

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM OPERAÇÃO

HÉLIO AMORIM(1); THIAGO BAPTISTA RODRIGUES(1)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1)

RESUMO

Atualmente a única forma de avaliar o sistema de isolamento dos Transformadores de Instrumentos (TI) é através da realização do teste de fator de potência, o que exige o desligamento do sistema, sendo realizado em um intervalo de tempo elevado, a cada seis anos, por exemplo. Além deste grande intervalo de tempo entre avaliações, dificultando uma análise incipiente, esses testes são geralmente feitos em 10 kV, tensão bem inferior à tensão de operação, impossibilitando a detecção dos sinais de alta frequência gerados pela ocorrência de Descargas Parciais (DP). Somase a isso a complexidade atual na operação do sistema elétrico, onde os desligamentos são cada vez mais raros. Desta forma, o surgimento de uma metodologia de avaliação em tempo real e não invasiva do equipamento, como será demonstrada nesse documento, pode representar um salto qualitativo aos processos de manutenção das empresas do setor elétrico. A medição de descargas parciais pode proporcionar valiosa informação a respeito das condições do sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão. O presente trabalho tem como objetivo principal apresentar alguns detalhes pertinentes à medição e ao monitoramento de TI, no caso especial em Transformador de Corrente (TC), combinando a medição em campo e a validação em laboratório, em condições controladas, o que permite afirmar que a técnica de monitoramento em tempo real destes equipamentos é factível e está disponível para o sistema elétrico brasileiro. Uma ferramenta computacional baseada em técnicas avançadas na área de inteligência artificial está pronta e testada para ajudar a impulsionar esta técnica.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de Corrente, Monitoramento, Descargas Parciais.

1.0 INTRODUÇÃO

A ocorrência de Descargas Parciais (DP) nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão é um sintoma de fragilidade na suportabilidade dielétrica e cuja evolução pode vir a acarretar graves consequências para esses equipamentos e para o sistema elétrico. A detecção de DP ocorrendo no interior de um sistema isolante é de fundamental importância para se avaliar o estado operativo de praticamente todos os sistemas de isolamento utilizados em alta tensão. Esta análise é importante visto que as DP são um dos fenômenos que mais prematuramente consegue diagnosticar uma futura queda de suportabilidade elétrica dos materiais.

O Cepel vem aplicando metodologias com baixo impacto operacional que viabilize a medição e avaliação de equipamentos elétricos no campo sob tensão aplicada [1] [2]. Em alguns casos, como em Para-raios (PR), Transformadores de Corrente (TC), Transformadores de Potencial (TP) e Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC), não há a necessidade de desligamento do equipamento, o que aumenta sobremaneira a quantidade de equipamentos a serem avaliados.

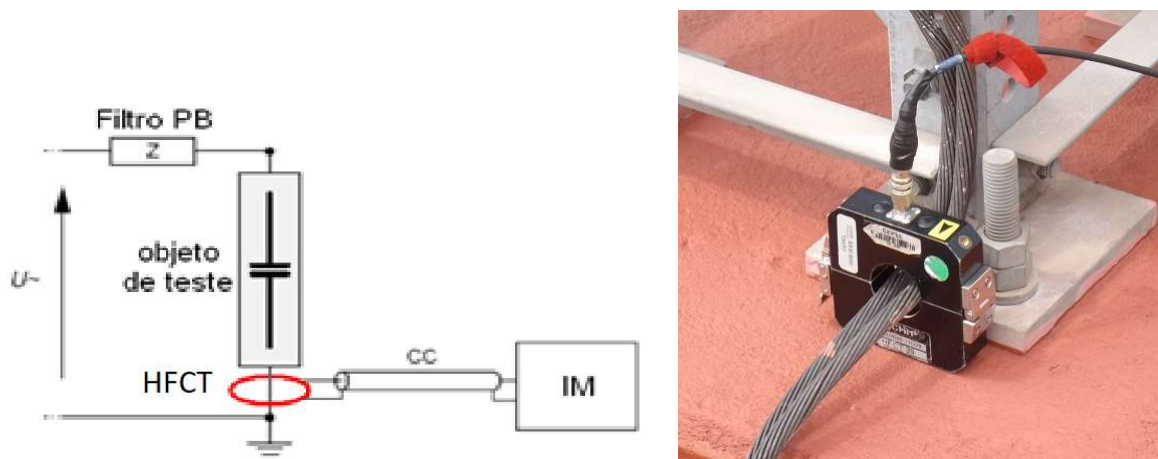
Quando um TC de Alta Frequência (HFCT) é usado para medição de DP, pode-se dispensar o uso de impedância de medição, ou também conhecido como quadripólo, ligada eletricamente entre o objeto e o terra. O HFCT também possui uma importante vantagem que é a isolamento galvânica entre o medidor de DP e o circuito de alta tensão, proporcionando segurança física e material. A Norma IEC 60270 trata esse tipo de medição como não-convencional, devido a ausência de calibração, inviabilizando a quantificação dos sinais.

No entanto, a grande vantagem do uso do HFCT, desde que seja do tipo bipartido, é o baixo impacto no sistema elétrico, sem a necessidade de interrupção no fluxo de energia. A instalação do HFCT, na maioria das vezes, é realizada em condições normais de operação através de um "clamp" ao redor do condutor que liga o equipamento elétrico ao terra. Entretanto, comparado com o sistema convencional, ou seja, o método direto, a medição por meio do HFCT será menos sensível uma vez que não existe um capacitor de acoplamento no circuito.

A utilização desta técnica (medição de DP pelo cabo de terra com o HFCT), aliada à AGD (análise de gases dissolvidos no óleo) para o diagnóstico da condição dielétrica dos TCs instalados nas subestações, torna-se uma ferramenta poderosa na retirada de equipamentos desse tipo com suspeita de DP internas. Estas duas técnicas foram utilizadas na avaliação do TC da classe de 550 kV que foi retirado de operação para uma análise mais detalhada em laboratório,

2.0 METODOLOGIA

Numa tentativa de minimizar a equivocada idéia de que este tipo de medição só deve ser realizada no âmbito laboratorial, o Cepel no início dos anos 2010, resolveu investigar a possibilidade de medição de DP por meio de Transformadores de Corrente com características especiais de resposta em alta frequência, denominados de HFCT, em inglês High Frequency Current Transformer. Buscou-se desenvolver uma metodologia de baixo impacto operacional e de rápida execução, de forma que pudessem ser monitorados muitos equipamentos em uma única missão [2]. Na medida em que há condições para responder razoavelmente questões técnicas pertinentes à este tipo de medição, o índice de assertividade na avaliação das condições do isolamento elétrico tende a ser maior.



Onde: filtro PB - Filtro passa-baixa;
 U - Tensão de ensaio;
 CC - Cabo coaxial;
 IM - Instrumento de medição;
 HFCT - Transformador de corrente de alta frequência.

Figura 1 – Circuito de Medição de DP e Sensor do tipo HFCT instalado no cabo de aterramento

Fisicamente, as DP são o resultado de um processo de ionização em ambiente gasoso no interior de materiais dielétricos, causada por um campo elétrico intenso e localizado [3]. A partir desse processo, podem ocorrer pulsos eletromagnéticos, luz, ruído acústico, aumento da temperatura e reações químicas. Tradicionalmente, as DP são avaliadas por meio da medição dos impulsos elétricos de alta frequência efetuada num circuito de medição específico, de acordo com os procedimentos descritos na norma IEC 60270 [3].

Em ambientes ruidosos, tais como subestações, o sinal deve ser pré-condicionado de forma que seja possível discriminar os sinais ruidosos dos sinais úteis de DP. A qualidade de uma medição de DP está diretamente relacionada com a eficiência do pré-processamento dos sinais adquiridos. Filtros personalizados (digitais ou analógicos) são projetados e fabricados de forma a minimizar os sinais indesejáveis e permitir que leituras úteis sejam adquiridas pelo sistema de medição.

3.0 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Recentemente o sistema elétrico brasileiro sofreu com inúmeros casos de perdas, seguidas de explosões, envolvendo um determinado equipamento elétrico. Muitos estudos e diagnósticos foram realizados usando diversas técnicas, visando descobrir e, principalmente, antecipar as falhas destes equipamentos. Neste sentido, o Cepel foi convidado a avaliar 12 TC em uma determinada subestação utilizando a metodologia desenvolvida pelo próprio Cepel, baseada na medição de DP por meio do cabo terra com o HFCT. Além disso, uma análise cromatográfica foi realizada pela empresa proprietária dos ativos indicando concentração de Hidrogênio, Metano e, principalmente, acetileno na amostra de óleo retirada em um destes equipamentos. Os resultados estão na tabela 1.

Tabela 1 - Resultado da Cromatografia Gasosa (AGD) em ppm

Data	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	TCG	TG
29/03/18	157	24	3	3	1	1396	989	11607	58721	1584	72901

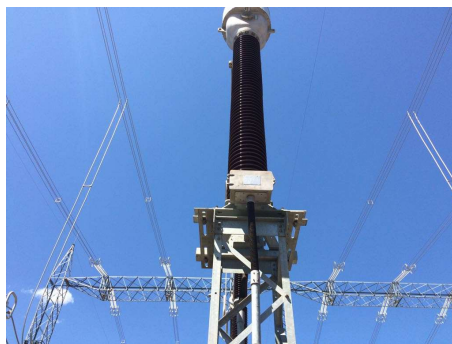


Figura 1 - TC da classe de 500 kV em operação na Subestação

O sistema é capaz de correlacionar os sinais de alta frequência capturados pelos sensores com o sinal de sincronismo de tensão na frequência de 60Hz. Nesse mapa característico de DP, denominado PRPD (Phase Resolved Partial Discharge), é importante observar alguns aspectos peculiares. Os sinais registrados, pontos em azul, estão concentrados em locais específicos da senóide de 60Hz, denominada referência. Esse sincronismo é um dos principais mecanismos para o auxílio na distinção entre ruído e DP. Quando há o sincronismo e, mais ainda, quando ele ocorre na região de maior variação de tensão, ou seja, na subida ou descida da tensão, pode-se afirmar que são DP.

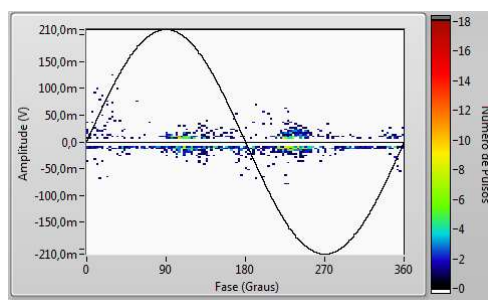


Figura 2 – PRPD registrado no campo com sincronismo

Em razão dos resultados e diagnóstico realizado pelo Cepel, a empresa resolveu retirar o TC de operação e o enviou para ensaios complementares no Cepel, em ambiente controlado.

4.0 ETAPA LABORATORIAL

O equipamento foi retirado de operação e enviado ao Cepel para ensaios complementares. Um teste prévio foi realizado no Laboratório UAT externo (gaiola) do Cepel, com tensão aplicada chegando até 380 kV ($1,2 \cdot 550 \text{ kV} / \sqrt{3}$). Sinais característicos de DP foram encontrados nesta medição. Uma foto do circuito montado para ensaio do TC no Laboratório UAT Externo é mostrada na figura 3.



Figura 3 – Detalhe do Equipamento sob teste no Cepel e o Circuito de Medição

Os sinais registrados no campo no domínio do tempo possuem semelhanças inquestionáveis e inegáveis entre as medições no campo e no laboratório, como mostrado na figura 4 a seguir.

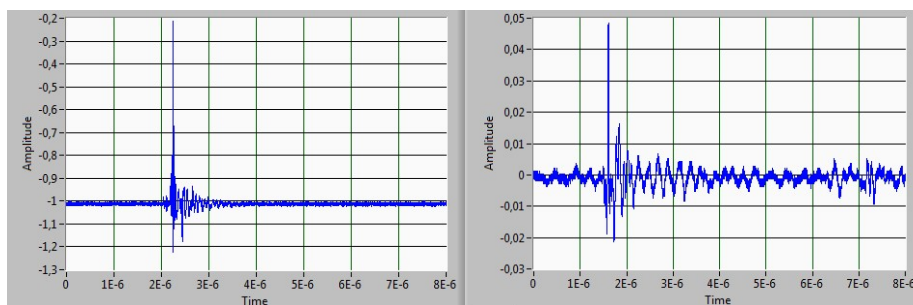


Figura 4 - Medição Realizada no Campo com o Equipamento Energizado (esquerda) e no Laboratório (direita)

Posteriormente, foi realizado o ensaio do TC no Laboratório de Alta Tensão (AT1) do Cepel, onde o nível de ruído é da ordem de 5 pC e o ambiente é totalmente controlado. Uma foto do circuito de ensaio montado no AT1 é mostrada na figura 5. Neste caso, também foram utilizados o método convencional e o não-convencional, utilizando-se o TC de alta frequência no cabo de aterramento.



Figura 5 – Equipamento sob teste no Laboratório de Alta Tensão (AT1) do Cepel

O procedimento de ensaio adotado foi o seguinte:

- Elevação da tensão até 318 kV (a nominal do equipamento = 550 kV / $\sqrt{3}$);
- Em seguida, a elevação da tensão até 380 kV (20% acima da nominal);
- Ensaio de tensão suportável com 520 kV (80% de 650 kV - tensão suportável nominal do equipamento) por 1 minuto;
- Descida da tensão até 318 kV;
- Descida da tensão até o zero.

A tabela 2 mostra os valores de DP medidos em cada nível de tensão pelo método convencional.

Tabela 2 - Valores de DP medidos no TC

Tensão (kV)	DP (pC)
50	<15
100	<15
150	<15
200	<15
250	43
300	66
318	69
380	160
520	>170 (passou do valor máximo após 27 s)

Na figura 6 são mostrados, respectivamente, o mapa de DP registrado na tensão nominal (318 kV) no campo, utilizando o HFCT com o equipamento energizado na Subestação, e o mapa de DP registrado no laboratório AT1, através do método convencional.

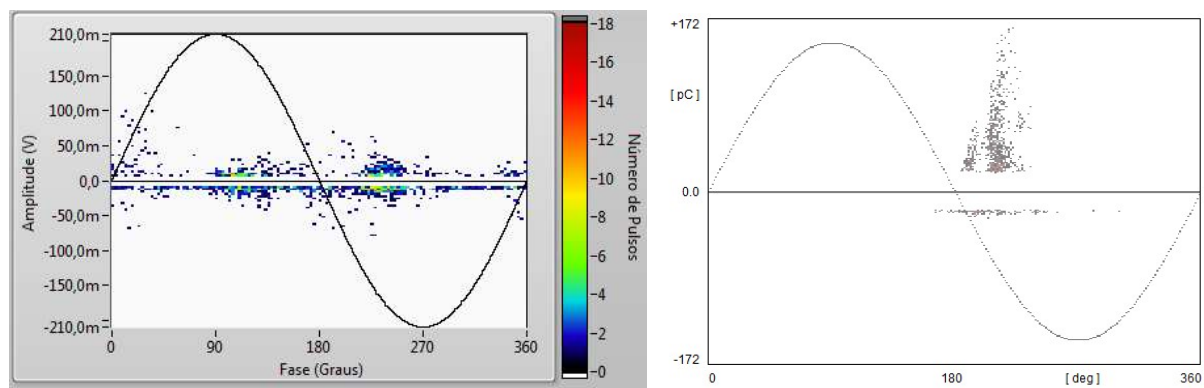


Figura 6 - PRPD obtido com o HFCT no campo com o TC energizado e o PRPD obtido pelo método convencional no laboratório AT1 em 318 kV

Também foi realizada a medição dos valores de capacitância e tangente delta no TC. Os valores obtidos são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Valores de Capacitância e Tangente Delta medidos no TC

Tensão (kV)	Cx (pF)	Tangente Delta (%)
10	885,47	0,1795
100	885,54	0,1875
200	885,66	0,1916
300	885,79	0,1963
318	885,82	0,1975
380	885,92	0,2020

5.0 AUTOMATIZAÇÃO POR MEIO DE FERRAMENTAS DE IA

Para automatizar o reconhecimento dos sinais, diferentes variáveis (ou parâmetros) foram avaliadas, sendo algumas sugeridas na literatura e outras propostas em [4] [5]. Variáveis como "área total do sinal", "área total da FFT (Fast Fourier Transform) do sinal", "largura de pulso do sinal", "largura de pulso da ACF (Autocorrelation Function - uma espécie de transformada do sinal) do sinal", "ponto de maior pico de frequência do sinal", "ponto de maior pico de frequência da ACF do sinal", "intervalo de tempo entre os dois maiores picos do sinal", "intervalo de tempo entre o máximo e o mínimo do sinal", "intervalo de frequência entre os dois maiores picos da FFT do sinal", foram utilizadas para caracterizar cada amostra. Outras variáveis relacionadas aos três maiores picos de dispersão da ACF do sinal, da FFT do sinal, e da FFT da ACF do sinal, foram também consideradas na caracterização das amostras. As variáveis apresentadas anteriormente devem ser avaliadas individualmente e em grupo com relação à sua capacidade de extrair informações dos sinais no tempo. Para isso, os dados com os sinais medidos no campo que possuem classe determinada (sabe-se apriori se os sinais são ou não de DP), foram avaliados em relação ao poder discriminante das variáveis consideradas em separar sinais com DP e sem DP.

A classificação dos sinais medidos é efetuada por meio de duas técnicas conhecidas: "árvore de decisão" e "SVM" (Support Vector Machine ou máquina de suporte vetorial). O que se pretende é avaliar o desempenho de cada uma dessas técnicas quando aplicadas ao banco de dados em questão. A árvore de decisão é determinada através do algoritmo "J48", que leva em consideração as variáveis mais bem avaliadas para determinar se os sinais têm ou não características de DP. A árvore vai sendo montada conforme o "ganho de informação" das variáveis em relação à saída (classe). A raiz da árvore (primeiro atributo), por exemplo, corresponde à variável que fornece o maior ganho de informação com relação à classe de saída. De forma semelhante, os demais atributos da árvore são selecionados e posicionados nela, sempre baseando-se no ganho de informação.

O SVM é um algoritmo de aprendizado supervisionado, cujo objetivo é classificar determinado conjunto de dados que são mapeados para um espaço de características multidimensional utilizando uma função kernel para esta classificação [6]. O limite de decisão no espaço de entrada do SVM é representado por um hiperplano em dimensão superior no espaço. O que o SVM realiza na prática é a separação de um conjunto de objetos com diferentes classes utilizando o conceito de planos de decisão. Pode-se analisar o uso do SVM com o exemplo a seguir.

As estruturas de árvore de decisão e SVM foram determinadas considerando-se primeiramente as duas melhores variáveis relevantes e não-redundantes, e o percentual de acerto em cada caso foi calculado. Posteriormente fez-se o mesmo para três variáveis, quatro variáveis e assim por diante. Assim, foi possível verificar qual configuração fornecia o melhor percentual de acerto considerando-se ambos os métodos de classificação (árvore de decisão e SVM).

A implantação deste tipo de ensaio em campo, aliada à classificação automática das medições como parte da manutenção preventiva e, permitindo que inspeções regulares possam ser feitas em períodos definidos de tempo, torna-se uma ferramenta poderosa de avaliação. Pode-se destacar as seguintes vantagens:

- 1) Rapidez na execução dos ensaios e na avaliação dos equipamentos em operação, permitindo assim a sua retirada de serviço antes de uma eventual falha.
- 2) Realização do ensaio com o equipamento energizado e em funcionamento normal, sem a necessidade de intervenções nos equipamentos e nem no sistema elétrico de potência.
- 3) Capacidade de prevenir custos provocados por falhas dos equipamentos, evitando assim gastos desnecessários e avarias em equipamentos vizinhos ou protegidos por estes.
- 4) Menor dependência do olho clínico do especialista na determinação dos equipamentos com DP.
- 5) Maior segurança às equipes de manutenção.

6.0 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Após a sequência de medições, pode-se constatar a ocorrência de DP no equipamento ensaiado, principalmente para tensões acima de 250 kV, como pode ser observado na tabela 2. Houve um aumento significativo na ocorrência de sinais na tensão de 520 kV, o que obrigou a equipe a interromper o ensaio em 27 segundos (antes de atingir os 60 segundos programados). A taxa de repetição dos sinais aumentou substancialmente após o ensaio de tensão suportável, nas tensões de 318 kV e 380 kV.

Pode-se concluir que o TC ensaiado apresentou sinais de DP, indicando problemas internos que foram agravados com o evento de elevação da tensão.

A metodologia de medição de DP no campo, utilizando-se o HFCT, foi validada mais uma vez, agora com o CTH 550 kV. Acredita-se que seja possível, com esta metodologia, identificar no campo a ocorrência de descargas elétricas internas e com isso, possibilitar uma avaliação dos TCs no que se refere a uma redução de sua suportabilidade elétrica ao longo do tempo de operação. Entre os próximos passos planejados, estão a reamostragem de óleo e também a abertura do equipamento para inspeção interna.

Trabalhos anteriores demonstraram que os sinais medidos em equipamentos de subestação no campo, utilizando o HFCT acoplado no cabo de aterramento como sensor e sem desligar os equipamentos, podem ser utilizados para avaliar a presença de DP internas a estes. Para tanto, é necessário um especialista treinado que seja capaz de comparar as assinaturas dos sinais colhidos em campo com a assinatura de equipamentos reconhecidamente com DP ensaiados em laboratório em condições controladas.

O trabalho aqui apresentado demonstrou que é possível automatizar este processo com elevado percentual de acerto na classificação quanto à presença de DP internas, diminuindo a dependência do especialista no diagnóstico. Esse sistema de classificação automática está sendo incorporado pelo Cepel na classificação de sinais dos equipamentos medidos em campo e será também muito útil para as equipes de manutenção de todo o sistema Eletrobrás, que poderão dele usufruir e acelerar a retirada de equipamentos com DP.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W.R. Bacega, H. Tatizawa, A.G. Kanashiro, "Técnica de Identificação do Processo de Degradação de Para-raios de ZnO em Campo", XX SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 2009.
- [2] H.P. Amorim Júnior, A.T. Carvalho, T.B. Rodrigues, J.B. Borges, C.C. Fleming, "Experience with On-Line Insulation Diagnostics of Surge Arresters by PD Measurement in the Field", 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), v.1, p.p. 472-475, Montpellier - França, 2016.
- [3] IEC 60270:2000, High-voltage test techniques - Partial discharge measurements.
- [4] A. Contin, S. Pastore, R. Paganin, "Evaluation of Spaces for the Separation of Signals Due to Multiple PD Sources", Electrical Insulation Conference (EIC), Seattle - USA, p.p. 209-213, 2015.
- [5] Rodrigues, T. B., Vellasco M.M.B.R, Tanscheit, R e Amorim Junior, H.P, "Avaliação automática de para-raios e transformadores de corrente no campo quanto à presença de descargas parciais internas", XVIII Eriac – Décimo Oitavo Encontro Regional Ibero-Americano do Cigre, Foz do Iguaçu, Brasil, 2019.
- [6] V. Saradhi, H. Kamik, P. Mitra, "A Decomposition Method for Support Vector Clustering". In Proc. of the 2nd International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing (ICISIP), p. 268-271, 2005.

8.0 DADOS BIBLIOGRÁFICOS



Hélio Amorim nasceu em Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil. Obteve o Doutorado e Mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), em 2001 e 1997 respectivamente, e a Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade de Taubaté (UNITAU) em 1994. Atua profissionalmente como Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) há 24 anos. Possui diversos artigos publicados em periódicos científicos e seminários técnicos e uma patente. É professor universitário já atuando na UERJ, PUC-Rio e atualmente na UniFOA. É membro do Cigré A1 e atual coordenador do A1.67 sobre o estado da arte sobre os métodos, experiências e limites do efeito corona em barras estatóricas de hidrogeradores.



Thiago Baptista Rodrigues nasceu em Vassouras, Brasil, em 1982. Recebeu o bacharelado em ciências graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2004. Tem mestrado (2007) e doutorado (2021) em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (Cepel), atuando nas seguintes áreas: desenvolvimento e análise de novas tecnologias em sistemas elétricos de potência, medição e análise de descargas parciais em equipamentos elétricos, ensaios elétricos em campo e laboratório , diagnóstico de equipamentos elétricos e simulações matemáticas e computacionais de fenômenos elétricos.