno variam de 0 a -20 dBm. A forma de onda do espalhamento Brillouin exibe um perfil de ganho quando ocorre ressonância e, apesar, da intensidade ser elevada o sinal é muito ruidoso. O sinal obtido é resultante da média de 1024 curvas. São necessárias centenas de formas de onda a cada leitura do meio sensoriado, o que consome um processo computacional para atingir a resolução requerida para a medição. A informação referente à diferença de frequência obtida por meio de detecção coerente é enviada ao processador juntamente com as informações de forma de onda para cada frequência.

### 3.3 - Sistema de controle

Entende-se por sistema de controle as etapas de aquisição de dados e processamento de sinais. Em geral o sistema de programação desempenha as tarefas de controle de potência e sintonia dos lasers, aquisição da medida de diferença de frequência entre eles, controle do osciloscópio utilizado na aquisição, armazenamento dos dados em memória, e finalmente, o processamento dos sinais. Somente com a automatização do sistema de medição é possível realizar a aquisição dos dados. A FIGURA 3 apresenta um interrogador DTS para exemplificar partes dos componentes eletrônicos e ópticos.

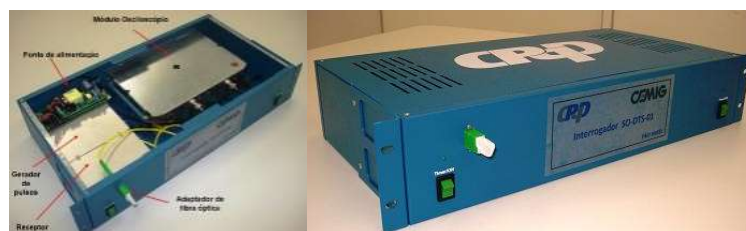


FIGURA 3- Partes internas do interrogador DTS montadas em caixa de 19" e sua vista frontal.

### 3.4 - Resultados obtidos em laboratório a partir do sensor BOTDA ou DTSS

Utilizando o esquema da montagem experimental já descrita do DTSS foi realizado ensaio de tração simulando as condições de operação de um cabo/cordão óptico sujeito à deformação mecânica. Os experimentos foram realizados no laboratório de tração de cabos ópticos do CPQD. Este laboratório dispõe de um vão de teste de 25 m de comprimento, com equipamentos adequados para provocar deformação de até 3% do comprimento de cabo/fibra teste, sendo que este valor é o máximo suportado pela estrutura mecânica da fibra óptica sensora. Com auxílio de bobinas de tração foi possível aumentar a extensão total do vão de teste por meio de várias passagens do cabo/fibra em teste. Nesse caso, foram utilizadas 6 passagens, o que resultou em um vão de 150 m. A FIGURA 4 apresenta as instalações que foram mobilizadas no CPQD para realização dos testes e o vão de teste com o cordão óptico disposto em 6 voltas. Com o objetivo de assegurar que as variações de amplitudes medidas por meio do sensor

BOTDA ou DTSS, foi obtida a curva de perda óptica pelo OTDR, quando o cordão estava em situação de repouso, ou seja, sem presença de nenhum esforço à fibra óptica do cabo. Verificou-se assim, que todo o lance óptico apresentava boa integridade, tendo sido observados apenas as variações esperadas onde havia emendas ópticas, conforme mostra a FIGURA 5.

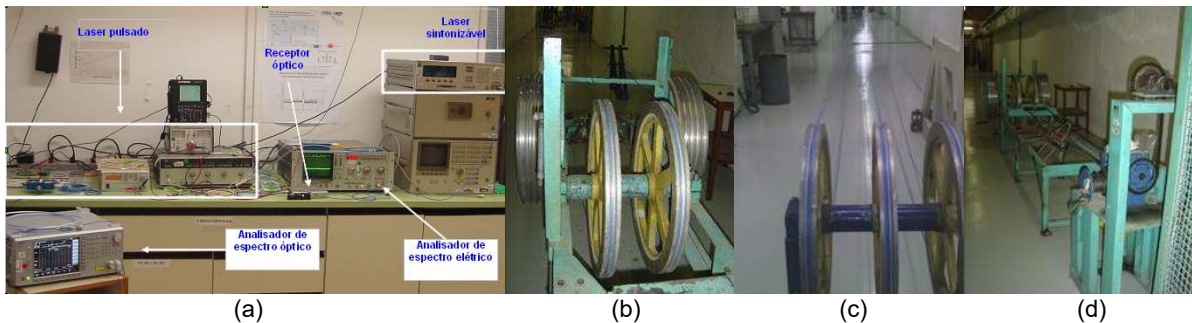


FIGURA 4 - (a) Sistema aquisição e (b) (c) bobinas de apoio acopladas à máquina de tração e (d) dispositivo de tração de cabos e fibras ópticas (9).

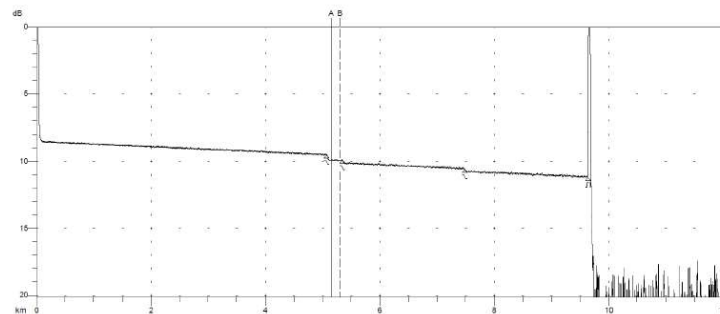


FIGURA 5 - Traço OTDR do lance óptico utilizado no ensaio de tração. O trecho selecionado pelos cursores A e B corresponde aos 150 m submetidos à tração.

Na sequência deu-se início a aquisição dos dados de deformação utilizando o sensor BOTDA ou DTSS. Conforme já explicitado, as medições do sensor de deformação BOTDA ou DTSS provêm de 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. Dessa forma, os dados obtidos dão origem à uma figura tridimensional que contempla essas três informações. A FIGURA 6 apresenta os resultados obtidos a partir das formas de onda medidas para três situações distintas: (a) quando não há deformação aplicada; (b) quando a deformação aplicada é de 150 mm e (c) para deformação de 300 mm.

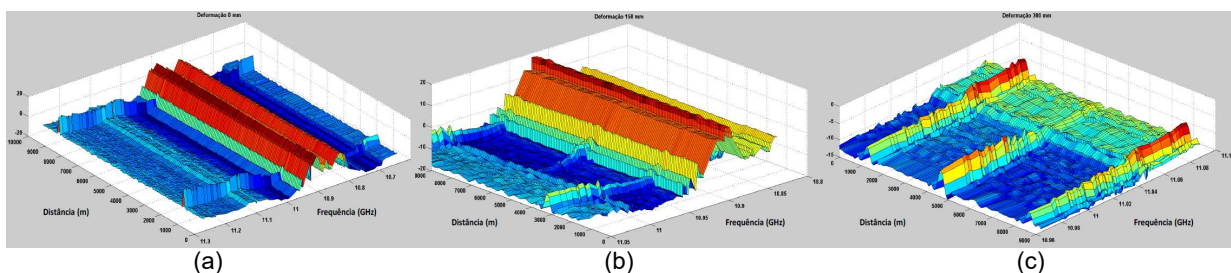


FIGURA 6 - Intensidade de espalhamento Brillouin em função da diferença de frequência e da posição na fibra óptica, sendo (a) fibra óptica sem deformação, (b) com 150 mm deformação e (c) com 300 mm deformação.

Os mapas de intensidade devem ser analisados levando-se em conta a intensidade medida, a posição e o valor da frequência associada. Na FIGURA 6(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 não há tração aplicada no cabo óptico, nesse caso. Por outro lado, na FIGURA 6(b) (c) verificam-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.

#### 4.0 - O ESPALHAMENTO BRILLOUIN

Os trabalhos baseados na utilização da amplificação Brillouin para a aplicação em sensoriamento distribuído tiveram início na década de 90 com o trabalho de T. Horiguchi (10) (11) (12) e X. Bao (13). Diferentemente do que ocorre no espalhamento Raman, o espalhamento Brillouin é gerado em um comprimento de onda muito próximo ao do feixe de bombeamento (cerca de 10 GHz) de modo que é necessário implementar técnicas de detecção para que as modificações nesse efeito sejam mensuráveis. A técnica BOTDA - *Brillouin Optical Time Domain Analysis* - teve um grande impacto no meio científico pois fornecia um método melhor de se medir perda óptica em fibra óptica, baseado na reflectometria óptica dedicada ao espalhamento Brillouin. Ela consiste em incidir um feixe laser modulado em amplitude com potência ligeiramente elevada em uma das pontas da fibra, esse laser é dito de bombeamento pois ele é responsável por gerar espalhamento Brillouin no meio. Simultaneamente, é incidido um outro laser na extremidade oposta da fibra em um comprimento de onda específico. Este segundo laser, geralmente opera em sistema de emissão contínua e sofre um ganho a medida em que percorre a fibra óptica, conforme representado esquematicamente na FIGURA 7(a). O sinal amplificado é medido no sentido contra-propagante ao laser de bombeamento em uma configuração semelhante ao sinal de um OTDR, via detecção direta. Outra técnica utilizada em sistemas baseados em espalhamento Brillouin é a BOTDR - *Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*. A técnica BOTDR é baseada em sistema de detecção coerente a qual é utilizada para discriminar o espalhamento Brillouin do espalhamento Rayleigh, que acompanha o feixe. Nesse caso também são utilizados dois laser, no entanto, o laser que opera em regime de emissão contínua é incidido diretamente sobre um fotodetector apropriado onde é gerado um fenômeno conhecido como batimento de luz. A representação esquemática da técnica BOTDR é apresentada na FIGURA 7(b). Tanto no sistema BOTDA quanto no BOTDR o laser contra-propagante deve ser sintonizável em comprimento de onda. Assim, para cada trecho de fibra óptica que for perturbado haverá um respectivo comprimento de onda do laser sintonizável que sofrerá ganho. Portanto, haverá uma forma de onda para cada comprimento de onda de interesse do laser, de modo que se construirá um mapa de temperatura ou deformação para a fibra óptica sensora, conforme apresentado na FIGURA 7(c).

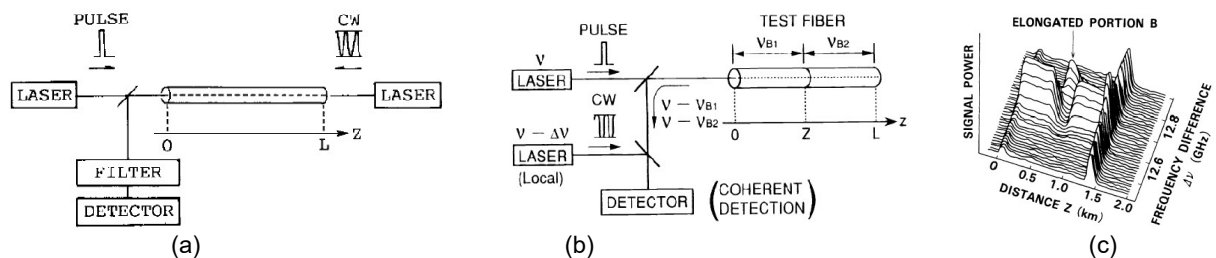


FIGURA 7 - (a) Representação esquemática do sistema BOTDA (10), (b) do sistema BOTDR (12) e (c) mapa 3D de deformações provocado na fibra óptica, medido por BOTDA.

#### 5.0 - APLICAÇÃO DE SENSOREAMENTO ÓPTICO DISTRIBUÍDO EM GRANDES ESTRUTURAS CIVIS

A tecnologia de sensores ópticos distribuídos estão em operação desde décadas passadas (6) com soluções para monitoramento estrutural amplo da indústria de petróleo e gás, e também, para a indústria de monitoramento de barragens. Isso envolve basicamente um sistema optoeletrônico de instrumentação e o cabo óptico sensor, que não se tem registros da fabricação desse tipo de cabo sensor óptico no Brasil ainda, infelizmente. Conforme já destacado, o sensoriamento distribuído se beneficia do fato de que as características de reflexão da luz do laser, trafegando por uma fibra óptica, variam com a temperatura e a força presente ao meio. O cabo sensor consiste em um canal de fibra óptica de telecomunicações padrão, que está perfeitamente, alojado e solidário, a uma cobertura de proteção externa resistente, que proporciona a reprodução dos esforços externos desse cabo sensor para o núcleo da fibra óptica interna. No mercado existem diversos equipamentos ópticos distribuídos que pode medir a temperatura do meio com uma resolução de  $0,01^\circ\text{C}$  em uma distância de até 10km com uma resolução espacial de apenas 1m (um sensor de temperatura a cada 1m). Nesse mesmo contexto, é possível medir a deformação ou a força com uma resolução de  $10\text{ }\mu\text{e}$ , independentemente da temperatura do meio, em até 10km com a mesma resolução espacial de 1m. Isso quer dizer, em tese, ter até 10 Mil sensores distribuídos de, temperatura e força, ao longo de um único cabo sensor óptico de 10km. Por outro lado, com uso de portas ópticas o canal desse equipamento pode varrer vários cabos opticos sensores, de forma sequencial, atingindo até centenas de km de redes ópticas para monitoramento.

##### 5.1 – A construção do cabo sensor em fibra optica

Conforme literatura, o cabo sensor mais utilizado, pode contém 4 fibras opticas, sendo 2 x fibras monomodo e 2 x fibras multimodo, conforme mostra a FIGURA 8. Esse cabo sensor tem fibras ópticas convencionais de telecomunicações de baixo custo e duração estimada em 30 anos ou mais. O desafio do desenvolvimento desse cabo sensor óptico é que ele deve suportar forças extremas que ocorrem durante a concretagem e/ou compactação na fase de construção da barragem, e ainda, permitir a medição em tempo real dos deslocamentos e os movimentos ao longo do ciclo de vida dessas grandes estruturas. O projeto do cabo sensor mostrado na FIGURA 8, a título de



exemplo prático, utiliza as propriedades exclusivas do Kevlar, tais como, resistente, leve, flexível e fácil instalação. Ao redor do Kevlar está uma camada de poliuretano que fornece a camada de bloqueio de água. Durante a fabricação desse cabo óptico sensor uma camada de poliuretano é aplicada sob condições de vácuo, o que une de forma perfeita as camadas, não deixando ocorrer deslocamentos relativos entre elas, que resulta em um excelente cabo sensor óptico para medições de deformações mecânicas.

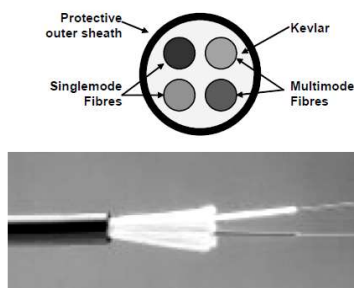


FIGURA 8– Característica construtiva de um cabo sensor óptico distribuído (6).

## 5.2 - Monitoramento de estruturas em fase de construção

Na busca de referências de trabalhos com aplicação de DTSS, em grandes estruturas civis, a empresa Sensornet, em conjunto com a Cementation Foundations Skanska e a Universidade de Cambridge, instalaram cabos sensores ópticos junto as fundações do Bankside-123, em Londres em 2004 (6). O objetivo dessa instalação foi monitorar os efeitos do carregamento estrutural, de longo prazo para O&M, mas já monitorando os esforços de cura do concreto, na fase de construção das estacas da fundação. A FIGURA 9 apresenta registros originais desse projeto, o que conclui que o tempo de cura do concreto foi medido e que os sensores continuaram operando após esse período.

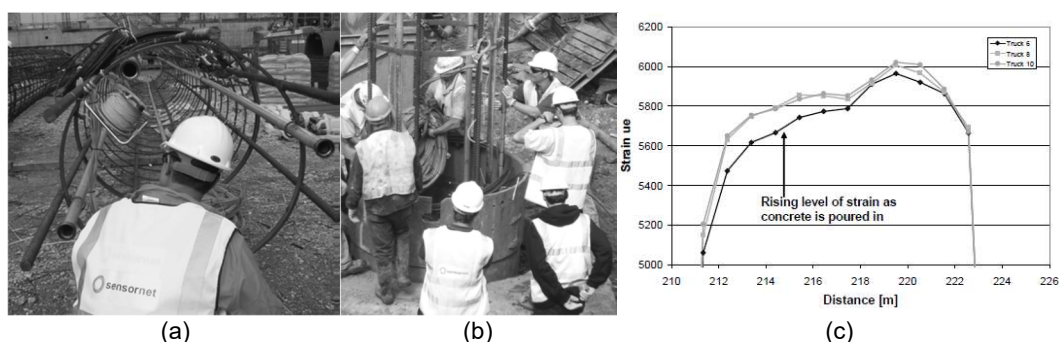


FIGURA 9 – (a) Característica da preparação, (b) instalação de cabo sensor óptico e (c) resultados da cura em uma fundação de concreto (6).

## 6.0 - TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

### 6.1 - Tecnologias convencionais

Diversos projetos para monitoramento de barragens são encontrados na literatura técnica (1). Em geral, os sistemas de monitoramento utilizam tecnologia de sensoramento por meio de algum tipo de transdutor mecânico, em que um sinal elétrico, convertido em sinal digital, se correlaciona com a grandeza física de interesse. Isso requer uma infraestrutura de fornecimento de alimentação elétrica e de canal de comunicação dos dados, no ponto de sensoramento, o que nem sempre é sempre trivial de ser feito em grandes estruturas. Interferências externas e constantes queimas dos sensores tendem a diminuir a robustez desses sistemas. As partes principais que formam as usinas hidrelétricas, tais como: barragem de compactação do solo, barragem de concreto e a eclusa podem atingir uma distância territorial de vários km. Sejam as leituras realizadas de forma manual e/ou parte automática, o trabalho é dispendioso de recursos. Outro problema apresentado por esse tipo de tecnologia é o custo unitário de cada ponto de monitoramento, por não ser possível escalar essas redes, e principalmente, pela dificuldade de instalação dos sensores às condições específicas das barragens.

### 6.2 – Tecnologias ópticas discretas

Por outro lado, acompanhando a rápida evolução tecnológica que os meios de comunicação e meios de TIC sofreram nos últimos anos, a tecnologia de monitoramento de ativos sendo adaptada para trabalhar em plataformas digitais de comunicação e processamento de dados, em tempo real, de forma a tornar a sua aplicação comercial sustentável

em CAPEX e OPEX dos equipamentos de monitoramento e de comunicação (3). Nesse contexto, a utilização de sensores ópticos para o monitoramento de diversas grandezas físicas tem se apresentado como uma tecnologia promissora para diversos setores industriais, e com aplicações em Usinas Hidrelétricas (14). No caso do setor elétrico, os sensores ópticos possuem grandes vantagens em relação aos sensores elétricos, pelo fato do elemento óptico sensor ser um dielétrico natural, o que o torna ideal para instalações em alta tensão. E também, em estruturas de grande extensão como são as barragens de hidrelétricas essas características dos sensores ópticos podem ser exploradas. Devido a seu tamanho reduzido permite a construção de sensores compactos e de baixo peso, além de possuir a capacidade de enviar e receber sinais ópticos em grandes distâncias e forma passiva.

### 6.3 - Tecnologias ópticas distribuídas

Um amplo programa de monitoramento de barragens, usando DTSS, são realizados desde 1999 (6). A HydroResearch Sam Johansson AB Ltda e a Sensornet instalaram sensores em ópticos em dezesseis barragens de aterro na Suécia, usando diferentes técnicas de instalação, tais como: incorporação do cabo sensor dentro da barragem (em novas construções); na parte superior em alguma elevação da barragem (reformas); ou em qualquer parte externa da barragem (em operação). Nessas condições, com o cabo sensor óptico instalado solidário à barragem, tem-se correlação com as infiltrações, relacionadas à temperatura (15) e as deformações que são medidas continuamente. Um exemplo desse comportamento pode ser observado na FIGURA 10. O objetivo dessa aplicação foi demonstrar e comparar as medições feitas entre o nível do reservatório cheio e o nível baixo. Uma comparação das duas medições mostradas na FIGURA 10(b) explicita que existe algum tipo de correlação entre as deformações da barragem, causada pelos diferentes níveis de água do reservatório. O que de fato, torna esse resultado muito promissor para o uso da técnica DTSS, em barragens.

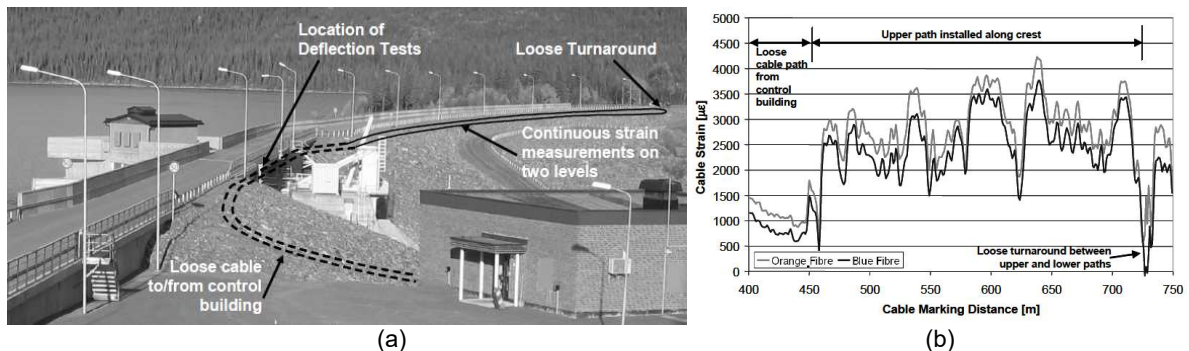


FIGURA 10– (a) Instalação de dois cabos sensores ópticos dentro da crista da barragem e (b) resultados obtidos pelos dois cabos sensores.

## 7.0 - SIMULAÇÃO DE DTSS EM USINAS HIDRELÉTRICAS

### 7.1 - Usinas em fase de projeto

A FIGURA 11 explora uma representação didática apenas, de uma barragem tradicional, de como poderiam ser os locais de instalação dos cabos sensores ópticos para realizar um amplo monitoramento estrutural por meio da técnica DTSS. Conforme já foi mencionado, a possibilidade de uso de diversas redes em cabos sensores ópticos é factível e uma das grandes vantagens DTSS. Nesse caso hipotético da FIGURA 11 seriam até 10 redes cobrindo as três principais partes da barragem, isto é: 4 cavas na face externa, 3 cavas na face interna e 3 cavas na parte interna da estrutura. Dessa forma, qualquer anomalia além das condições prevista em projeto, detectada por meio das leituras de temperatura e de esforço/deslocamento pelo DTSS podem ser detectadas por diversos sensores distribuídos pelas fibras ópticas ao longo da barragem. Assim, no planejamento e projeto de novas usinas é recomendado considerar o uso da tecnologia DTSS, em conjunto com a execução da fase de obras.

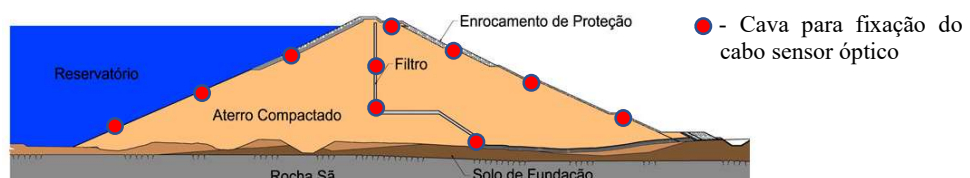


FIGURA 11– Representação de uma seção de uma barragem com aplicação de N cavas para fixação dos ramais de cabos sensores ópticos.

### 7.2 - Usinas hidrelétricas em operação, reforma e/ou manutenção

Diversos problemas para monitoramento em tempo real de barragens em usinas hidrelétricas, em operação, estão bem relatados na literatura técnica (1). Nesse contexto, buscando uma alternativa viável utilizando a técnica DTSS,

é possível estimar assim: i) utilizar um sistema interrogador DTSS com apenas um canal de 10 km de alcance óptico, ii) um chaveador óptico de até 10 posições, e iii) um cabo sensor óptico para DTSS com até 10 km de extensão. Nessa configuração clássica seria possível realizar o monitoramento das 5 maiores usinas hidrelétricas do Brasil, conforme mostra a TABELA 1. Dessa forma, com apenas 5 sistemas DTSS idênticos, na sua configuração clássica, poderia monitorar a soma de 41 GW de potência instalada, no Brasil. Apesar de ser uma análise simplificada ainda, a possibilidade de uso do DTSS em usinas em operação é motivadora pelos ganhos já descritos pela adoção da tecnologia óptica. Claro que, para lançar todas as cavas mostradas na FIGURA 11 não é uma ação trivial, que irá requer soluções inovadoras para isso. Outro desafio é difundir o uso da tecnologia óptica como elemento sensor e meio de comunicação em redes inteligentes, algo que irá demandar muitos esforços das academias e ICTs na formação de mão de obra especializada e da indústria na fabricação de sistemas nacionais. Por exemplo, por ainda não temos registros da fabricação do cabo sensor óptico para DTSS no Brasil. Isso eleva o custo da aquisição da tecnologia no mercado internacional e é uma forte restrição ao uso da tecnologia em países em desenvolvimento.

**TABELA 1** - Informações básicas das cinco maiores Usinas Hidrelétricas do Brasil.

Usina hidrelétrica	Potência instalada (MW)	Largura média barragem (km)	Altura (m)	Início de operação
Itaipu - Binacional	14000	7	196	1984
Belo Monte	11233	5,1	88	2016
Tucuruí	8535	11	78	1984
Jirau	3750	6	93,5	2013
Santo Antônio	3568	0,31	49,5	2012

## 8.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma visão geral do estado da arte em sistemas de monitoração de temperatura e deformação mecânica utilizando técnica de sensores distribuídos em fibras ópticas - DTSS, levando em consideração a evolução histórica com aplicações práticas desses sensores, que utilizam espalhamento Brillouin para tal finalidade. Foram também apresentadas, a título didático e motivador, algumas noções básicas e teóricas com montagens experimentais dos aparatos utilizados para a caracterização do espalhamento Brillouin.

A tecnologia DTSS em comparação com outras tecnologias se destaca pela sua capacidade de medir de forma independente, temperatura da deformação do meio, em até vários km de um único lance de fibra óptica. Nesse contexto, é possível medir a deformação ou a força com uma resolução de 10  $\mu\epsilon$ , independentemente da temperatura do meio, em até 10km com a mesma resolução espacial de 1m. Isso quer dizer, em tese, ter até 10 Mil sensores distribuídos de, temperatura e força, ao longo de um único cabo sensor óptico de 10km. Por outro lado, com uso de portas ópticas o canal desse equipamento pode varrer vários cabos ópticos sensores, de forma sequencial, atingindo até centenas de km de redes ópticas para monitoramento.

A tecnologia de sensoriamento de fibra óptica distribuída mostra ser uma tecnologia emergente para o monitoramento estrutural de grandes estruturas, como o caso de fundações, em barragens e em grandes extensões de linhas de transmissão, em função dos ganhos da plataforma óptica, tais como: o cabo sensor óptico é imune aos efeitos de ruídos externos para ter uma medição correta dos sensores e apropriado para estar solidamente fundido às grandes estruturas civis, seja como uma fundação de concreto ou junto a barragem. Mas, uma característica importante da digitalização do setor de energia, é ter uma rede de sensores distribuídos e fechada por meio de fibras ópticas, o que eleva a segurança e dificultam os ataques cibernéticos, nesses importantes ativos, de geração de energia elétrica.

Devido a seu tamanho reduzido permite a construção de sensores compactos e de baixo peso, além de possuir a capacidade de enviar e receber sinais ópticos em grandes distâncias e forma passiva, a utilização de sensores ópticos DTSS para o monitoramento de diversas grandezas físicas tem se apresentado como uma tecnologia promissora para diversos setores industriais, e com algumas aplicações em Usinas Hidrelétricas, principalmente no exterior. No Brasil, existem aplicações embrionárias ainda, mas esse artigo mostrou um grande potencial de aplicação da tecnologia em DTSS nos ativos de geração de energia elétrica.

Outro desafio é difundir o uso da tecnologia óptica como elemento primordial de redes inteligentes, algo que irá demandar muitos esforços das academias e ICTs na formação de mão de obra especializada e da indústria na fabricação de sistemas nacionais, com esse tipo de tecnologia. Como por exemplo, por ainda não temos a fabricação do cabo sensor óptico DTSS no Brasil, isso tende a elevar o custo da aquisição dessa tecnologia no mercado internacional e ser uma forte restrição ao uso da tecnologia em países em desenvolvimento. Mas temos em abundância grande conhecimento na área de fônica e óptica, que são as universidades e ICTs do Brasil. A interseção desse recurso primordial, com a necessidade de expansão das redes inteligentes das empresas de geração de energia elétrica, pode alavancar uma importante parceria para junto aos parques hidráulicos de geração de energia elétrica no Brasil.



## 9.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) José Antonio Jardini, Luiz Carlos Magrini, Bruno Luis Soares de Lima, Delson Torikai, Ricardo Cury Ibrahim, Júlio Cesar Pinfari e Edvaldo Fábio Carneiro. M – Monitoramento de Barragens - January 2010 - Conference: IEEE/PES 2010 Transmission & Distribution Conference and Exposition Latin America At: São Paulo Volume: Anais do IEEE/PES2010
- (2) M. Niklès, L. Thevenaz, P. A. Robert. "Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis," Optics Letters, v. 21, pp. 758-760, 1996.
- (3) Nascimento, C.; Rosolem, J.; Hortencio, C.; Dini, D.; Obara, L. The First Generation of Synergic Overhead Transmission Lines Network. In Proceedings of the CIGRE-IEC 2019 Conference on EHV and UHV (AC & DC), Hakodate, Hokkaido, Japan, 23–26 April 2019.
- (4) J. B. Rosolem - CPQD, Brazil "Optical system for broadband data transmission concomitant to monitoring the physical integrity, Cigre Paris Session 2018, SC-B2, August 2018, Paris, France.
- (5) Dr. Daniele Inaudi Eng. Régis Blin, Monitoring dams with distributed fiber optic sensing - Switzerland Switzerland
- (6) R. J. KLUTH and D. A. WATLEY - Utilising Dam Monitoring Technology for Monitoring Structural Behaviour of Foundations - SensorNet Ltd, 198 Providence Square, Jacob Street, London SE1 2DZ, UK
- (7) Y. Huang and Y. Zhu, "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.
- (8) K. Y. Song, S. Yang. "Simplified Brillouin optical time domain sensor based on direct modulation of a laser diode," Optics Express, vol. 18, pp. 24012-24018, 2010.
- (9) Projeto de P&D: D382 "PA - Sistema óptico para sensoriamento distribuído de temperatura e tensão mecânica de LT aéreas e subterrâneas"; ANEEL PD-382-Programa 2010; 'Proponente: CEMIG D'; 'Executora: Fundação CPQD;
- (10) T. Horiguchi, M. Tateda; BOTDA - Nondestructive Measurement of Single Mode Optical Fiber Attenuation Characteristics Using Brillouin Interaction: Theory. Journal of Lightwave Technology 7, 8, 1989.
- (11) T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima, M. Tateda, Y. Koyamada; Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering. Journal of Lightwave Technology 13, 7, 1995.
- (12) T. Horiguchi, T. Kurashima, Y. Koyamada; Measurement of Temperature and Strain by Brillouin Frequency Shift in Silica Optical Fibers. in Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensor, Proceedings of Spie, Vol 1797, 1992.
- (13) X. Bao, J. Dhlwayo, N. Heron, D. J. Webb, D. A. Jackson; Experimental and Theoretical Studies on a Distributed Temperature Sensor Based on Brillouin Scattering. Journal of Lightwave Technology 13, 7, 1995.
- (14) Marcus Vinícius F. Santana, Augusto Cezar M. Gregatti, Gilson M. Carvalho, Guilherme Muniz, Fernando, Pertile, Gerson L. Amadeo, João B. Rosolem, Rivaél S. Penze, Claudio Floridia, Claudio A. Hortencio, Danilo C. Dini, Bruno N. Aires, Fabio R. Bassan, Claudinei Martins, Rodrigo A. Morbach, Eduardo F. da Costa, Rodrigo Peres, Luis Fernando P. Melegari e Gustavo Silva Siqueira - Sistema de Monitoração Multiparamétrico para Barragens de UHEs - IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IX CITENEL).
- (15) Liliane R. Marconcini<sup>1</sup>, Roberto D. Machado, Luiz A. de Lacerda and Markus Aufleger - Monitoring structures with optical fibers: infiltration detection - Anais da Academia Brasileira de Ciências (2018) 90(2): 1865-1872 (Annals of the Brazilian Academy of Sciences) Printed version ISSN 0001-3765 / Online version ISSN 1678-2690 <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201820170144> [www.scielo.br/aabc](http://www.scielo.br/aabc) | [www.fb.com/aabcjournal](http://www.fb.com/aabcjournal)

## 10.0- DADOS BIOGRÁFICOS



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.

- |     |                 |         |
|-----|-----------------|---------|
| (2) | JOÃO<br>BATISTA | ROSOLEM |
|-----|-----------------|---------|
- 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 Sensoriamento e Monitoração Óptica) do CPQD. Suas áreas de atuação em sensoriamento 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.

(3) RODRIGO PERES  
Possui graduação em Engenharia Física pela Universidade Federal de São Carlos (2011). Atualmente, cursa mestrado na Faculdade de Tecnologia na Unicamp, e é pesquisador da Fundação CPQD, atuando em projetos de P&D para o setor elétrico no desenvolvimento de sensores ópticos para o monitoramento e supervisão de linhas de transmissão, subestações e em barragens de usinas hidrelétricas, também é um dos responsáveis pelos ensaios ópticos no laboratório de homologação de cabos ópticos. Tem experiência na área de Física, com ênfase em redes de sensoriamento óptico, desenvolvimento de software na plataforma LabVIEW e projetos mecânicos utilizando ferramenta computacional SolidWorks.

(4) RIVAEEL STROBEL PENZE  
Rivael 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) HERMES CARVALHO  
HERMES CARVALHO concluiu seu doutorado em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais em 2015 e pós-doutorado na UPorto em 2020. É PROFESSOR ADJUNTO do Departamento de Engenharia de Estruturas (UFMG). Atua principalmente nas seguintes linhas de pesquisa: Pontes, Ferrovias, Fadiga, Dinâmica de Estruturas, Estruturas de Aço e Mistas de Aço e Concreto, Estruturas de Linhas de Transmissão de Energia e Estruturas OffShore. Participa ativamente da elaboração de normas técnicas, para a ABNT, coordenador de projetos de pesquisa e consultor de projetos especiais de engenharia em aço e mistas: CEMIG, VALE, VLI, MRS, DNIT, ARCELLOR, USIMINAS

(6) CLAUDIO ANTONIO HORTENCIO  
Mestrando pela FT Unicamp - Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, graduado em Tecnologia em Eletrônica Industrial pela UNISAL. Pesquisador de Telecomunicações com atuação no desenvolvimento de tecnologias para a planta óptica de telecomunicações e sensores ópticos. Trabalhou na Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CPQD de 1984 até 2020. Atuou no desenvolvimento de dispositivos e acessórios para a rede externa de telecomunicações. Desenvolveu trabalhos de pesquisa e coordenação de projetos na área de sensores ópticos à fibra para o setor de energia. Atualmente atua como consultor independente em infraestrutura de redes ópticas.