

Overhead Line Insulators Performance Degradation Analysis Due to Environmental Pollution

S. M. A. Lopes, V. H. Yoshizumi, B. L. Tavares, W. H. Moreira, A. C. C. Barquete, R. A. Flauzino, D. H. Spatti, I. N. Da Silva

Abstract-- Overhead line insulators are one of the main equipment responsible for transmission lines safe and proper operation. Adverse environmental conditions, mainly the presence of pollution, are the main cause of overhead line insulators early failure. The deposition of pollutants on the surface of the insulator, combined with moisture in the air, can lead to the occurrence of leakage currents on its surface, causing degradation of its operation and eventually leading to the occurrence of flashovers. In this paper, experimental tests were conducted in a high voltage laboratory with overhead line insulators towards verifying the electrical performance of such equipment after being naturally polluted during one year of operation in a high voltage transmission line. The insulators were tested in four different conditions: with dry and polluted surface; wet and with polluted surface; dry and clean surface; wet and clean surface. The results indicate a permanent degradation in the electrical performance of the insulators, characterized by a change in their surface's electrical characteristics. This permanent change might be due to surface erosion caused by the contaminant's deposition process and by the constant occurrence of partial discharges on the surface of the insulators. Furthermore, based on the results it can be observed that degradation: incurs in a higher leakage current, which increases the surface temperature; increases the number of partial discharges, which promote surface erosion; and leads to a change in the distribution of potentials along the chain. These conclusions demonstrate the necessity of assessing pollution severity prior to new developments due to the negative effects that the pollution layer has over insulator's long-term operation.

Index Terms—Overhead line insulators, laboratory tests, partial discharges, pollution layer, flashover.

I. NOMENCLATURA

LTs – Linhas de transmissão
RTV – *Room temperature vulcanizing*
LAT – Laboratório de Alta Tensão
DDSE – Densidade do depósito de sal equivalente
DDNS – Densidade do depósito de materiais não solúveis

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de P&D regulado pela ANEEL.

S. M. A. Lopes, V. H. Yoshizumi, R. A. Flauzino, D. H. Spatti, I. N. Da Silva - Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de São Paulo – São Carlos – SP, Brasil, 13566-590 (e-mail:sofia.moreira.lopes@usp.br, , yoshizumi@usp.br, raflauzino@usp.br, spatti@icmc.usp.br, insilva@usp.br);

B. L. Tavares, W. H. Moreira, A. C. C. Barquete - Argo Energia – São Paulo – SP, Brasil, 04533-013 (e-mail: beatriz.tavares@argoenergia.com.br, wallace.honorato@argoenergia.com.br, ana.barquete@argoenergia.com.br).

II. INTRODUÇÃO

OS isoladores de alta tensão presentes nas linhas de transmissão (LTs) consistem em um dos principais elementos responsáveis por garantir a segurança da linha e de sua operação. Estes equipamentos são responsáveis por fornecer suporte mecânico aos cabos alimentadores da LT e isolamento elétrico entre tais cabos e a estrutura. Desta forma, durante sua operação, os isoladores são sujeitos a estresses provenientes de cargas mecânicas e elétricas, além de operarem expostos a ambientes com variáveis ambientais diversas [1]. Apesar de sua importância, de acordo com Sanyal et al. [2], dentre os custos de construção de uma linha de transmissão, apenas 5% são relativos aos isoladores. No entanto, falhas nestes equipamentos são responsáveis por 70% das interrupções que ocorrem no fornecimento de energia e por até 50% dos custos relativos à manutenção.

Segundo Sanyal et al. [2], a vida útil de um isolador é de aproximadamente 30 anos e próximo deste prazo, estes equipamentos podem apresentar defeitos, sendo vital ter informações sobre seu funcionamento, pois não é possível financeiramente substituir todos os isoladores de uma linha de apenas uma vez.

Além disso, condições ambientais adversas tais como a presença de certos tipos de poluentes podem acelerar o envelhecimento dos isoladores causando sua deterioração e conseqüentemente sua falha precoce. O acúmulo de poluentes na superfície do isolador, combinado com a umidade do ar, pode levar ao surgimento de correntes de fuga na superfície do equipamento. A existência de correntes de fuga acarreta na polarização e na ocorrência de efeitos térmicos, que promovem o envelhecimento acelerado do material que constitui o isolador. Esta situação degrada o funcionamento do equipamento e favorece a ocorrência de flashovers causados por poluição [3].

A performance dos isoladores depende principalmente da condutividade da camada de poluentes em sua superfície, que é afetada pelas condições climáticas do local de instalação. Além disso, de acordo com Jiang et al. [3], a deposição de partículas de poluição nestes equipamentos difere da deposição de partículas em outros ativos das LTs, pois no caso dos isoladores, além da força da gravidade, o campo elétrico presente ao seu redor atrai as partículas de poluição, facilitando seu movimento em direção à superfície do

equipamento, ou seja, o campo elétrico ao redor do isolador causa a atração de partículas ionizadas para a sua superfície.

A adesão das partículas à superfície dos isoladores é afetada por diversos fatores, tais como: umidade relativa, velocidade do vento, força do campo magnético. Além disso, o material que compõe o isolador também influencia no processo de deposição; isoladores com camada de silicone, por exemplo, podem apresentar acúmulo de carga, o que afeta a força do campo elétrico durante a deposição de partículas [3]. O material do isolador também afeta em sua vida útil frente à poluição do ambiente de operação. O uso de uma camada de revestimento de silicone (RTV) em isoladores, por exemplo, é uma solução utilizada para reduzir a ocorrência de flashovers, devido às características dielétricas desejáveis deste revestimento [4].

Devido à importância do tema, diversos estudos buscam modelar o processo de deposição de contaminantes em isoladores e verificar como a poluição afeta o desempenho e a vida útil deste tipo de equipamento. Em [5] é avaliada a influência que o local e as dimensões de danos na superfície de revestimentos RTV em isoladores de vidro têm sobre o desempenho de tais isoladores. Em [4] foi avaliada a performance de revestimentos RTV frente à altas tensões do tipo DC e à presença de correntes de fuga, descargas parciais e eventos de flashover. Neste estudo, os ensaios experimentais consideraram uma análise de longo prazo, submetendo os revestimentos a um estresse contínuo por 10 mil horas, a fim de avaliar o impacto em seu envelhecimento. As alterações químicas causadas na cobertura RTV devido à descargas parciais também foram avaliadas em [6], estudo no qual os experimentos laboratoriais foram realizados com pedaços retangulares dos revestimentos RTVs. Outro estudo que avalia experimentalmente a degradação da performance da cobertura RTV utilizada em isoladores, devido à ocorrência de descargas parciais, pode ser encontrado em [7].

Tendo em vista a importância do tema e a falta de estudos que utilizam isoladores que foram naturalmente poluídos durante a operação, este artigo tem como objetivo avaliar como a camada de poluição pode afetar o desempenho de isoladores de alta tensão e verificar se houve degradação na performance deste equipamento após um período de exposição de 1 ano. Para esta finalidade, foram avaliados 24 isoladores de vidro com cobertura de RTV que estiveram em operação durante o período de 1 ano em uma linha de transmissão de 500 kV. Os ensaios laboratoriais desenvolvidos neste estudo foram projetados para avaliar a performance de tais isoladores, simulando a sua operação na linha de alta tensão, a fim de verificar se houve alteração na em suas características elétricas devido à camada de poluição acumulada em sua superfície.

III. ISOLADORES DE ALTA TENSÃO

Os isoladores fornecem o suporte dos cabos condutores em uma linha de transmissão. Desta forma, precisam suportar esforços mecânicos e elétricos ao fornecer uma estrutura de sustentação física aos cabos condutores e isolá-los eletricamente da estrutura da LT [8]. Em relação aos esforços elétricos, o isolador deve ser capaz de suportar sobretensões

que ocasionalmente podem ocorrer na LT, como sobretensões de manobra ou de origem atmosférica.

Além de ser constituído por um material isolante, os isoladores também utilizam a capacidade de isolamento do ar que os cerca. Além disso, o formato dos isoladores é projetado para garantir a melhor distribuição dos potenciais elétricos em sua superfície. Fisicamente, por serem elementos que operam expostos à diversas condições meteorológicas, os isoladores devem ser robustos e duráveis, capazes de resistir a condições climáticas distintas e operar em ambientes com alto grau de poluição [8, 9].

A operação de isoladores em ambientes com alta poluição atmosférica, principalmente em linhas de transmissão de tensões extra elevadas, demonstrou a necessidade de explorar novos materiais e métodos de manutenção para os isoladores. Isto ocorre pois, ambientes de operação extremos podem levar os isoladores a falhas internas, com perfuração do material, ou falhas externas, caracterizadas por descargas no ar localizado ao redor do isolador [8].

A. Deposição de poluentes em isoladores

Além de ser afetado pela ocorrência de descargas parciais, o material da superfície do isolador também sofre degradação devido ao processo de deposição de poluentes. O processo de colisão e deposição de sujidades em isoladores é dividido em quatro etapas: injeção, colisão, recuperação e ejeção. Durante a colisão, as partículas produzem uma pequena deformação na superfície do isolador, criando uma força elástica perpendicular à superfície [10]. O estresse de compressão no ponto de contato entre a partícula de poluição e o isolador é proporcional à velocidade da partícula que colidiu. Se o nível deste estresse superar o ponto de escoamento do material, pode haver uma deformação plástica em sua superfície. No caso de isoladores com cobertura de silicone, por exemplo, tem-se uma superfície com baixo módulo de Young, o que leva a ocorrência da deformação plástica, ou seja, de uma deformação permanente [3].

As partículas são ejetadas da superfície do isolador de volta para o ar se sua velocidade superar a força de aderência do isolador. Um aspecto que afeta o processo de ejeção de partículas é a umidade relativa do ambiente, pois esta grandeza afeta a força de aderência do isolador, de forma que, quanto maior a umidade, maior a força de aderência. Neste caso, na presença de umidade, partículas maiores terão maior probabilidade de serem depositadas na superfície por possuírem maior energia cinética [10].

Por se tratar de um processo complexo, que pode afetar a estrutura superficial dos isoladores, estudos que analisam as consequências ocasionadas pelo processo de deposição de contaminantes na superfície de isoladores são necessários. Desta forma, é possível prever o perfil de envelhecimento do isolador, otimizar processos de manutenção e apoiar o desenvolvimento de projetos que visem combater o acúmulo de poluentes em isoladores.

IV. ARRANJO EXPERIMENTAL

O aparato experimental para a realização dos ensaios de alta tensão foi construído no laboratório de alta tensão (LAT) da Universidade de São Paulo a fim de avaliar as características elétricas de 24 isoladores de vidro com

cobertura de RTV naturalmente poluídos que foram retirados de uma linha de transmissão.

Os ensaios elétricos foram divididos em quatro fases principais, sendo estas:

- Ensaios de alta tensão com os isoladores contaminados naturalmente;
- Ensaios de alta tensão com os isoladores contaminados naturalmente e com umidificação artificial;
- Ensaios de alta tensão com os isoladores limpos;
- Ensaios de alta tensão com os isoladores limpos e com umidificação artificial;

Ressalta-se que os contaminantes foram retirados dos isoladores seguindo as indicações previstas em norma, para que análises químicas e medições de parâmetros como DDSE e DDNS pudessem ser obtidas. Os resultados de tais análises não fazem parte do escopo deste artigo.

A. Componentes do Sistema de alta tensão

O arranjo experimental foi construído baseado em dois objetivos principais: fornecer um nível de tensão elevado para o isolador testado; permitir conexões para a medição de corrente e tensão sobre tal isolador. Em todas as etapas dos ensaios foi utilizado o kit de equipamentos de alta tensão Haefely, que contém componentes que podem ser conectados de diversas formas para criar diferentes esquemas de teste. Dentre os equipamentos e peças disponíveis no kit, os principais utilizados para construir o circuito dos ensaios elétricos são apresentados nas Fig. 1 – 3 a seguir. O circuito completo utilizado nos experimentos é apresentado na Fig. 4.



Fig. 1. Transformador de tensão PZT 100-0.1

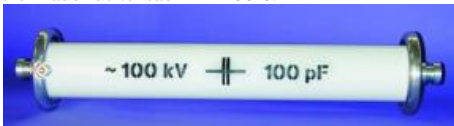


Fig. 2. Capacitor de medição de 100pF

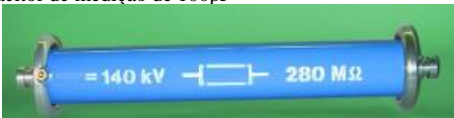


Fig. 3. Resistor de medição de 280 MΩ



Fig. 4. Circuito final do ensaio AC com dois transformadores conectados em cascata.

Na Fig. 1, é apresentado um dos transformadores de teste utilizados, o transformador de tensão AC monofásico, modelo PZT 100-0.1 com relação de transformação de 220V / 100kV. Nas Fig. 2 e Fig. 3, são apresentados o capacitor e o resistor de medição utilizados para compor os divisores de tensão AC e DC, respectivamente. O kit permite que inúmeras configurações sejam montadas, no caso dos ensaios elétricos realizados para esse estudo, foi utilizada uma configuração prevista no manual para uma tensão alternada de até 200kV, que utiliza dois transformadores de teste do modelo PZT 100-0.1 para alcançar a tensão de saída. O circuito final construído é apresentado na Fig. 4.

Para esta configuração, um dos transformadores de teste tem seu enrolamento primário conectado ao transformador regulador, que é alimentado por uma fonte principal que fornece uma tensão de 230 V. Os dois transformadores de teste são conectados em uma configuração de cascata, atingindo uma tensão de até 200kV. Tais transformadores são conectados entre si através da conexão do enrolamento terciário do primeiro isolador, com o enrolamento primário do segundo. Mais detalhes sobre a conexão entre os transformadores podem ser encontrados no manual do kit [11]. Para realizar a medição da tensão no lado de alta tensão, dois capacitores de medição de 100 pF foram conectados em série ao circuito.

Para compor a parte de controle e aquisição de dados, utilizou-se o terminal de operação OT276 e um osciloscópio, apresentados na Fig. 5. O terminal de operação funciona como unidade de controle para controlar a corrente e a tensão no lado secundário do transformador regulador, que é, por sua vez, conectado aos transformadores PZT 100-0.1.



Fig. 5. Terminal de operação OT276 e osciloscópio.

V. ENSAIOS COM OS ISOLADORES

Como detalhado anteriormente, foram realizadas duas etapas dos ensaios com os isoladores contaminados naturalmente. A primeira etapa consistiu em avaliar os isoladores poluídos naturalmente conforme foram retirados de

operação da linha de transmissão. A segunda etapa avaliou os isoladores com uma camada de umidade aplicada artificialmente sobre a camada de poluição natural. Esta etapa do experimento teve como objetivo avaliar o desempenho dos isoladores em um ambiente úmido, tendo em vista que a umidade facilita o processo de deposição de contaminantes.

Além disso, vale ressaltar que processo de umidificação natural dos isoladores pode ocorrer de duas formas: este processo pode ser intenso, ocasionado por chuvas, por exemplo, promovendo a remoção da camada de poluição do isolador; este processo também pode ser de baixa intensidade, apenas umidificando a superfície do isolador, sem no entanto, retirar poluentes. No segundo caso, a camada de água ao invés de remover os poluentes, contribui para a ocorrência de descargas parciais na superfície do isolador. Desta forma, verifica-se a importância de avaliar os isoladores em condições secas e úmidas.

A. Ensaios com os isoladores contaminados

Nesta etapa de ensaios, os isoladores foram utilizados com a contaminação natural que foi depositada ao longo de sua operação na linha de transmissão. A Fig. 6 apresenta as vistas superior e inferior de um dos isoladores utilizados no ensaio, o isolador em questão é o de número 24, o último da cadeia. A partir da imagem da parte superior é possível observar que o depósito de sujidades ocorre de modo não uniforme, sendo que a poluição é mais pronunciada em um dos lados do isolador. Além disso, nota-se que a concentração de poluição nesse isolador é maior em sua parte inferior. Ressalta-se ainda que, para cada um dos 24 isoladores retirados da LT, o depósito de poluição ocorreu de maneira diferente, devido à sua posição na cadeia de isoladores, o que leva a comportamentos diferentes durante os ensaios.



Fig. 6. Isolador nº 24 da cadeia de isoladores contaminado naturalmente – vista superior e inferior

Para os ensaios, os isoladores foram conectados ao circuito elétrico apresentado anteriormente na Fig. 4. Para sua conexão, os isoladores foram posicionados entre o divisor de tensão resistivo e o capacitivo, detalhes do encaixe do capacitor podem ser observados na figura. Na configuração do circuito, o isolador recebe uma tensão que pode ser medida entre os divisores de tensão capacitivo e resistivo, enquanto sua corrente pode ser obtida a partir da medição feita no divisor de tensão resistivo. O experimento seguiu as seguintes etapas de execução:

1. Conectar o isolador ao circuito;
2. Ligar a fonte de tensão do transformador regulador e controlar seu valor através da unidade de controle;
3. Incrementar a tensão de saída do transformador

regulador dentro do intervalo de 50 V – 160 V (medidas da parte de baixa-tensão). Os incrementos foram feitos com os passos de 10 V;

4. Para cada valor de tensão considerado, aquiritar as formas de onda de tensão provenientes dos divisores de tensão capacitivo e resistivo utilizando o osciloscópio. Ressalta-se que o circuito foi calibrado antes dos ensaios, assim, as formas de onda foram obtidas já em suas escalas e unidades corretas.

A partir das medições de tensão e corrente do circuito AC com os isoladores conectados, foi possível obter a impedância equivalente do circuito. Neste caso, a impedância equivalente inclui tanto a impedância do isolador quanto do divisor resistivo de tensão.

B. Ensaios com os isoladores naturalmente contaminados naturalmente e com umidade artificial

Nesta etapa dos ensaios, verificou-se o comportamento elétrico dos isoladores quando esses são submetidos à diferentes níveis de tensão em uma região que contém névoa capaz de umidificar suas superfícies. Para isso, os isoladores foram umidificados artificialmente utilizando um borrifador com água. O procedimento de umidificação dos isoladores seguiu um padrão, de forma a garantir que todos os isoladores recebessem uma quantidade de água equivalente. Para isso, foram efetuadas cinco borrifadas na superfície superior de cada isolador e cinco borrifadas na superfície inferior – para cada borrifada a posição do borrifador foi variada em torno do isolador para garantir um depósito uniforme de umidade. A Fig. 7 apresenta o borrifador utilizado e a superfície umidificada do isolador 24.



Fig. 7. Borrifador utilizado no experimento e superfície do isolador 24 umidificada

Nesses ensaios, foi utilizada a mesma metodologia seguida anteriormente, para os isoladores sem umidade artificial. Todavia, nestes experimentos foi verificada uma maior tolerância dos isoladores para valores elevados de tensão, de forma que não era verificada a ocorrência significativa de descargas parciais até valores de tensão superiores à 160V, no lado de baixa tensão. Por esse motivo, o intervalo de medição foi alterado para 50V – 190V. A obtenção das formas de onda foi feita conforme descrito anteriormente.

Além disso, ao atingir o valor de 190V, os isoladores foram mantidos sob esta tensão pelo período de 1 minuto. Durante este período, foi possível observar o aumento da ocorrência de descargas parciais, cujas emissões acústicas se tornavam mais pronunciadas com o decorrer do tempo. Após o fim deste intervalo de 1 minuto, as formas de onda eram aquiritadas

novamente para verificar o comportamento do isolador após ser submetido à uma alta tensão por um período maior.

C. Ensaios com os isoladores limpos

Após os ensaios realizados com os isoladores contaminados, cada um dos isoladores foi limpo seguindo as especificações previstas em norma. Desta forma, os contaminantes de cada isolador foram coletados para serem mensurados e analisados quimicamente. Conforme ressaltado anteriormente, os resultados provenientes da análise química dos contaminantes não faz parte do escopo deste estudo.

Os experimentos considerando os isoladores com sua superfície limpa foram realizados seguindo os mesmos passos apresentados anteriormente. Desta forma, primeiramente os isoladores limpos e secos foram avaliados seguindo o passo a passo apresentado no tópico A desta seção. Em seguida, os isoladores limpos receberam uma camada de umidade artificial, aplicada da mesma forma na qual foi realizada para os isoladores poluídos. As medições realizadas para os isoladores limpos e com umidade seguiu os mesmos passos apresentados no tópico B.

VI. RESULTADOS

Para a análise dos resultados, quatro informações principais foram consideradas:

- A impedância dos isoladores;
- A corrente de fuga percorrendo os isoladores;
- A tensão dos isoladores;
- A quantidade de descargas parciais ocorrendo nos isoladores.

Essas informações foram calculadas em conjunto a partir dos dados de tensão e corrente obtidos durante os ensaios com os isoladores. Para a obtenção das três primeiras informações, inicialmente foram considerados os dados de tensão e corrente medidos durante o processo de aferição do circuito. Essas formas de onda foram obtidas pelo divisor capacitivo e pelo resistivo, respectivamente, conforme apresentado no circuito equivalente da Fig. 8.

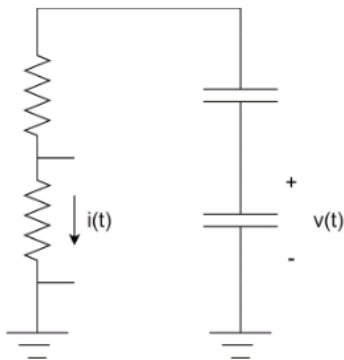


Fig. 8. Esquema de medição das formas de onda de tensão e corrente no sistema de aferição.

Foi realizado o processamento dessas formas de onda e, considerando a frequência fundamental de 60 Hz, observou-se um desvio do ângulo do fasor da tensão, o que indica que a frequência deveria ser compensada. Essa compensação foi necessária para que a decomposição de Fourier pudesse ser ajustada na frequência do ensaio. Após o ajuste, as componentes de Fourier foram obtidas utilizando uma janela

deslizante e considerando que cada medição tem um total de 500 ms.

O cálculo dos coeficientes de Fourier para cada instante de tempo foi feito tanto para a onda de tensão quanto para a de corrente. Considerou-se a obtenção dos fasores da frequência fundamental até a quinquagésima harmônica, todavia, verificou-se que após a vigésima quinta harmônica, não havia variação significativa.

Após a decomposição das ondas de tensão e corrente em seus fasores, foi possível calcular a impedância (ou admitância) para cada uma das componentes. Essa impedância foi calculada para cada ponto das formas de onda de tensão e corrente. O que retornou diversos valores de impedância (Z) para cada medição realizada em cada isolador. Desta forma, para se obter o valor representante de impedância para cada medição, foi realizada uma média ponderada pela potência em cada ponto com os valores calculados de Z para cada ponto da forma de onda. Assim, obteve-se uma impedância média do divisor resistivo para cada componente de frequência.

Além disso, devido ao fato de a frequência não ser puramente de 60Hz, foi realizada uma compensação no cálculo da impedância. Essa compensação foi realizada na parte imaginária da impedância, considerando a razão direta ou inversa da frequência - dependendo se a impedância possuía uma característica capacitiva ou indutiva, respectivamente.

Assim, para cada uma das medições feitas, em cada tensão considerada para o ensaio de aferição do circuito, foi obtido um valor de impedância Z_w . Posteriormente, todas as medições tiveram seus valores de Z_w ponderados pelo inverso da tensão daquela medição. Dessa forma, criou-se um modelo que prioriza a baixa tensão.

Após os cálculos, observou-se que no início o modelo do divisor resistivo apresenta um comportamento capacitivo, como era esperado. Todavia, a partir de uma determinada frequência verifica-se a variação entre o comportamento indutivo e capacitivo para esse divisor. Após a obtenção do modelo do divisor resistivo, foi possível realizar o cálculo da tensão no isolador.

A. Cálculo da Tensão nos isoladores

Para obter a tensão nos isoladores, considerou-se a tensão total dada pelo divisor capacitivo, pois essa tensão representa a tensão sob o isolador e o divisor resistivo. Além da forma de onda da tensão, também utilizou-se para o cálculo, a corrente medida que passa pelo divisor resistivo.

Com essas duas medições e com o modelo ajustado da impedância do divisor resistivo foi possível decompor a corrente em suas componentes harmônicas e calcular a tensão no divisor resistivo. Em seguida calculou-se a diferença entre essa tensão calculada para o divisor resistivo e a tensão medida no divisor capacitivo. Essa diferença representa a tensão no isolador, conforme apresentado no esquemático da Fig. 9.

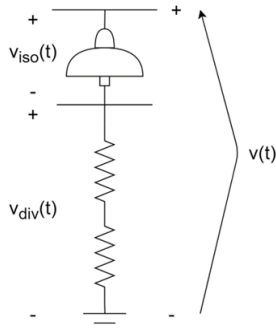


Fig. 9. Esquemático considerado para o cálculo da tensão do isolador.

Desta forma, foi possível obter os valores de tensão no isolador. Além disso, os valores de corrente nesse componente são os mesmos medidos para o divisor de tensão resistivo. As formas de onda de tensão e corrente obtidas para o isolador foram decompostas em componentes harmônicas e, com base nisso, foi possível calcular a impedância de cada isolador. Assim como feito para as medições de aferição, foi realizada uma média ponderada das impedâncias calculadas para cada medição pela potência, obtendo, para cada tensão de ensaio, um valor de impedância. Após obter a impedância para cada ensaio, foi realizada uma média ponderada pelo inverso da tensão com a finalidade de construir um modelo que privilegia a baixa tensão – que consiste no modelo que considera o menor valor de corrente de fuga. Desta forma, foi criado o modelo equivalente de impedância do isolador.

Considerando o vetor de impedâncias e a tensão calculada sobre cada isolador, foi possível calcular a corrente que percorre cada um dos isoladores. Essa corrente é um valor estimado, que foi confrontado com o valor da corrente medida para o ramo do isolador em série com o divisor resistivo. Como o modelo de impedâncias calculado para o isolador privilegiou a baixa tensão, a diferença entre a corrente calculada e a medida tem relação com a corrente de fuga que flui na superfície do isolador.

B. Cálculos da quantidade de descargas parciais

Para o cálculo das quantidades de descargas parciais nos isoladores, utilizou-se as formas de onda de corrente de fuga calculadas anteriormente. Foi realizada uma decomposição da corrente de fuga para retirar a parcela relacional da corrente, de forma a deixar os ruídos presentes no sinal, que podem ter relação com a descarga parcial. Dessa forma, a partir da integração apresentada na equação (1), realizada sobre o sinal dos ruídos, é obtida a quantidade de coulomb por ciclo relativa à quantidade de carga da descarga parcial.

$$DP = (\int |I_{dif}(t)dt|) / N^o \text{ de ciclos} \quad (1)$$

Onde I_{dif} representa o sinal de corrente residual, ou seja, o sinal de corrente de fuga relativo ao ruído. Com isso, é possível caracterizar o comportamento da descarga parcial para os isoladores secos e úmidos.

VII. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Assim como apresentado anteriormente, a partir da obtenção das formas de onda de tensão e corrente do circuito AC com os isoladores conectados, foi possível obter a

impedância equivalente do circuito. Neste caso, para os resultados apresentados, a impedância equivalente inclui tanto a impedância do isolador quanto do divisor resistivo de tensão, como apresentado no circuito elétrico apresentado na Fig. 10.

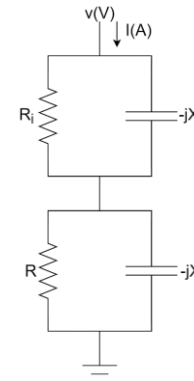


Fig. 10. Circuito final do ensaio AC com dois transformadores conectados em cascata.

O circuito elétrico equivalente da Fig. 10 apresenta uma representação da impedância do isolador $R_i - jX_i$ em série com a impedância do divisor de tensão resistivo $R - jX$. Com base neste circuito, os valores de resistência e reatância foram calculados para cada um dos isoladores. Os resultados destes cálculos para o décimo isolador da cadeia em seu estado sujo e seco são apresentados na Fig. 11.

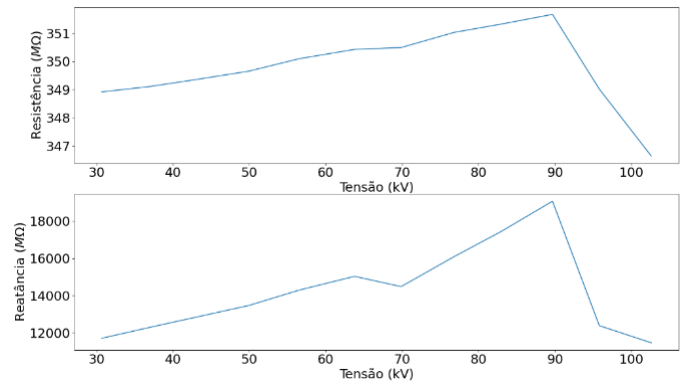


Fig. 11. Resistência e reatância calculadas para o isolador de nº10 durante os ensaios com os isoladores sujos e secos.

A partir do gráfico da Fig. 11 é possível observar que, conforme o valor da tensão de entrada do circuito aumenta, a resistência também tende a aumentar até um certo ponto, isso ocorre devido há existência de colisões eletrônicas. Todavia, a partir de certo ponto, é possível observar, para alguns isoladores, que há uma queda na resistência, o que indica, consequentemente, um aumento na corrente. Esta corrente tem origem eletrônica e percorre a superfície do isolador. A partir do ponto de queda da resistência, também se infere a ocorrência de descargas parciais nos isoladores.

Os resultados obtidos para os isoladores contaminados naturalmente e umidificados artificialmente foram compilados utilizando os mesmos critérios apresentados anteriormente. Desta forma, os valores de impedância apresentados na Fig. 12 também são caracterizados pelo circuito apresentado na Fig. 10.

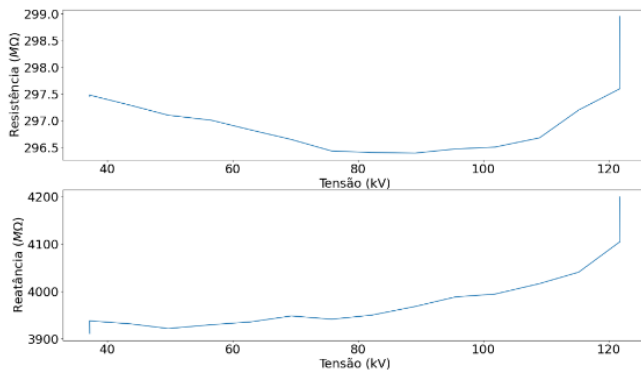


Fig. 12. Resistência e reatância calculadas para o isolador de nº10 durante os ensaios com os isoladores sujos e úmidos.

Com base nos valores obtidos para as impedâncias dos isoladores sujos e úmidos, representados pela Fig. 12, nota-se que para os isoladores umidificados, o comportamento da resistência é diferente do observado anteriormente. Com o aumento da tensão, é possível notar a queda da resistência durante toda a extensão do gráfico, até um ponto de inflexão onde há um aumento da resistência. O oposto ocorre com a reatância para alguns casos, que aumenta ao longo do gráfico junto com a tensão. Ressalta-se ainda que, para os isoladores úmidos, duas medições foram realizadas para o último valor de tensão considerado. Por este motivo, existe a mudança abrupta de valor para as variáveis de resistência e reatância para este último valor de tensão. Nota-se ainda que, devido às duas medições feitas com a diferença de 1 minuto entre uma e outra, é possível observar um aumento expressivo na resistência e na reatância após esse intervalo temporal.

A Fig. 13 e a Fig 14 apresentam uma análise comparativa entre os valores das resistências e reatâncias do circuito para os diferentes isoladores contaminados, em condições secas e úmidas. Os valores considerados foram arbitrariamente obtidos para a décima medição dos ensaios, correspondente à uma tensão de aproximadamente 89 kV.

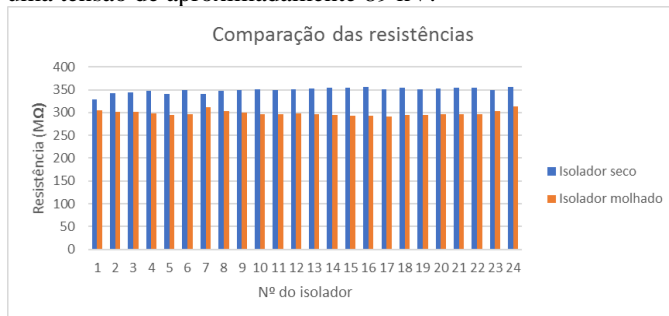


Fig. 13. Comparação entre os valores de resistência do circuito para os isoladores contaminados em diferentes condições.

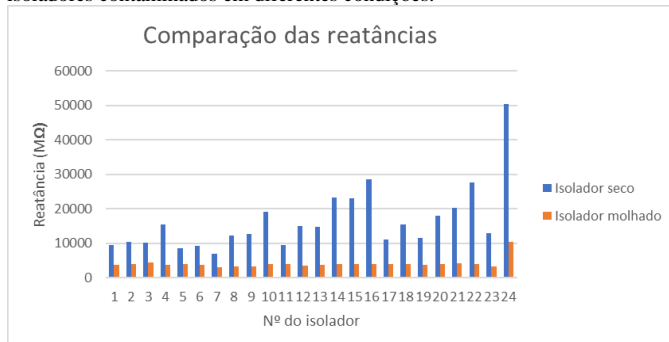


Fig. 14. Comparação entre os valores de reatância do circuito para os isoladores em diferentes condições.

A partir da análise dos gráficos é possível observar que não há alterações significativas de resistência para os diferentes isoladores, seja em condições com ou sem umidade. Além disso, a diferença entre os valores de resistência obtidos para isoladores secos e isoladores molhados também é pequena. Todavia, para a reatância observa-se uma distinção visível entre os valores obtidos para diferentes isoladores durante a análise de isoladores secos. Esta mesma situação não é verificada para os isoladores com umidificação artificial, que apresentam uma reatância oscilando em torno de um valor médio.

Para a análise da condutância, foram considerados os valores medidos de corrente nos isoladores (corrente medida no ramo do divisor resistivo) e os valores calculados de tensão para os isoladores. Com esses dados, foi possível calcular a condutância de cada um dos isoladores nas condições de isoladores secos e úmidos. Os resultados são apresentados na Fig. 15.

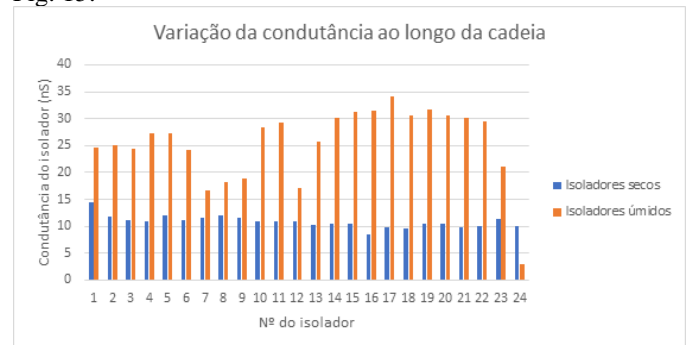


Fig. 15. Comparação da condutância dos isoladores contaminados em condições com e sem umidade.

Observa-se a partir do gráfico que o valor da condutância é visivelmente maior para quase todos os isoladores quando umidificados artificialmente. Essa situação só não é verificada para o isolador 24, o isolador mais próximo à torre da LT. O aumento da condutância para os isoladores úmidos indica que uma parcela adicional de corrente passa a percorrer a poluição úmida que está depositada na superfície do isolador. Além disso, observa-se que para os isoladores em condições secas, esse parâmetro se mantém estável ao longo da cadeia; o contrário ocorre com os isoladores úmidos, cuja condutância apresenta variações ao longo da cadeia de isoladores.

A parcela adicional de corrente que percorre os isoladores úmidos pode ter relação com o aumento de descargas parciais, pois, como é possível ver na Fig. 16, para a maior parte dos casos, a quantidade média de descargas parciais é maior para os isoladores úmidos.

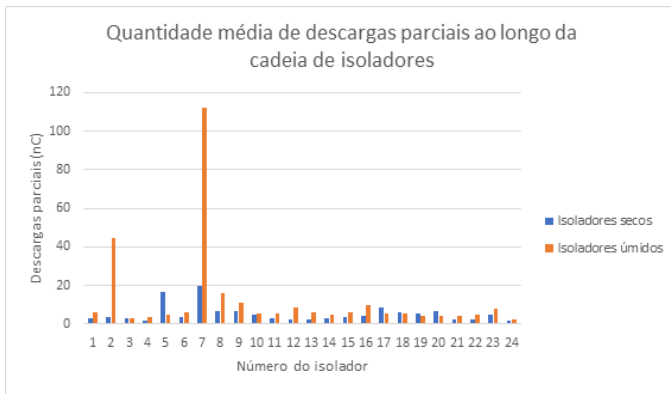


Fig. 16. Quantidade média de descargas parciais para os isoladores contaminados em condições com e sem umidade artificial.

A. Comparação dos resultados com os isoladores limpos

Em relação aos ensaios realizados com os isoladores limpos, a impedância de cada isolador foi calculada seguindo a metodologia apresentada anteriormente. Os resultados para as impedâncias calculadas para os isoladores limpos e secos e limpos e úmidos são apresentados na Fig. 17 e Fig. 18, respectivamente. Para fins comparativos, gráficos similares foram criados para os isoladores contaminados secos e úmidos, apresentados na Fig. 19 e Fig. 20, respectivamente.

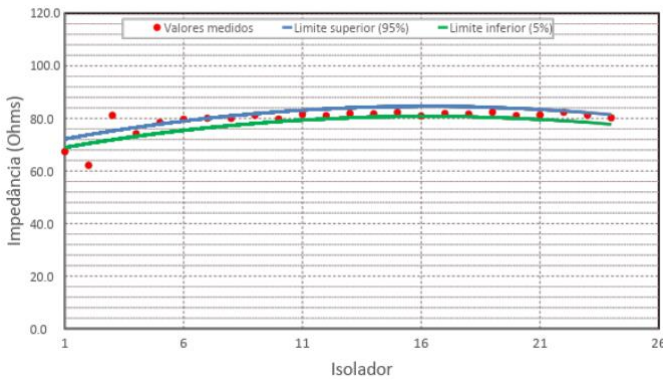


Fig. 17. Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores limpos e secos

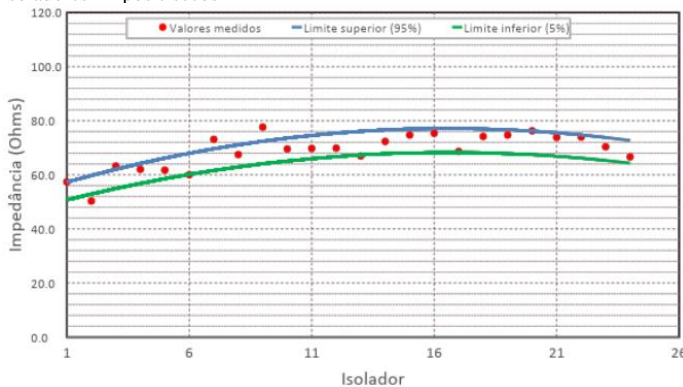


Fig. 18. Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores limpos e úmidos

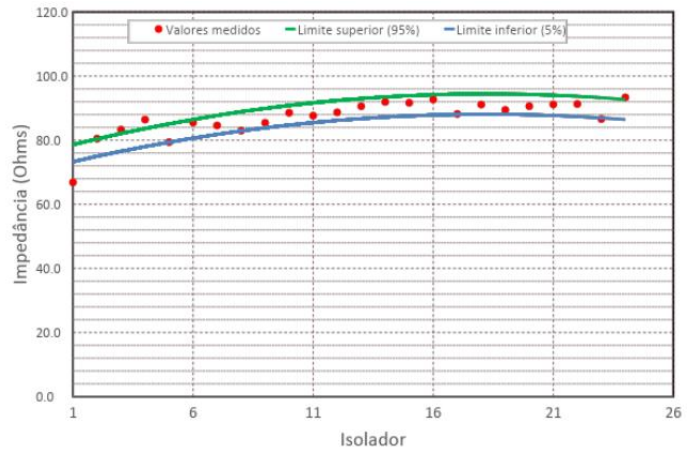


Fig. 19. Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores sujos e secos

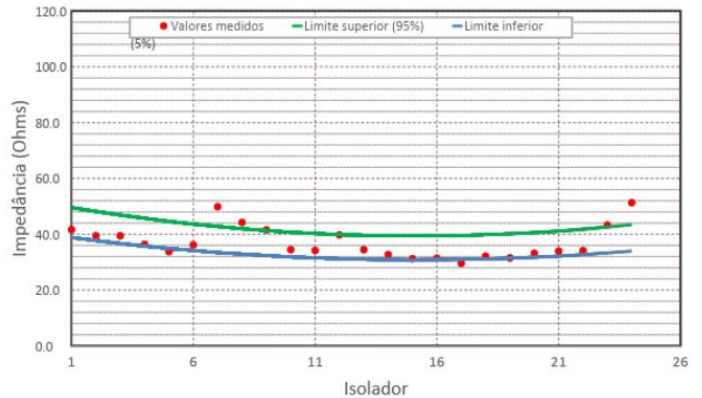


Fig. 20. Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores sujos e úmidos

Com base na Fig. 17 e Fig. 18, que apresentam o comportamento dos isoladores limpos, observa-se que a degradação sofrida pelos isoladores causada pela poluição tem um caráter permanente, ou seja, mesmo após a remoção dos contaminantes, o desempenho do isolador permanece prejudicado. Essa degradação é verificada, pois, quando os isoladores limpos recebem a umidade artificial, sua impedância é reduzida, assim como ocorre para os isoladores contaminados, o que indica uma alteração nas características superficiais dos isoladores.

O grau de degradação permanente apresentado no comportamento dos isoladores, pode ser ocasionado pelos seguintes fatores:

- Erosão superficial ocasionada pelo processo de deposição de contaminantes;
- Ocorrência de descargas parciais na superfície dos isoladores.

Além disso, a partir dos gráficos (Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19 e Fig. 20), nota-se que há um grau de variação significativo do funcionamento dos isoladores ao longo da cadeia, de forma que, os isoladores das extremidades apresentam um comportamento com maior nível de deterioração que os isoladores do centro da cadeia.

VIII. CONCLUSÕES

Este trabalho visou desenvolver ensaios laboratoriais de alta tensão utilizando isoladores naturalmente contaminados a fim de verificar a performance de tais elementos após um período

de exposição a um ambiente severo em termos de poluição. A partir dos resultados, foi possível inferir um grau permanente de degradação no desempenho elétrico de tais isoladores. Esta degradação pode estar relacionada com os mecanismos de deposição de contaminantes na superfície dos isoladores e com a ocorrência de descargas parciais, dois processos que podem acarretar em danos superficiais aos equipamentos.

Ressalta-se ainda a contribuição promovida pelo estudo ao utilizar isoladores naturalmente poluídos, pois, conforme visto na seção II, o processo de deposição de contaminantes na superfície dos isoladores é afetado pela presença ou não do campo elétrico, que está presente quando a LT está em operação. Desta forma, ensaios realizados com isoladores naturalmente poluídos apresentam resultados mais condizentes com a prática do que àqueles obtidos com isoladores contaminados artificialmente.

Por fim, ressalta-se a importância das análises obtidas a partir dos resultados dos ensaios laboratoriais, que destacam os impactos negativos permanentes que a poluição causa sobre a performance dos isoladores. Este tipo de informação é de extrema valia e indica a importância de considerar a severidade da poluição no ambiente de operação em estudos de viabilidade de novos empreendimentos e nas análises sobre a vida útil de isoladores de LTs.

IX. AGRADECIMENTOS

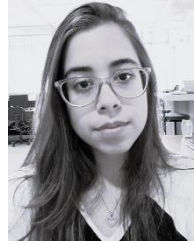
Este trabalho foi também desenvolvido no âmbito do Programa de P&D regulado pela ANEEL.

X. REFERÊNCIAS

- [1] A. El-Hag. Application of machine learning in outdoor insulators condition monitoring and diagnostics. IEEE Instrumentation Measurement Magazine, v. 24, n. 2, p. 101–108, 2021.
- [2] S. Sanyal, T. Kim, C-S. Seok, J. Yi, J-B. Koo, J-A. Son e I-H. Choi. Replacement strategy of insulators established by probability of failure. Energies, v. 13, n. 8, 2020. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/2043>>
- [3] M. Jiang, J. Guo, Y. Jiang, L. Li e M. Lu. Dust contamination on surface of transmission line insulators in air-polluted regions in China: statistical characteristics, adhesion mechanism, and environmental impact factors. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, p. 1–12, 07 2020.
- [4] I. Ullah, M. Akbar. Anti-aging characteristics of rtv-sir aided hv insulator coatings: Impact of dc polarity and fillers. Materials Chemistry and Physics, v. 278, p. 125634, 2022. ISSN 0254-0584. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058421014176>>
- [5] Z. Li, F. Yin, B. Cao, L. Wang, S. Shao e M. Farzaneh. Pollution flashover performance of rtv coatings with partial damage. International Journal of Electrical Power Energy Systems, v. 121, p. 106102, 2020. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519342498>>
- [6] Arshad, A. Nekahi, S. G. McMeekin and M. Farzaneh, "Ageing and degradation of silicone rubber insulators due to dry band arcing under contaminated conditions," 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/UPEC.2017.8231873.
- [7] B. Mehmood; M. Akbar; R. Ullah. Accelerated aging effect on high temperature vulcanized silicone rubber composites under dc voltage with controlled environmental conditions. Engineering Failure Analysis, v. 118, p. 104870, 2020. ISSN 1350-6307. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630720306841>
- [8] R. D. Fuchs. Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- [9] CIGRE. Polluted Insulators: A review of current knowledge. 2000.

- [10] S. Zhao, C. Zhang, Y. Zhang, e D. Zhang. (2020). Collision Mechanism and Deposition Characteristics of Particles on the Catenary Insulator Surface. Coatings. 10. 697. 10.3390/coatings10070697.
- [11] M. Ahl, D. Rehm. KIT High Voltage Construction 4.0. 2018.

XI. BIOGRAPHIES



Sofia Moreira de Andrade Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração de Sistemas Dinâmicos pela USP/São Carlos (2020). Graduada em Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação pela USP/São Carlos (2018). Atualmente, é aluna de Doutorado da Universidade de São Paulo, na área de Sistemas Dinâmicos. Tem experiência de docência na área de engenharia elétrica e eletrônica. As áreas de pesquisa são focadas em projetos de aprendizado de máquinas, sistemas fotovoltaicos, sistemas embarcados e equipamentos de linhas de transmissão.



Victor Hideki Yoshizumi Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2018) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2021) sendo bolsista CAPES. Atualmente é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo como bolsista CAPES. Tem experiência na área de Aprendizagem de Máquinas, Mineração de Dados, Algoritmos Bioinspirados, Processamento Digital de Sinais, Mecatrônica e Robótica, atuando principalmente nos seguintes temas: sistemas inteligentes híbridos, redes neurais artificiais, algoritmos de ensemble, análise de dados e equipamentos de linhas de transmissão.



Beatriz de Lima Tavares Possui mestrado em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em Sistemas Elétricos de Potência, pós-graduada em Engenharia de Segurança do Trabalho (PUC-Minas) e graduação em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Atualmente é Gerente de Expansão - Reforços e Melhorias na ARGO Transmissão de Energia. Possui experiência em regulação do setor elétrico, planejamento da expansão e análise de operação. Sua área de interesse é sistemas de potência e energia.



Wallace Honorato Moreira Engenheiro Eletricista com experiência em obras de Linhas de Transmissão de 138 à 800 kV, com atuação nas etapas de elaboração de Projeto Básico e Executivo, Serviços Preliminares de Engenharia (Topografia e Sondagem), Gestão de Projetos de Obras de Linhas de Transmissão, Fornecimento de Materiais e Acompanhamento das obras de Construção das LTs. Atualmente, ele tem desempenhado o cargo de Gerente de Novos Negócios da ARGO Energia.



Ana Claudia Carvalho Barquete Possui graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em Sistemas de Energia e Automação pela Universidade de São Paulo – USP (2013). Tem 3 anos de experiência na área de projetos de Engenharia Elétrica. Experiência também no setor elétrico, na área de comercialização de energia elétrica, distribuição, geração e transmissão.



Rogério Andrade Flauzino Graduado em Engenharia Elétrica pela UNESP/Bauru (2001), mestrado em Engenharia Industrial pela UNESP/Bauru (2004), doutorado em Engenharia Elétrica pela USP/EESC (2007) e Livre-Docente

pela USP/EESC em 2014. É revisor do Journal of Control, Automation and Electrical Systems, IEEE Transaction on Power Delivery, IEEE Transaction on Power Systems, Electric Power Systems Research, International Journal of Electrical Power & Energy Systems e Applied Soft Computing. As áreas de atuação se concentram em Sistemas Elétricos de Potência e Sistemas Inteligentes. As pesquisas atualmente em desenvolvimento são direcionadas às redes inteligentes, estudo de sistemas de armazenamento de energia e gestão de ativos em sistemas elétricos de potência.



Danilo Hernane Spatti é Professor Dr. no Departamento de Sistemas de Computação da USP São Carlos (SSC/ICMC/USP), onde ministra disciplinas de Circuitos Eletrônicos Digitais, Sistemas Embarcados e Computação Científica. Formou-se em 2005 em Engenharia Elétrica com ênfase em Informática Industrial pela Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP Bauru. É Mestre em Engenharia Elétrica pela USP São Carlos (2007),

sendo bolsista CAPES. Em 2011 obteve o título de Doutor em Ciências pelo Programa de Engenharia Elétrica da EESC/USP, desenvolvendo pesquisas na área de proteção de sistemas de distribuição, sendo bolsista da FAPESP. Foi bolsista de Pós Doutorado (CAPES/PNPD) UNESP / Bauru entre 2013 e 2014 e pela USP / São Carlos entre 2014 e 2015. É autor de 3 Patentes, 4 Livros e 7 Capítulos de Livros que figuram como textos mais influentes nas áreas de Inteligência Computacional, Mineração de Dados, Eletrônica Digital e Processamento de Sinais, aplicados às mais diversas áreas de conhecimento. Desde 2015 coordena o Grupo de Estudos em Sinais Biológicos - GE4Bio envolvendo instituições nacionais e internacionais.



Ivan Nunes da Silva É bolsista Produtividade em Pesquisa pelo CNPq desde o ano 2000. Possui graduação em Ciência da Computação (Bacharel) pela Universidade Federal de Uberlândia (1991), graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1992), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1995) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de

Campinas (1997). Atualmente é Professor Titular (MS-6) do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de São Paulo (USP // Campus de São Carlos). Recebeu diversas premiações e menções honrosas no Brasil e no Exterior. Foi Editor-Chefe do "Journal of Control, Automation and Electrical Systems", promovido pela Sociedade Brasileira de Automática (SBA), entre 2013 e 2017, e da Revista "Controle & Automação" (em 2012). Atualmente, desempenha o papel de Editor-Chefe Emérito do Journal of Control, Automation and Electrical Systems", e de Editor-Associado da "Polytechnica (SPRINGER)". É integrante do Comitê Técnico "Computers for Control" do IFAC (International Federation of Automatic Control). Atua como revisor de artigos submetidos em mais de 25 periódicos científicos internacionais. É assessor científico da FAPESP, CNPq, CAPES, FAPEMIG, FACEPE, FAPESPA e Fundação Araucária (Governo do Paraná). Possui mais de 80 artigos publicados em periódicos nacionais/internacionais e mais de 380 artigos completos em anais de eventos científicos. Possui 8 livros publicados (incluída 2 organizações de obra), sendo ainda autor de 19 capítulos de livros já também publicados. Orientou 39 dissertações de mestrado (incluída 2 co-orientações) e 28 teses de doutorado (incluída 3 co-orientações). Já coordenou mais de 10 projetos de pesquisa fomentados por agências públicas. Participou em mais de 190 bancas de mestrado/doutorado. Possui 7 patentes depositadas junto ao INPI. É fundador e coordenador do Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas (LAIPS) da USP, sendo também coordenador do respectivo grupo de pesquisa certificado pelo CNPq. Suas áreas de pesquisas incluem temas relacionados à automação inteligente de processos envolvendo sistemas elétricos de potência, controle inteligente de máquinas e equipamentos elétricos, projeto de arquiteturas de sistemas inteligentes, identificação e otimização de sistemas.