



GRUPO-III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

AValiação DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS NA CORRENTE DE FUGA EM ISOLADORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500 KV APLICANDO TECNOLOGIA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO

Cesar C. Carvalho (*) Roberto W. Mok Marcelo M. Werneck
Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) – COPPE – UFRJ

RESUMO

Foi desenvolvido um protótipo, tipo “cabeça de série”, de um sistema de monitoramento optoeletrônico, em condições de campo, da corrente de fuga em cadeias de isoladores de uma linha de transmissão (LT) de 500 kV. As partes do sistema são descritas: sensor de fibra óptica; hardware optoeletrônico; telemetria; software de banco de dados; e interface web. O sistema foi instalado em região costeira brasileira, e os dados foram adquiridos durante sete meses. Análise dos resultados demonstraram forte correlação entre os parâmetros climáticos, umidade relativa, temperatura, ponto de orvalho, e as descargas de corrente de fuga provocadas pela contaminação superficial nos isoladores.

PALAVRAS-CHAVE

Corrente de Fuga, Linhas de transmissão, Fibra óptica plástica, Cadeia de isoladores, Sensor óptico.

1.0 - INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão de energia elétrica (LT) são muito importantes para o modo de vida contemporâneo, pois permitem a distribuição de energia elétrica regiões e cidades distantes das usinas geradoras. As LTs são compostas por várias partes importantes que garantem o seu estado operacional, como no caso dos isoladores, que promovem a sustentação e o isolamento dos cabos de alta tensão. Porém, as LTs em regiões costeiras, são mais suscetíveis à ocorrência de perdas de isolamento causadas pela deposição contínua de poluição na superfície do isolador, o que acarreta em perdas técnicas e, consequentemente, a possibilidade de cortes de energia devido a *flashovers* [1], [2]. Esse problema usualmente é resolvido por meio da execução de uma rotina de manutenção de lavagens, *in loco*, com jatos de água realizados por uma equipe de trabalhadores com equipamentos especializados. Contudo, o custo deste procedimento de manutenção é alto e, portanto, abre a oportunidade de existência de um sistema de monitoramento contínuo que seja capaz de indicar o intervalo de tempo mais apropriado para realizar a lavagem, otimizando o procedimento, e minimizando perdas financeiras e riscos no sistema elétrico [3].

Diversos sensores e sistemas para monitoramento *on-line* de LTs surgiram nos últimos anos visando tornar esta avaliação mais prática e acessível [3], [4], algumas utilizando técnicas, tais como: aplicação de divisor resistivo [5], [6], retroespalhamento (tecnologia RFID) [7] e bobina de indução [3], todos com limitações de interferência eletromagnética; método de intensidade modulada por fibra óptica [2], [8], [9]; e rede de Bragg de fibra (FBG) [10], [11], com sistemas de interrogação de alto custo.

Conforme concluído por [2], [6], [12], existe uma forte correlação entre a corrente de fuga superficial, os parâmetros climáticos e os contaminantes depositados na superfície do isolador. Assim, a determinação do intervalo de tempo ótimo para a intervenção da equipe de manutenção implica em uma análise multivariável dos parâmetros climáticos relacionados à descarga das correntes de fuga, que foram objeto de estudo por [1], [13], [14] com um método equivalente. Sistemas de monitoramento similares, aplicando dispositivo de LED e fibra óptica, foram desenvolvidos [12], [15], porém essas pesquisas se limitaram a realizar ensaios experimentais em ambientes controlados de laboratório, sem extrair relações efetivas entre parâmetros climáticos como temperatura, umidade relativa (UmdR) e ponte de orvalho, e a ocorrência de eventos de descarga de corrente de fuga na cadeia de isoladores contaminados.

Este trabalho teve como objetivo duas diferentes abordagens de avaliação para o sistema de monitoramento proposto: i) desenvolvimento, caracterização e implantação em campo de um sistema optoeletrônico para monitoramento *on-line* de corrente de fuga e parâmetros climáticos usando um sensor de fibra óptica de plástica (POF) em um cordão de isolamento em torres TL de 500 kV; e ii) a análise de sete meses de dados adquiridos do sistema desenvolvido a fim de estabelecer e validar a relação entre os parâmetros climáticos e as descargas de corrente de fuga em condições de LT 500 kV. O sistema de monitoramento optoeletrônico *on-line* proposto teve como

LIF – Laboratório de Instrumentação e Fotônica

*End: Av. Horácio Macedo, 2030, bloco I 2000, sala 036 –Subsolo - Centro de Tecnologia, Cidade Universitária
– Rio de Janeiro – RJ. CEP: 21.941-598 - Tel: (+5521)3938-8200. Email: cesar@lif.coppe.ufrj.br*

objetivo identificar o momento mais adequado para a limpeza preventiva para evitar descargas excessivas de corrente de fuga na cadeia de isoladores, permitindo que a empresa de transmissão de energia estabeleça um cronograma de manutenção mais eficiente e econômico. Além disso, a influência dos parâmetros climáticos, ponto de orvalho (DP), UmdR e temperatura ambiente na ocorrência de corrente de fuga, foi analisada sob condições reais de campo (em cadeias de isoladores de LT de 500 kV), diferentemente das análises anteriores, isto é, sob condições controladas realizadas por [1], [13], [14].

2.0 - SISTEMA REMOTO ÓPTICO DE MONITORAMENTO DE CORRENTE DE FUGA

O sistema de monitoramento é composto por um sensor optoeletrônico para medição de corrente de fuga, que foi instalado no isolador e conectado, via fibra óptica, a um hardware eletrônico (Unidade Remota - UR) que inclui um sensor de umidade, um sensor de temperatura, um sistema de telemetria com modem com chip-celular (GPRS - General Packet Radio Service), e uma base de dados local (BD). O sistema transmite os dados coletados para uma Interface Web para que os usuários visualizem os dados na forma de gráficos e relatórios. O sensor optoeletrônico de corrente de fuga é conectado a UR por um cabo de POF, que permite um caminho do sinal óptico robusto e de baixo custo para as medições de corrente de fuga. Um diagrama esquemático do sistema completo pode ser visto na Figura 1. O sistema completo de monitoramento remoto recebe dados da UR instalada em uma torre LT de 500 kV de propriedade da siderúrgica Ternium Brasil Ltda., parceira no desenvolvimento deste projeto, localizada na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. Em função da empresa lidar com óxido de ferro em seu processo siderúrgico, e estar próxima ao mar, tanto o pó condutor quanto o sal marinho, soprado pelo vento, se depositam na superfície dos isoladores. Portanto, essas substâncias acentuam a possibilidade de ocorrência de descargas de correntes de fuga em sua cadeia de isoladores, podendo causar graves interrupções no fornecimento de energia.

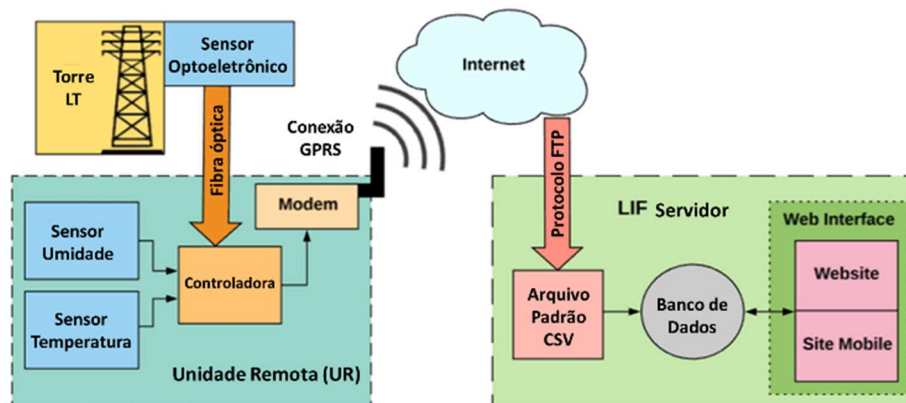


FIGURA - 1. Diagrama em blocos do sistema de monitoramento on-line. LIF Servidor: Computador localizado no laboratório de pesquisa da universidade.

Os dados provenientes do sensor de corrente de fuga e sensores ambientais são processados na UR e enviados em formato de arquivo padrão CSV via conexão GPRS para um servidor web localizado no laboratório da universidade (Laboratório de Instrumentação e Fotônica) por FTP (Protocolo de transferência de arquivos). Os arquivos CSV são lidos e seus valores são armazenados automaticamente no BD, permitindo que sejam monitorados através da Web Interface. Cada parte do sistema mostrada na Figura 1 é descrita com detalhes nas próximas seções.

2.1 Sensor Optoeletrônico

O transdutor de corrente de fuga é composto por um circuito optoeletrônico contendo um LED verde de alta eficiência, que é excitado pela corrente de fuga que flui da linha de alta tensão para o potencial de aterramento sobre a superfície do isolador, fornecendo energia suficiente para fazê-lo brilhar com uma irradiância proporcional à corrente de fuga instantânea. A luz verde produzida pelo LED é a cor que apresenta menor deslocamento térmico, e, também, menor atenuação considerando a janela de transmissão do material POF (Polimetilmetacrilato - PMMA). A descrição detalhada do circuito optoeletrônico está disponível em [13]. Dessa forma, a luz de saída do LED, modulada em intensidade pela corrente de fuga, é injetada na POF que transmite o sinal para UR, instalada no potencial de terra. O circuito optoeletrônico é protegido por resina dentro de um copo de cerâmica, conforme mostrado na Figura 2 - (b). O copo de cerâmica possui um orifício com um conector de parafuso inoxidável que conduz à entrada do LED na placa optoeletrônica (nº 3 na Figura 2 - (c)). O transdutor é fixado à torre em uma posição próxima à base da cadeia de isoladores por meio das placas de fixação mostradas na Figura 2 - (c) e um fio elétrico conectado do primeiro isolador da cadeia ao parafuso inoxidável localizado no topo do copo de cerâmica. O diagrama esquemático da instalação do transdutor é mostrado na Figura 2 - (a). Desta forma, a corrente de fuga é desviada para o transdutor, entra no circuito optoeletrônico, excita o LED e retorna ao potencial de terra através das chapas de aço galvanizado que fixam o transdutor a torre. O cabo de POF guia a luz do LED para UR que transmite os dados.

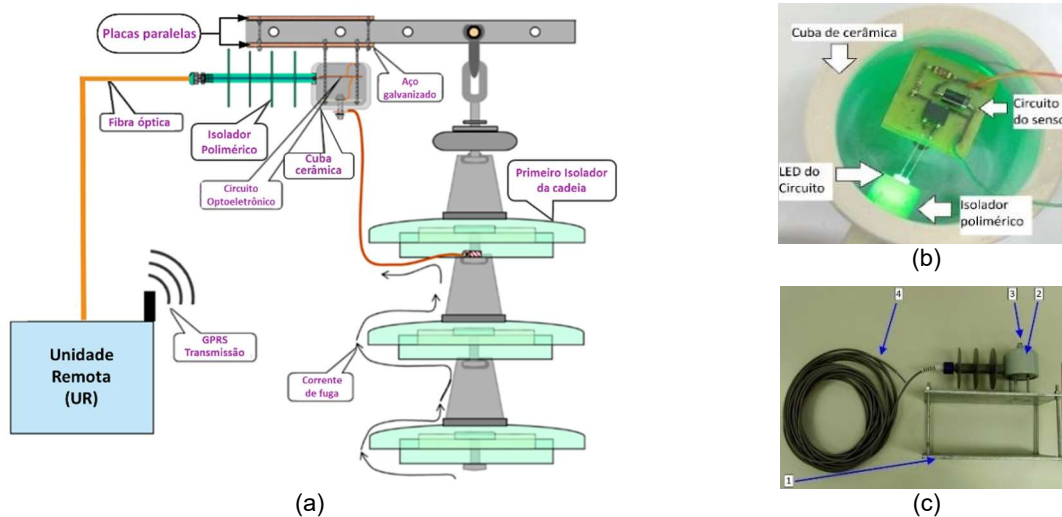


FIGURA - 2. (a) Diagrama ilustrativo do sensor optoeletrônico instalado na torre da Linha de transmissão. (b) Detalhes internos do transdutor antes da imersão na resina. (c) Partes principais: (1) Placas galvanizadas para fixação do sensor a torre; (2) Copo de cerâmica; (3) Conexão elétrica ao fio isolante; (4) Cabo POF.

2.2 Unidade Remota e Interface Web

O diagrama de blocos da UR é mostrado na Figura. 4. Conceitualmente, a UR é um sistema de aquisição e controle de dados que armazena os dados medidos e os transmite pela Internet para um banco de dados. A UR recebe o sinal de três transdutores: de corrente de fuga via POF; de umidade; e de temperatura; estes dois últimos na UR. A partir da UmdR e da temperatura ambiente, a UR calcula o ponto de orvalho (DP), que é um parâmetro importante na ignição das descargas da corrente de fuga. O ponto de orvalho é a temperatura ambiente na qual o ar fica saturado com vapor de água. Com a queda maior da temperatura, o vapor de água no ar se condensa para formar água líquida, conhecida como orvalho. Quando o ar esfria até seu ponto de orvalho, a superfície do isolador fica molhada pela água condensada, umidificando o sal que já está na superfície. O sal seco é dielétrico, mas é condutor se úmido, portanto, quando o DP é atingido, as correntes de fuga começam a subir. O ponto de orvalho pode ser calculado aproximadamente usando a fórmula simples:

$$DP \approx T - \frac{100 - RH}{5} \quad (1)$$

onde DP é o ponto de orvalho em °C, T é a temperatura ambiente em °C e RH é a UmdR em %. Essa relação só é válida para RH igual ou superior a 50%, o que geralmente é o caso.

Uma placa de interface recebe os sinais dos três sensores e os converte em sinais de tensão, os quais são digitalizados e enviados à CPU para processamento e armazenamento (Figura 3). O modem coleta periodicamente os dados da CPU, converte os sinais em um arquivo no formato CSV, conecta-se à rede móvel e envia o arquivo pela tecnologia GPRS. O arquivo será finalmente recebido pelo banco de dados do servidor, localizado no laboratório de pesquisa. A UR, protegida por caixa de classificação IP66, é alimentada por 127-220 Vca, produzida por rede elétrica ou sistema fotovoltaico, dependendo da disponibilização da empresa. A Interface Web, localizada no computador servidor do laboratório, permite que os usuários cadastrem cada UR no BD, bem como controlem os recursos de armazenamento, gerenciamento e exibição dos dados recebidos. Devido ao grande volume de dados diários, que são transmitidos continuamente por várias URs instaladas em diversas torres durante meses, foi desenvolvido um software exclusivo de gerenciamento de BD capaz de monitorar individualmente cada UR.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Unidade Remota – Calibração em laboratório

Dois tipos de testes foram realizados em laboratório, calibração de corrente e variação de temperatura. Para o ensaio de calibração, o sistema é montado em laboratório com o sensor de corrente conectado à UR via POF conforme mostrado na Figura 4 - (a). Em seguida, correntes conhecidas são injetadas no sensor, e as tensões de saída do fotodetector são medidas na UR. O gráfico obtido é mostrado na Figura 4 - (b), apresentando um polinômio de 4º grau, cuja equação é mostrada dentro do gráfico com um coeficiente de correlação de 0,9997, demonstrando uma alta correlação. Esta equação foi inserida no firmware da UR para ser utilizada durante a conversão da tensão de saída em corrente de fuga. O sensor foi submetido a diferentes temperaturas de operação em um forno de temperatura controlada levando em consideração a faixa de temperatura média anual da cidade do Rio de Janeiro, onde foram instaladas as URs. Os resultados experimentais obtidos em laboratório indicaram que a na faixa de 0 a 25 mA, a resposta do sensor em diferentes temperaturas apresentou uma incerteza de 1,5%, dentro de um intervalo de confiança (IC) de 95%.

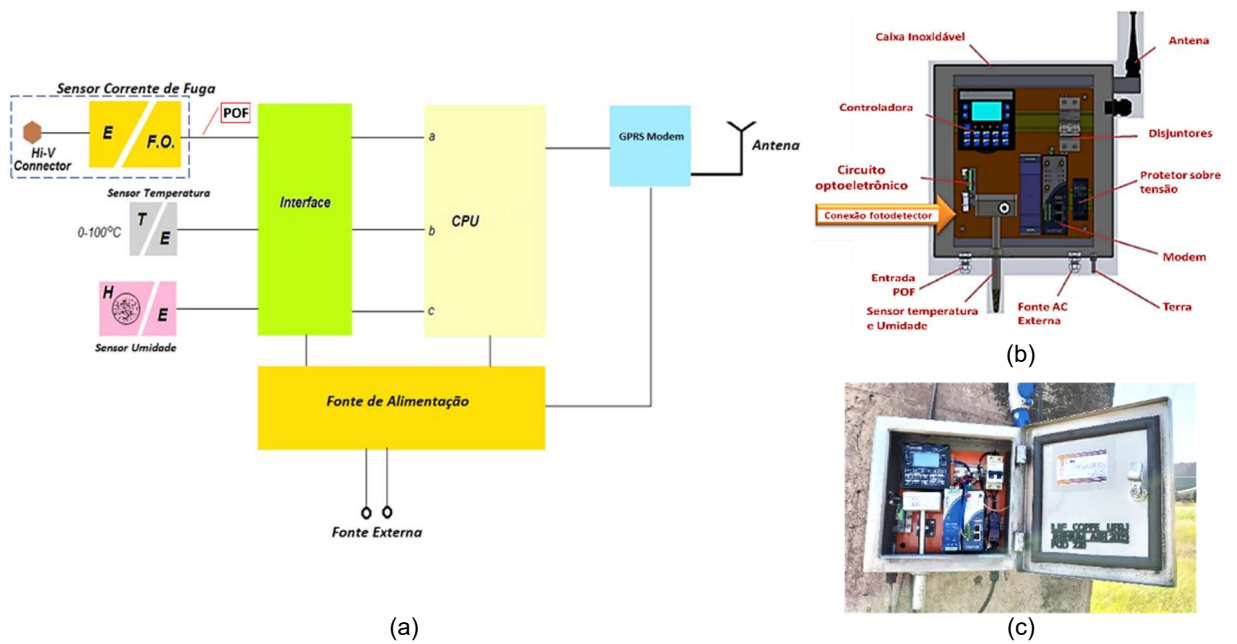


FIGURA - 3. (a) Diagrama em blocos da UR. E: sinal elétrico; F.O.: fibra óptica. (b) Diagrama detalhado da UR. (c) Fotografia da UR instalada em campo na base da torre.

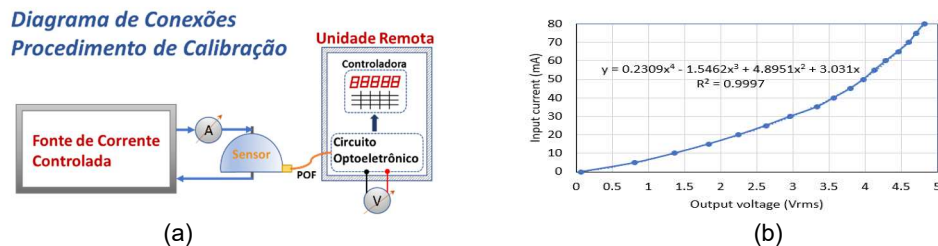


FIGURA – 4. (a) Diagrama em bloco do experimento para calibração do sensor. (b) Gráfico com curva de calibração do sensor: 0 a 80 mA.

3.2 Procedimento em campo

O sistema foi instalado em uma torre LT 500 kV, localizada dentro da área operacional de uma empresa siderúrgica na região litorânea da cidade do Rio de Janeiro - Brasil (Figura 5), a qual foi escolhida pela equipe técnica da empresa devido aos altos níveis de poluição encontrado em suas cadeias de isoladores devido à proximidade (~ 500 metros) de aglomerados de pó de ferro expostos. Ademais, a área mencionada é profundamente afetada pela salinidade do mar e pela UmdR excessiva. A instalação foi realizada por equipe técnica especializada em linhas vivas, pois a linha de transmissão não podia ser desligada, devido ao processo intermitente de produção do aço. Os procedimentos de instalação em campo são mostrados na Figura 5, onde podem ser visualizadas fotos de momentos relevantes.

3.3 Análise de Dados

Um dos principais objetivos desta pesquisa é tentar estabelecer uma correlação confiável entre as variáveis ambientais e a possibilidade de descargas de corrente de fuga nas cadeias de isoladores. Ao confirmar as condições favoráveis, será possível à Interface Web emitir avisos de possibilidade de correntes de fuga. Isso é especialmente importante em linhas de transmissão porque quando as correntes aumentam, as perdas técnicas e os riscos ao sistema também aumentam, podendo ocasionar interrupção no fornecimento de energia, obrigando a uma pronta ação da equipe de emergência de linha viva. Depois de recebidos e armazenados no BD, os dados coletados de diferentes URs são processados pelos algoritmos, que calcula o ponto de orvalho e, a interface Web, o plota junto com os demais parâmetros, corrente de fuga, temperatura e UmdR. Portanto, o DP constitui a quarta variável crítica no sistema de monitoramento proposto. Analiticamente, o DP tem um significado importante, pois caracteriza o ponto de temperatura, de acordo com as condições ambientais em um determinado momento, para o qual o orvalho ocorrerá naturalmente e, portanto, há uma maior chance de trilhamento superficial, ou descarga, da corrente de fuga através da superfície dos isoladores. Isso é ainda mais provável de ocorrer quando a cadeia de isoladores está superficialmente contaminada com poluição ambiental.

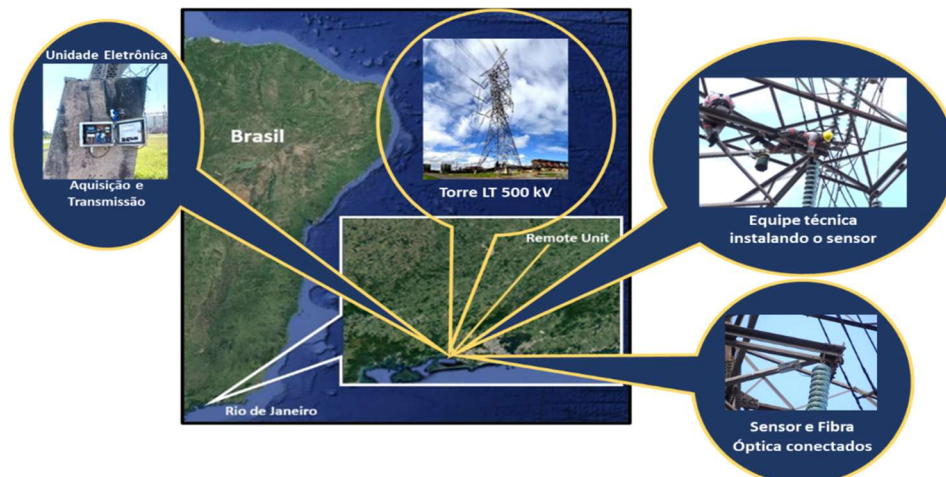


FIGURA - 5. Geolocalização da UR de monitoramento e fotos mostrando momentos importantes durante os procedimentos de instalação do sistema na torre da LT 500 kV. Esquerda: UR fixada à torre; Superior direito: Técnico instalando o *bypass* conectando o sensor ao primeiro isolador da cadeia; Parte inferior direita: Sensor instalado.

Na região sudeste do Brasil, mais especificamente no litoral do Rio de Janeiro onde está instalado o sistema de monitoramento, sabe-se que entre junho e outubro há uma alta incidência de picos de corrente de fuga, pois esse período é caracterizado por baixas temperaturas (18°C a 25°C) e alta UmdR ($> 95\%$). Essas condições são consideradas favoráveis para descargas de corrente em isoladores contaminados no caso de linhas de distribuição de 13 kV [13]. Portanto, a análise estatística da correlação entre os parâmetros monitorados e a ocorrência de correntes de fuga em LTs de 500 kV é de extrema importância para o sistema de potência. A metodologia analítica aplicada neste trabalho é baseada na seleção de intervalos de tempo específicos onde foram identificados eventos significativos e críticos, considerando a janela de monitoramento que abrange o período de agosto de 2019 a fevereiro de 2020.

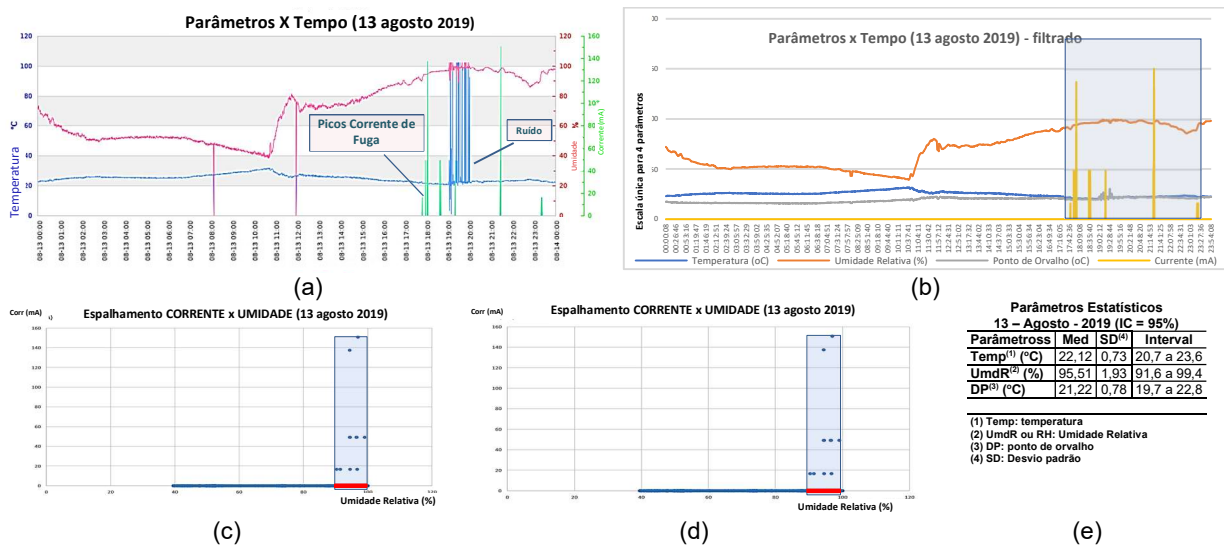


FIGURA - 6. 13 de agosto de 2019. (a) Gráficos de temperatura e UmdR; vários picos de corrente de fuga foram identificados; A curva DP não é traçada. (b) O intervalo de tempo destacado refere-se ao período de medição dos picos: filtros digitais básicos são aplicados para minimizar o ruído; UmdR $> 95\%$; as curvas de DP e temperatura estavam próximas; temperaturas em torno de 22°C . (c) Dados da temperatura versus umidade: faixa de temperatura em destaque indica que os picos de corrente ocorrem em torno de 22°C . (d) Dados da corrente versus umidade: faixa de umidade destacada indica que os picos de corrente ocorrem em torno de 95% de UmdR. (e) Parâmetros estatísticos extraídos dos dados em 13 de agosto de 2019 indicando as condições climáticas favoráveis (temperatura e UmdR) para ocorrência de picos de corrente.

O primeiro caso analisado corresponde a 13 de agosto de 2019, que é apresentado nas Figuras 6 - (a) e (b) (dados originais filtrados para minimizar o ruído). Esse intervalo de tempo foi particularmente importante devido a dois fatores: período de alta umidade e baixa temperatura, favorável a picos de corrente de fuga; e, a empresa realizou no dia 14 de agosto um procedimento de limpeza (jatos d'água) na cadeia de isoladores. As Figuras 6 - (c) e (d) apresentam gráficos que permitem a análise do espalhamento das medidas de temperatura, e UmdR quanto à ocorrência de eventos de descargas de corrente de fuga. A Figura 6 - (a) mostra a presença de ruído nas medidas de temperatura e umidade devido à deposição de aglomerado de pó de ferro cobrindo o sensor eletrônico. Ainda na

Figura 6 - (c) e (d) verifica-se a existência de condições climáticas favoráveis para o desencadeamento das correntes de fuga: umidade elevada, acima de 95%; e baixas temperaturas, em torno de 22 °C (temperatura - escala esquerda, DP - direita). Os gráficos das Figura 6 - (c) e (d) demonstram as faixas de UmdR e temperatura favoráveis à ocorrência de correntes de fuga. Os parâmetros estatísticos na Figura 6 - (e) apresentam a análise dos parâmetros climáticos relacionados aos picos de corrente de fuga superiores a 2 mA ocorridos em 13 de agosto de 2019. As transmissões de dados da UR para o BD começaram em 12 de agosto de 2019. Nesse período, contudo, não havia condições ideais para a ocorrência de picos de corrente de fuga, pois o tempo estava quente e seco. Entretanto, no dia seguinte, ocorreu uma mudança repentina nas condições climáticas com chuvas leves e queda de temperatura, o que favoreceu a contaminação da superfície dos isoladores, ocasionando picos significativos de corrente de fuga. No dia 14 de agosto, a equipe de manutenção da LT interveio e limpou as cadeias de isoladores, resultando no desaparecimento dos picos de corrente de fuga. Ao longo de setembro de 2019, foram observados apenas dois picos de corrente de fuga, demonstrando eficiência no procedimento de lavagem.

Devido a problemas técnicos, não houve transmissão de dados em outubro. O monitoramento e a transmissão de dados retornaram apenas no final de novembro de 2019. Os resultados são mostrados na Figura 7, onde observam-se vários eventos de descarga de corrente fuga no período, demonstrando o alto grau de contaminação com material ferroso presente nas proximidades da torre LT de 500 kV.

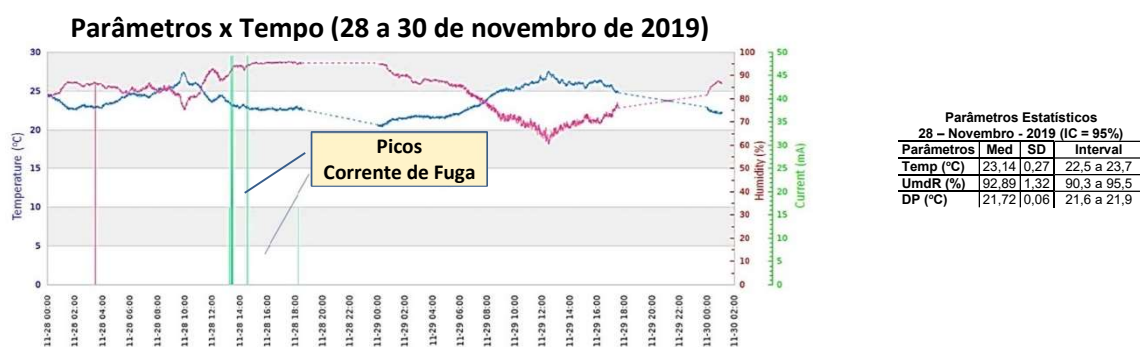


FIGURA - 7. 28 a 30 de novembro de 2019: gráficos com os dados originais; foram identificados picos de corrente de fuga (verde). São apresentados parâmetros estatísticos extraídos dos dados de 28 de novembro de 2019, que indicam as condições climáticas favoráveis (temperatura e UmdR) para ocorrências de descargas de corrente. * Tracejado: conexão de dados perdida.

O mês de dezembro de 2019 marca o início do verão com aumento da temperatura e fortes chuvas que encharcam temporariamente a superfície dos isoladores. Essas condições climáticas não favorecem a ocorrência de descargas de corrente de fuga, mesmo quando os isoladores estão com poluição superficial excessiva. Mesmo tendo sido identificadas situações de temperaturas ligeiramente mais baixas, próximas a 19 °C, não foram observadas descargas de corrente. A análise simultânea dos demais parâmetros climáticos, umidade e DP, indica que as condições não eram muito favoráveis para a ocorrência de descargas de correntes de fuga. Nesse caso, o DP (16,5 °C a 17,5 °C) foi ligeiramente inferior a temperatura ambiente (19 °C), com a umidade próxima a 92%. Essas condições são quase favoráveis, mas não suficientes para desencadear descargas de corrente de fuga na cadeia de isoladores. Os resultados analíticos de 28 de novembro de 2019 mostrados na Figura 7 indicam similaridade no comportamento das variáveis climáticas, temperatura e UmdR, para que ocorram descargas de corrente de fuga, ou seja, umidade muito elevada e baixas temperaturas próximas ao DP. Os parâmetros estatísticos, ainda na Figura 7, apresentam as condições climáticas relacionados aos eventos de pico de corrente de fuga superiores a 2 mA ocorridos em 28 de novembro de 2019, considerando um IC de 95%.

Levando-se em consideração as incertezas do processo experimental (físico e matemático), pode-se dizer que as condições climáticas são previsíveis, porém, mudanças repentinas nos microclimas proporcionam condições favoráveis para a ocorrência de descargas de correntes de fuga nos isoladores. Portanto, embora os meses de janeiro e fevereiro ainda sejam verão no Brasil, foram identificados eventos de pico de correntes de fuga nos isoladores naquele período. A Figura 8 mostra os dados originais adquiridos ao longo do mês de janeiro de 2020, onde os picos de corrente foram identificados nos dias 6 e 13. Os eventos identificados nesses dois dias foram analisados de acordo com a metodologia descrita, visando estabelecer uma correlação entre os parâmetros climáticos e a ocorrência de descargas de correntes de fuga, como podem ser observados nos parâmetros estatísticos extraídos e também apresentados na Figura 8, em relação aos dias 6 e 13 de janeiro de 2020, respectivamente. Esta análise estatística indica as condições climáticas médias favoráveis (temp e UmdR) para que ocorram as descargas de corrente: 24,5 °C e 92%; e 25,1 °C e 93%, respectivamente.

Seguindo o cronograma analítico, alguns eventos de correntes de fuga foram observados em fevereiro de 2020, conforme apresentado na Figura 9. Observa-se que as descargas de correntes de fuga ocorreram nos dias 11 e 13 de fevereiro, as quais foram analisadas separadamente segundo a metodologia analítica empregada neste trabalho. Parâmetros climáticos médios (temp e UmdR), favoráveis a ocorrências de descargas de correntes, são apresentados, respectivamente aos dias indicados: 22,7 °C e 97%; e, 25,1 °C e 92,7%.

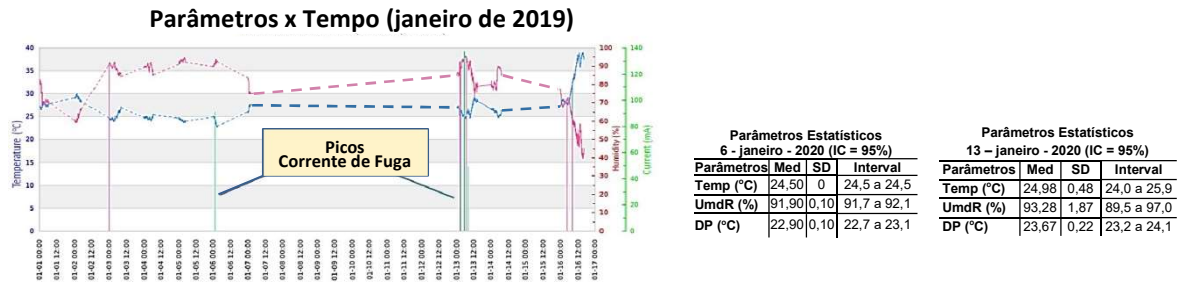


FIGURA - 8. janeiro de 2020. Nos dias 6 e 13 de janeiro, foram observados picos de corrente de fuga. Análise estatística indicando os valores médios dos parâmetros climáticos (temperatura e UmdR) que favoreceram as ocorrências dos picos de corrente de fuga nos dias 6 e 13 de janeiro de 2020. * Tracejado: conexão de dados perdida.

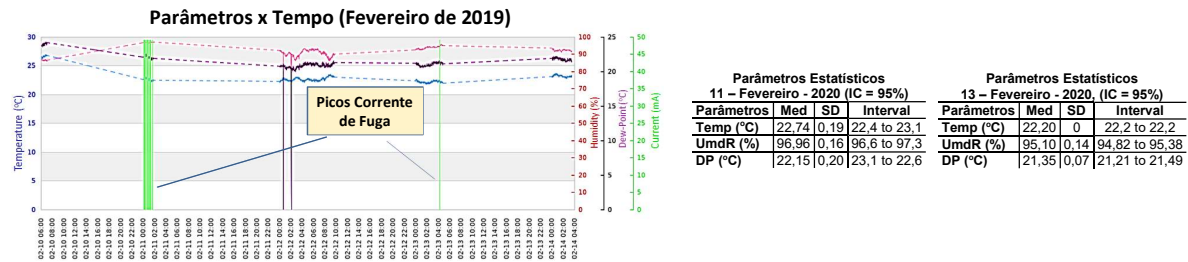


FIGURA - 9. Fevereiro de 2020. Picos de corrente de fuga foram observados 11 e 13 de fevereiro. Análise estatística indicando os valores médios dos parâmetros climáticos (temperatura e UmdR) que favoreceram as ocorrências dos picos de corrente de fuga nos dias 11 e 13 de fevereiro de 2020 *Tracejado: conexão de dados perdida.

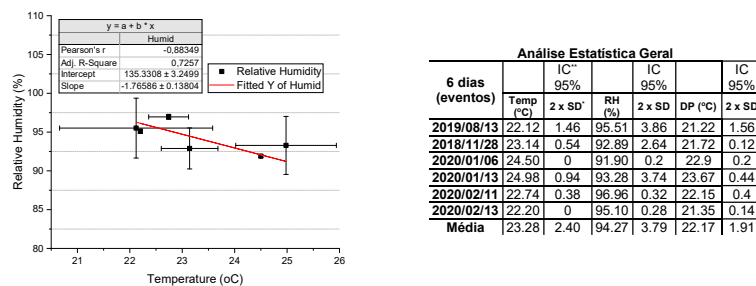


FIGURA - 10. Análise estatística geral de todos os dados adquiridos. Uma regressão linear foi traçada considerando os valores médios e a barra de incerteza para cada dia analisado (IC = 95%). A tabela contém os valores gerais obtidos a partir da metodologia aplicada a cada dia analisado considerando a incerteza estatística.

*SD: Desvio Padrão; **IC: Intervalo de Confiança; as análises estatísticas consideram que as distribuições são do tipo Normal.

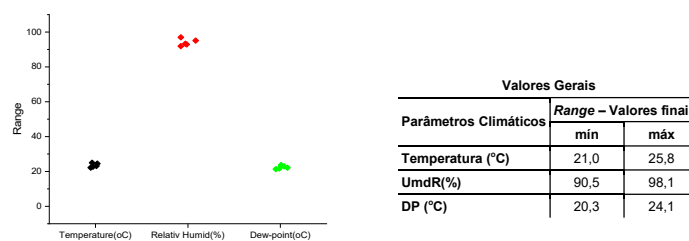


FIGURA - 11. Representação bidimensional dos espalhamentos das condições climáticas favoráveis (temperatura, UmdR e DP) para que ocorram descargas parciais. A tabela estabelece as faixas das variáveis climáticas que favorecem a ocorrência de descargas de corrente de fuga em cadeias de isoladores poluídas.

A Figura 10 apresenta uma tabela e um gráfico com um ajuste linear dos dados experimentais, indicando especificamente o fenômeno das descargas de corrente de fuga. Nesse universo limitado de eventos, observa-se que há uma redução relativa da umidade e, simultaneamente, uma progressão positiva da temperatura, e vice-versa. Apesar do comportamento dinâmico da curva mostrada na Figura 10, os valores estatísticos médios encontrados para todas as ocorrências investigadas também foram calculados e apresentados também na Figura 10. Esses valores médios calculados, associados às suas barras de erro, foram testados, ou seja, foram aplicados sobre o universo total dos dados originais como condições de borda limite para cada um dos seis dias analisados. Nessas condições, foram identificados 96% de todos os eventos de pico de corrente de fuga durante o período monitorado, validando as condições limites dos valores encontrados.

A Figura 11 apresenta uma distribuição de probabilidades para a ocorrência de descargas de corrente de fuga, considerando a influência da umidade relativa e da temperatura ambiente.

4.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, um sistema de monitoramento optoeletrônico *on-line* foi desenvolvido, instalado e avaliado em condições de campo para monitoramento em tempo real da ocorrência de corrente de fuga em cadeia de isoladores em LT 500 kV. O sistema de monitoramento apresentou resultados dentro das especificações do projeto, considerando tanto os ensaios realizados em laboratório quanto em campo, permitindo sua calibração para garantir a melhor precisão na medição de correntes de fuga de até 100 mA. O desvio térmico do sensor se mostrou insignificante considerando os objetivos finais do sistema de monitoramento, que seria informar se a cadeia de isoladores necessita de limpeza ou troca. Embora o sistema de monitoramento seja altamente dependente da cobertura de sinal-celular e de potenciais instabilidades no fornecimento de energia local, o sistema completo de monitoramento *on-line* funcionou com sucesso, sendo capaz de medir, armazenar e exibir as medições das quatro variáveis, ou seja, corrente de fuga, temperatura, DP e umidade relativa, por meio do banco de dados e da interface da web. O sistema ainda pode ser melhorado, em termos de robustez, caso seja utilizado um sistema fotovoltaico autônomo como fonte de energia.

Em função do sistema de monitoramento desenvolvido ser de baixo custo, possui capacidade limitada de adquirir dados a uma taxa de duas amostras por minuto para todas as variáveis, no entanto, é suficiente para detectar níveis perigosos de correntes de fuga suficientes para estabelecer intervenções preventivas. A análise dos dados foi realizada remotamente e baseia-se na identificação diária de sequências de descargas aleatórias de correntes de fuga que podem durar cerca de dois minutos ou mais. Portanto, a utilização do sistema de monitoramento desenvolvido garante uma probabilidade significativa de detecção de eventos nocivos à LT, quando comparada à utilização de métodos convencionais, como inspeção visual ou lavagem programada.

Os resultados obtidos para DP e a temperatura, nos momentos de ocorrência de descargas de corrente de fuga, são complementares, ou seja, suas medições são muito semelhantes, demonstrando, e validando, a expressão matemática empregada no processo analítico. Ademais, os resultados deste trabalho comprovam, em situação de classe de tensão de 500 kV, que ainda é válida a estreita relação entre os três parâmetros climáticos analisados, ou seja, temperatura ambiente, UmdR e DP, com a ocorrência de descargas de correntes de fuga nos isoladores com contaminação de poluição superficial.

Por fim, os resultados deste estudo permitem concluir que o sistema testado, após integração à rotina de manutenção da empresa, apresentará um grande potencial para indicar o momento adequado para intervenção de manutenção através da lavagem da cadeia de isoladores, garantindo maior segurança ao sistema LT 500 kV. Este sistema também pode ser empregado em linhas de distribuição, como 13,8 kV. Nestes sistemas, principalmente em localidades próximas à faixa costeira, a interrupção de energia é frequente devido a faíscas nos isoladores, deixando partes das cidades com escassez de energia. Portanto, a previsão de possibilidade de picos de correntes de fuga através de parâmetros climáticos seria importante para colocar a equipe de emergência em alerta para religar os interruptores locais em caso de ocorrência de *flashover*.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) R. Castillo Sierra, O. Oviedo-Trespalcios, J. E. Candelo, and J. D. Soto, "The influence of atmospheric conditions on the leakage current of ceramic insulators on the Colombian Caribbean coast," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 22, no. 4, pp. 2526–2536, 2015, doi: 10.1007/s11356-014-3729-3.
- (2) M.M. Werneck, C.C. Carvalho et al., "Detection and Monitoring of Leakage Currents in Distribution Line Insulators," in 2014 IEEE International Instrumentation and Measurements Technology Conference - ISBN: 9781467363853, 2014, pp. 468–472.
- (3) F. Amarh, "Electric Transmission Line Flashover Prediction System," Ph.D. Thesis, Department of Electrical Engineering, Arizona State University, 2001.
- (4) M. Amin, S. Amin, and M. Ali, "Monitoring of leakage current for composite insulators and electrical devices," *Rev. Adv. Mater. Sci.* - ISSN 16065131, vol. 21, no. 1, pp. 75–89, 2009.
- (5) J.B. Briggs, "Leakage current monitoring system and method," US Patent 3947759, 1976.
- (6) T. Zuo, T. Liu, K. Chen, and X. Hu, "On-line monitoring system of insulator leakage current based on ARM," *IEEE Int. Conf. Ind. Informatics*, pp. 75–79, 2012, doi: 10.1109/INDIN.2012.6301125.
- (7) A.J. Phillips, F.F. Bologna, J.M. Major, C.S. Engelbrecht, S. Antonio, and E. Consulting, "Development and Demonstration of Low Cost Robust Leakage Current Sensors for Evaluating," *Proc. 16th Int. Symp. High Volt. Eng.* - ISBN 9780620445849, 2009.

- (8) J. Wang, C. Yao, Y. Mi, X. Zhang, and C. Li, "Research for the LED optical fiber sensor for the leakage current of the insulator string," Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC, pp. 2–5, 2012, doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307625.
- (9) R.A. Maraio, A.T. McMahon, and H.B. Hart Jr., "Method and detector for identifying insulator flashover," US Patent 5136248, 1992.
- (10) Z. Yan, Z. Zhang, Q. Mei, R. Zhou, and T. Zhai, "Measurement of leakage current and tension based on fiber Bragg grating," Opt. Express, vol. 29, no. 3, p. 3772, 2021, doi: 10.1364/oe.415693.
- (11) Z. Yan, Z. Zhang, L. Li, T. Zhai, R. Guo, and C. Jiang, "Insulator String Leakage Current Sensor Based on Fiber Bragg Grating," Asia Commun. Photonics Conf. ACP, vol. 2018-Octob, no. 19, pp. 24940–24952, 2018, doi: 10.1109/ACP.2018.8595781.
- (12) J. Wang, Y. Xi, C. Fang, L. Cai, J. Wang, and Y. Fan, "Leakage current response mechanism of insulator string with ambient humidity on days without rain," IEEE Access, vol. 7, pp. 55229–55236, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2910660.
- (13) M.M. Werneck, D.M. Santos, C.C. Carvalho, F.V.B. Nazare, and R.C.S.B. Allil, "Detection and Monitoring of Leakage Currents in Power Transmission Insulators," IEEE Sens. J., vol. 15, no. 3, pp. 1338–1346, Mar. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2361788.
- (14) L.H. Meyer et al., "A study of the correlation of leakage current, humidity and temperature of 25 kV insulators in urban and rural areas," Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP, pp. 398–402, 2011, doi: 10.1109/CEIDP.2011.6232679.
- (15) J. Ramírez-Niño, M.J.O. Pacheco, J. Rodríguez, and V.M. Castaño, "Design and construction of a pollution monitor for power line insulators," Meas. Sci. Technol., vol. 7, no. 6, pp. 876–881, 1996, doi: 10.1088/0957-0233/7/6/003.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



CESAR C. CARVALHO nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1966. Obteve o B.Sc., M.Sc., e D.Sc. em áreas da engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, em 1989, 1994 e 2000, respectivamente. Atualmente é pesquisador e professor (pela Escola Politécnica) do Laboratório de Instrumentação e Fotônica do Programa de Engenharia Elétrica da UFRJ. Seus interesses de pesquisa incluem fibra óptica, sensores, transdutores e instrumentação optoeletrônica.



ROBERTO W. MOK nasceu em Mesquita-RJ, Brasil, em 1991. Foi bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), em 2015, e M.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2019. Atualmente é pesquisador associado no Laboratório de Fotônica e Instrumentação (LIF) da UFRJ-COPPE (Brasil). Seus interesses atuais de pesquisa incluem sensores de fibra óptica e técnica de teste de alta tensão e tecnologia.



MARCELO M. WERNECK nasceu em Petrópolis, Rio de Janeiro, em 1949. Graduiu-se em Engenharia Eletrônica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC) em 1975. Obteve o MSc pelo Programa de Eng. Biomédica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1977 onde é professor adjunto desde 1978. PhD obtido pela University of Sussex, no Reino Unido em 1985. Atualmente é coordenador do Laboratório de Instrumentação e Fotônica do Programa de Eng. Elétrica e do Dep. de Eletrônica e Computação (Escola Politécnica e COPPE) onde desenvolve pesquisas na área de instrumentação e transdutores a fibra óptica.