UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA PROPOSTA DE PROJETO DE GRADUAÇÃO



CARLA JACOBSEN ESPINDULA

ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE CABOS DE MÉDIA TENSÃO COM ISOLAMENTO EPR EM VLF: ESTUDO DE CASO DO PORTO DE TUBARÃO - VALE

VITÓRIA – ES DEZEMBRO/2018

CARLA JACOBSEN ESPINDULA

ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE CABOS DE MÉDIA TENSÃO COM ISOLAMENTO EPR EM VLF: ESTUDO DE CASO DO PORTO DE TUBARÃO - VALE

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Carla Jacobsen Espindula**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos Coorientador: Eng. Edmilson José de Castro

VITÓRIA – ES DEZEMBRO/2018

CARLA JACOBSEN ESPINDULA

ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE CABOS DE MÉDIA TENSÃO COM ISOLAMENTO EPR EM VLF: ESTUDO DE CASO DO PORTO DE TUBARÃO - VALE

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Carla Jacobsen Espindula, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Aprovada em 11 de Dezembro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Eng. Edmilson José de Castro Vale S/A Coorientador

Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

AGRADECIMENTOS

Tenho total gratidão a Deus por ter me dado tanta força e proporcionado uma trajetória com vários obstáculos e dificuldades. Foram eles que me amadureceram e me tornaram quem sou. Agradeço aos meus pais, Telma e Carlos, por sempre acreditarem em mim e sempre se esforçarem para oferecer as melhores coisas possíveis a mim. Sou grata aos meus irmãos mais velhos, Luis Paulo e Ana Paula, que são minha inspiração e sempre estão ao meu lado não importa qual decisão eu tome. Também agradeço a minha avó Zenira por todo carinho oferecido e demonstrado. Eu não conseguiria passar por essa estressante fase sem a ajuda e a compreensão dessa família.

Reconheço a ajuda e os ensinamentos dados por todos os meus professores até hoje, começando do ensino fundamental, passando pelo Ifes e chegando à Ufes. Acho que a aprendizagem é uma riqueza que não se perde e nos torna uma criatura mais desenvolvida a cada dia. Por isso, a todos os professores muito obrigada por compartilha-la e auxiliar o desenvolvimento da atual sociedade.

Em especial, agradeço o apoio do professor Walbermark Santos por ter me auxiliado de perto na confecção deste intenso trabalho e também ao engenheiro Edmilson de Castro por ter dado a moção inicial deste projeto e todo suporte técnico, especialista e de análise da empresa Vale. Agradeço a todos os membros da Supervisão de Energia, todos vocês foram fundamentais na concepção deste trabalho. Muito obrigada Bruno Mazzini, Gustavo Benevides e Moisés Cabral por permitirem que esse projeto inicial acontecesse. Não poderia deixar de fora os técnicos quem prepararam as amostras e os ensaios, obrigada Marcos Carlin, Humberto Escafura e Rondinele Rodrigues.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que contribuíram na minha formação como engenheira eletricista. São tantos nomes que não consigo citar. Especificamente, quero agradecer meu colega de sala e namorado Felipe que fez essa jornada mais branda ao ser meu parceiro.

RESUMO

A garantia da confiabilidade, continuidade de serviço e segurança das instalações elétricas é um dos principais problemas industriais na atualidade. As paradas de operação não programadas, devido às falhas no sistema elétrico em diversos dispositivos, geram complicadas manutenções corretivas e lucros cessantes para empresas. Dentre os principais dispositivos causadores de interrupções intempestivas nas instalações estão os cabos elétricos isolados, que são o objeto de estudo deste trabalho. Na avaliação dos cabos elétricos isolados, é necessário estudar os fenômenos que podem comprometer a integridade do isolante, entre os quais se destacam as arborescências em água e elétrica, capazes de envelhecer rapidamente os cabos e até mesmo romper o dielétrico. Neste contexto, o objetivo do trabalho é estabelecer análises e mecanismos preditivos capazes de indicar o estado real de degradação da isolação e vida útil dos cabos. Para tal fim, e baseado nas normas de ensaios e testes de cabos, é analisado um modelo de circuito que representa o estado de integridade do material dielétrico dos cabos com isolante EPR 105 antes e após o envelhecimento forçado experimentalmente em estufas a ar. Essa metodologia levará em consideração a verificação dos valores de tangente delta através de testes em Very Low Frequency (do inglês, frequência muito baixa) com a finalidade de parametrizar esses valores e prever melhor a vida útil restante do cabo.

Palavras-Chave: Cabos elétricos isolados. EPR. Arborescência. Cabos subterrâneos. Tangente delta. VLF. Frida. Porto de Tubarão.

ABSTRACT

The guarantee of reliability, continuity of service and safety of electrical installations is one of the main industrial problems at the present time. Unscheduled shutdowns due to electrical system failures in various devices generate complicated corrective maintenance and business loss. Among the main devices causing untimely interruptions in the installations are isolated electrical cables, which are the object of study of this thesis. In the evaluation of isolated electrical cables, it is necessary to study the phenomena that can compromise the integrity of the insulation, among which stand out the water and electric trees, capable of rapidly aging cables and even breaking the dielectric. In this context, the objective of the thesis is to establish analyzes and predictive mechanisms capable of indicating the actual state of degradation of insulation and cable life. For this purpose and based on the standards of tests and tests of cables, it is analyzed a circuit model that represents the state of integrity of the dielectric material of the cables with EPR 105 insulation before and after experimentally aging in air greenhouses. This methodology will take into account the verification of the delta tangent values through Very Low Frequency tests in order to parameterize these values and better predict the remaining cable life.

Keywords: Isolated electrical cables. EPR. Arborescence. Underground cables. Tangent delta. VLF. Frida. Porto de Tubarão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão aérea da Unidade de Tubarão	16
Figura 2 – Passagem subterrânea de cabos de média tensão isolado	19
Figura 3- Cabos danificados nas instalações elétricas do Porto de Tubarão	20
Figura 4- Segmentos de cabos isolados retirados após substituição no Terminal de Produto)S
Diversos	21
Figura 5- Emenda feita em cabo isolado que se apresenta comprometida e danificada	22
Figura 6 - Cabos nas instalações elétricas do Porto de Tubarão - Espírito Santo	26
Figura 7 - Constituição básica de cabos isolados de média tensão	28
Figura 8 - Diferentes tipos de constituições de cabos elétricos	30
Figura 9 - Tipos de formação dos condutores do cabo elétrico	31
Figura 10 - Condutor redondo normal	32
Figura 11 - Condutor redondo compacto	32
Figura 12 - Condutor setorial compacto	32
Figura 13 - Condutor flexível	33
Figura 14 - Cabo unipolar	34
Figura 15 - Cabo multipolar	34
Figura 16 - Demonstração efeito do campo elétrico no cabo condutor	36
Figura 17 - Linhas de campo no dielétrico e no interior do cabo	37
Figura 18 - Arco formado por ionização do ar	38
Figura 19 - Presença do fenômeno <i>tracking</i>	38
Figura 20 - Exemplos de arborescências nos cabos EPR e XLPE	42
Figura 21 - Arborescência elétrica crescendo de uma arborescência de água	42
Figura 22 - Arborescência evoluída em cabo de isolação XLPE	43
Figura 23 - Degradação do dielétrico de polietileno por arborescência em água	44
Figura 24 - Maneiras de manifestação de arborescência	44
Figura 25 – Diagrama de modelagem elétrica relacionada aos trechos infinitesimais d	le
seção do cabo	46
Figura 26 – Modelagem em circuito elétrico da soma de todos os pedaços infinitesimais d	0.
cabo isolado	47
Figura 27 - Pontos do cabo usados para construção do modelo de circuito elétrico d	la
isolação	47

Figura 28 - Circuito equivalente de trecho isolado de cabo não degradado48
Figura 29 – Modelo de cabo elétrico como um capacitor cilíndrico entre dois meios
condutores
Figura 30 - Comparação de crescimento dos canais arborescentes
Figura 31- Definição de tangente de delta de acordo com IEEE 400.252
Figura 32 - Equipamento utilizado para ensaios de tangente delta (Frida - BAUR) e sua
interface
Figura 33 – Cabo de isolação EPR 105, com as camadas expostas da capa externa até o
condutor
Figura 34 – Etapas do processo de preparação das extremidades dos cabos para ensaios de
tangente delta
Figura 35 – Amostras de cabos de 25 cm preparados conforme a metodologia59
Figura 36 – Gráfico de tangente de delta ao longo do ensaio dado pelo equipamento para
cabo de 25 cm
Figura 37 – Gráfico de tangente de delta ao longo do ensaio dado pelo equipamento para
cabo de 25 m
Figura 38 – Curvas dos valores medidos e calculados de capacitância do cabo para
diferentes comprimentos
Figura 39 - Curvas dos valores medidos e calculados de resistência de isolamento do cabo
para diferentes comprimentos
Figura 40 - Curva dos valores medidos de tangente de delta para diferentes comprimentos
de cabo
Figura 41 – Gráfico de tangente de delta ao longo do ensaio dado pelo equipamento para
cabo de 5 m
Figura 42 – Estufa da Vale acondicionando os cabos para envelhecimento a 100° C durante
168h
Figura 43 - Circuito equivalente com aumento de comprimento do trecho isolado de cabo
não degradado67
Figura 44 - Circuito equivalente de trecho isolado de cabo após degradação por
envelhecimento térmico67
Figura 45 – Capacitância de isolação a cada degrau de tensão aplicado para amostras antes
e denois do envelhecimento em estufa a ar 68

Figura 46 - Resistência de isolação a cada degrau de tensão aplicado para amostras antes e
depois do envelhecimento em estufa a ar69
Figura 47 - Corrente total medida a cada degrau de tensão aplicado para amostras antes e
depois do envelhecimento em estufa a ar70
Figura 48 - Capacitância, resistência e corrente de isolação a cada degrau de tensão
aplicado para amostras de 20 metros de comprimento, antes e depois do envelhecimento em
estufa a ar71
Figura 49 – Curvas dos valores de tangente de delta medidos durante 30 minutos de ensaio,
para amostras de 5 m antes e depois do envelhecimento em estufa a ar73
Figura 50 – Curvas dos valores de tangente de delta medidos durante 30 minutos de ensaio,
para amostras com 20 m antes e depois do envelhecimento em estufa a ar74
Figura 51 – Circuito equivalente de trecho isolado de cabo após degradação experimental
por envelhecimento térmico em estufa a ar, em 168h de ensaio a 100° C74
Figura 52 - Possível modelo para uma amostra de cabo degradada por arborescências
úmidas75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de materiais de isolação para cabos de média tensão	27
Tabela 2 - VLF teste de tensão para forma de onda senoidal (ver Nota 1)	53
Tabela 3 - Especificações de tensão do equipamento	53
Tabela 4 - Especificações de corrente do equipamento	54
Tabela 5 - Especificações dos valores de tangente delta do equipamento	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas
Balanço Energético Nacional
Empresa de Pesquisa Energética
Etilenopropileno
International Electrotechnical Comission
Institute of Electrical and Electronics Engineers
Instituto Tecnológico Vale
Norma Brasileira
Norma Regulamentadora
Root Mean Square
Terminal de Produtos Diversos
Terminal de Praia Mole
Unidade de Tubarão
Universidade Federal do Espírito Santo
Polietileno reticulado

LISTA DE SÍMBOLOS

С	Capacitância							
Cd	Capacitância após envelhecimento térmico							
c _m	Capacitância da isolação infinitesimal do cabo							
Cma	Capacitância média medida antes do ensaio de envelhecimento							
Cmd	Capacitância média medida depois do ensaio de envelhecimento							
D	Diâmetro nominal sobre a isolação (mm)							
d	Diâmetro nominal sob a isolação (mm)							
d_1	Região não degradada da isolação do cabo							
d ₂	Região degradada da isolação do cabo sem presença de água							
d ₃	Região degradada da isolação do cabo com presença de água							
\vec{E}	Magnitude do campo elétrico							
f	frequência de operação							
Ic	Corrente capacitiva do material dos cabos (A)							
i _i	Corrente resistiva do condutor do cabo							
i _m	Corrente resistiva infinitesimal do material isolante do cabo							
Ima	Corrente média medida antes do ensaio de envelhecimento							
Imd	Corrente média medida depois do ensaio de envelhecimento							
Ir	Corrente resistiva do material dos cabos (A)							
Ki	Constante de isolamento							
L	Comprimento de cabo							
Q	Carga elétrica							
R	Raio circuncêntrico							
Req	Resistência de isolamento total medida pelo equipamento							
Rf	Resistência de isolamento							
Rfd	Resistência de isolamento após envelhecimento térmico							
Rfd,u	Resistência de isolamento após envelhecimento térmico e variável com umidade							
r _m	Resistência da isolação infinitesimal do cabo							
Rma	Resistência da isolação média medida antes do ensaio de envelhecimento							
Rmd	Resistência da isolação média medida depois do ensaio de envelhecimento							
r _i	Resistência do condutor do cabo							
\mathbf{r}_0	Resistência da blindagem do cabo							

TDma	Tangente de delta médio medido antes do ensaio de envelhecimento
TDmd	Tangente de delta médio medido antes do ensaio de envelhecimento
V	Tensão elétrica
Vn	Tensão elétrica nominal
Xc	Reatância capacitiva
3	Permissividade elétrica
tanδ	Tangente de delta
Δx	Comprimento infinitesimal de seção transversal do cabo isolado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO DO SITIO DE ESTUDO	15
	1.1 Aspectos globais da mineradora Vale e do processo do Porto de Tubarão	15
	1.2 Utilização de cabos de média tensão	18
	1.3 Justificativa do estudo	19
	1.4 Objetivos	23
	1.4.1 Objetivos gerais	23
	1.4.2 Objetivos específicos	23
2	PROBLEMAS E TESTES EM CABOS ISOLADOS DE MÉDIA TENSÃO	25
	2.1 Instalações elétricas	25
	2.2 Cabos isolados de média tensão	26
	2.2.1 Aspectos construtivos de cabos isolados de média tensão	27
	2.2.1.1 Condutores	30
	2.2.1.2 Isolações	33
	2.2.1.3 Campo elétrico e blindagem eletrostática	36
	2.2.1.4 Cobertura ou capa externa	38
	2.2.2 Histórico dos condutores elétricos	39
	2.2.2.1 A importância da isolação de cabos e os aspectos a ela relacionad	los.40
	2.3 O fenômeno físico da arborescência	43
	2.3.1 Modelagem para cabos elétricos sem degradação do isolante	45
	2.3.2 Testes para verificação de integridade do isolamento dos cabos de n	nédia
	tensão: ensaio de tangente de delta em VLF	50
3	METODOLOGIA DE ENSAIOS E RESULTADOS	55
	3.1 Normas adotadas para a metodologia de ensaios e testes	56
	3.2 Testes de tangente delta para amostras de cabos com 25 cm e efeito colateral	57
	3.3 Novo padrão de amostras de 5 metros	61
	3.4 Modelagem elétrica do envelhecimento do cabo e degradação do isolante	66
	3.5 Apresentação dos resultados dos testes gerados e modelagem elétrica obtida	ı dos
	cabos isolados	67
4	CONCLUSÃO	77
R	EFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO DO SITIO DE ESTUDO

De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2017, o consumo final de eletricidade no Brasil aumentou 0,2% entre os anos de 2015 e 2016, sendo que o maior consumidor de energia elencado por esse mesmo levantamento foi o setor industrial com 33% do consumo nacional (EPE, 2017).

Junto a isso, atualmente, há um crescimento industrial, social e tecnológico responsável por demandar instalações elétricas com maior capacidade de funcionamento. Dentre as grandes companhias, encontra-se a empresa privada e global Vale S/A, com mais de 70 anos de história e liderança no mercado de mineração. Dentre as suas filiais no Brasil, existe a Unidade de Tubarão (TU), localizada no estado do Espírito Santo, cujos processos industriais necessitam de alimentação elétrica cada vez mais eficiente, e com mais continuidade e confiabilidade.

Para assegurar a produtividade da empresa e garantir a integridade do sistema elétrico nesse âmbito, a utilização de cabos alimentadores isolados de média tensão é altamente relevante para o funcionamento das instalações como um todo. Neste capítulo, explana-se o contexto no qual o presente trabalho surge e é inserido.

1.1 Aspectos globais da mineradora Vale e do processo do Porto de Tubarão

A Companhia Vale do Rio Doce foi fundada em 1º de junho de 1942 pelo presidente Getúlio Vargas e detinha suas atividades somente no estado de Minas Gerais. No primeiro ano de operação, a empresa produziu cerca de 40 mil toneladas de minério de ferro, quantidade correspondente ao que é embarcado por hora atualmente no Porto de Tubarão (VALE, 2018).

A empresa foi privatizada em 1997 e, desde novembro de 2007, adotou o nome de Vale. Ela possui atualmente atividades em 38 países em diversas áreas como, por exemplo, mineração, logística, siderurgia e energia. Hoje, a Vale é a maior empresa privada do Brasil, contemplando 13 estados que produzem e transportam, principalmente, minério e pelotas de ferro, fertilizantes, carvão, cobre, ferroligas, manganês, cobre, níquel, cobalto, potássio,

fosfatos e nitrogenados. O sistema de logística do país possui mais de nove mil quilômetros de ferrovias e 10 terminais portuários próprios (VALE, 2018).

Segundo Gonzalez (2004), a definição de porto pode ser estabelecida como:

Um porto é um local com condições físicas (abrigo e profundidade) e operacionais (quantidade e compatibilidade de berços e equipamentos de movimentação, adequados ao tipo de carga a ser movimentada) que permita uma operação de transferência segura, rápida e eficiente da carga, minimizando a estadia do navio e da carga no porto, de modo que estas operações proporcionem custos reduzidos ao Armador e ao dono da Carga, colaborando para a redução dos custos totais de transporte, parte integrante na composição do preço final do produto.

O Porto de Tubarão, localizado na cidade de Vitória – ES, possui área total de 14 km², dotado de um terminal com dois píeres específicos para granéis de minério de ferro (com capacidade de movimentar 43 mil toneladas por hora) e três terminais de carga geral, sendo esses últimos Praia Mole (relacionado a importação de carvão), Produtos Diversos (relacionados a exportação de soja, farelos e fertilizantes) e Granéis Líquidos (responsáveis pela movimentação de gasolina e outros derivados do petróleo). É possível visualizar, na Figura 1, a estrutura da Unidade de Tubarão, bem como o porto na parte direita da imagem.



Figura 1 - Visão aérea da Unidade de Tubarão

Fonte: Google Earth.

A logística da operação do Porto de Tubarão é complexa e envolve as atividades de outras unidades da Vale, consistindo em uma interação entre minas, ferrovias e portos. Em suma, o processo do minério de ferro tem início nas operações das minas que extraem o material das fontes naturais e preenchem lotes (1 lote equivale a 84 vagões) para serem transportados por locomotivas através das malhas ferroviárias. Os vagões chegam ao Complexo de Tubarão e são descarregados em silos subterrâneos por equipamentos denominados viradores de vagões. Em seguida, o minério escoa por correias transportadoras e é realocado dentro do porto para três destinos distintos: direto para dentro dos porões dos navios, para a estocagem em pátios ou encaminhados para usinas de pelotização.

A logística do processo da carga geral não se difere tanto dos meios e etapas utilizados para o minério. Os grãos do Terminal de Produtos Diversos (TPD) chegam advindo dos seus produtores por locomotivas em vagões fechados, que, ao chegarem no porto, são abertos e descarregados em moegas situadas no subsolo e essas são responsáveis por direcionar o produto para outras correias transportadoras. A partir desse ponto, os produtos seguem para armazéns, onde ficam estocados, e, em seguida, seguem para os navios através de máquinas chamadas carregadores de navio. Os fertilizantes chegam por navios e também seguem por correias transportadoras para armazéns específicos. Já os líquidos são descarregados por dutos, que transportam e seguem diretamente para grandes reservatórios de onde, posteriormente, são carregados em caminhões tanque para distribuição na região. Já o carvão em granel sólido é descarregado por equipamentos chamados descarregadores de navio e pode ficar estocado em pátios para, posteriormente, ser levado por correias transportadoras para suas unidades de pelotização em Tubarão ou seus clientes locais do estado do Espírito Santo ou carregados em vagões para outros consumidores do Brasil.

Diante da complexidade do processo e das rotas, é necessária a presença quotidiana de várias máquinas e equipamentos de campo, que necessitam ser alimentados por uma fonte de energia eficaz para garantir a continuidade da operação; para tanto, um complexo sistema elétrico de potência, constituído por diversas subestações, vem sendo expandido ano após ano e os cabos elétricos de média tensão são parte importante desse sistema.

O Sistema Elétrico de Potência do Porto de Tubarão é composto por 87 subestações de média tensão (62 subestações de distribuição e 25 auxiliares) e seus periféricos como, por exemplo, 266 disjuntores, 181 transformadores, 661 relés de proteção, entre outros.

A unidade de Tubarão é alimentada pela distribuidora EDP por meio de três subestações receptoras de 138 kV, das quais a segunda receptora distribui para todo o porto. Com a finalidade de manter todo esse sistema interligado e abastecido nas tensões de 4,16 kV, 13,8 kV e 34,5 kV, utilizam-se circuitos com cabos de média tensão isolados, totalizando-se dezenas de quilômetros de extensão, divididos em aproximadamente centenas de vias por circuito.

1.2 Utilização de cabos de média tensão

Os ramais elétricos, também chamados de alimentadores, podem ser divididos, entre outros aspectos, em classes de tensão. Nesse âmbito, insere-se a utilização de cabos de média tensão.

Nas instalações industriais de pequeno e médio porte, a utilização de condutores primários (tensão superior a 1 kV) se dá basicamente no ramal subterrâneo que interliga a rede de distribuição aérea da concessionária com a subestação consumidora da instalação[...]. Em indústrias de maior porte, porém, é grande a aplicação de condutores primários, em cabo unipolar, alimentando as várias subestações de potência existentes em diferentes pontos da planta (MAMEDE, 2002).

No Porto de Tubarão, aproximadamente 99% dos cabos que interligam o sistema de potência são subterrâneos e possuem, ao longo de seus percursos, poços de inspeção (caixas de passagem), a fim viabilizar acesso para a manutenção e inspeção dos conjuntos de cabos. Por essa característica do sistema e também pelos níveis de tensão e demanda de potência dos equipamentos e dos ramais, todos os cabos de média tensão subterrâneos são isolados com a finalidade de garantir o funcionamento do sistema e garantir a confiabilidade do fornecimento de energia. Mostram-se, na Figura 2, as condições rústicas na área operacional de um poço de inspeção dos cabos de tensão nominal de 4,16 kV.



Figura 2 - Passagem subterrânea de cabos de média tensão isolado

Fonte: Própria autora.

Vista a importância da especificação no projeto e da utilização operacional deste ativo, o presente trabalho pretende analisar a integridade do isolamento de cabos de média tensão no Porto de Tubarão considerando as adversidades externas dos meios nos quais esses cabos estão inseridos e também o desgaste devido ao processo operacional do sistema. Para isso, serão analisados os parâmetros obtidos através dos ensaios dos cabos e, com base na análise dos resultados, será proposta uma metodologia para ensaios objetivando encontrar uma forma de se estimar a vida útil restante dos cabos isolados de média tensão com EPR.

1.3 Justificativa do estudo

Com o avanço da tecnologia e das demandas cada vez mais exigentes do mercado, os processos industriais precisam acompanhar esse ritmo de avanço e atender as expectativas dos diversos clientes. Alinhado a isso, é necessário à existência de uma eficaz manutenção do processo para então garantir a continuidade do mesmo. Isso é retratado por Paschoal *et al* (2009) no seguinte trecho:

Contudo, numa visão mais recente o objetivo da manutenção é manter o item funcionando de acordo com as condições de projeto, ou restaurá-lo para aquelas condições, observando as necessidades físicas necessárias para o pleno desenvolvimento da produção. Obviamente, este conceito permite uma ampliação de visão porque inclui agora uma abordagem proativa, que vai desde serviços rotineiros e inspeções periódicas até a reposição preventiva e monitoramento das condições.

Nesse contexto, também é importante para as operações da empresa a garantia da máxima disponibilidade da rede elétrica, a fim de se fornecer uma alimentação energética contínua e com alta confiabilidade. Segundo o conceito geral de Scapin (1999), a confiabilidade pode ser denominada como a probabilidade de um sistema, produto ou serviço ser executado de maneira satisfatória dentro das condições limitantes pelo tempo e operação. Exibem-se, na Figura 3, trechos comprometidos de cabos elétricos que foram responsáveis por paradas do processo produtivo do Porto de Tubarão que geraram lucros cessantes. Demonstra-se assim, a importância da confiabilidade do suprimento de energia no processo de operação do porto e a influência direta que a integridade do cabo tem nesse serviço de fornecimento.

Figura 3- Cabos danificados nas instalações elétricas do Porto de Tubarão



Fonte: Própria autora.

Quando a operação e a manutenção caminham conforme a meta estipulada pela empresa, otimizando sempre seus processos, outro setor que ganha com essa harmonia é o financeiro. A garantia dos processos com menos perdas operacionais e o melhor planejamento das manutenções preventivas e preditivas possibilitam maior acúmulo de lucro. O planejamento é um item fundamental para evitar desperdícios e perdas em cada processo, sendo assim uma ferramenta fundamental para auxiliar a utilização da capacidade máxima de produção da

empresa. Por isso, é trivial a constante confecção de estudos para melhoramento dos projetos e da estipulação de metas das organizações industriais.

Nos projetos de instalações elétricas, grande parte do valor total de implantação do projeto está associada aos custos dos cabos elétricos de média tensão isolados. Devido à maior confiabilidade desses cabos, adquirida pelo isolamento e pelas camadas de blindagem, os custos desses ativos são elevados em relação aos outros tipos de cabos. Também, devido a esse fato, o planejamento de troca deste ativo se torna complexo na decisão de quando há verdadeira necessidade de substituição dos cabos. Esse planejamento requer grande orçamento e tempo de parada para a retirada e passagem subterrânea dos cabos. Além disso, existe ainda a possibilidade de realização de emendas caso o problema nos cabos apresente singularidade em algum ponto. Nas Figura 4 e Figura 5, são apresentados segmentos de cabos isolados de média tensão retirados do Sistema Elétrico do Porto de Tubarão após processo de substituição, mostrando, respectivamente, como os cabos estavam comprometidos em sua estrutura e o quanto as emendas se tornam pontos sensíveis e propensos a desgastes na isolação.



Figura 4- Segmentos de cabos isolados retirados após substituição no Terminal de Produtos Diversos

Fonte: Própria autora.



Figura 5- Emenda feita em cabo isolado que se apresenta comprometida e danificada

Fonte: Própria autora.

Existem muitos trabalhos direcionados aos estudos dos componentes do sistema de potência, e, dentre eles, há os que se referem aos cabos de média tensão isolados, tendo em vista que esta tecnologia possui um valor elevado nos orçamentos dos projetos deste produto. A busca pelo melhoramento do dielétrico dos isoladores e por metodologias capazes de utilizar e aperfeiçoar os ensaios já existentes desses cabos são exemplos dos temas mais explorados nos âmbitos nacional e internacional.

Portanto, o presente trabalho, sobre a análise de integridade de cabos de média tensão isolados, justifica-se pelo fato de buscar parâmetros que possibilitem desenvolver metodologias para ensaios que permitam estimar a previsão de falha na integridade do isolamento dos cabos, ao considerar as condições em que eles se inserem e ao permitir estipulação mais realista da vida útil do material, direcionando adequadamente recursos e investimentos para esse setor. Por consequência, isso impacta no plano de manutenção e nos futuros projetos ou expansões do sistema elétrico de potência. Diante desses fatores, pretende-se alcançar reduções nas perdas de operação, otimizando os planejamentos dos projetos, possibilitando a previsibilidade de investimentos no sistema elétrico, assegurando maior confiabilidade das manutenções e diminuindo os custos com manutenções corretivas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos gerais

O objetivo geral do trabalho consiste em propor uma metodologia de ensaios capaz de resultar em parâmetros que possam ser modelados a fim de se estimar a durabilidade dos materiais dielétricos que compõem os cabos isolados com EPR de média tensão através de análises relacionadas aos cabos utilizados no Porto de Tubarão da empresa Vale S/A, considerando as normas nacionais e internacionais, os resultados dos ensaios obtidos e os dados fornecidos por fabricantes de condutores elétricos.

1.4.2 Objetivos específicos

A seguir, são listadas e relacionadas as etapas das tarefas necessárias para se atingir os propósitos deste trabalho:

- Realizar revisão teórica sobre cabos isolados de média tensão em instalações elétricas – estudar detalhadamente o funcionamento e a inserção dos cabos nas instalações industriais;
- Estudar e interpretar normas existentes sobre ensaios em cabos de média tensão isolados e suas características – buscar bibliografia existente nas normas brasileiras e internacionais sobre os tipos de ensaios existentes para cada espécie de isolamento de cabos de média tensão. Identificar também aspectos construtivos e funcionais desse tipo de cabo que influenciem no tempo de vida útil deles;
- Propor uma metodologia para modelagem do envelhecimento de cabos de média tensão baseados em suas condições de uso e operação – baseados nos fatores externos do ambiente como, por exemplo, temperatura, umidade e agentes corrosivos, e também nas condições de carga dos cabos, almeja-se elencar os parâmetros essenciais para caracterizar a degradação dos cabos e, assim, considerando as normas de ensaio, forçar o envelhecimento dos cabos isolantes a fim de enriquecer o banco de dados do trabalho e as conclusões do estudo de caso;
- Descrever o método do teste tangente de delta detalhar o funcionamento do equipamento utilizado e explicar a teoria dos testes de cabos de média tensão isolados;
- Relacionar os resultados experimentais comparar as curvas encontradas através dos testes aplicados e analisar os resultados;

- Elaborar métodos para programação de ensaios de cabos na manutenção ao fim do estudo, espera-se ter embasamento suficiente para direcionar planos de manutenção mais eficazes para cabos de média tensão;
- Localizar imperfeições no processo apontar, no atual sistema elétrico do Porto de Tubarão, pontos sensíveis à ruptura e também possíveis procedimentos errôneos na atual manutenção destes ativos.
- Propor metodologia para ensaios com tangente delta em VLF propor uma forma prática de ensaios e análise de resultados com o objetivo de estimar a vida útil remanescente dos cabos isolados.

2 PROBLEMAS E TESTES EM CABOS ISOLADOS DE MÉDIA TENSÃO

Neste capítulo, reúnem-se os fundamentos básicos sobre a temática abordada no projeto, apresentando os assuntos relacionados ao sistema elétrico de potência (instalações elétricas e cabos de média tensão isolados), as normas alusivas aos tópicos do trabalho, os problemas relacionados ao estado dos cabos (arborescências) e aos modelos elétricos dos cabos isolados.

2.1 Instalações elétricas

A classificação existente sobre os níveis de tensão de instalações elétricas depende do conjunto de restrições ao qual elas são projetadas e das normas que abrangem tais escopos. A Norma Regulamentadora NR 10 (Ministério do Trabalho e Emprego, 2016) que trata de assuntos relacionados a eletricidade estipula a denominação de alta tensão para níveis superiores a 1000 V em corrente alternada ou 1500 V em corrente contínua, para tensões de linha ou de fase-neutro. Como o presente trabalho trata exclusivamente de estudo para as tensões de 4,16 kV, 13,8 kV e 34,5 kV, opta-se por utilizar como base a categorização de tensão utilizada pela NBR 14039 (ABNT, 2003) na qual a definição de média tensão se enquadra no intervalo entre 1000 V e 36200 V.

De acordo com a NBR 5410, os componentes de uma instalação elétrica podem ser definidos como:

[...] itens da instalação que, dependendo do contexto, podem ser materiais, acessórios, dispositivos, instrumentos, equipamentos (de geração, conversão, transformação, transmissão, armazenamento, distribuição ou utilização de eletricidade), máquinas, conjuntos ou mesmo segmentos ou partes da instalação (por exemplo, linhas elétricas) (ABNT, 2008, p 15).

Na complexa composição das instalações elétricas, há diversos equipamentos como geradores, disjuntores, relés, transformadores e outros, que ou precisam ser alimentados ou fornecem eles mesmos energia a outra parte do sistema. Com essa necessidade de conexão e fornecimento de energia, é preciso conectar fisicamente os componentes desse sistema, pois as transmissões de energia sem fios (*wireless*) ainda não são economicamente viáveis e são menos confiáveis do que as conexões cabeadas. Com isso, evidencia-se a importância dos

cabos como componentes essenciais à existência e manutenção do funcionamento das instalações.

As disposições para instalação de cada tipo de cabo estão previstas nas normas NBR 14039 e NBR 5410, e dependem de diversas características da instalação elétrica. A Figura 6 é uma foto que mostra as situações de cabos de média tensão interligando as máquinas de campo com as instalações elétricas no Ponto de Tubarão:



Figura 6 - Cabos nas instalações elétricas do Porto de Tubarão - Espírito Santo

Fonte: Própria autora.

2.2 Cabos isolados de média tensão

Dentre as normas brasileiras existentes sobre cabos elétricos, há a NBR 6251(ABNT, 2012) para cabos de potência com isolação extrudada para tensões de 1 kV a 35 kV. Nesse documento, apresenta-se a padronização da construção dos cabos de potência, sejam eles unipolares, multipolares ou multiplexados. Além disso, a norma é especificada para valores de tensão de isolamento de 0,6/1 kV, 1,8/3 kV, 3,6/6 kV, 6/10 kV, 12/20 kV, 15/25 kV ou 20/35

kV; sendo que o primeiro valor numérico dessas relações refere-se ao valor eficaz da tensão entre condutor de fase e o condutor de terra ou blindagem da isolação ou qualquer proteção metálica sobre esta, e o segundo termo se refere ao valor de tensão eficaz de fase entre os condutores (ABNT, 2000).

Ainda citando essa norma, ela padroniza a construção de cabos para tipos específicos de materiais de cobertura e de isolação, o qual este último pode ser enumerado e descrito na Tabela 1.

Fabela 1	-	Tipos	de	materiais	de	iso	lação	para	cabos	de	média	tensão
----------	---	-------	----	-----------	----	-----	-------	------	-------	----	-------	--------

Designação
PVC/A
PE
EPR, HEPR e EPR 105
XLPE
TR XLPE

Fonte: ABNT, 2012.

Como o projeto é baseado no estudo de caso do Porto de Tubarão e em suas características, os isolamentos predominantes nas instalações elétricas dos cabos de média tensão do porto são do material EPR e XLPE e, por isso, estes serão o foco das pesquisas e descrições bibliográficas de isolantes. Na presente seção, específica-se o assunto de cabos elétricos, principalmente, por meio de fundamentação teórica das normas NBR 7287 e 7286 (que são especificas para isolamentos XLPE e EPR, respectivamente) e também da NBR 6251. No final da seção, traz-se também uma introdução do ensaio de cabos mais comumente usados em campo: o teste de tangente de delta.

2.2.1 Aspectos construtivos de cabos isolados de média tensão

Basicamente, os cabos de média tensão são constituídos por uma parte condutora coberta por uma camada semicondutora interna, acoplada por um material dielétrico isolante, novamente coberto por outra camada semicondutora, envolvida por blindagem metálica e não metálica e, por fim, protegida por uma camada de proteção mecânica externa. São ilustradas, na Figura 7, as partes construtivas dos cabos de média tensão isolados.



Figura 7 - Constituição básica de cabos isolados de média tensão

Fonte: TEIXEIRA JR, 2004.

De acordo com a NBR 6251 (ABNT, 2012), "O condutor deve ser constituído por um ou vários fios de cobre eletrolítico, com ou sem revestimento metálico, ou de alumínio nu.". A norma também diz que a blindagem de cabos é obrigatória em casos com tensão de isolamento acima de 3,6/6 kV, sendo opcional para os demais valores de tensão.

Seguindo na mesma norma, o material da isolação pode ser composto por dielétrico extrudado, termoplástico ou termofixo, devendo ser verificado os limites para tensão de isolamento e temperatura respectivos (ABNT, 2012).

Os cabos isolados possuem limites térmicos como, por exemplo, para a isolação XLPE e EPR, a temperatura máxima do condutor em regime permanente é de 90 °C, em regime de sobre carga é de 130 °C e em regime de curto circuito é de 250 °C. Esses dois últimos valores de temperatura podem ser menores dependendo das condições dos materiais, devido a emendas, condições de carga, quesitos de projeto, dentre outros fatores.

Em relação às condições de demanda, a operação em regime de sobrecarga não deve exceder nem 100 horas, por 12 meses consecutivos, nem 500 horas durante a vida do cabo, pois, sob essa condição de sobrecarga, a vida útil é reduzida em relação à prevista em regime permanente. Para regime de curto circuito, o tempo máximo no qual o condutor pode manter a temperatura indicada é de 5 s. Quanto à espessura média da isolação, esta não deve ser inferior ao valor nominal especificado. Já a espessura mínima pode ser inferior ao valor nominal, contanto que a diferença não exceda 0,1 mm somado a 10 % do valor nominal especificado (ABNT, 2000).

Caso ocorram falhas na fabricação da parte isolante dos cabos, há uma grande probabilidade de ocorrência de descargas parciais de tensão no condutor enquanto estiver conduzindo corrente e sob tensão induzida.

A parte não metálica da blindagem deve ser aplicada diretamente sobre a isolação de cada condutor. Essa estrutura possivelmente é formada por uma fita semicondutora, por uma camada extrudada de composto semicondutor, pela combinação das duas ou por um destes materiais em combinação com revestimento de verniz semicondutor. A espessura média dela deve ser igual ou superior a 0,4 mm. Em caso de combinação de fita semicondutora com camada extrudada a espessura mínima deve ser de 0,065 mm com sobreposição mínima de 10%. Já em relação a parte metálica, esta pode ser constituída de uma ou mais fitas, tranças de fios, camada concêntrica de fios ou camada concêntrica de fios combinada com fita(s) ou fio(s).

Dependendo do tipo de cobertura, o condutor possui um limite de temperatura em regime permanente que varia com o tipo de material e que está descrito na NBR 6251. Para entender o projeto que tem como objeto de estudo cabo elétrico é importante a *priori* conhecer melhor sua estrutura e suas funcionalidades. Há diversos tipos de condutores, isolantes, blindagens, entre outros, que permitem a existência de singularidade para cada aplicação e fabricação de cabos. Mostram-se, na Figura 8, alguns tipos de estruturas de cabos.



Figura 8 - Diferentes tipos de constituições de cabos elétricos

Fonte: Própria autora.

2.2.1.1 Condutores

Define-se como condutor encordoado aquele que é constituído por um conjunto de fios dispostos de forma helicoidal a fim de conceder maior flexibilidade ao condutor em relação ao condutor tipo sólido (fio). Quando o condutor possui um conjunto de fios encordoados e não isolados entre si, chama-se esse componente do cabo de corda (SENAI, 2012).

Para a classificação de fios e cabos de acordo com a formação do condutor, criaram-se as chamadas classes de encordoamento. Primeiramente, elas foram definidas para condutor de cobre pela norma não mais vigente NBR 6880, na qual se classificaram os cabos em seis classes segundo a flexibilidade: Classe 1 (condutores sólidos), Classe 2 (condutores

encordoados, compactados ou não), Classe 3 (condutores encordoados, não compactados) e Classes 4, 5 e 6 (condutores flexíveis) (SENAI, 2012).

A nova norma vigente, NBR NM 280, válida para os países do Mercosul, reduz as classes para quatro unidades. São mantidas as classes 1 e 2 e as classes para condutores flexíveis tornam-se classes 5 e 6 (nos quais os cabos recebem esse número de classe para manter o padrão da norma anterior). Percebe-se que as antigas classes 3 e 4 foram suprimidas, visto que elas se enquadravam na classificação, respectivamente, de 2 e 5. Entretanto, dada a alta frequência da utilização de cabos classificados antes como classe 4, nos países englobados por essa nova norma, manteve-se, por tempo indeterminado, essa classe à parte da nova categorização (ABNT, 2011).

Considerando a formação dos condutores do cabo, esses podem ser divididos em cinco tipos, conforme é explicitado na Figura 9.





Fonte: SENAI, 2012.

a) Fio redondo sólido.

Constitui-se por um único condutor compacto, que apresenta baixa flexibilidade e, com isso, maior grau de dificuldade na instalação e acomodação dos cabos com esse condutor. Devido a essa limitação, as bitolas são limitadas em 10 mm².

b) Condutor redondo normal.

Chamado também de condutor de formação regular ou concêntrica, este é o mais utilizado nas instalações elétricas industriais para casos com seções superiores a 10 mm², dado a maior flexibilidade apresentada por esse condutor (classe de encordoamento 1). Constitui-se de um fio redondo sólido envolvido por coroas deste mesmo fio, tal que o número de fios de cada nova coroa acrescentada, aumenta em múltiplos de seis. Na Figura 10 é ilustrado esse condutor.

Figura 10 - Condutor redondo normal



Fonte: SENAI, 2012.

c) Condutor redondo compacto.

Geralmente, é utilizado em condutores de baixa e média tensão com seções de 10 a 500mm². Ele assemelha-se ao redondo normal e se diferencia pela compactação que os fios de cada coroa recebem na fabricação, o que reduz o diâmetro do condutor (classe de encordoamento 2). A compactação torna o condutor mais rígido. Na Figura 11, tem-se a representação dessa configuração.





Fonte: SENAI, 2012.

d) Condutor setorial compacto.

A partir da corda do condutor redondo compacto e de uma deformação específica para os fios das coroas, fabricam-se o condutor setorial compacto que permite a disposição de diferentes cordas elementares. Esse condutor constitui os cabos tripolares e quadripolares, com diâmetros consideravelmente reduzidos, apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Condutor setorial compacto



Fonte: SENAI, 2012.

e) Condutor flexível.

Este condutor tem aplicação em específicas áreas, como por exemplo, em máquinas móveis, pontes rolantes, escavadeiras, máquinas de solda, aspiradores industriais, iluminação pendente, entre outros. O condutor flexível constitui-se do encordoamento de vários fios de diâmetro reduzido (classes de encordoamento 4,5 e 6), o que possibilita grande grau de flexibilidade, conforme a exemplificação na Figura 13.



Fonte: SENAI, 2012.

Em geral, os cabos de média tensão em ambientes industriais são do tipo encordoamento redondo compacto para todas as seções do cabo (SENAI, 2012).

Em relação ao material para construção do condutor, basicamente as ligas de cobre e alumínio são utilizadas na fabricação por causa das boas características mecânicas, elétricas e de custo. Segundo Freitas (1995), ao considerar apenas a resistência ôhmica para avaliar a capacidade de condução de uma mesma corrente, o condutor de alumínio teria diâmetro de 28% maior do que o de cobre, entretanto teria metade do peso. Além disso, a maior limitação de utilizar o condutor de alumínio é a confecção de acessórios que minimizem a rápida oxidação do metal ao ficar em contato com o ar e que suportem a deterioração das propriedades mecânicas ao sofrer deformações. Atualmente, esses problemas são diminuídos pelos avanços tecnológicos de acessórios especiais e novas técnicas de operação.

2.2.1.2 Isolações

Os tipos de cabo elétrico que possuem isolação são classificados como:

 a) Cabos unipolares ou singelos: formado por um único condutor isolado, com capa externa de proteção, conforme é exibido na Figura 14;



Fonte: SENAI, 2012.

 b) Cabos multipolares: formado por dois ou mais cabos isolados e com capa externa de proteção, conforme mostrado na Figura 15.





Fonte: SENAI, 2012.

A escolha do material isolante está relacionada com a tensão de operação a qual o cabo será submetido. Para os cabos elétricos isolados:

Quanto maior a probabilidade de o isolante apresentar falhas, menor a tensão admissível sobre o mesmo. As falhas aparecem também por um processo de "envelhecimento" do cabo, que é a perda da sua característica isolante devido a uma exposição contínua a um gradiente excessivamente elevado de tensão. Alguns materiais apresentam uma longa vida útil quando submetidos a tensões médias, mas envelhecem muito rapidamente sob tensões altas (Freitas, 1995). As isolações sólidas extrudadas podem ser de fabricação:

I. Termoplásticos:

São isolações fabricadas a base de cloreto de polivinila (PVC). Caracterizam-se por amolecer a partir da temperatura de 120°C e pelas seguintes descrições básicas:

- Baixa rigidez dielétrica;
- Péssima condução de chama, quando agregada a aditivos especiais;
- Perdas dielétricas elevadas, notadamente em tensão superior a 20 kV;
- Resistência ao envelhecimento regular;
- Boa flexibilidade;
- Baixa temperatura máxima admissível;
- Boa resistência à abrasão;
- Boa resistência a golpes;
- Resistência regular à umidade e a água.

II. Termofixos:

As isolações do tipo termofixas são fabricadas ou a base de polietileno reticulado ou a base de borracha de etileno-propileno.

O polietileno reticulado, conhecido por XLPE se destaca por:

- Baixa resistência à ionização;
- Temperatura máxima admissível elevada;
- Excelente resistência à abrasão;
- Alta rigidez dielétrica;
- Flexibilidade regular;
- Boa resistência ao envelhecimento;
- Baixa resistência à arborescência.

A borracha etileno-propileno, conhecido por EPR é caracterizado por:

- Elevada resistência à ionização;
- Alta rigidez dielétrica;
- Baixas perdas dielétricas;
- Temperatura máxima admissível elevada;
- Excelente resistência à abrasão;
- Excelente resistência a golpes;
- Grande flexibilidade;
- Alta resistência à arborescência.

2.2.1.3 Campo elétrico e blindagem eletrostática

Conforme apresentado por Freitas (1995), entre dois diferentes condutores elétricos, surge uma diferença de potencial capaz de gerar um campo elétrico em determinado meio. Como o cabo elétrico é composto por condutor, isolado por um meio dielétrico até um condutor de blindagem eletrostática metálica, é estabelecido um campo elétrico radial e uniforme, tal como mostrado na Figura 16.





Fonte: SENAI, 2012.

O campo elétrico, quando não uniformizado e distorcido, produz certo estresse eletrostático no meio dielétrico devido ao acúmulo de densidade em certo ponto do isolante. No caso de isolações poliméricas, a concentração do campo elétrico, que piora com a exposição a longo tempo, pode causar a ruptura do limite admissível pelo dielétrico e conduzir pelo meio
degradado, o que ocasiona descargas parciais, gerando perda de energia, calor, erosões no dielétrico e fim de vida útil nos cabos. Para tanto, a fim de manter e uniformizar o campo elétrico contido na região entre o condutor e a blindagem eletrostática, é utilizado, nos cabos de média e alta tensão, uma camada semicondutora entre o isolante e os materiais condutores. Também utiliza-se uma camada semicondutora aplicada na superfície do isolamento para confinar o campo elétrico dentro do cabo isolado. Nos desenhos da Figura 17, ilustra-se a organização do campo com as blindagens.





Fonte: Freitas, 1995.

Dessa forma, são estabelecidas linhas equipotenciais no material dielétrico isolante, cujas linhas de força têm densidade maior próximo ao condutor e menor perto da blindagem. Podese observar que a principal finalidade da camada semicondutora interna é dar forma perfeitamente cilíndrica ao condutor e eliminar espaços vazios entre o condutor e a isolação (FREITAS, 1995).

O ambiente industrial, que contém partículas em suspensão e partículas salinas se perto do mar, favorece o surgimento de arco entre o condutor e a blindagem, causando o fenômeno conhecido como *flash over* (do inglês, ignição súbita). O fenômeno ocorre comumente nos isoladores da rede de distribuição de energia elétrica, localizados perto de orla marítima ou

nos distritos industriais, onde estão presentes fábricas de cimento, de siderurgia, mineradores, entre outros. Na Figura 18, ilustra-se a formação de arco como consequência da ionização do ar.





Fonte: SENAI, 2012.

Além disso, através da corrente de fuga que circula na superfície entre o condutor e a blindagem, existe o fenômeno danoso à isolação denominado *tracking* (do inglês, trilhamento). Este fenômeno é favorecido pela natureza dos poluentes na atmosfera e resulta na queima da isolação, formando inúmeros caminhos em forma arborescente. Na Figura 19 mostra-se a existência de *tracking* através dos caminhos de isolação danificados.





Fonte: SENAI, 2012.

2.2.1.4 Cobertura ou capa externa

Há ainda, nos cabos elétricos de isolamento sólido, uma proteção externa não metálica, geralmente formada por uma camada de cloreto de polivinila (PVC) ou de neoprene. O composto de neoprene é utilizado em ambientes poluídos, já que possui excelentes

características térmicas e mecânicas, e também por ser resistente a uma variedade de agentes químicos.

Vale ressaltar que, em locais com maior probabilidade de danos mecânicos, os cabos devem possuir mais uma blindagem metálica para garantir a proteção mecânica, sendo que essas proteções metálicas são geralmente aplicadas sobre uma capa não metálica e sob uma cobertura anticorrosiva.

2.2.2 Histórico dos condutores elétricos

Para linhas de transmissão e distribuição é comum o uso de condutores elétricos com metal de alumínio por causa de sua capacidade suficiente de condutividade e por seu custo inferior ao cobre, o qual tem a melhor eficiência na condução. Entretanto, nas instalações industriais, prediais e comerciais, ainda se utilizam mais o cobre, devido aos benefícios do custo operacional da instalação. Um dos fatores considerados na escolha do material do condutor são as perdas por elevação de temperatura nos condutores, dada pelo fenômeno físico chamado efeito Joule. Essas influem diretamente no custo da energia elétrica e no tamanho projetado da bitola dos cabos.

Antes da década de 50, os cabos elétricos em geral eram constituídos de isolação de papel banhado em óleo isolante para alta tensão. Entretanto, as tecnologias de isolantes sólidos foram evoluídas e se desenvolveu a isolação para cabos extrudada, cujo processo mecânico de fabricação se dá pela injeção contínua de material dielétrico dentro de um recipiente selecionado, adquirindo assim certa forma pré-determinada para o cabo. Os materiais utilizados para a isolação dos cabos extrudados são de natureza polimérica; dentre eles, temos, como exemplo, o cloreto de polivinila (PVC), o polietileno (PE) e a borracha etilenopropileno (EPR).

O PVC e o PE são definidos como compostos termoplásticos e perdem suas características físicas quando submetidos a temperaturas superiores a 70°C. Para adaptação em ambientes com temperaturas superiores, surgiram os materiais termofixos, cujas moléculas passam por processo de reticulação, no qual agentes causam ligações entre os átomos de carbono para impedir deslocamento intramolecular no aquecimento do dielétrico. O mais conhecido

termofixo é o polietileno reticulado (XLPE), que opera a temperaturas maiores que 90°C (SENAI,2012).

2.2.2.1 A importância da isolação de cabos e os aspectos a ela relacionados

Dentre os primeiros registros existentes sobre cabos isolados no final do século XIX, encontra-se o método de isolação pela impregnação em piche (tecnologia desenvolvida e aplicada por Thomas Edison) e, posteriormente, pela aplicação de fitas de papel.

A impregnação do papel em óleo, por volta de 1930, aperfeiçoou as técnicas de isolação existentes e, nesta mesma época, iniciaram-se pesquisas para produção de cabos elétricos extrudados, construídos à base de borracha natural vulcanizada (JÚNIOR, 2008).

Há consideráveis diferenças entre dielétrico de um material e isolante de material. O autor PRESENTE (2004) define dielétrico como um material no qual são considerados aspectos eletrostáticos, ou seja, propriedades específicas mensuráveis, tais como rigidez dielétrica, absorção dielétrica, constante dielétrica e fator de potência. Por outro ponto de vista, considera-se um material dielétrico como sendo um meio no qual podem ocorrer os processos de condução e indução elétrica simultaneamente, tais como o óleo mineral, o vidro, entre outros. Já o material isolante é apenas um material cuja condução de eletricidade não é boa como, por exemplo, o ar, a porcelana, alguns polímeros, a borracha e outros. Geralmente, para construção de matérias elétricos, utiliza-se tanto materiais isolantes como dielétricos.

A principal funcionalidade da isolação é confinar o campo elétrico gerado pela tensão aplicada ao condutor no seu interior e, por consequência, reduzir ou eliminar o risco de choques elétricos e curtos circuitos das instalações. Entretanto, devido ao fato do isolante ser um dielétrico, ele possui a capacidade de ser polarizado. Sendo assim, a medida que um campo elétrico ou tensão elétrica é aplicado através da isolação, os materiais podem se polarizar e criar um efeito capacitivo entre suas duas extremidades. Desse modo, pode existir o surgimento de uma tensão de retorno, inversa à tensão previamente aplicada, que aparenta ter função de "neutralizar" a polarização existente.

Entre os tipos de isolantes mais utilizados na área industrial, existe o polietileno, que é um polímero sintético. Segundo Júnior (2008):

Em cabos com isolação em XLPE, os processos de reticulação utilizados são a cura a vapor e a cura a seco (...). Dependendo das condições impostas no processo de polimerização é que se obterá o polietileno de baixa densidade (LDPE), de alta densidade (HDPE) ou o polietileno entrecruzado (XLPE) (JÚNIOR, 2008).

Para o autor Júnior (2008), o XLPE possui excelentes propriedades químicas e físicas, tais como inércia química, boas propriedades mecânicas e excelentes propriedades elétricas, como alta resistividade volumétrica, baixa permissividade, baixas perdas dielétricas e alta rigidez dielétrica. Esses aspectos aliados ao bom comportamento de variação brusca na temperatura tornam o XLPE uma atraente escolha para isolamento dos cabos elétricos.

O elastômero de etilenopropileno (EPR) é um outro composto polimérico obtido a partir da copolimerização do etileno e do propileno (EPM). O EPR também é frequentemente utilizado para isolação de cabos e outros equipamentos elétricos, por suas características e facilidade de produção. De acordo com Júnior (2008), na prática são utilizados compostos que inserem aproximadamente cerca de 50% de EPM na massa total da mistura e, mesmo assim, conseguem manter as propriedades físicas e elétricas deste material. Por apresentar maior resistência ao fenômeno chamado arborescência em água, o EPR é bastante utilizado em ambientes com contato constante em água.

Nas condições normais de operação, os cabos isolados ficam sujeitos a diversos tipos de estresses, como o elétrico, o térmico, o mecânico e o ambiental. De forma individual ou mesclada, os múltiplos estresses aceleram os processos de envelhecimento dos cabos, prejudicando assim o seu desempenho. Entre os mecanismos de degradação que ocorrem em cabos isolados estão as arborescências em água (*water tree*) e as arborescências elétricas (*electrical tree*). A arborescência tem esse nome por relembrar, em sua maioria, a aparência de árvores. Apresentam-se, na Figura 20, imagens dos isolantes já citados.



Figura 20 - Exemplos de arborescências nos cabos EPR e XLPE

Fonte: ALVES, [ca. 2007].

De acordo com DELTATRON (2017), as arborescências de água elevam o nível de estresse nos componentes dos cabos, aumentam o campo elétrico nos locais sensíveis de operação e geram mais estresses mecânicos nos cabos. Se os estresses elétricos e mecânicos se tornam elevados, a arborescência elétrica é iniciada e se estende de forma mais rápida no material dielétrico.

Mostra-se, nas Figura 21 e Figura 22, respectivamente, uma imagem das condições do isolamento de cabos que sofreram os efeitos das duas arborescências e os efeitos da arborescência avançada na isolação XLPE.



Figura 21 - Arborescência elétrica crescendo de uma arborescência de água

Fonte: DELTATRON, 2017.



Figura 22 - Arborescência evoluída em cabo de isolação XLPE

Fonte: ALVES, [ca. 2007].

2.3 O fenômeno físico da arborescência

O principal fenômeno nocivo à degradação do dielétrico dos cabos isolados é a arborescência. Dependendo da causa da formação existem dois tipos de arborescência: elétrica e em água.

A ocorrência da arborescência elétrica está vinculada à pré-ruptura elétrica e associada à existência de impurezas e vazios no interior da isolação e à ocorrência de descargas parciais no momento em que o dielétrico é submetido a um campo elétrico. O rápido processo de degradação começa com a formação de canais, a partir de certo ponto sensibilizado do isolante, onde são produzidas cavidades caminhando paralelo ao campo elétrico, apresentando-se uma repercussão por ramificações ao longo do meio. Essa arborescência é minimizada pelas técnicas avançadas de produção do material isolante, como a tripla extrusão, e pelas injeções de aditivos, como a acetofenona, para inibirem as reações iônicas que avançam o efeito da arborescência (NEVES, 2002).

Quanto à arborescência em água, esta apresenta lento desenvolvimento e a ruptura do dielétrico ocorre com seu processo de envelhecimento. Esse fenômeno consiste na aparição de caminhos filamentares paralelos ao campo elétrico, entre pequenas cavidades do meio das quais penetra umidade. A presença de moléculas de água, tanto no estado líquido como no vapor, perante a temperatura de trabalho do dielétrico, aumenta a pressão e a agitação molecular, concentrando ainda mais o campo elétrico nesses pontos com umidade e dando origem as cavidades iniciais. São mostradas, na Figura 23, microcavidades devido à arborescência em água no interior de cabos com isolação de polietileno.



Figura 23 - Degradação do dielétrico de polietileno por arborescência em água

Fonte: Velasco, 2013.

Para os estudos e verificações da integridade do dielétrico de cabos elétricos referente ao surgimento de arborescências, é necessário observar que:

[...] cabos de mesma especificação e fabricação submetidos às mesmas condições ambientais e ao mesmo carregamento, podem apresentar comportamentos diferentes quanto à geração e aparência das arborescências (Velasco, 2013).

É importante salientar que o crescimento dessas arborescências é proporcional ao aumento da umidade e do gradiente de tensão aplicado nos cabos. Segundo Velasco (2013), esses fenômenos podem se manifestarem de duas formas conforme se apresentam na Figura 24, ou como (a) *vented-tree* (do inglês, árvore ventilada), ou como (b) *bow-tie-tree* (do inglês, árvore de gravata borboleta).







Fonte: Velasco, 2013.

A forma *vented-tree* surge das superfícies internas do condutor ou externas da blindagem (ou capa) e aumentam em direção ao interior do isolante. Pode surgir pela formação de poros durante a fabricação ou pela presença de líquidos que penetram no cabo. Já a *bow-tie-tree*, forma mais comum do fenômeno, aparece do interior da isolação para as superfícies interna e externa, advinda das impurezas do próprio dielétrico ou do *stress* mecânico causado pelo manuseio dos cabos.

2.3.1 Modelagem para cabos elétricos sem degradação do isolante

Inicialmente, com o objetivo de entender o funcionamento e a modelagem elétrica de um cabo isolado, é preciso analisá-lo considerando segmentos infinitesimais de comprimento Δx , com a seção transversal do cabo elétrico, tal como é esquematizado na Figura 25. Os desenhos A e B ilustram o fluxo de corrente do condutor e a relação de tensão correspondente ao aumento do comprimento Δx . Os desenhos C e D ilustram a relação de densidade de corrente de isolação em função da variação de corrente do condutor. O desenho E ilustra o circuito do isolamento e o desenho F mostra o modelo de circuito considerando todos os pedaços infinitesimais das seções do cabo somados.

Figura 25 – Diagrama de modelagem elétrica relacionada aos trechos infinitesimais de seção do cabo



Fonte: KOCH & SEGEV, 1998.

Com isso, apresenta-se na Figura 26 um modelo do cabo completo sobre o condutor de raio a, considerando os parâmetros de resistência, capacitância e corrente (r_m , c_m e i_m) que representam a camada isolante equivalente de cada pedaço Δx do comprimento do cabo, e os parâmetros resistência e corrente que representam cada trecho do condutor ($r_i e i_i$).



Figura 26 – Modelagem em circuito elétrico da soma de todos os pedaços infinitesimais do cabo isolado

Fonte: UNIVERSITY OF WASHINGTON, 2018.

Segundo Koch e Segev (1998), os valores da resistência do condutor interno (r_i) e resistência do condutor da blindagem (r_0), dependendo da aplicação, são desprezíveis em relação aos valores dos outros parâmetros, ou até mesmo constantes de acordo com a modelagem, o que os excluem das equações e modelos gerais de cabos.

Com o intuito de avaliar os efeitos da degradação e do envelhecimento de cabos isolados de média tensão, faz-se necessário modelar com circuitos elétricos o comportamento da corrente de fuga que flui pelo material dielétrico, entre o condutor e a blindagem, respectivamente representados pelos pontos A e B na Figura 27.





Fonte: Velasco, 2013.

Sem considerar os efeitos da degradação do isolante, a corrente de fuga entre os pontos A e B tem aspectos lineares e não lineares tais que, em uma situação idealizada, o cabo pode ser representado por uma capacitância em paralelo com uma resistência de isolamento (Velasco, 2013). Com isso, pode-se inferir que a corrente de fuga é dividida em duas componentes: ativa e reativa. Em condições normais a componente predominante da corrente é a capacitiva

 (I_{C0}) em comparação à resistiva (I_{R0}) , e o esquema que ilustra essa relação é apresentado na Figura 28.



Figura 28 - Circuito equivalente de trecho isolado de cabo não degradado

Fonte: Velasco, 2013.

Pelo fato de que o cabo elétrico pode ser modelado como um cilíndrico condutor concêntrico a um cilindro da capa externa e/ou blindagem, é possível modelar o parâmetro reativo como um capacitor cilíndrico. Apresenta-se na Figura 29 uma ilustração do cabo elétrico como um capacitor cilíndrico, sendo E o campo elétrico entre o condutor e o material isolante, R_1 o raio do condutor, R_2 o raio do isolante e r um valor de raio variável entre os dois raios já citados.



Figura 29 - Modelo de cabo elétrico como um capacitor cilíndrico entre dois meios condutores

Fonte: PHYSICS LIBRETEXTS, 2018.

Utilizando-se o Teorema de Gauss em coordenadas cilíndricas, como demonstra Suzuki *et al.* (2011) ao desenvolver integrais de linha, conclui-se que o campo elétrico atuante no condutor é:

$$E = \frac{Q}{2\pi\varepsilon rH} \tag{1}$$

Como a tensão elétrica pode ser definida como o trabalho de levar uma carga entre dois pontos em um campo elétrico, é possível inferir que:

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} \tag{2}$$

Considerando que a direção de propagação do campo elétrico é a mesma que o crescimento do raio externo do isolante e do raio concêntrico interno do condutor, e utilizando as duas últimas fórmulas citadas, obtém-se:

$$V = \int_{r_{int}}^{r_{ext}} \frac{Q}{2\pi\varepsilon rL} \cdot dr = \frac{Q}{2\pi\varepsilon L} \int_{r_{int}}^{r_{ext}} \frac{dr}{r}$$
(3)

Resolvendo-se a integral, considerando as condições limites, tem-se:

$$V = \frac{Q}{2\pi\varepsilon L} \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) \tag{4}$$

Conforme definido por Hayt (2003), a capacitância pode ser obtida pela razão entre o módulo da carga total envolvida por uma superfície e a diferença potencial entre os terminais do capacitor. A partir disso e substituindo a equação das variáveis, conclui-se que:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{Q \cdot ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi\varepsilon L}}$$
(5)

Tal que, o arranjo da equação da capacitância do cabo resulta na expressão:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon L}{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)} \tag{6}$$

Laskoski (2006, citado por NOGUEIRA, 2010) apresenta a formulação da resistência do material isolante, para a temperatura ambiente de 20°C, sendo calculada como:

$$Rf = \frac{Ki.\log\left(\frac{D}{d}\right)}{L} \tag{7}$$

Vale ressaltar que a constante de isolamento Ki depende estritamente do material isolante do cabo e também da umidade presente nele e no ambiente externo.

2.3.2 Testes para verificação de integridade do isolamento dos cabos de média tensão: ensaio de tangente de delta em VLF

Há normas nacionais que mencionam teste de tensão em corrente contínua (NBR 7287 e NBR 7286), que são ensaios mais comuns no país. Entretanto, como esses ensaios elevam as sobretensões no cabo e a tensão contínua polariza o material isolante, esses ensaios são prejudiciais à vida útil dos cabos. O mais adequado seria utilizar os testes com corrente alternada, no qual a frequência de relaxação da polarização do dielétrico é respeitada. A fim de atender a este último quesito, o valor de frequência utilizado é da ordem de 0,1 Hz, faixas denominadas por frequência muito baixa (VLF, em inglês *Very Low Frequency*).

Pelo fato da ABNT não possuir normas que regulam ensaios com VLF, o documento utilizado para direcionar esses ensaios do trabalho é o Guia 400.2 do IEEE. Conforme essa norma, os ensaios podem ser realizados com frequências entre 0,01 Hz e 0,1 Hz e durante a instalação dos cabos, durante a aceitação deles, ou mesmo durante as manutenções da rede elétrica. A guia do IEEE recomenda manutenções preditivas com VLF empregando os ensaios de descargas parciais e de medição da tangente delta.

Vale ressaltar a importância dos testes de VLF em AC (*alternating current*) em comparação aos atuais testes com corrente DC (*direct current*) em cabos, que ainda são comumente utilizados. Os testes em DC podem ser realizados por aparelhos de pequeno porte e de fácil operação, como os equipamentos chamados Hipots, considerados "não totalmente destrutivos" para operação dos cabos. Entretanto, a aplicação de ensaios com corrente DC é

prejudicial a isolamento dielétrico sólido do cabo. O aparelho Hipot, por exemplo, carrega negativamente áreas com presença de arborescência de água e, quando se reaplica AC, há grande diferença de potencial, piora-se as falhas no dielétrico já existente e cria-se arborescência elétrica, que piora mais ainda a integridade do isolante (DELTATRON, 2017).

Na Figura 30, exibem-se três diferentes ensaios em um cabo isolado e é demonstrada a diferença na integridade do mesmo material para teste com VLF e teste com frequência industrial.



Figura 30 - Comparação de crescimento dos canais arborescentes

É mostrado, na sequência de capturas da Figura 30, a relação de crescimento dos canais de arborescência em função da frequência da tensão aplicada no cabo. Quanto maior a frequência, maior é o desenvolvimento dos danos no isolante. Esse fato pode ser averiguado analisando a seguinte fórmula da reatância capacitiva:

$$Xc = \frac{1}{2\pi fC} \tag{8}$$

Dada à relação, quanto menor é a frequência, maior é a reatância capacitiva e, para uma mesma tensão desejada, menor é a corrente necessária para aplicação de teste no material dielétrico, diminuindo assim o estresse do isolante.

Fonte: BAUR, 2013.

A medição da tangente de delta analisa o grau de envelhecimento do material isolante por meio da verificação do ângulo δ a partir dos ângulos da corrente resistiva (I_r) e da corrente capacitiva (I_c). O diagrama fasorial que representa essas grandezas na IEEE 400.2 (2013) é mostrado na Figura 31. Observe que quanto maior δ , maior é a corrente I_r em relação a corrente I_c, o que significa maiores perdas e possíveis problemas no material isolante.





Fonte: DELTATRON, 2017.

Para atingir conclusões mais confiáveis, uma das formas utilizadas é a comparação dos resultados dos ensaios com um banco histórico de cabos do mesmo tipo, a fim de julgar se o cabo está com o envelhecimento acelerado, moderado ou estável. Em geral, esses bancos de dados são obtidos por laboratórios e vêm embutidos em equipamentos.

Para realização do teste de tangente delta, a norma IEEE 400.2 (2013) estipula quatro degraus de tensão para teste de tangente delta. Os valores dos degraus aplicados, em relação à tensão nominal do cabo são 0,5Vn, 1,0Vn, 1,5Vn e 2,0Vn. Observando a Tabela 2, como a menor classificação de tensão nominal segundo a norma americana é 5kV e a tensão de operação dos cabos analisados neste trabalho é de 4,16kV, então os testes vão ser simulados para tensão monofásica de 2,9kV, a fim de se obter 7kV monofásico no degrau mais elevado do teste de manutenção.

Classificação de cabo fase a fase	Instalação (ver Nota 2) fase a terra	Aceitação (ver Nota 2) fase a terra	Manutenção (ver Nota 3) fase a terra
tensão rms em kV	rms ou (tensão de pico)	rms ou (tensão de pico)	rms ou (tensão de pico)
5	9 (13)	10 (14)	7 (10)
8	11 (16)	13 (18)	10 (14)
15	19 (27)	21 (30)	16 (22)
25	29 (41)	32 (45)	24 (34)
35	39 (55)	44 (62)	33 (47)

Tabela 2 - VLF teste de tensão para forma de onda senoidal (ver Nota 1)

Fonte: IEEE 400.2, 2013.

A seguir é demonstrada a Figura 32 que apresenta imagens do equipamento Frida TD Baur utilizado para ensaios de tangente delta e da interface por ele gerada durante os ensaios. Vale lembrar que, pela norma IEEE 400.2, recomenda-se para teste de conservação do cabo uma duração de ensaio de cerca de 30 minutos.

Figura 32 - Equipamento utilizado para ensaios de tangente delta (Frida - BAUR) e sua interface



Fonte: BAUR, 2013.

As seguintes tabelas trazem informações dos dados técnicos desse equipamento, tais como os dados da tensão e corrente gerada e também da medição do valor de tangente de delta.

Tensão de saída	
Faixa de frequência	$0,01 - 0,1 \; \text{Hz}$
VLF truesinus*	$1-24 \text{ kV}_{rms} (34 \text{ kV}_{pico})$
Tensão de onda quadrada VLF	1 - 34 kV
Tensão contínua	$\pm 1 - 34 \ kV$
Resolução	0,1 kV
Precisão	1 %
Faixa de carga (teste VLF)	1 nF – 8 μF

Tabela 3 - Especificações de tensão do equipamento

Fonte: BAUR, 2013.

Tabela 4 -	Espec	ificac	ões de	corrente	do e	quipar	nento
I abera i	Lopec	moug	000 40	contente	40 0	quipui	nenco

Corrente de saída	
Faixa de medição	0 – 14 mA
Resolução	1 μΑ
Precisão	1 %
Carga capacitiva máxima	0,5 μF em 0,1 Hz, 24 kV _{rms} / 34 kV _{pico} 1 μF em 0,05 Hz, 24 kV _{rms} / 34 kV _{pico}
	8 μF em 0,01 Hz, 18 kV _{rms} / 25 kV _{pico}

Fonte: BAUR, 2013.

Tabela 5 - Especificações dos valores de tangente delta do equipamento

Medição do fator de dissipação (frida TD)				
VLF truesinus*	$1-24 \ kV_{rms}$			
Faixa de carga	$10 \ nF - 8 \ \mu F$			
Resolução	1 x 10 ⁻⁶			
Precisão	1 x 10 ⁻⁴			
Faixa de medição	$1 \ge 10^{-6} - 21000 \ge 10^{3}$			
Frequência de medição tan δ	0,01 – 0,1 Hz			

Fonte: BAUR, 2013.

3 METODOLOGIA DE ENSAIOS E RESULTADOS

Neste trabalho, analisamos os comportamentos característicos dos parâmetros elétricos do isolamento de cabos de média tensão (capacitância, resistência de isolamento e tangente delta). A finalidade é modelar, através do comprimento e da degradação do envelhecimento do material dielétrico, curvas e equações capazes de relacionar a tangente de delta em condições diferentes. Busca-se então propor uma metodologia de ensaios que seja capaz de possibilitar a avaliação do tempo de vida útil real dos cabos de média tensão com esse tipo de isolamento.

Inicialmente, estudaram-se referências bibliográficas relacionadas aos testes de tangente de delta, às análises do comportamento do dielétrico dos cabos e às normas relacionadas ao envelhecimento do isolante.

Diante da falta de um banco de dados significativo e confiável, com resultados de ensaios de tangente delta que fossem suficientes para caracterizar o período de vida útil dos cabos ensaiados, criou-se um novo banco de dados de ensaios. Optou-se, neste trabalho, por modelar a degradação do dielétrico através da análise da tangente delta e dos valores de capacitância e resistência do isolante do cabo antes e após um método de envelhecimento artificial acelerado por estufa de ar. Para a realização do envelhecimento e análise de tangente delta, foi disponibilizado pela empresa Vale amostras de cabos novos de isolação EPR 105 e tensão 3,6/6 kV. Ilustra-se, na Figura 33, o tipo de cabo utilizado neste trabalho, mostrando a disposição das camadas expostas e retiradas para a preparação dos ensaios de tangente.

Figura 33 - Cabo de isolação EPR 105, com as camadas expostas da capa externa até o condutor



Fonte: SENAI, 2012.

3.1 Normas adotadas para a metodologia de ensaios e testes

Após os estudos sobre normas nacionais e internacionais relacionadas aos testes e assuntos referentes à isolação de cabos de média tensão, optou-se pela utilização de três normas como pilares das propostas e ensaios realizados nesse trabalho: IEEE 400.2, NBR 7286 e NBR NM-IEC 60811-1-2.

A norma americana IEEE 400.2 (2013) estabelece as condições necessárias para a realização e análise dos ensaios de tangente delta. Segundo essa norma, os ensaios para os cabos novos, utilizados na operação em 4,16 kV, conforme mostrado na Tabela 2, fixam para análise de conservação e manutenção uma tensão máxima em RMS de até 7 kV para uma classe de tensão nominal trifásica de 5 kV. Sendo assim, o equipamento utilizado para os ensaios de tangente delta segue os procedimentos do teste aplicando em 0,1 Hz quatro degraus de tensão (1,4; 2,9; 4,4 e 7 kV), e como a norma recomenda, o teste tem duração de 30 minutos.

A norma NBR 7286 (2015) é a mais consultada pelos fabricantes nacionais de cabos e constituí os requisitos de desempenho para cabos de alta tensão, com isolação extrudada de borracha etilenopropileno (EPR). Nesta norma, são retratados os ensaios para envelhecimento do cabo completo, ou seja, sem a necessidade de se destruir o cabo com separação em camadas para o experimento. O ensaio escolhido é indicado para cabos com tensões de isolamento iguais ou inferiores a 3,6/6 kV que serão envelhecidos em estufa a ar, à temperatura de 100°C durante 168 horas (7 dias). Vale ressaltar o fato dos cabos tipo EPR 105 trabalharem em regime permanente na temperatura máxima de 105°C.

É importante ressaltar que, pela primeira vez, é proposto analisar a integridade de cabos efetuando tangente delta antes e após o envelhecimento em estufa de ar, e, dada a necessidade de se expor o isolante das extremidades do cabo para conexão no ensaio de tangente delta, essa parte do cabo não mais completa fica exposta na estufa. Sendo assim, presume-se que os cabos e seus terminais não sejam destruídos ao passar por envelhecimento forçado.

Como a norma anteriormente citada não entrega mais detalhes desse processo de envelhecimento do cabo completo, recorreu-se à NBR NM-IEC 60811-1-2 (2001). Essa norma especifica uma estufa com circulação de ar natural ou forçada, capaz de manter de

forma controlada a temperatura especificada para a norma de cada tipo de cabo, e que não tenha ventilador em seu interior. O procedimento para amostras completas de cabos estipula comprimento de 200 mm, que devem ser suspensas verticalmente na parte central da estufa, com uma distância entre amostras de 20 mm e não ocupando mais que 2% do volume interno da estufa. Através de medições com paquímetro, constatou-se o raio do condutor das amostras de 1 cm e o raio do centro do condutor até a camada isolante equivale a 1,7 cm, com isso, considerando-se o comprimento das amostras de cabo e os terminais expostos, o volume total das amostras seria 2.347,1 cm³ (aproximadamente 2,35 L). Dessa forma, para atender a norma, seria necessário uma estufa de 117.355,0 cm³.

3.2 Testes de tangente delta para amostras de cabos com 25 cm e efeito colateral

Concordante e baseado nas normas apresentadas na seção anterior, foi definida uma metodologia de ensaios para verificar a tangente delta e sua relação com o envelhecimento dos cabos. Pela norma NBR NM-IEC 60811-1-2 (2001), as amostras de cabos deveriam ter um comprimento equivalente a 20 cm de cabo completo. Entretanto, como não existe metodologia de ensaios com o mesmo objetivo do trabalho e é necessário deixar as extremidades expostas de isolante e do condutor para conexão do equipamento de ensaio de tangente delta, adotou-se amostras de 25 cm, sendo 20 cm de cabo completo e 5 cm destinados a exposição do isolante e conexão com o equipamento.

O objetivo consistia em preparar 10 amostras de cabo nunca utilizados e mais 10 amostras de cabos envelhecidos similares retirados depois de alguns anos de operação das subestações do porto. As 20 amostras passariam pelo ensaio inicial de tangente delta, em seguida as 10 amostras novas teriam um envelhecimento térmico provocado no isolante EPR 105 por ensaio em estufa de ar a 100°C durante sete dias e, por fim, as amostras já envelhecidas teriam um segundo ensaio de tangente de delta. Com essas informações, seria possível fazer uma comparação do estado de degradação do isolante medido através da tangente de delta e modelados pela duração de operação dos cabos velhos.

Em relação à preparação dos ensaios de tangente delta, para conexão ao equipamento é necessário realizar a preparação das extremidades dos cabos, evitando ao máximo impurezas e partículas que interfiram na medição da tangente de delta. Primeiramente, é necessário retirar a capa externa de proteção com estilete adequado para tal tarefa. Logo após, deve-se separar a

blindagem externa de forma a deixá-la distante da cobertura semicondutora e do isolante. Com isso, a camada semicondutora deve ser retirada completamente de cima do isolante, seja com o auxílio de aquecedor industrial, caso necessário, ou apenas com o estilete. A partir desse ponto, o isolante deve ser limpo e lixado para a retirada de impurezas e homogeneização da superfície a fim de garantir o não acúmulo de cargas. Em um dos dois terminais do cabo, deve-se cortar também o isolante e expor o condutor de cobre sem a camada semicondutora interna, visando conectar um dos terminais do equipamento. Por fim, deve-se limpar novamente a parte isolante. Na Figura 34 são demonstrados alguns dos passos para a preparação dos cabos.

Figura 34 - Etapas do processo de preparação das extremidades dos cabos para ensaios de tangente delta



Fonte: Própria autora.

Para a conexão com equipamento, uma das pontas é conectada no terminal do cabo com o condutor exposto, e, para retorno da corrente e afastamento das conexões, a outra ponta é ligada na extremidade oposta com os fios da camada de blindagem juntados em formato de trança. A Figura 35 traz os cabos novos e envelhecidos naturalmente na área com 25 cm preparados para os ensaios de tangente de delta.



Figura 35 - Amostras de cabos de 25 cm preparados conforme a metodologia

Fonte: Própria autora.

Após a preparação das amostras, ao fazer os primeiros ensaios de tangente delta e gerar as curvas de tangente delta ao longo do ensaio geradas pelo equipamento, foi possível observar certa irregularidade e inconsistência dos resultados. Baseado na norma IEEE 400.2 e em um banco de dados histórico que o equipamento utiliza para analisar os resultados segundo sua programação interna e as configurações parametrizadas pelo usuário no início do ensaio, o equipamento entrega três faixas com limites de tangente delta que representam o estado da integridade do isolante. Abaixo do menor limite, a tangente de delta do cabo é indicada na faixa especificada como pronto para operar, entre os dois limites o cabo é sinalizado com risco de operar e acima da maior faixa o cabo é sinalizado com elevado risco de operação. Para os cabos estudados no trabalho (isolamento em EPR), o valor de tangente delta $10x10^{-3}$ representa o menor limite e o valor $80x10^{-3}$ o maior limite, de acordo com a avaliação do equipamento.

Conforme são mostrados nas Figura 36 e 37, as curvas de tangente delta dos cabos novos com 25 cm são instáveis e oscilam totalmente dentro da faixa de risco de operação (entre $30x10^{-3}$ e $40x10^{-3}$), já uma amostra do mesmo cabo novo, com comprimento de 25 metros apresentou valor quase constante de tangente de delta próximo a $5,7x10^{-3}$ e dentro da faixa

considerada de boa integridade e apta a operação. Logo, observa-se que o comprimento do cabo influencia no valor de tangente delta e essa metodologia não resulta em valores confiáveis para esse tipo de análise.





Fonte: Relatório do equipamento frida da BAUR.



Figura 37 - Gráfico de tangente de delta ao longo do ensaio dado pelo equipamento para cabo de 25 m

Fonte: Relatório do equipamento frida da BAUR.

Esse resultado pode ser explicado pela sensibilidade do equipamento. Os ensaios para 25 cm resultaram, em média, nas amostragens de dados coletadas pelo aparelho, em um valor de capacitância aproximado de 0,132 nF, sendo que, de acordo com a Tabela 5, para a validade de medição do fator de dissipação de tangente de delta, a capacitância de carga mínima do equipamento seria de 10 nF. Dessa forma, conclui-se que a capacitância medida das amostras de 25 cm é menor do que o limite inferior especificado pelo fabricante do equipamento, inviabilizando assim sua utilização para os ensaios, de acordo com os objetivos do trabalho.

3.3 Novo padrão de amostras de 5 metros

Visando retificar o problema que ocorreu com as amostras de 25 cm e melhor conhecer o modelo do cabo em seu estado novo (sem nunca haver operado), o trabalho direcionou-se a analisar o efeito das componentes elétricas com o aumento de tamanho das amostras de cabo novo.

A empresa disponibilizou cabos isolados com EPR 105, de bitola de 240 mm², nunca utilizados em operação, com a finalidade de observar experimentalmente, com o equipamento

e com diversos tamanhos de amostras, o efeito da tangente de delta. As Figura 38 e Figura 39 contêm curvas que resumem os valores médios de capacitância e de resistência de isolamento encontrados nos ensaios para diferentes comprimentos de cabos. A curva com as grandezas calculadas representa os valores obtidos com as Equações 6 e 7 para as mesmas condições do cabo e dos comprimentos, considerando, dado as informações das amostradas coletadas, as constantes $\varepsilon = 2,53x10^{-11}$ e $Ki = 2,89x10^{12}$ para o material isolante em questão.



Figura 38 - Curvas dos valores medidos e calculados de capacitância do cabo para diferentes comprimentos

Fonte: Própria autora.



Figura 39 - Curvas dos valores medidos e calculados de resistência de isolamento do cabo para diferentes comprimentos

Fonte: Própria autora.

Desconsiderando os erros de medição devidos à imprecisão do equipamento, as interferências eletromagnéticas e as impurezas, os valores medidos e calculados apresentaram comportamentos similares e coincidentes. Sendo assim, para o cabo em estado novo, os resultados foram utilizados para modelar a integridade dos cabos. Observa-se também, pelos gráficos, que à medida que o comprimento do cabo aumenta, ele apresenta um valor maior de capacitância e menor de resistência. Isso influencia no valor de tangente delta, já que este é calculado pela razão da corrente circulante na parte resistiva sobre a parte capacitiva, como é formulado na Equação 9.

$$tan\delta = \frac{I_R}{I_C} \tag{9}$$

A curva da Figura 40 traz graficamente as médias de tangente delta em relação ao comprimento das amostras de cabos, ressaltando que os valores abaixo de 3,35 m apresentam comportamento instável e bruscas variações de tangente de delta que, por sua vez, ultrapassam o limite para cabos em bom estado.



Figura 40 - Curva dos valores medidos de tangente de delta para diferentes comprimentos de cabo

Fonte: Própria autora.

A partir das considerações e observações obtidas pelos ensaios experimentais, optou-se pela realização de novas amostras de cabos com o comprimento de 5 m acrescidos de 16 cm para as extremidades conectoras do equipamento (sendo 7 cm de isolante exposto no lado em que será utilizado o conector na blindagem, 7 cm de isolante exposto e mais 2 cm de condutor exposto no lado de conexão do condutor). Essa escolha está associada ao fato de que a curva de tangente de delta para 5 m ter apresentado valores mais estáveis e com o mesmo perfil de comportamento das amostras com comprimentos maiores, ou seja, a variação de inclinação da curva da Figura 40 é quase nula após o comprimento de 5 m de cabo. Além disso, devido às dimensões das estufas necessárias para os ensaios de envelhecimento possuírem dimensões incompatíveis com as necessárias, quanto menor o comprimento da amostra de cabo, mais amostras poderiam ser produzidas e utilizadas no mesmo ensaio. Exibe-se, na Figura 41, a curva de tangente de delta para o ensaio realizado no cabo de 5 m de comprimento, em que vale ressaltar que os valores não apresentaram variações significativas e não ultrapassaram o limite de risco de operação de $10x10^{-3}$ estipulado pelo equipamento para esse tipo de isolante.



Figura 41 - Gráfico de tangente de delta ao longo do ensaio dado pelo equipamento para cabo de 5 m

Fonte: Relatório do equipamento frida da BAUR.

Prosseguindo os ensaios de envelhecimento dos cabos, foram levados a estufa da Vale 6 amostras com 5,16 m de cabo com EPR 105 e uma amostra com 20,16 m. O controle da estufa foi programado para a temperatura de 100° C durante 168h, conforme as normas já citadas estabeleciam. Os cabos foram acondicionados no centro da estufa, entre superfícies resistentes ao calor, e, conforme apresentado na Figura 42, o arranjo experimental minutos antes do início do ensaio.



Figura 42 - Estufa da Vale acondicionando os cabos para envelhecimento a 100° C durante 168h.

Fonte: Própria autora.

Vale ressaltar que 10 amostras com 5,16 m e uma amostra com 20,16 m foram enviadas para uma empresa fabricante de cabos, a qual realizaria também o mesmo ensaio.

3.4 Modelagem elétrica do envelhecimento do cabo e degradação do isolante

Segundo o modelo elétrico do isolante do cabo já apresentado na seção 2.3.1, pode-se considerar a representação do circuito por componentes lineares e não lineares como uma resistência de isolação em paralelo com uma capacitância do dielétrico, sendo as Equações 6 e 7 que modelam esses componentes. Expandindo-se essa modelagem em consonância com o aumento do comprimento do cabo e consequente aumento do comprimento do isolante, é possível deduzir que as características elétricas do material entre o condutor (ponto A) e a blindagem (ponto B) aumentam de forma paralela ao modelo simples, conforme é ilustrado na Figura 43.





Fonte: Própria autora.

Baseado nessa consideração, os resultados sugerem que o novo modelo do circuito, após o envelhecimento do cabo, tenha adicionado, em paralelo, uma resistência de isolação pósdegradação (Rfd) e uma capacitância pós-degradação (Cd). Na Figura 44, é criado o novo circuito equivalente. Com isso, os ensaios feitos pelo equipamento pós-envelhecimento resultarão em novos valores de capacitância e resistência, que terão suas componentes C, Rf, Rfd e Cd calculadas de acordo com os resultados dos testes antes do envelhecimento.





Fonte: Própria autora.

3.5 Apresentação dos resultados dos testes gerados e modelagem elétrica obtida dos cabos isolados

Após uma semana de ensaio na estufa da Vale (Estufa 1) e na estufa do fabricante de cabos (Estufa 2), foram realizados novos ensaios de tangente de delta após a limpeza e preparação das amostras com 5 m, conforme o procedimento anteriormente aplicado na Seção 3.2. Dos resultados apresentados pelo equipamento, utilizou-se a média dos valores das grandezas

elétricas a medida que cada degrau de tensão previsto na norma de ensaio em VLF era aplicado em dado momento do ciclo da tensão. Apresentam-se, na Figura 45, os valores de capacitância média medida antes do ensaio de envelhecimento (Cma) e de capacitância média medida depois do ensaio de envelhecimento (Cmd) das amostras de cabo.



Figura 45 – Capacitância de isolação a cada degrau de tensão aplicado para amostras antes e depois do envelhecimento em estufa a ar

Fonte: Própria autora.

Através da observação da Figura 45, é possível verificar que os valores de capacitância da isolação praticamente não são alterados após o ensaio de envelhecimento aplicado. Isso implica na consideração de que o valor do parâmetro C_d , da Figura 44, tende a ser zero. Esse fato se explica pela natureza dos parâmetros que definem a fórmula do capacitor cilíndrico, como já apresentado anteriormente.

Na Figura 46, são exibidos os valores de resistência de isolação média medidos antes do ensaio de envelhecimento (Rma) e os valores de resistência média medidos depois do ensaio de envelhecimento (Rmd) das amostras de cabo. Nessas curvas, é possível observar que os valores de resistência de isolação, após o envelhecimento, são consideravelmente maiores, o que possibilita o surgimento da grandeza Rfd.

Figura 46 – Resistência de isolação a cada degrau de tensão aplicado para amostras antes e depois do envelhecimento em estufa a ar



Fonte: Própria autora.

São apresentados, na Figura 47, os valores de corrente média (em RMS) medida antes do ensaio de envelhecimento (Ima) e depois do ensaio de envelhecimento (Imd) para cada degrau aplicado pelo equipamento. Vale ressaltar que os valores médios de cada curva foram os

mesmos para as duas estufas e que os valores de corrente, de antes para pós-envelhecimento, diminuíram quase pela metade.



Figura 47 – Corrente total medida a cada degrau de tensão aplicado para amostras antes e depois do envelhecimento em estufa a ar

Fonte: Própria autora.

Na Figura 48, são apresentados os valores medidos das grandezas avaliadas anteriormente para a amostra de cabo com 20 m de comprimento, antes e após o envelhecimento na estufa 1, que foi a única estufa a suportar a acomodação do arranjo com esse tamanho de amostra.



Figura 48 – Capacitância, resistência e corrente de isolação a cada degrau de tensão aplicado para amostras de 20 metros de comprimento, antes e depois do envelhecimento em estufa a ar

Fonte: Própria autora.

Pode-se observar que o perfil é o mesmo das curvas de capacitância e de resistência da isolação para cabos de 5 m (apresentados nas Figuras 45 e 46) e de 20 m de comprimento (mostrados em resumo na Figura 48). Isto é, com o envelhecimento térmico os valores da capacitância praticamente não mudaram e os valores da resistência de isolação são maiores após o envelhecimento das amostras de diferentes comprimentos e de diferentes estufas.

Entretanto, pela Figura 48, a corrente medida na amostra de 20 m tem valor muito próximo dos ensaios antes e pós-envelhecimento. Essa última constatação pode ser explicada pelo fato da ordem de grandeza da corrente ser consideravelmente menor que a ordem de resistência, e também que a resistência de isolação para cabos de 20 m possui valor absoluto e variação entre os degraus menores que o cabo de 5 m.

São mostrados, na Figura 49, os valores de tangente delta medidos antes do envelhecimento (TDma) e depois do envelhecimento (TDmd) para as amostras de 5 m de comprimento. Através das curvas TDma e TDmd, é possível inferir que os valores de tangente de delta diminuem após o envelhecimento nas duas estufas, existindo uma queda dos valores médios de aproximadamente $7x10^{-3}$ para valores médios inferior a $6x10^{-3}$. Conforme a análise dos valores de tangente delta, quanto maior os valores da tangente, maior é a intensidade de corrente resistiva da isolação e/ou menor é a intensidade da corrente capacitiva da isolação, tal como foi apresentado na Equação 9. Sendo assim, a diminuição da tangente de delta resultou em menor fuga de corrente e de perdas pelo dielétrico do cabo ao aumentar a resistência de isolação do mesmo, o que, por consequência, melhorou as condições de operação do cabo e causou um "rejuvenescimento" no material. Isto é, o efeito resultante da metodologia de ensaio proposta no trabalho e realizada nas estufas foi a melhoria do cabo e não o envelhecimento do material isolante.


Figura 49 – Curvas dos valores de tangente de delta medidos durante 30 minutos de ensaio, para amostras de 5 m antes e depois do envelhecimento em estufa a ar

Fonte: Própria autora.

Os valores de tangente de delta nos 30 minutos de ensaio capturados pelo equipamento para as amostras de cabo com 20 m estão representados na Figura 50, e as curvas possuem o mesmo perfil resultante de rejuvenescimento, que neste caso, obteve para o mesmo cabo valores de tangente de delta menores para amostra de comprimento maior.



Figura 50 – Curvas dos valores de tangente de delta medidos durante 30 minutos de ensaio, para amostras com 20 m antes e depois do envelhecimento em estufa a ar

Fonte: Própria autora.

A fim de obter algumas análises finais, de acordo com o efeito desejável de envelhecimento do dielétrico e aumento do valor de tangente de delta, inverteram-se os resultados dos ensaios das estufas no sentido de avaliar o agravamento e deterioração do material isolante. Retomando o modelo sugerido na Figura 44, para as considerações feitas na realização da metodologia de envelhecimento térmico em estufa desse trabalho e pelas verificações realizadas dos resultados, o circuito pós-degradação tende a levar o valor de Cd a zero, pois não houve degradação significante do isolante para o ensaio realizado, e o valor da resistência de degradação Rfd possui um valor variável, como são representados na Figura 51. Além disso, observando a Equação 6 do capacitor cilíndrico e a média dos resultados, as variáveis não apresentam mudanças, mantendo assim o valor da permissividade dielétrica com o mesmo valor encontrado antes do ensaio de envelhecimento ($\varepsilon = 2,53x10^{-11}$).

Figura 51 – Circuito equivalente de trecho isolado de cabo após degradação experimental por envelhecimento térmico em estufa a ar, em 168h de ensaio a 100° C.



Fonte: Própria autora.

Vale a ressalva do porquê as amostras apresentaram resultados melhores para suas de isolações quando o presumido era exatamente o oposto, piorarem, logo após os ensaios. Conforme relatado por Fragoso (2011), o cabo elétrico isolado pode ser representado por três distintas regiões d_1 , d_2 e d_3 , que representam, respectivamente, a parte da região do isolamento não degradada, a parte degradada sem a presença de água e a região da amostra comprometida com a presença de cavidades e canais preenchidos com água, como é mostrado na Figura 52.



Figura 52 - Possível modelo para uma amostra de cabo degradada por arborescências úmidas

Fonte: NORIYUKI et al (2001, apud FRAGOSO, 2011).

Dado esse modelo, a região d3 é a mais condutiva, pois possui canais preenchidos com água e ao aplicar tensão nessa região da amostra, as cavidades crescem e se expandem aumentando a condutância do material na presença do campo elétrico aplicado (FRAGOSO, 2011).

Visto isso, e considerando que a relação de resistência do isolamento, dada pela Equação 7, depende da temperatura do ambiente e umidade contida na amostra, o efeito de rejuvenescimento, encontrado nos resultados dos ensaios da metodologia adotada para envelhecimento em 168 h e 100° C, é explicado pelo fato da temperatura e o tempo de ensaio não terem sido suficientes para causar degradação no material isolante, mas sim terem

reduzido a umidade presente no cabo advinda de fabricação e/ou armazenamento em locais úmidos.

Com a diminuição da umidade nas amostras, a corrente diminui e a resistência de isolação aumenta, resultando em um valor menor de tangente de delta. Assim, a variável do modelo apresentado na Figura 51, Rfd,u, é um valor de resistência variável em função da umidade presente no material isolante. Para os resultados apresentados, e considerando a média dos valores encontrados de Rf para as amostras com menor umidade e dos valores de resistência medida do equipamento Req para as amostras com maior umidade, encontra-se o valor médio de Rfd,u para os cabos com maior umidade pela relação de equivalência de resistência em paralelo apresentada na Equação 10:

$$Rfd, u = \frac{Req * Rf}{Rf - Req}$$
(10)

Dessa forma, os valores resultantes do ensaio da estufa 1 para as amostras de 5 m e 20 m, respectivamente, são $5,47x10^{+11}$ e $1,40x10^{+11}$. Já para a estufa 2, a amostra com 5 m resultou em Rfd,u equivalente a $4,40x10^{+11}$. Não é possível averiguar o motivo da diferença de valores apresentadas entre as amostras de 5 m de cada estufa, pois para fazer a comparação de umidade das amostras era necessária a medição antes e após o ensaio, o que não foi previsto nem planejado para esse trabalho.

4 CONCLUSÃO

Visto os resultados obtidos após os ensaios de envelhecimentos supostamente relacionados à umidade presente nas amostras, torna-se interessante agregar na metodologia de ensaio proposta nesse trabalho algum ensaio capaz de avaliar a composição molecular para a medição da umidade e temperatura antes e depois do envelhecimento em estufa a ar. Com isso, supõe-se que seria possível modelar o fator de umidade e temperatura na medição de tangente delta para análise de envelhecimento do dielétrico de cabos isolados.

Além disso, já tendo em vista que a temperatura de 100° C não foi suficiente para provocar o envelhecimento esperado e degradar a isolação de cabos de EPR 105 com 240 mm² de bitola, sugere-se uma nova modelagem de envelhecimento que considere o valor de temperatura da estufa a ar igual ou superior a temperatura de curto circuito do cabo de 130° C. É importante dar atenção ao fato das extremidades do cabo ficarem com a isolação exposta, essas pontas podem sofrer deformações físicas e comprometer a integridade dos materiais que compõem o isolamento ou até mesmo de outro trecho da amostra do cabo, e por isso, essa fato deve ser considerado também na escolha de temperatura de ensaio a ser programado na estufa.

Diante do exposto, sugere-se adicionar aos ensaios, para degradação do isolante, o envelhecimento por imersão das amostras em tanque com tensão aplicada no cabo e controle de temperatura, conforme especificado na norma NBR NM-IEC 60811-1-3. Nesse caso, também sugere-se utilizar a temperatura de curto circuito do cabo ou até mesmo adicionar outros elementos como sal à água do tanque, a fim de acelerar o fenômeno da arborescência em água e elétrica no material isolante e provocar condições que forcem um envelhecimento artificial dos materiais isolantes.

Ademais, observou-se durante o trabalho a necessidade de se incluir outros ensaios de envelhecimento e/ou parâmetros para serem analisados em relação ao estado de degradação do isolante. Outros ensaios que são extremamente importantes e que não foram incluídos nesse trabalho devido à limitação de recursos e de tempo para estudos, são ensaios de descargas parciais que podem possibilitar detecção de falhas e fuga ou deformações do campo elétrico em pontos específicos do cabo. Portanto, sugere-se como válida a inclusão à

metodologia de ensaios de tangente delta associados a ensaios de descargas parciais antes e após o envelhecimento das amostras de cabos isolados.

Através das modelagens elétricas do cabo isolado de média tensão, foi possível averiguar e associar experimentalmente para a isolação do tipo EPR 105 a relação proporcional dos parâmetros do material dielétrico com o comprimento das amostras de cabos. À medida que o tamanho da amostra aumenta para uma determinada seção, a resistência de isolação diminui e a capacitância entre o condutor e a blindagem aumenta, permitindo ao cabo operar sob condições normais de isolação até o aparecimento de fenômenos físicos degradantes, no caso, as arborescências.

O ensaio de envelhecimento térmico em estufa a ar proposto pela NBR 7286 (2015) em conjunto com as adaptações adicionadas para teste em VLF com tangente delta e com o arranjo de amostras preparadas de cabo não apresentou resultados satisfatórios quanto à degradação do material isolante. No caso, os ajustes de temperatura junto ao tempo da norma somente surtiram efeito de provavelmente retirar a umidade presente no isolante, seja devido ao processo de fabricação ou por contaminação no armazenamento desse componente da instalação elétrica, o que implicou em melhorar as condições de resistência de isolação do cabo aumentando a relação de I_R por I_C , e consequentemente diminuindo o valor de comparação de tangente delta. Portanto, pode-se concluir que para avaliações e análises de previsibilidade de vida útil desses materiais isolantes, faz-se necessário adotar outros ensaios e configurar outros parâmetros para as condições de envelhecimento artificial.

Com isso, apesar da análise do modelo de degradação pós-ensaio contida nesse trabalho, não é possível consolidá-lo e nem relacionar os valores de tangente delta para uma previsão mais precisa do tempo remanescente de vida útil do isolante dos cabos de média tensão. Pelo trabalho foi possível verificar que a tangente delta é uma boa variável a ser considerada na análise da integridade do cabo. Entretanto, ou a metodologia de ensaio de envelhecimento precisa ser aprimorada ou é necessário um banco de dados detalhado e confiável de ensaios de tangente delta com a finalidade do desenvolvimento de estudos mais aprofundados sobre o assunto. Contudo, após a análise dos resultados obtidos experimentalmente e conhecimento dos fenômenos envolvidos no trabalho desenvolvido e nos diversos assuntos por ele abordados, infere-se ainda que condutores isolados em EPR 105, que sejam instalados em ambientes com presença de água e predominantemente úmidos, estão sujeitos a variações em suas resistências de isolamento em função da quantidade de umidade absorvida. Ou seja, é recomendável que esses cabos instalados recebam acompanhamento com menor intervalo do que os circuitos onde não haja a presença de umidade constante, pois além da degradação do isolamento devido aos fenômenos de arborescências já apresentados neste trabalho, a presença de água no meio onde esses condutores são instalados pode culminar na redução de sua vida útil. Isso gera consequentes custos com reparação, além de paradas precoces de produção.

Dessa forma, o acompanhamento da evolução da tangente delta e resistência de isolamento, especialmente nestes circuitos, tornam-se ainda mais importantes e aconselháveis, por conseguinte esse método demonstrou-se efetivamente aplicável para essa finalidade. Ademais, a adoção de análise de outros parâmetros, como as descargas parciais, aliadas a tangente delta pode trazer resultados mais satisfatórios do ponto de vista da avaliação da vida útil dos cabos isolados utilizados em instalações elétricas de média e alta tensão.

Por fim, pode-se concluir que as condições de instalação dos cabos isolados em instalações elétricas de alta tensão devem ser avaliados ainda na fase de projeto, levando-se em consideração a presença de umidade e/ou água como um critério de avaliação a ser ponderado nos custos totais da instalação ao longo do tempo de operação da planta.

REFERÊNCIAS

ALVEZ, M. T. **Capítulo X:** Cabos subterrâneos de média tensão em ambientes com grande presença de água, [ca. 2007].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 280: Condutores de cabos isolados. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 6251**: Cabos de potência com isolação extrudada para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos construtivos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7286**: Cabos de potência com isolação extrudada de borracha etilenopropileno (EPR) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7287**: Cabos de potência com isolação extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM-IEC 60811-1-2: Métodos de ensaios comuns para os materiais de isolação e de cobertura de cabos elétricos. Capítulo 2:Métodos de envelhecimento térmico. Rio de Janeiro, 2001.

BAUR, *Ensurig the flow*. Equipamentos de teste e diagnóstico de alta tensão: Manual adicional Frida TD. Sulz- Áustria, 2013.

DELTATRON Equipamentos e serviços. Avaliação das condições de cabos isolados através dos métodos de tensão aplicada em VLF e tangente de delta. São Paulo, Junho de 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional – Ano Base 2016**: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf >. Acesso em: 05 mai. 2018. FREITAS, Daniel Santana. **Desempenho térmico de cabos de potência subterrâneos, incluindo migração de umidade no solo e efeitos transientes.** Dissertação de doutorado. Florianópolis: UFSC, 1995.

GONZALEZ, Julio de Albuquerque. **Avaliação do Desempenho das Instalações Portuárias do Terminal da ALUMAR**, São Luís, MA, 2004.

HAYT JR., William Hart. Eletromagnetismo. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

IEEE – Institute of Electrial and Electronics Engineers. **IEEE 400.2**: *IEEE Guide for field testing of shielded power cables systems using very low frequency (VLF) (less than 1 Hz)*. EUA, 2013.

JÚNIOR, S. R. Análise da ruptura dielétrica em materiais isolantes elétricos de cabos isolados XLPE e EPR por tomografia 2D e 3D. Dissertação de mestrado. Curitiba: UTFPR, 2008.

KOCH, C. & SEGEV, I. *Methods in Neuronal Modeling:* from ions to networks. 2th ed. Cambridge: MIT Press, 1998.

LASKOSKI, G. T. Conceitos fundamentais sobre condutores elétricos. Centro Federal de Educação Tecnológico do Paraná, 2006 *apud* NOGUEIRA, Jorge Felipe Salgado. Comissionamento de cabos subterrâneos de média tensão em parques eólicos. Dissertação de conclusão de curso. Ceará: UFC, 2010.

MAMEDE FILHO, João. Instalações elétricas industriais. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

NEVES, C. H. Estudo do processo produtivo do polistireno utilizando água como agente de expansão física: Controle da granulometria e morfologia do polímero. Dissertação de mestrado em Engenharia Química. Florianópolis: UFSC, 2002.

NOGUEIRA, Jorge Felipe Salgado. Comissionamento de cabos subterrâneos de média tensão em parques eólicos. Dissertação de conclusão de curso. Ceará: UFC, 2010.

NORIYUKI I., TAMON O., ISSEI S., JIRO K. & SHUNHEI N. *Relation Between The Ac Loss Current Method And The Pea Method For Water Trend Length*. *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials*. Himeji, Japan, 2001 *apud* FRAGOSO, Jackson Rafhaell. **Desenvolvimento de sistema de medida para diagnóstico de arborescências em cabos isolados de média tensão.** Dissertação de mestrado. Curitiba: UFPR, 2011. NORMA REGULAMENTADORA, NR-10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade - Ed 2005.

PASCHOAL, D. R., Medonça, M. A., Morais, R. D., Gitahy, Paula Fernanda S. de Castro Ramos & Lemos, M. A. **Disponibilidade e confiabilidade: Aplicação da gestão da manutenção na busca de maior competitividade**. Revista da Engenharia de Instalações no mar da FSMA, 2009.

PHYSICS LIBRETEXTS. *Capacitors and Capacitance*. University of California. Disponível em: < https://phys.libretexts.org/TextBooks_and_TextMaps/University_Physics/ Book%3^a_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_II_-_Thermodyna mics%2C_Electricity%2C_and_Magnetism_(OpenStax)/8%3A_Capacitance/8.1%3A_Capaci tors_and_Capacitance>. Acesso em: 16 out. 2018.

PRESENTE, Jonas Roberto. **Fundamentos de Técnica de AT**. Apostila - UniOeste, Foz do Iguaçu, 2004.

SCAPIN, C. A. Análise sistêmica de falhas. Belo Horizonte: Editor de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. Emendas e Terminações em Cabos Singelos e Multiplicadores. Vitória - ES, 2012.

SUZUKI, K. K., Kondlatsch, P. C. & Gomes, T. S. Estudo do comportamento das tensões residuais em cabos blindados de média tensão após a realização de ensaio de tensão aplicada. Dissertação de conclusão de curso. Curitiba: UTFPR, 2011.

TEIXEIRA JR., M. D. R. Cabos de Energia. São Paulo: ArtLiber Editora, 2004.

UNIVERSITY OF WASHINGTON. *Computing in carbon*. Seattle, WA. Disponível em: https://courses.cs.washington.edu/courses/cse528/13sp/lecture-slides/Lecture7.pdf>. Acesso em: 07 out. 2018.

VALE. **Nossa história.** [S.I.], 2018. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/book-our-history/Paginas/default.aspx. Acesso em: 05 mai. 2018.

VELASCO, Loana Nunes. Proposta e Avaliação de Desempenho de um Novo Indicador para o Diagnóstico do Isolamento de Cabos Elétricos Subterrâneos. Dissertação de doutorado. Uberlândia: UFU, 2013.