



Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM

Desafios no diagnóstico de para-raios óxido de zinco de alta tensão aplicados na proteção de transformadores de potência

MARIO AUGUSTO CAETANO DOS SANTOS(1); RODRIGO EDUARDO CHAPARRO MORAES(2); ITAIPU(1);ITAIPU(2);

RESUMO

Este trabalho apresenta os desafios enfrentados na obtenção de diagnósticos de para-raios óxido de zinco aplicados na proteção de transformadores de potência, com enfoque na prevenção de falhas. A partir de técnicas de medição de corrente resistiva de fuga e de temperatura por termografia, e com apoio de uma ferramenta computacional dedicada, busca-se a emissão de diagnósticos assertivos. Porém, fatores externos e circunvizinhos podem influenciar consideravelmente os dados obtidos mediante as inspeções termográficas, com reflexos nas variações dos diagnósticos. Tais fatores de influência são analisados e discutidos, sendo sugeridas medidas para aprimoramento da metodologia de termografia.

PALAVRAS-CHAVE

Para-raios, Transformadores de Potência, Óxido de Zinco, Corrente Resistiva, Termografia

1.0 - INTRODUÇÃO

Os para-raios são equipamentos utilizados nas subestações do sistema elétrico de potência para proteger os demais equipamentos e instalações contra sobretensões potencialmente danosas, sejam advindas de manobras, de condições operacionais transitórias ou de descargas atmosféricas. Dentre os equipamentos existentes nas subestações, os transformadores de potência possuem grande relevância, seja em função de sua importância sistêmica ou de seu elevado valor imobilizado. Em virtude de sua menor suportabilidade a sobretensões, grande parte dos transformadores tem seus enrolamentos primários e secundários protegidos por para-raios (1).

Conforme (2), em virtude de sua simplicidade construtiva e desempenho superior, existe uma tendência para uso dos para-raios óxido de zinco (ZnO) em detrimento dos para-raios carboneto de silício (SiC). No Brasil, conforme levantamento realizado em 2010, 58% dos para-raios com tensão até 500 kV em operação nas empresas transmissoras eram do tipo ZnO e 42% do tipo SiC (3).

Outra característica construtiva importante para os para-raios é o tipo de material aplicado em seu invólucro (*housing*), podendo ser de porcelana ou de constituição polimérica. Para o primeiro, em caso de falha interna, apesar de ser equipado com dispositivos de alívio de pressão, há o risco de rompimento da porcelana e possível projeção de fragmentos (4).

Para aplicação na proteção de transformadores de potência, os para-raios normalmente são alocados muito próximos as buchas terminais e por vezes posicionados na parte superior do tanque ou dos radiadores (ver Figura 1). Tal situação, embora necessária para garantir a minimização dos efeitos das ondas viajantes de surto

de tensão (2), acaba amplificando os danos potenciais advindos de uma falha do para-raios, especialmente se este tiver o invólucro de porcelana (5).



Figura 1 – Para-raios de porcelana posicionado na parte superior do transformador (Fonte: INMR, 2019)

Em virtude do exposto acima, fica evidente a necessidade de evitar-se as falhas dos para-raios associados aos transformadores. Para tanto, uma estratégia de substituição programada de para-raios com invólucro de porcelana por outros com invólucro polimérico pode ser adequada. Em (6), tem-se um exemplo de aplicação de tal estratégia, onde os para-raios foram classificados por sua condição e tempo em operação, priorizando-se as substituições em diferentes prazos.

No entanto, restrições orçamentárias e regulatórias podem impor desafios para empreender-se uma estratégia de substituição de para-raios, de tal forma a exigir um controle sobre o estado operacional mediante o emprego de técnicas de diagnóstico, visando-se a minimização dos riscos de falha.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

A Itaipu Binacional (ITAIPU) é a entidade que construiu, opera e mantém a Usina Hidrelétrica de Itaipu, com potência instalada de 14 GW dividida igualmente nas frequências de 50 e 60 Hz. Além de ser a usina hidrelétrica com maior produção acumulada do mundo, também detém o recorde anual de produção obtido em 2016.

Dentre seus ativos de transmissão de energia elétrica, a ITAIPU possui 156 para-raios ZnO instalados ao tempo em bays de linha e de transformadores, operando em tensões de 66 à 500 kV. Especificamente na Subestação Margem Direita (responsável pelo despacho de energia na frequência de 50 Hz, tanto para o Brasil quanto para o Paraguai), existem 6 transformadores rebaixadores (500 – 220 kV) com potência de 430 MVA cada, 6 transformadores reguladores com potência de 430 MVA cada e 2 transformadores rebaixadores (220 – 66 kV) com potência de 25 MVA cada, com 60 para-raios ZnO com invólucro de porcelana associados. A Figura 2 – (a) apresenta a configuração de instalação dos para-raios nos transformadores rebaixadores de 500 – 220 kV e a Figura 2 – (b) a dos transformadores reguladores.



Figura 2 – Configurações de para-raios nos transformadores rebaixadores 500 – 220 kV (a) e nos transformadores reguladores (b) da Subestação Margem Direita (Fonte: Autor, 2019)

Na Tabela 1 são apresentados os dados relacionados aos para-raios ZnO associados aos transformadores, segmentados por fabricante e modelo (os nomes dos fabricantes e modelos são fictícios). Na Tabela 1, U_r refere-se a tensão nominal e U_c a máxima tensão de operação contínua, sendo ambas definições obtidas da norma IEC 60099-4.

Tabela 1 – Dados dos para-raios ZnO de transformadores na Subestação Margem Direita (Fonte: Autor, 2019)

Fabricante	Modelo	Ano fabricação	Quantidade	U_r (kV)	U_c (kV)
A	A1	2008	3	420	336
A	A2	2008	6	240	191
A	A2	2011	6	240	191
A	A3	2010	3	420	336
B	B1	2001	3	420	336
B	B2	2001	6	242	194
C	C1	1982	9	420	320
C	C2	1982	24	240	171

É importante observa-se pela Tabela 1 que mais da metade dos para-raios (33 unidades) apresentam uma idade de 37 anos, concentrados nos modelos C1 e C2. Essa idade está acima da vida útil estimada de 30 anos (7), o que demanda uma atenção especial quanto aos aspectos de manutenção e monitoramento.

2.1 Estratégia de diagnóstico de para-raios ZnO

Em geral, várias empresas transmissoras no Brasil utilizam técnicas de medição para diagnóstico de para-raios, havendo predominância do uso da termografia, muito embora a medição de corrente resistiva de fuga também seja aplicada (3).

Na ITAIPU, a medição de corrente resistiva de fuga (pelo método B2 da norma IEC 60099-5) já é realizada há mais de duas décadas nos para-raios ZnO, porém havia uma grande dificuldade em obter-se um diagnóstico adequado, especialmente pelo esforço demandado na análise manual dos dados.

A partir de 2016, iniciaram-se estudo que culminaram com a adoção de uma metodologia de inspeção termográfica específica para os para-raios, onde obtém-se o valor da diferença entre a temperatura máxima e a temperatura média no invólucro.

Assim, com uma frequência semestral, passou-se a realizar inspeções termográficas e medições de corrente de fuga de forma conjunta, sendo os dados carregados em uma ferramenta computacional desenvolvida para

entregar um diagnóstico que integra ambas as técnicas, chamado de Sistema de Diagnóstico de Para-Raios (SDPR). Este sistema executa inicialmente uma avaliação do crescimento dos valores de corrente resistiva e diferença de temperatura, tanto em relação as medições anteriores quanto em relação a média e desvio padrão da família do para-raios (mesmo modelo e ano de fabricação). Desta avaliação advêm valores normalizados que são utilizados como entradas em uma lógica paraconsistente anotada de dois valores (LPA2v), a qual estabelece graus de crença e descrença quanto a condição de degradação do para-raios. Como resultado final, o para-raios é classificado em um dos cinco diagnósticos possíveis: normal, intermediário, crítico, contraditório, indeterminado. Para maiores informações e detalhes sobre o SDPR, consultar a referência (8).

2.2 Medições e diagnósticos dos para-raios associados aos transformadores

Para os para-raios elencados na Tabela 1 foram realizadas medições de corrente resistiva de fuga e diferença de temperatura no 1° e 2° semestre de 2018. No 1° semestre de 2019 foram realizadas apenas medições de diferença de temperatura por termografia, dado que o instrumento utilizado para medição da corrente resistiva encontrava-se em reparo/calibração. A Figura 3 apresenta as imagens térmicas dos três para-raios associados ao lado de 220 kV do transformador abaixador TX, obtidas no 2° semestre de 2018.

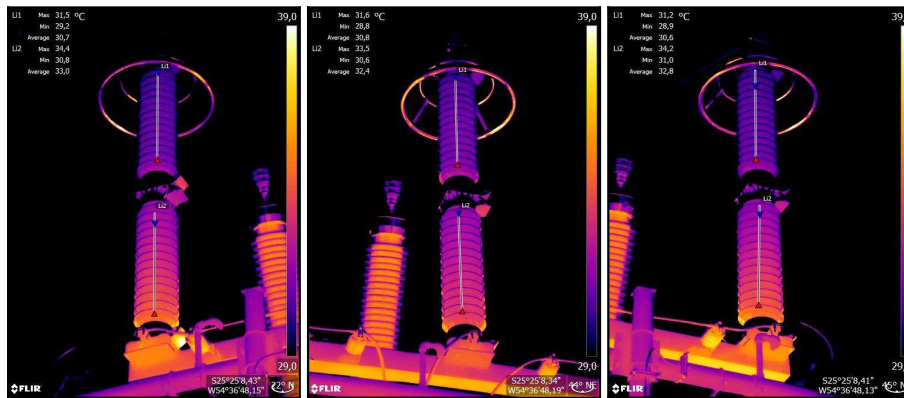


Figura 3 – Imagens térmicas dos para-raios associados ao lado de 220 kV do transformador abaixador TX (fases R, S e T, da esquerda para a direita). (Fonte: ITAIPU, 2018)

Todas as medições foram carregadas no SDPR sendo gerados dois ciclos de diagnóstico: o primeiro com as medições do 1° e 2° semestre de 2018 e o segundo com as medições do 2° semestre de 2018 e do 1° semestre de 2019.

Observando-se os resultados gerados, percebeu-se que para o primeiro ciclo houveram 17 casos de para-raios diagnosticados como críticos, destacando-se os para-raios modelo A2 com 7 diagnósticos críticos de um total de 12 unidades. Para estes casos, houve a prevalência da técnica de termografia em pelo menos um dos graus crença e descrença, conforme pode-se ver na Tabela 2.

Tabela 2 – Diagnósticos dos para-raios modelo A2 (Fonte: Autor, 2019)

Posição	1° Ciclo			2° Ciclo		Diagnóstico
	Técnica prevalente		Diagnóstico	Técnica prevalente		
	Grau de crença	Grau de descrença		Grau de crença	Grau de descrença	
Trafo T5/fase R	Corrente de fuga	Corrente de fuga	Intermediário	Termografia	Termografia	Normal
Trafo T5/fase S	Termografia	Termografia	Intermediário	Termografia	Termografia	Contraditório
Trafo T5/fase T	Termografia	Termografia	Crítico	Termografia	Termografia	Normal

Trafo TX/fase R	Termografia	Termografia	Crítico	Termografia	Termografia	Contraditório
Trafo TX/fase S	Termografia	Termografia	Crítico	Termografia	Termografia	Contraditório
Trafo TX/fase T	Termografia	Termografia	Crítico	Termografia	Termografia	Contraditório
Regulador R5/fase R	Corrente de fuga	Termografia	Indeterminado	Termografia	Termografia	Normal
Regulador R5/fase S	Termografia	Termografia	Intermediário	Termografia	Termografia	Contraditório
Regulador R5/fase T	Corrente de fuga	Termografia	Crítico	Termografia	Termografia	Normal
Regulador RX/fase R	Corrente de fuga	Termografia	Crítico	Termografia	Termografia	Normal
Regulador RX/fase S	Termografia	Termografia	Indeterminado	Termografia	Termografia	Normal
Regulador RX/fase T	Corrente de fuga	Termografia	Crítico	Termografia	Termografia	Normal

Analisando-se as medições de diferença de temperatura (ΔT) do 2º semestre de 2018 para os 7 para-raios críticos do modelo A2, não identificou-se nenhum valor acima de 3°C, considerado um valor limite segundo a literatura (9) para tomada de ações preventivas. Assim, decidiu-se acompanhar estes para-raios nas próximas medições semestrais.

Com a emissão de diagnósticos para o segundo ciclo no 1º semestre de 2019, surpreendentemente nenhum dos 7 para-raios modelo A2 que haviam sido identificados como críticos no ciclo anterior voltaram a apresentar tal diagnóstico (ver Tabela 2). Este fato levou a Engenharia de Manutenção de ITAIPU a investigar as prováveis influências que impactaram as inspeções termográficas a ponto de induzir a mudança substancial de diagnóstico entre um ciclo e outro, visando a confiabilidade da metodologia.

2.3 Análise dos fatores de influência sobre a inspeção termográfica dos para-raios

Em inspeções termográficas em geral vários fatores devem ser levados em consideração para que os resultados sejam confiáveis e com menor margem de erro possível, tais como emissividade, condições atmosféricas, resolução de medição, distância, etc (10).

Tendo em vista a capacitação e experiência dos inspetores de termografia de ITAIPU e o cumprimento de instrução interna específica para termografia em para-raios, é de se esperar que os fatores mencionados acima tenham sido adequadamente considerados. Portanto, para fomentar a análise das alterações de diagnóstico foram elencados os seguintes possíveis fatores de influência não tradicionalmente considerados nas inspeções, a saber: mês e hora da inspeção, carregamento do transformador e temperatura de topo de óleo.

A Tabela 3 apresenta as medições de diferença de temperatura dos para-raios modelo A2 críticos, acompanhadas pelo mês/hora da inspeção, temperatura ambiente (T_a), carregamento do transformador (C) e temperatura de topo de óleo (T_o), estas duas últimas informações obtidas da base de dados do sistema supervisorio da subestação.

Cabe observar-se que os valores nulos de carregamento do Trafo T5 e do Regulador R5 são decorrentes de sua operação a vazio coincidente com o momento da realização da inspeção termográfica.

Tabela 3 – Medições dos para-raios modelo A2 (Fonte: Autor, 2019)

Posição	1º semestre/2018 (maio)					2º semestre/2018 (novembro)					1º semestre/2019 (maio)				
	Ta (°C)	ΔT (°C)	To (°C)	C (%)	Hora	Ta (°C)	ΔT (°C)	To (°C)	C (%)	Hora	Ta (°C)	ΔT (°C)	To (°C)	C (%)	Hora
Trafo T5/fase T	18	0,3	59	46	20:09	29	1,7	52	0	19:42	22	0,6	43	0	06:24
Trafo TX/fase R	18	1,2	45	50	20:11	29	2,5	57	70	19:44	22	2,1	40	38	06:19
Trafo TX/fase S	18	0,9	45	50	20:11	29	1,9	57	70	19:44	22	1,2	40	38	06:20
Trafo TX/fase T	18	0,7	45	50	20:12	29	2,5	57	70	19:45	22	1,4	40	38	06:20
Regulador R5/fase T	18	0,2	36	46	20:21	29	1,2	41	0	19:57	22	0,6	33	0	06:54
Regulador RX/fase R	18	0,2	34	49	20:22	29	0,7	34	71	19:49	22	0,4	34	41	06:54
Regulador RX/fase T	18	0,1	34	49	20:23	29	0,9	34	71	19:55	22	0,5	34	41	06:55

Para facilitar a análise dos dados, são apresentados a seguir nas Figuras 4, 5, 6 e 7 os gráficos das medições dos para-raios da fase T de cada um dos transformadores apresentados na Tabela 3.

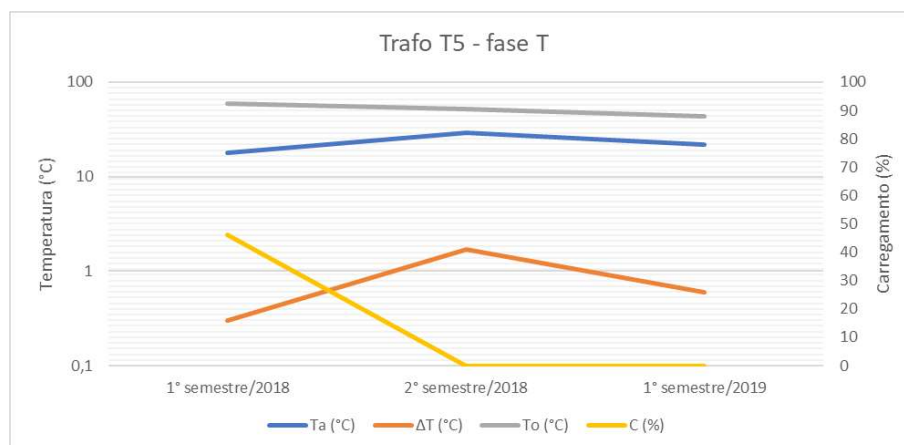


Figura 4 – Medições do para-raios do Trafo T5 – fase T (Fonte: Autor, 2019)

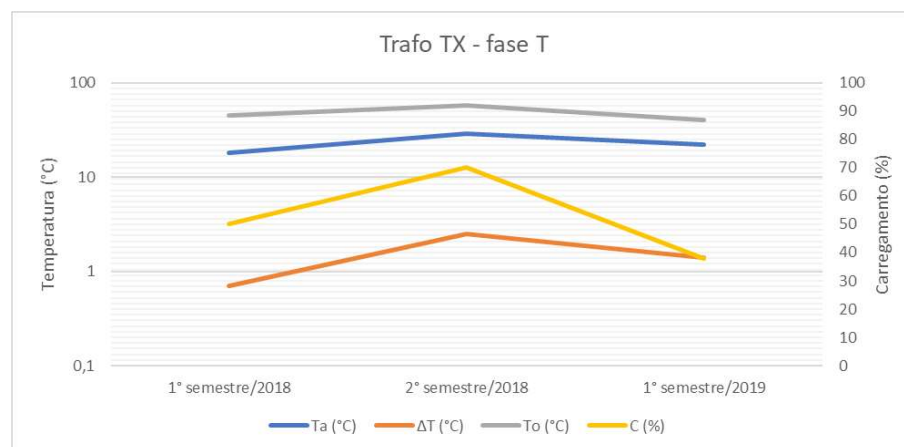


Figura 5 – Medições do para-raios do Trafo TX – fase T (Fonte: Autor, 2019)

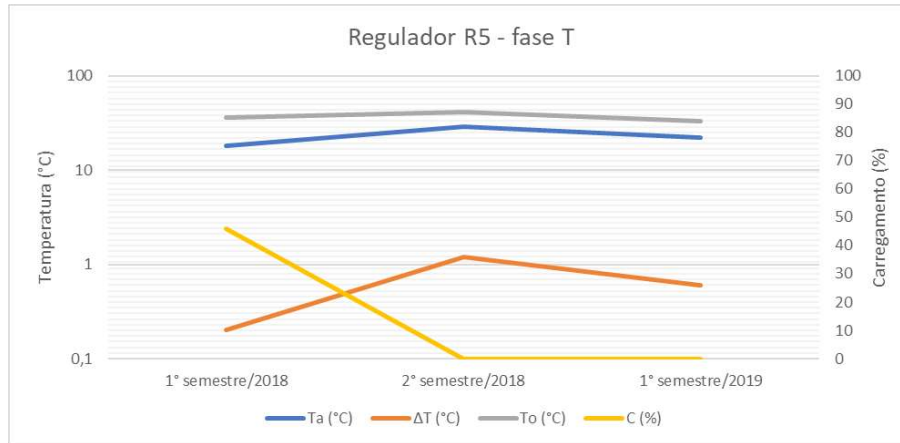


Figura 6 – Medições do para-raios do Regulador R5 – fase T (Fonte: Autor, 2019)

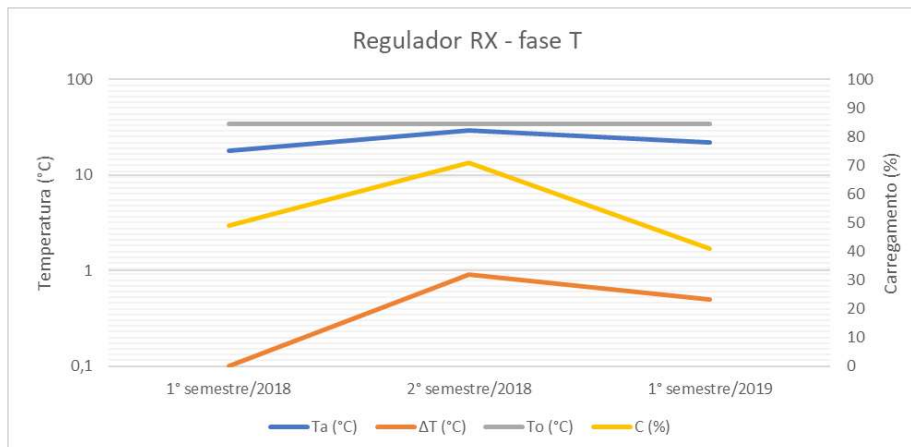


Figura 7 – Medições do para-raios do Regulador RX – fase T (Fonte: Autor, 2019)

A partir da Tabela 3 e das Figuras 4 a 7, pode-se tecer as seguintes constatações:

- Para a temperatura ambiente: para todos os casos verificou-se uma relação correspondente com a diferença de temperatura do para-raios;
- Para a temperatura de topo de óleo: embora para alguns casos a diferença de temperatura tenha tido uma relação correspondente, percebe-se claramente que as diferenças de temperatura no 1º semestre de 2019 são superiores as do 1º semestre de 2018 para os Trafos T5 e TX a despeito da temperatura de topo de óleo apresentar um comportamento inverso;
- Para o carregamento: a relação com a diferença de temperatura segue o mesmo comportamento da temperatura de topo de óleo, como era de esperar-se dado o óleo ser aquecido pelas perdas do transformador, dentre elas a no cobre, que é quadraticamente proporcional ao carregamento;
- Para o mês e hora da inspeção: chama a atenção o fato de que, para as duas inspeções realizadas no mês de maio, àquela realizada a noite apresentou diferenças de temperatura menores do que aquela realizada ao amanhecer, sendo que esperava-se o contrário em virtude do acúmulo de carga térmica solar (muito embora desconheça-se as condições de insolação em ambas as datas).



3.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho abordou de forma específica os desafios inerentes ao diagnóstico de para-raios ZnO aplicados na proteção de transformadores de potência em ITAIPU. A importância do tema justifica-se pelos riscos potenciais de uma falha de para-raios nas adjacências de transformadores, impondo a este danos severos com elevados custos de reparo e perdas de receita/disponibilidade.

Os dois ciclos de diagnósticos realizados com base em medições de corrente resisitiva de fuga e de diferença de temperatura por termografia, com apoio da ferramenta computacional SDPR, mostraram variações significativas de diagnóstico, especialmente para os para-raios modelo A2. Tais variações tiveram relação direta com a técnica de termografia, o que incitou uma investigação.

Após a análise dos fatores de influência e respectivas constatações pode-se concluir que a temperatura ambiente é um fator de considerável influência no resultados das inspeções termográficas dos para-raios. O calor irradiado pelo transformador, relacionado com o carregamento e temperatura de topo de óleo, parece não influenciar de forma significativa as medições de diferença de temperatura, muito embora as imagens térmicas da Figura 3 apresentem claramente uma região mais aquecida próxima a base do para-raios.

Quanto ao mês e hora das inspeções, embora aparente a relação observada deponha desfavoravelmente ao efeito da carga térmica solar, não se pode tomar uma conclusão efetiva a esse respeito dado desconhecer-se as condições de insolação dos dias em que as inspeções foram realizadas.

É importante destacar-se os benefícios auferidos com a aplicação de uma metodologia específica para diagnóstico e o uso de uma ferramenta de apoio como o SDPR, os quais permitem a percepção de mudanças de condição nos para-raios, buscando se antecipar possíveis falhas potenciais e salvaguardar a integridade dos transformadores.

Pode-se sugerir, para as próximas inspeções, a busca de uma uniformidade quanto ao horário, com preferência pela execução ao amanhecer, no intuito de independizar o diagnóstico quanto a carga térmica solar, além de ter-se maior probabilidade de um baixo carregamento dos transformadores, possibilitando novas constatações quanto a sua influência nas medições.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INMR. **2019/20 Power Engineers Handbook**. Québec: Zimmar Holdings Ltd., 2019.
- (2) FRONTIN, S. O. (Org.). **Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília: Teixeira, 2013.
- (3) GOMES, A. T. Técnicas preditivas de diagnóstico de para-raios. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 22., 2013, Brasília. **Anais eletrônicos...**Brasília: CIGRÉ, 2013.
- (4) MOBEDJINA, M.; JOHNNERFELT, B.; STENSTRÖM, L. Design and testing of polymer-housed surge arrester. In: SYMPOSIUM OF GULF COOPERATIVE COUNCIL, 9. 1998, Abu Dhabi. **Anais eletrônicos...**Abu Dhabi: CIGRÉ, 1998.
- (5) PHADUNGTHIN, R.; HAEMA, J. Porcelain Insulator Maintenance Management for Smart Power Transformer. **International Journal of Electrical Energy**. v. 3, n. 4, p. 219 – 224, dec. 2015.
- (6) VICTORIAN ELECTRICITY TRANSMISSION NETWORK. **Surge Arresters - Asset Management Strategies**. Melbourne: AusNet Services, 2015.
- (7) MAIA, M. J. A.; COSTA, E. G.; NETO, E. T. W.; SOUZA, R. T. Monitoramento da Degradação de Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO). In: CONGRESSO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 3. 2005, Florianópolis. **Anais eletrônicos...**Florianópolis, 2005.



(8) SANTOS, M. A. C. **Diagnóstico de para-raios de óxido de zinco de alta tensão mediante emprego de lógica paraconsistente anotada**. Curitiba, 146 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Institutos LACTEC, 2017.

(9) ABRATE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório Técnico – Subgrupo de Manutenção de Equipamentos – Força tarefa de técnicas preditivas de diagnóstico de para-raios**. Brasília: ABRATE, 2012.

(10) SANTOS, L. **Classificação e modelagem de fatores de influência sobre inspeções termográficas em ambientes desabrigados**. Itajubá, 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, 2012.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Mario Augusto Caetano dos Santos

Técnico em Eletrotécnica (CTISM-UFMS, Santa Maria, 1997), Engenheiro eletricitista (UNIDERP, Campo Grande, 2010) e Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia (Institutos LACTEC, Curitiba, 2017).

Coordenador de manutenção de redes de distribuição na AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A. (1998 – 2002), técnico de manutenção de equipamentos de subestações na Eletrosul Centrais Elétricas S.A. (2002 – 2011) e desde 2011 trabalha em Itaipu Binacional, atuando a partir de 2013 na Engenharia de Manutenção com foco em equipamentos de alta tensão.



Rodrigo Eduardo Chaparro Moraes

Engenheiro eletricitista (UNE, Ciudad del Este, 2004), Especialista em Automação e Controle (UTFPR, Medianeira, 2008) e Mestre em Engenharia Elétrica (Universidad Politécnica de Madrid, 2012).

Engenheiro de projetos elétricos e automação da multinacional Cargill Agropecuária SACI (2005) e desde 2007 trabalha como engenheiro de manutenção elétrica na Itaipu Binacional, atuando inicialmente na manutenção elétrica dos geradores e agregados, e atualmente na engenharia de manutenção elétrica de equipamentos de



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

4643
GTM/24

alta tensão.