



**XXII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GLT/26
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

SOMLS - SISTEMA ÓPTICO DE MONITORAMENTO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS

**Maurissone Ferreira
Guimarães(*)
Cemig Distribuição
Claudio Antonio Hortencio
Fundação CPqD**

**Carlos Alexandre M.
Nascimento
Cemig Distribuição
Eduardo Ferreira da Costa
Fundação CPqD**

**Caio Cesar dos Reis
Fundação CPqD
João Batista de M. Ayres
Neto
Fundação CPqD**

RESUMO

Este trabalho apresenta uma solução de monitoramento da temperatura em cabos isolados subterrâneos de distribuição de energia elétrica. O sistema monitora a variação de temperatura, no revestimento externo do cabo, por meio de sensores de grade de Bragg em fibra óptica (FBG), que refletem comprimentos de onda dependentes da mudança de temperatura. O sinal óptico que carrega estes comprimentos de onda passa por um interrogador de sensores FBG e, com o auxílio de um software, calcula a ampacidade dos cabos em tempo real. Neste artigo é descrita a solução para sensoriamento da temperatura, e apresenta alguns resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Cabo subterrâneo, Cálculo da ampacidade, Monitoramento de temperatura, Monitoramento óptico, Sensor FBG.

1.0 - INTRODUÇÃO

A crescente demanda pelo serviço de energia elétrica gera a necessidade recorrente de construção e reforços no sistema de distribuição, seja pelo lado de redes de distribuição de MT/BT, sejam pelas linhas de subtransmissão e subestações em tensões de 69 e 138 kV. A solução convencional com utilização de redes e linhas aéreas tem impacto estético negativo e são susceptíveis às árvores e instalação de terceiros, o que as torna mais sujeitas a falhas. Em relação às linhas aéreas nas tensões de 69 ou 138 kV, existem restrições ainda maiores dado a necessidade de implantação de faixa de passagem. Uma alternativa às redes aéreas, principalmente nos grandes centros urbanos, é a utilização de cabos subterrâneos de energia (1)(CORREA, 2009, p. 01).

Os sistemas subterrâneos são praticamente invisíveis à sociedade, de modo que se tornam mais atrativos no que diz respeito à estética e à segurança. Apesar de apresentarem maior custo de implantação, em média 10 vezes mais que uma rede aérea, as redes subterrâneas apresentam menor susceptibilidade às interferências externas, menor frequência de manutenções, aumento da segurança da população e dos equipamentos da rede, maior confiabilidade e disponibilidade para o fornecimento de energia elétrica.

Cabos condutores empregados em sistemas subterrâneos de energia devem ser capazes de operar por

(*) Av. Barbacena, 1200 - 20º andar - Ala A2 - CEP 30190-131 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil – Brasil
Tel: (+55 31) 3506-2130 – Email: mauris@cemig.com.br

30 anos de maneira confiável. Contudo, condutores subterrâneos de sistemas de potência estão expostos a estresses de origem elétrica, mecânica e térmica durante a operação, os quais podem reduzir a vida útil ou mesmo danificar o isolamento do cabo. Qualquer dano sofrido pelo cabo resulta na degradação do isolamento, ocorrência de descargas parciais e, por fim, na ruptura do isolamento (2)(YILMAZ, 2006, p. 148-155).

A temperatura suportada pelo material isolante e pelo próprio cabo são fatores limitantes para a temperatura máxima de operação e, por conseguintes, do limite de corrente e potência permissíveis. O isolamento do cabo pode suportar diferentes temperaturas dependendo da duração e da intensidade da corrente circulante nos condutores. Sistemas subterrâneos operando em temperaturas acima dos limites tolerados provocam a redução da vida útil dos cabos (3)(SENSORTAN, 2009, p. 01).

A falta de sistemas de monitoramento da temperatura de operação dos cabos faz com que o sistema de energia elétrica tenha, em alguns casos, a sua capacidade subutilizada, uma vez que a temperatura de operação pode estar muito abaixo dos limites tolerados (4)(FURTADO, 2008, p. 02).

O sensoriamento ao longo do cabo subterrâneo de energia possibilitará o monitoramento em tempo real da sua temperatura de operação permitindo, com isso, a utilização plena da sua capacidade dentro dos limites de segurança, mantendo a vida útil estimada na fase de projeto da linha e prevenindo a ocorrência de falhas. A aplicação de um sistema de monitoramento viabiliza a otimização das instalações existentes e um planejamento mais apurado da expansão (novas linhas), resultando em benefícios econômicos para a concessionária.

A escolha da tecnologia empregada para monitorar a temperatura do cabo subterrâneo depende do tipo de instalação que deverá ser monitorada. Em instalações de redes de distribuição de energia subterrâneas, onde toda extensão do cabo é acessível, como em galerias, é possível fixar a fibra óptica no seu revestimento externo ao longo de toda sua extensão. Para este tipo de instalação, tem sido empregado o uso do sistema de monitoramento distribuído de temperatura (*Distributed Temperature Sensing* – DTS). O sistema de DTS mede a temperatura no revestimento externo do cabo subterrâneo através da variação da componente anti-Stokes do espalhamento Raman na fibra óptica decorrente da interação entre o feixe de luz incidente e as impurezas presentes na fibra. Outra aplicação do sistema DTS é em linhas subterrâneas novas, sendo que o cabo já é construído com uma fibra óptica integrada. Para o legado das redes subterrâneas, ou seja, aquelas já construídas, e com acesso aos cabos restrito, uma opção é o monitoramento discreto e pontual. Neste tipo de monitoramento são identificados alguns pontos críticos para instalação ao longo do cabo. Para tanto, este trabalho apresenta um sistema óptico para monitorar em tempo real a ampacidade de sistemas subterrâneos de energia elétrica. A ampacidade é a capacidade máxima que um cabo condutor tem em conduzir corrente elétrica, determinada a partir da capacidade de dissipação de calor do cabo para o ambiente externo. Desse modo, para evitar o superaquecimento dos condutores, um conhecimento mais apurado da ampacidade dos cabos é exigido (4)(FURTADO, 2008, p. 02).

O sistema descrito no presente artigo é composto, basicamente, por: (i) interrogador óptico, (ii) uma rede de sensores ópticos de temperatura, (iii) um sistema de aquisição de dados e (iv) um sistema computacional. Os dados coletados pelos sensores de temperatura, estrategicamente distribuídos ao longo do cabo subterrâneo, serão analisados e correlacionados para a determinação da condição do carregamento elétrico da instalação, isto é, a ampacidade em tempo real.

Uma solução viável e de baixo custo para o sensoriamento da temperatura nos cabos subterrâneos é a utilização de sensores de grade de Bragg em fibra óptica - FBG. Para tal, os sensores serão acoplados diretamente ao cabo subterrâneo utilizando um encapsulamento que poderá ser utilizado em cabos de diferentes diâmetros. Os dados obtidos pelos sensores serão utilizados para a determinação da ampacidade do cabo subterrâneo.

Algumas soluções analíticas e aproximações numéricas são empregadas para calcular a ampacidade do cabo. As duas principais associações internacionais de padrões técnicos de engenharia, a IEEE e a IEC, adotaram os métodos analíticos como base para seus padrões. As aproximações numéricas são principalmente baseadas em técnicas de elementos finitos, que são mais adequadas para o cálculo da ampacidade devido à geometria dos cabos (5)(LEON, 2005, p. 01). Qual solução utilizamos?

2.0 - DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A solução óptica contempla três sensores FBG em cada fase da linha subterrânea, estrategicamente localizados. A Figura FIGURA 1 mostra a montagem da instalação dos sensores FBG's nos cabos subterrâneos de distribuição de energia. Em uma das extremidades foram instalados os sensores FBG, S_1 , S_2 e S_3 , sendo um em cada fase da linha, formando a primeira seção de monitoramento. Estes

sensores refletem, respectivamente, os distintos comprimentos de onda 1, 2 e 3. A segunda seção de monitoramento, localizada em uma região intermediária dos cabos subterrâneos, é composta pelos sensores S_4 , S_5 e S_6 , que também refletem, respectivamente, os comprimentos de onda 1, 2 e 3. E a terceira seção de monitoramento, localizada na outra extremidade dos cabos subterrâneos, é composta pelos sensores S_7 , S_8 e S_9 , que também refletem, respectivamente, os comprimentos de onda 1, 2 e 3. As três fibras de cada sensor da seção de monitoramento são concentradas em uma caixa de emendas e seguem, por uma única fibra, até os canais ópticos, CH_1 , CH_2 e CH_3 . Os três comprimentos de onda 1, 2 e 3, provenientes de cada seção de monitoramento, trafegam na fibra óptica sem que os sinais interfiram entre si.

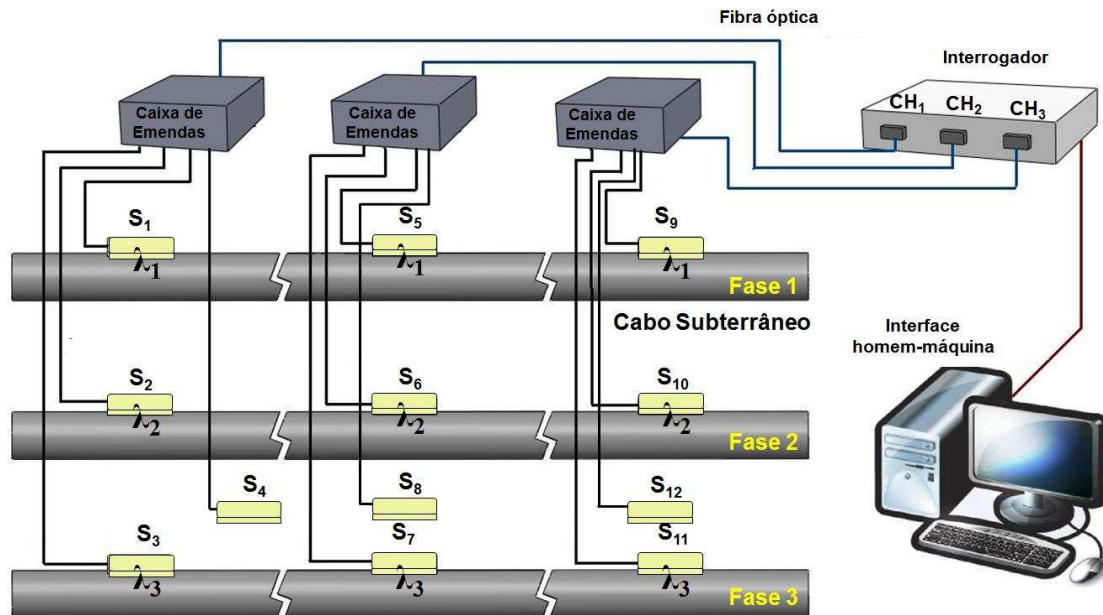


FIGURA 1: Montagem do sistema de monitoramento.

2.1 Sensor FBG

Uma grade de Bragg é uma estrutura óptica criada a partir de uma fibra óptica em que o índice de refração do núcleo da fibra é incrementado e modulado com um período Λ . A modulação do índice de refração é induzida pela exposição da fibra a um padrão de interferência formado por feixes de luz ultravioleta que se interferem ou usando a técnica de máscara de fase (6)(LEE, 2006, p. 431-434).

As aplicações que utilizam sensores FBG, geralmente, usam uma fonte de luz de espectro largo que abrange todos os sensores. Deste modo, apenas uma fração da fonte de luz em sintonia com a grade FBG é refletida e o complemento é transmitido.. Esse comprimento de onda é denominado de comprimento de onda de Bragg, λ_B , e é dado pela equação:

$$\lambda_B = 2n_{ef} \Lambda \quad (1)$$

onde n_{ef} é o índice de refração efetivo e Λ é o período de modulação da grade de Bragg.

Na Figura FIGURA 2 é apresentada uma fibra óptica com a estrutura representativa de uma grade de Bragg. É possível observar nesta ilustração os espectros para os feixes incidente, transmitido e refletido. A luz refletida tem o comprimento de onda de Bragg, λ_B .

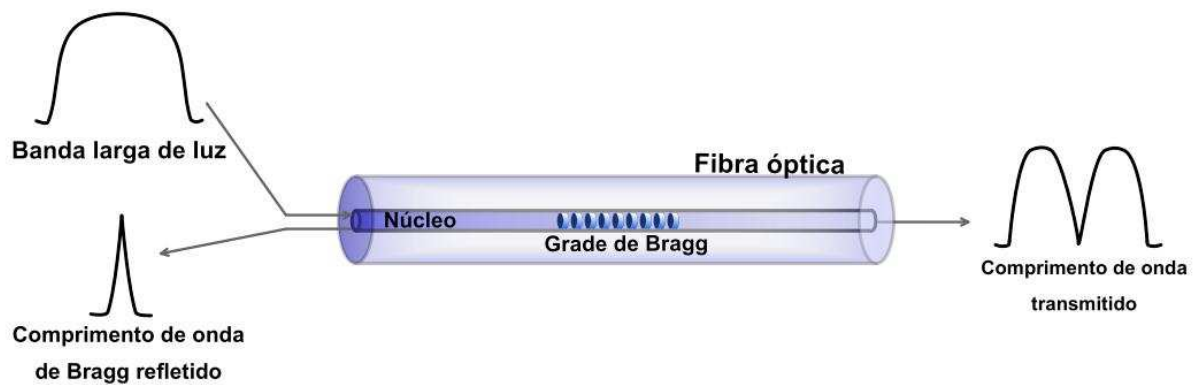


FIGURA 2: Estrutura da fibra com grade de Bragg.

A grade de Bragg é sensível a deformação mecânica e a variação de temperatura, portanto, qualquer mudança destes parâmetros causam deslocamento no comprimento de onda de sintonia da grade FBG, λ_B , resultante da mudança no período da grade e/ou da mudança do índice de refração. Comparados com os sensores elétricos, os sensores ópticos apresentam características específicas como: completa imunidade à interferência eletromagnética (*Eletromagnetic Interference – EMI*), total isolamento galvânico, possibilidade de realizar sensoriamento remoto, realização de medidas distribuídas, medidas utilizando sensores passivos, acesso em ambientes exíguos (baixo peso e pequenas dimensões) e excelente largura de faixa, tornando-o ideal para ser aplicado no setor elétrico que apresenta um ambiente de operação agressivo (7)(ALLIL, 2010, p. 03-11).

Os sensores de temperatura escolhidos para este projeto trabalham na banda próxima a 1550 nm e, para que não ocorra sobreposição dos comprimentos de onda dos sensores, foi respeitado um espaçamento entre os comprimentos de onda centrais dos sensores, para operação na faixa de temperatura de 0 a 100°C. O equipamento responsável pela detecção da variação do comprimento de onda é o interrogador de sensores ópticos.

2.2 Interrogador de Sensores Ópticos FBG

O interrogador de sensores é um equipamento utilizado para medir a variação do comprimento de onda (λ) nas FBG's, causada pela dilatação/contração da fibra óptica, no caso discutido neste artigo, devido à variação da temperatura. Constituem o interrogador: um módulo analisador de espectro óptico (Optical Spectrum Analyzer - OSA), uma fonte de luz banda larga ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) com EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*), um circulador óptico e uma chave óptica utilizada para medir vários canais.

2.3 Software

O interrogador óptico necessita de uma interface com um software para fazer a aquisição dos dados. O software desenvolvido, na plataforma *LabView*[®], neste trabalho tem a função de encontrar os valores de picos do comprimento de onda refletido por cada sensor FBG e, a partir destes dados, calcular os seus respectivos valores de temperatura que, posteriormente, são manipulados por uma estrutura fuzzy que realiza a inferência da variação da amplitude.

2.4 Empacotamento mecânico dos sensores

Para garantir a segurança física e a robustez do sistema óptico de medição, o sensor e o cordão óptico do sensor foram encapsulados por um sistema mecânico especialmente desenvolvido para o projeto. Em geral, os cabos subterrâneos apresentam distintos diâmetros especificados de acordo com o projeto da linha. Deste modo, o sistema de empacotamento é dividido em duas partes, sendo que uma delas é substituível de acordo com o diâmetro do cabo subterrâneo.

Para monitorar a temperatura do revestimento externo do cabo subterrâneo de distribuição de energia, o sensor FBG é mecanicamente empacotado e fixado ao cabo como mostra a Figura FIGURA 3. A rede de sensores se comunica, via fibra óptica, com o sistema de aquisição de dados, e o interrogador que estará na SE distante do ponto de monitoramento.

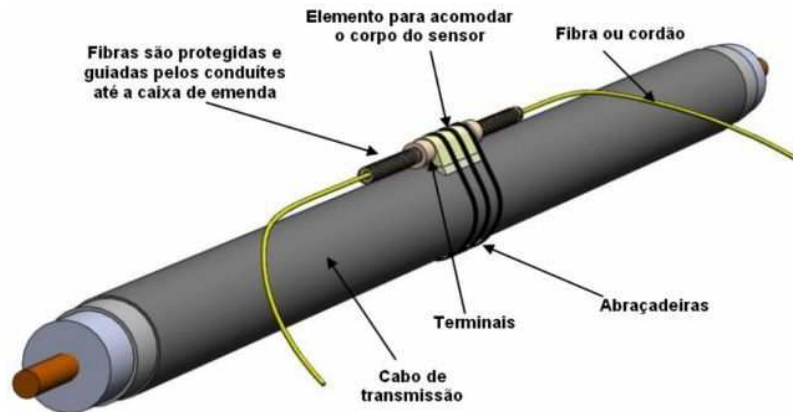


FIGURA 3: Sistema de encapsulamento geral – Simulação de instalação no cabo de distribuição.

2.5 Calibração dos sensores

Os sensores FBG, antes de serem avaliados em teste, foram calibrados em uma câmara climática, com temperatura controlada, para verificação do comportamento com a variação de temperatura. O gráfico da Figura FIGURA 4 apresenta os dados obtidos na calibração.

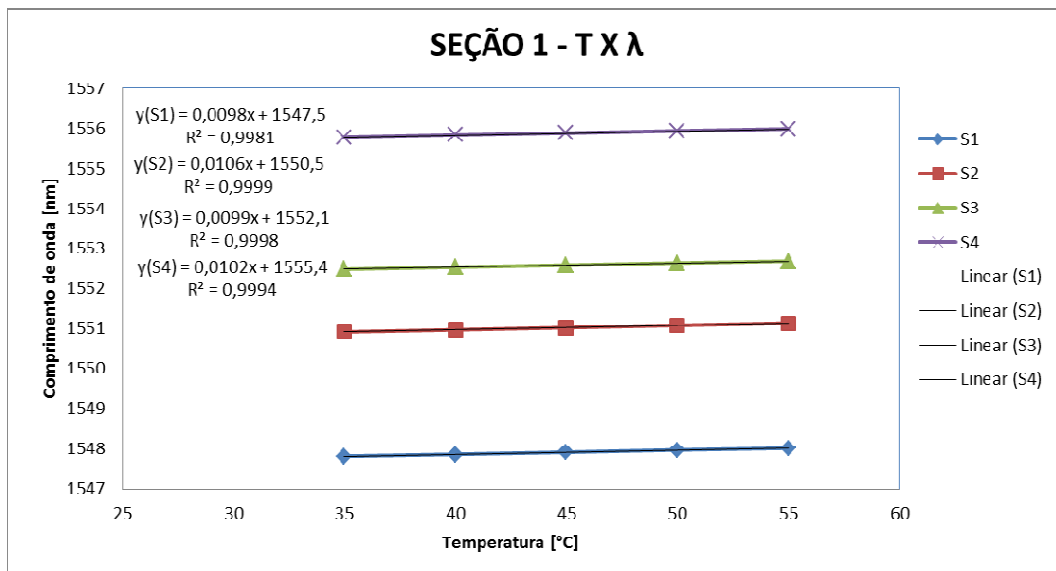


FIGURA 4: Curva de calibração do sensor FBG.

Foi observado que os sensores apresentaram uma resposta linear e não apresentam histerese significativa entre as curvas de aquecimento e resfriamento.

3.0 - CONCLUSÃO

Foi apresentada nesse trabalho uma solução de monitoramento térmico baseada em sensores ópticos (FBG) para aplicação em cabos isolados subterrâneos. O sistema permite a leitura da temperatura do condutor em tempo real e, por meio de simulação computacional, a determinação da ampacidade. O sistema desenvolvido é perfeitamente aplicável às linhas subterrâneas em operação que não possuem fibras ópticas integradas aos cabos. Outra vantagem desse sistema é o baixo custo frente às outras tecnologias, como o DTS.

O trabalho descrito apresenta uma solução inovadora para o monitoramento da temperatura em cabos subterrâneos, empregando uma solução óptica para medição. Os sensores ópticos utilizados forneceram respostas confiáveis da temperatura e, devido às características de imunidade à interferências eletromagnéticas, mostram-se viáveis para aplicações em sistemas elétricos de potência.

A instalação do sistema de monitoramento óptico de linhas subterrâneas foi replanejada em função da realização de obras de infraestrutura na região metropolitana de Belo Horizonte, além da dificuldade de desligar a linha para a execução da instalação dos sensores nos pontos de monitoramento. Portanto, os resultados dos testes de campo ainda não estão disponíveis. O modelo matemático para o cálculo computacional baseado em elementos finitos não foi apresentado no presente trabalho, no entanto é parte integrante da solução.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) P. Corrêa, J. P. Borges, L. R. Nogueira "Rede de distribuição subterrânea de energia elétrica," XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, UNIVAP. São Paulo, 2009, pg. 1.
- (2) G. Yilmaz, S. E. Karlik, "A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 125, pg 148–155, 2006.
- (3) P. Nicholls, "SensorTran DTS Information Series: Transmission & Distribution Applications, Cable Ampacity Analysis Software (CAAS)," White Paper, SensorTran, Austin, EUA, 2009.
- (4) R. G. C. Furtado, "Métodos estatísticos aplicados ao cálculo da ampacidade e risco térmico de linhas aéreas de transmissão," Dissertação de mestrado, Dept. Eng. Elétrica, Univ. Fed. de Juiz de Fora, 2008.
- (5) F. León, "Calculation of Underground Cable Ampacity", CYME International T&D, St. Bruno, Canada, 2005.
- (6) J. -H. Lee, S. -G. Kim, H. -J. Park, M. Song, "Investigation of fiber Bragg grating temperature sensor for applications in electric power systems", 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, pg. 431 – 434, 2006.
- (7) R. C S. B. Allil, "Sensores a Fibra Óptica com Tecnologia FBG para Medida de Temperatura e Alta Tensão," Tese de doutorado, Dept. Eng. Elétrica, Univ. Fed. do Rio de Janeiro, 2010.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Maurissone Ferreira Guimarães. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG (2001). Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) - UFMG (2003). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência (Equipamentos, transitórios eletromagnéticos, qualidade da energia (Power Quality), compatibilidade eletromagnética). Desde 2002, trabalha como engenheiro na Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG D), onde já atuou em atividades na área de projetos e estudos de viabilidade para linhas de transmissão e subestações de alta e extra-alta tensão. Desde 2008, tem-se dedicado a gestão de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica voltados para o setor elétrico.

Carlos Alexandre Meireles do Nascimento. Possui graduação em Engenharia Plena pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (1993), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1999) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2009). Atualmente é engenheiro de tecnologia e normalização da Companhia Energética de Minas Gerais S/A. Tem experiência na área de Engenharia de Distribuição e Transmissão de Energia, com ênfase em Engenharia Térmica, atuando principalmente nos seguintes temas: monitoramento de linhas de transmissão, linhas de transmissão, projetos de linhas de transmissão, ampacidade e cabos termorresistentes.

Caio Cesar dos Reis. Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2011). Atualmente é Pesquisador na Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Tem experiência na área de engenharia mecânica, com ênfase em método estruturado de desenvolvimento de produtos e projeto mecânico de componentes com auxílio de método de elementos finitos.

Claudio Antonio Hortencio. Possui graduação em Tecnologia em Eletrônica Industrial pela Universidade Salesiana (2001) e curso técnico profissionalizante em Técnico em Eletrônica pelo Instituto Educacional São João da Escócia (1979) . Atualmente é Pesquisador de Telecomunicações do Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica , com ênfase em Telecomunicações.

Eduardo Ferreira da Costa. Possui mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2009) e graduação em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Salesiano de São Paulo (2005). Atualmente é engenheiro da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Circuitos Eletrônicos

João Batista de Mello Ayres Neto. Possui graduação em Graduação Em Física pela Universidade Estadual de Campinas (1976), mestrado em Física pela Universidade Estadual de Campinas (1978), curso-tecnico-profissionalizante pela Escola Técnica Industrial Conselheiro Antonio Prado (1972). Atualmente é Pesquisador em Telecomunicações do Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Tem experiência na área de Física , com ênfase em Física Atômica e Molecular. Atuando principalmente nos seguintes temas: Fibra Óptica, Dispersão Modal, Dispersão Cromática, Banda Passante de uma Fibra, Atenuação Espectral.

Ricardo Zandonay. Possui graduação em Física Bacharelado pela Universidade Federal de Santa Catarina (2005), mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina (2007) e MBA em Gestão Empreendedora de Negócios pela ESAMC (2012). Atualmente é gerente de projetos da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Tem experiência na área de Física, com ênfase em Ótica e Física dos Materiais, atuando principalmente nos seguintes temas: ótica, fibra ótica, materiais dielétricos e sensores a fibra ótica. Tem atuado como coordenador de projetos de P&D para o Setor Elétrico em projetos de soluções de monitoramento e supervisão de sistemas elétricos de potência, linhas de transmissão e distribuição e equipamentos de subestações e usinas hidrelétricas.

Rodrigo Peres. Possui graduação em Engenharia Física pela Universidade Federal de São Carlos (2011) e ensino-medio-segundo-grau pelo Fundação Instituto Tecnológico de Osasco (2002) . Atualmente é Pesquisador do Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Tem experiência na área de Física , com ênfase em Física Geral.