

Técnicas para Diagnóstico e Estimativa de Vida Útil de Cabos Subterrâneos: Discussão sobre Alternativas, Aplicações e Potencialidades

Mariana N. Gonçalves* Helder de Paula**
André M. Alzamora***

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia (e-mail: nalessomariana@gmail.com).

**Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia (e-mail: drhelderdepaula@gmail.com).

***Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia (e-mail: andre.alzamora@outlook.com)

Abstract: The great challenge for the industries and electric power companies that operate with underground power cables is to identify the ones that are in good operating conditions, those that require maintenance and the units that will need to be replaced soon, so that an appropriate operation planning be developed to optimize the use of the company human and financial resources. Researchers around the world have been focusing their efforts to find a methodology able to identify the insulation status of these cables and provide an estimation of the remaining useful life, so that a safe and reliable operation can be established. However, so far, no single technique was able to provide an ultimate answer for this question. In this context, this paper presents an extensive literature review of different techniques that are used to diagnose aged underground cables, estimate the failure rate and predict the remaining lifetime. It is also presented case studies of the application of these techniques and the results obtained. The discussion is established around the sufficiency of the results obtained in the application of each methodology for the effective elaboration of preventive maintenance programs, for planning the replacement problematic cable stretches and for guidance in making long-term budgetary decisions.

Resumo: O grande desafio para empresas e concessionárias que possuem redes elétricas subterrâneas é identificar os cabos que estão em boas condições de operação, os que demandam manutenção e aqueles que precisarão ser substituídos em um curto intervalo de tempo, para que se torne possível realizar um planejamento adequado dos investimentos e das intervenções de manutenção, otimizando a utilização de seus recursos. Pesquisadores ao redor do mundo há tempos vêm direcionando esforços para conceber uma metodologia capaz de avaliar o estado da isolação destes cabos de modo a fornecer uma estimativa da vida útil restante, assegurando uma operação segura e confiável, com elevada disponibilidade do mesmo. Entretanto, até então nenhuma das técnicas utilizadas isoladamente foi capaz de atender, em definitivo, esta necessidade. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma extensa revisão bibliográfica de diferentes técnicas que são utilizadas para realizar o diagnóstico dos cabos subterrâneos envelhecidos, estimar a taxa de falhas da rede e prever o tempo de vida restante para estes cabos. Estudos de caso de aplicação destas técnicas, assim como os resultados obtidos, reportados na literatura por diferentes empresas, foram compilados e também apresentados neste artigo. A discussão é estabelecida em torno da suficiência dos resultados obtidos na aplicação de cada metodologia para a elaboração dos programas de manutenção preventiva, de planejamento para substituições dos trechos de cabos problemáticos e para orientação na tomada de decisões orçamentárias a longo prazo.

Keywords: Underground Cable Diagnostics; Underground Electrical Installations; Failure Modes; Lifetime Estimation; Reliability.

Palavras-chaves: Diagnósticos em Cabos Subterrâneos; Instalações Elétricas Subterrâneas; Modos de Falha; Estimativa de Vida Útil; Confiabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de redes subterrâneas de transmissão e distribuição de energia elétrica veio como alternativa para substituir as redes aéreas em situações em que há dificuldades em sua implementação e em locais onde se deseja melhorar o

aspecto visual da instalação. As redes subterrâneas são vantajosas também por estarem protegidas de radiação e de descargas atmosféricas diretas (Lanz, et. al., 2016).

Entretanto, diferentemente do que acontece nas redes aéreas, em que o diagnóstico de defeitos pode ser realizado facilmente por uma inspeção visual (Lanz, et. al., 2016), as

redes subterrâneas apresentam grande complexidade para se estimar o estado da isolação de seus condutores e, conseqüentemente, a sua vida útil.

Dessa forma, o grande desafio para as concessionárias é identificar os cabos que estão em boas condições de operação, os que demandam manutenção e aqueles que precisarão ser substituídos em um curto intervalo de tempo, e encontrar soluções técnicas que sejam apropriadas para a situação, com o menor custo possível (Lassila, et. al., 2007).

Nesse contexto, para se entender como o envelhecimento dos cabos impacta na confiabilidade do sistema, é preciso, de acordo com Xu e Brown (2011), entender como a sua taxa de falhas aumenta com a idade deste componente.

Os cabos fabricados para operação em instalações subterrâneas apresentam um perfil de vida útil caracterizado por uma taxa consideravelmente alta, porém decrescente, de falhas prematuras, ocasionadas por defeitos de fabricação ou por mão de obra pouco qualificada designada para a instalação dos mesmos. Durante a maior parte de sua vida em serviço, esta taxa é baixa e constante, voltando a crescer significativamente à medida que a idade destes cabos se torna avançada (Carer e Briend, 2008; Nemati, et. al., 2015; Tang, et. al., 2015; Lanz, et. al., 2016). O perfil de falhas apresentado na Fig. 1 descreve genericamente a vida útil de cabos e acessórios em sistemas de potência, sendo referenciado pelos autores supracitados para descrever a vida útil dos cabos em instalações subterrâneas.

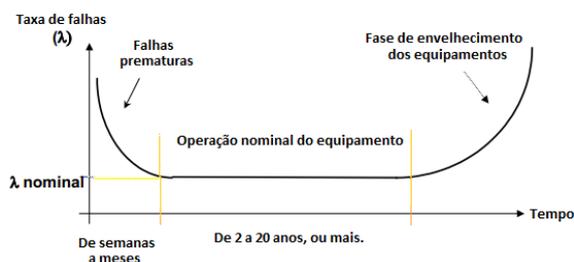


Fig. 1 Perfil característico de falhas em cabos e acessórios de sistemas elétricos (Adaptado de Carer, Briend, 2008).

De acordo com Nemati, et. al. (2015), as duas principais formas de avaliar as condições de um cabo são (i) através de medições e análises dos diagnósticos obtidos e (ii) por meio de estudos com informações históricas sobre a operação dos cabos e simulações a partir de informações registradas sobre a idade dos cabos e sobre falhas anteriores.

O grande propósito de se conhecer o estado dos cabos em instalações subterrâneas relaciona-se com a caracterização da confiabilidade do sistema, que pode ser definida como a capacidade de um sistema de estar disponível e executar as suas funções adequadamente. Abernethy (2004) define a confiabilidade como a probabilidade da não ocorrência de falhas em um intervalo de tempo especificado. Este aspecto está diretamente relacionado aos custos de operação e aos investimentos a longo prazo tanto em manutenção como para a aquisição de equipamentos. Além disso, um sistema de fornecimento de energia elétrica contínuo e confiável, não só

da concessionária, mas também da alimentação interna à fábrica, interfere diretamente nos seus índices de produtividade, com grande impacto, portanto, em sua receita. Dessa forma, pesquisadores em todo o mundo vêm trabalhando em busca de soluções e ferramentas capazes de fornecer um diagnóstico suficientemente exato em relação à condição dos cabos instalados e prever o tempo de vida útil remanescente.

Nesse contexto, o presente artigo contribui para a comunidade científica e engenheiros que lidam diretamente com este tópico por apresentar uma grande compilação de informações úteis, fruto de uma extensa e cuidadosa revisão bibliográfica, acompanhada por discussões e análises comparativas. As metodologias apresentadas são comumente utilizadas para se conhecer o estado dos cabos em instalações subterrâneas e estimar a sua vida útil, para orientar a gerência de indústrias e concessionárias na tomada de decisões orçamentárias e nos planejamentos de manutenção e investimentos em aquisições de novos itens. Estudos de caso relacionados à aplicação dessas metodologias são também compilados neste artigo, enriquecendo a discussão apresentada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As redes subterrâneas de transmissão e distribuição em concessionárias em todo o mundo têm registrado históricos de falhas semelhantes. Estudos como os de Densley (2001), Lanz e Broussard (2008), Dong et. al. (2014), Dixit et. al. (2015) e Tuinema et. al. (2016), mostram que os cabos podem falhar por características inerentes de seu material e sua fabricação, por estresses causados em sua operação e por fatores associados ao meio onde estão instalados.

De acordo com Densley (2001), os tipos de falhas dos cabos são divididos em intrínsecas, que são fatores térmicos, elétricos, ambientais e mecânicos inerentes de sua operação, e que afetam grande volume de material; e extrínsecas, que são defeitos introduzidos no processo de fabricação, transporte, instalação ou serviço, e que afetam uma pequena parte do material, mas a degradação pode se propagar. Além disso, ainda de acordo com o autor, estes fatores podem agir sozinhos ou em conjunto.

Em um estudo que compara os índices de confiabilidade do sistema elétrico com a adição de linhas de transmissão subterrâneas, Tuinema, et. al. (2016) afirmam que conexões de cabos subterrâneos são menos confiáveis que linhas aéreas, principalmente pelo tempo de reparo associado aos primeiros, o que reduz a disponibilidade do sistema. Os autores afirmam que, no caso das redes aéreas, cerca de 20% dos problemas são temporários, como descargas atmosféricas ou árvores encostando na rede, podendo ser resolvidos apenas com o religamento do sistema. Em geral, a maioria dos casos é solucionada com uma média de tempo de 8 horas, através de uma inspeção no local da falha. O pior cenário é quando ocorrem rompimentos nas linhas ou quebra das torres, quando os reparos podem levar dias ou meses. Em relação às falhas de cabos subterrâneos, Tuinema, et. al. (2016) trazem estatísticas do CIGRÈ que mencionam tempos de reparo de

600 horas, e de estatísticas europeias com tempos de reparo entre 900 e 1200 horas.

A solução mais simples para o problema dos cabos envelhecidos, de acordo com Lanz e Broussard (2008), seria a substituição completa de todos eles por novos condutores com uma tecnologia que apresente melhores resultados de confiabilidade. Entretanto, as concessionárias operam com orçamentos limitados e os programas de recuperação das redes subterrâneas podem levar até 30 anos para serem implementados, de acordo com Gill (2011).

Por estes motivos, indústrias e concessionárias de todo o mundo buscam alternativas para identificar o nível de degradação dos componentes de suas redes subterrâneas, para que possam criar planos de ação de maior eficácia e melhorar os seus indicadores de confiabilidade, além de reduzirem seus custos de operação, reparo e manutenção. As próximas seções dedicam-se a apresentar as metodologias comumente utilizadas para esta finalidade.

2.1 Reparo e Substituição Reativa

A estratégia de reparo e substituição reativa consiste em simplesmente reparar os cabos ou conexões onde ocorreram falhas e retornar o trecho ao serviço (Bertini, 2002). Contudo, esta abordagem é bastante dispendiosa, visto que interrupções não planejadas implicam em custos maiores com reparos e substituições de emergência, além de maior tempo de intervenção, o que eleva o tempo de indisponibilidade do sistema e afeta negativamente os seus índices de confiabilidade (Xu, Brown, 2011). Lanz e Broussard (2008) afirmam que esta estratégia tem se mostrado inapta, resultando em uma operação com custos elevados e de baixa confiabilidade.

2.2 Substituição Proativa

A abordagem de substituição proativa considera a troca dos cabos com piores desempenhos como prioridade (Bertini, 2002).

De acordo com Xu e Brown (2011), um programa proativo de substituições visa evitar interrupções e melhorar a confiabilidade do sistema. Os autores propõem uma avaliação estatística dos dados disponíveis dos circuitos, em que estes são divididos em clusters por seu grau de similaridade. O grupo é representado por um circuito característico e o impacto das substituições dos cabos neste circuito deverá ser similar a todos dentro do grupo.

Apesar do custo de manutenção e operação das linhas subterrâneas nesta estratégia ser menor quando comparado ao custo da abordagem reativa, e os índices de confiabilidade obtidos também serem relativamente maiores, Lanz e Broussard (2008) afirmam que a substituição proativa tem ainda taxas de falhas anuais crescentes, mesmo que em uma velocidade menor que na metodologia de substituição reativa.

Xu e Brown (2011) reconhecem, entretanto, a limitação da metodologia proativa pela dificuldade em se poder afirmar

que o cabo designado para substituição de fato falharia em um curto período de tempo. Dessa forma, observa-se que esta estratégia ainda não apresenta resultados ideais para reduzir os custos de operação e melhorar os indicadores de confiabilidade quando se trata de uma visão a longo prazo da operação do sistema.

2.3 Testes Offline

Os testes de diagnóstico em campo que podem ser realizados para a identificação do estado dos cabos em instalações subterrâneas podem ser classificados em dois tipos, de acordo com Vahlstrom (2009), que referencia o guia IEEE 400. Os dois tipos são chamados de teste de resistência e teste de avaliação de condições. No primeiro, os cabos são levados a operar em condições de sobretensão, forçando o aparecimento dos pontos de defeito, para que estes sejam reparados e os cabos retornados ao serviço. No segundo caso, o objetivo é que os resultados sobre as condições da isolação dos cabos sejam obtidos sem provocar mais danos aos mesmos.

Existem algumas técnicas de avaliação em que são realizados testes nos cabos com a rede de alimentação desligada, ou seja, offline. Entretanto, antes de se optar pela realização de um teste em um cabo, seja ele online (energizado) ou offline (desenergizado), deve-se avaliar os custos do mesmo e se estes testes poderão gerar algum tipo de estresse ou dano adicional ao equipamento. Bertini (2002) afirma que quaisquer testes que possam piorar as condições dos cabos e leva-los à reabilitação imediata podem ser considerados desperdícios de recursos.

Ainda de acordo com Bertini (2002), apenas os testes online têm potencial zero para causar danos adicionais. O autor afirma que testes offline têm um potencial de destruição dos cabos, que é somado ainda ao estresse que pode ser causado pela própria desenergização e reenergização do circuito.

Alguns testes offline são realizados em laboratórios e são utilizados por fabricantes para estimar a vida útil esperada para um cabo operando em condições específicas. Este tipo de teste pode também ser utilizado, quando realizado com padrões semelhantes aos de fábrica, quando um cabo é retirado de serviço, para estimar a vida útil do restante dos condutores que permaneceram em serviço, operando em condições semelhantes. Porém, Mendelsohn e Richardson (2009) afirmam que mesmo que os testes com aceleração do envelhecimento possam fornecer um indicativo sobre o desempenho dos cabos, os fatores de envelhecimento criados em laboratório não são os mesmos aos quais estão expostos os cabos em campo, e podem haver variações entre as estimativas e o desempenho real destes cabos.

A seguir são descritos, resumidamente, os tipos de testes offline mais utilizados para diagnósticos do estado da isolação e estimativa de sua vida útil.

2.3.1 Descargas Parciais Offline

Descargas Parciais (DP), de acordo com Densley (2001), são descargas elétricas localizadas que ocorrem em cavidades que se formam em vazios ou bolhas existentes na isolação de dispositivos elétricos. São chamadas de parciais por não atravessarem completamente o sistema de isolação do componente.

Alguns tipos de testes de DPs são realizados desconectando os cabos do sistema e injetando um sinal capaz de detectar irregularidades na isolação do cabo. A tensão é aumentada rapidamente ao nível operacional, em 1 pu, e mantida por alguns minutos. Depois, a tensão é então aumentada a seu valor máximo, em 2 ou 2,5 pu, por 5 segundos e então retornada a zero rapidamente. De acordo com o tipo de sinal obtido como resposta, é possível localizar os pontos de defeito e caracterizá-los. Em Mashikian e Szatkowski (2006), e Hartshorn et. al. (2009), é possível encontrar mais detalhes sobre os testes offline por descargas parciais, e o procedimento para a identificação e caracterização de defeitos.

Vale ressaltar que as características dos sinais das descargas parciais, como a amplitude, variam de acordo com a origem da mesma e se ela ocorreu em um vazio ou em uma arborescência (electrical tree) (Densley, 2001). Dessa forma, torna-se possível identificar e caracterizar o defeito.

Quando os defeitos localizados são diagnosticados corretamente e os cabos são reparados, de acordo com Lanz, et. al. (2016), mais de 75% dos cabos que poderiam ser considerados condenados têm sua vida útil prolongada e podem permanecer em serviço por até 20 anos.

De acordo com Hartshorn, et. al. (2009), o teste de diagnóstico de DP offline tem como vantagem a possibilidade de localização e caracterização do defeito. O autor afirma que este tipo de teste é capaz de localizar defeitos que precisam de reparos e que são invisíveis a outros métodos. Além disso, Vahlstrom (2009) aponta como vantagens para os métodos de diagnóstico por DP a possibilidade de operar em frequências de 0,1 a 60 Hz, mas apresenta como desvantagens a necessidade de utilização de mão de obra especializada para a realização do diagnóstico. O autor afirma ainda que, quando o método é utilizado em grandes sistemas, alguns defeitos podem mascarar outros.

2.3.2 “Very Low Frequency” (VLF)

Na metodologia de testes que utiliza uma frequência muito baixa (“Very Low Frequency” ou ainda, VLF), utilizam-se sinais de corrente alternada com uma faixa de frequências que varia de 0,01 Hz a 1 Hz. De acordo com Seesanga, et. al. (2008) os testes VLF podem ser classificados em diagnóstico, que permitem determinar a degradação de uma seção do sistema de cabos, e resistência, em que o cabo em teste é submetido a uma tensão aplicada através de sua isolação, devendo o cabo suportá-la sem apresentar defeitos.

O teste de baixa frequência foi caracterizado por Lanz, et. al. (2016) e Hartshorn, et. al. (2009) como uma metodologia obsoleta, que gerou diagnósticos incertos e resultou em cabos

retornados ao serviço com defeitos ou tratados sem necessidade. Vahlstrom (2009) também afirma que os resultados dos testes são inconclusivos para cabos extensamente danificados por water trees ou que apresentam ionização do isolamento.

Além disso, Hartshorn, et. al. (2009) afirmam ainda que os testes VLF podem agravar ainda mais defeitos já existentes ou causar novos defeitos discretos, podendo, ao final do diagnóstico, fazer com que o cabo passe a ter uma vida útil menor do que antes, tornando-se ainda menos confiável.

2.3.2 Tangente de δ

O fator de dissipação da isolação de um cabo, ou simplesmente tangente de delta, é definido como o ângulo entre a corrente total e a corrente capacitiva, e mede a integridade do sistema isolante de um cabo.

Os valores de $\tan \delta$ são obtidos aplicando-se uma tensão senoidal ao cabo e medindo-se as diferenças de fase da forma de onda da tensão aplicada com a forma de onda da corrente resultante. Este ângulo é usado para separar da corrente total a componente de carga e a componente de perdas. O fator de dissipação é a razão entre estas duas componentes.

As medições do fator de dissipação fazem parte de um grupo de testes que avaliam as condições de um cabo e que podem fornecer uma avaliação geral sobre o estado de degradação da isolação deste, mas não são capazes de indicar o local do defeito (Hartshorn, et. al., 2009). Além disso, Grossi, et. al. (2014) mencionam a possibilidade de o teste apresentar diagnósticos incorretos, visto que o valor obtido para o ângulo é o valor médio para todo o comprimento do cabo e pode mascarar pontos que estejam acima dos valores recomendados.

Devido à grande dificuldade de encontrar o ponto de defeito precisamente, Hartshorn, et. al. (2009) relatam que as conclusões obtidas neste tipo de teste são normalmente utilizadas para auxiliar a decisão de manter em operação ou substituir completamente o trecho onde defeito foi diagnosticado. Dessa forma, observa-se que esta metodologia não leva a uma decisão precisa e pode resultar em operação economicamente inviável, devendo ser, portanto, empregada juntamente a algum outro teste para se chegar a conclusões mais confiáveis.

2.4 Testes Online – Descargas Parciais

Outro tipo de diagnóstico comumente encontrado na literatura é o monitoramento da situação dos cabos com medições realizadas estando os mesmos em serviço (online). Este tipo de abordagem, conforme mencionado anteriormente, é a que apresenta o menor potencial de destruição para os cabos, mas alguns tipos de defeitos podem ser mascarados por ruídos.

Apesar da vantagem de não demandar a desconexão dos cabos da rede de alimentação, de acordo com Hartshorn, et. al. (2009), os testes online possuem algumas limitações como

uma baixa porcentagem de defeitos que podem ser detectados em nível de tensão operacional, considerando os tempos curtos em que são realizados os ensaios, que resulta em uma probabilidade relativamente alta de leituras falso-positivas devidas a ruídos.

Grossi, et. al. (2014), por sua vez, afirmam que as medições por descargas parciais se destacam por serem capazes de indicar os pontos localizados onde o sistema de isolamento está em degradação; e, adicionalmente, Dong, et al. (2014) afirmam que o monitoramento online de DPs pode detectar falhas na isolação em estágio inicial. O monitoramento online por descargas parciais pode detectar falhas no sistema de isolamento tanto por degradação do material isolante como por imperfeições no processo de fabricação do condutor.

Densley (2001) também afirma que os testes por descargas parciais apresentam como vantagem a realização no local onde o cabo está instalado, sem precisar retirá-lo de serviço, além da determinação dos locais onde ocorreram danos. Este autor apresenta um estudo de cabos XLPE envelhecidos em campo que foram submetidos a testes por DPs, em seguida retirados de serviço e submetidos a testes de aceleração vida útil. Observou-se que os cabos que apresentaram descargas parciais nos testes em serviço falharam rapidamente no estudo seguinte.

Comparando este tipo de abordagem com os testes de DP offline, Hartshorn, et. al. (2009) e Grossi, et. al. (2014) afirmam que a detecção de defeitos é mais precisa quando os cabos estão desconectados da rede de alimentação, uma vez que as medições são realizadas com um nível mínimo de ruído, e, dessa forma, o defeito pode então ser encontrado e melhor caracterizado.

2.5 Análises Estatísticas e Probabilísticas

Análises estatísticas e probabilísticas de dados são as análises baseadas em modelos criados com registros históricos da operação dos componentes. Estes modelos levam em consideração dados coletados ao longo dos anos, por exemplo, sobre modos de falha, data associada ao tipo de falha e data de substituição dos equipamentos (Carer e Briend, 2008).

Conforme mencionado anteriormente, as concessionárias normalmente operam com orçamentos limitados, sendo que os esforços dos pesquisadores que trabalham com dados históricos estão em encontrar uma forma de substituir gradualmente os cabos que estão envelhecendo, com os recursos que estão disponíveis, para garantir que o sistema se mantenha confiável.

Entretanto, nem todas as empresas dispõem de registros completos sobre a operação de suas redes subterrâneas para executar análises precisas de confiabilidade. Além disso, Carer e Briend (2008) reportaram dificuldades adicionais, como um período de observação que pode ser menor que a vida útil média dos condutores ou algum parâmetro que pode ser crítico para a análise da falha que pode ter sido omitido no processo de coleta de informações.

Entre os modelos probabilísticos utilizados para prever as falhas em cabos subterrâneos, destacam-se a Distribuição de Weibull e o Modelo Crow-AMSAA, apresentados a seguir.

2.5.1 Distribuição de Weibull

Segundo Tang, et. al. (2015), a distribuição de Weibull é o modelo mais utilizado na análise de dados tratando-se de confiabilidade e falhas. Sua aplicação permite a estimativa do tempo de vida médio de uma população selecionada e sua taxa de falhas em função do tempo. A análise de Weibull, de acordo com Abernethy (2004), apresenta a previsão de falhas através de gráficos e é utilizada para auxiliar gerências na elaboração de planos de manutenção e estratégias para substituições custo-efetivas nos processos de produção.

Este modelo é capaz de prever falhas de cabos de redes subterrâneas, mas apresenta como desvantagem a capacidade de modelar apenas a primeira falha de um cabo, sem considerar aqueles sistemas que são reparados e retornados ao serviço. A distribuição de Weibull, ainda de acordo com Tang, et. al. (2015), é adequada para um modo de falha único.

2.5.2 Modelo Crow-AMSAA

Assim como a Distribuição de Weibull, o modelo Crow-AMSAA é utilizado para prever falhas nos sistemas subterrâneos, e pode também ser usado para estabelecer modelos de manutenção que podem ser utilizados em cabos envelhecidos (Tang, et. al., 2015).

Também chamado de Processo de Poisson não-homogêneo, a ferramenta auxilia na previsão de ocorrência de falhas, considerando que os sistemas são reparáveis, representando eventos com taxas de recorrência de falhas que não são constantes.

Este modelo tem como vantagem sobre a distribuição de Weibull a sua capacidade de lidar com mais de um tipo de modo de falha e ainda modela sistemas reparáveis, ou seja, considera aqueles cabos que foram reparados, e sua condição volta à inicial, antes da falha (Gill, 2011). Entretanto, apresenta como desvantagem não distinguir cabos novos e envelhecidos na estimativa até a próxima falha, uma vez que a condição inicial é reestabelecida após a recuperação daquele condutor (Nemati, et. al., 2015).

3. ESTUDOS DE CASO

Com o intuito de ilustrar a aplicação das técnicas mencionadas anteriormente como ferramentas de análise da degradação de cabos e, consequentemente, instrumentos para nortear o planejamento das ações de manutenção e direcionamento de investimentos em componentes novos, reuniu-se nesta seção trabalhos que empregaram tais metodologias de análise, cujos casos são reportados a seguir.

O estudo de Xu e Brown (2011), aplicado a uma concessionária de energia sediada nos Estados Unidos, utiliza um programa de substituições proativas em uma simulação.

O programa busca substituir as seções mais propensas a falhas e seu objetivo é reduzir as substituições reativas ao longo dos anos.

Em tal estudo foi realizada uma simulação de 20 anos para a avaliação das variações na confiabilidade do sistema à medida que os cabos envelhecem. Os resultados mostraram que a confiabilidade do sistema sofrerá uma redução significativa à medida que seus indicadores SAIFI (System Average Interruption Frequency Index), equivalente ao FEC (Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora), e o SAIDI (System Average Interruption Duration Index), equivalente ao DEC (Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora), sofrerão aumentos de cerca de 50%. O estudo então prossegue para encontrar um equilíbrio entre as substituições reativa e a proativa.

Os autores Xu e Brown (2011) afirmam que a substituição proativa completa pode não ser uma abordagem financeiramente viável, pois podem ocorrer substituições prematuras e desnecessárias de cabos que ainda poderiam apresentar vida útil longa. Mesmo assim, os resultados das simulações do programa apresentam índices de confiabilidade maiores que as substituições reativas, visto que os cabos são substituídos de maneira programada, antes que as interrupções não planejadas ocorram. Portanto, mesmo que a abordagem possibilite uma melhora na confiabilidade do sistema a longo prazo, os resultados obtidos ainda não apresentam um cenário de operação ideal para a concessionária, visto que, conforme mencionado pelos autores do experimento, este tipo de abordagem pode gerar substituição prematura dos cabos que, conseqüentemente, poderá elevar os custos de operação com as substituições.

Outros casos práticos interessantes, empregando o método das descargas parciais, foram relatados por Hartshorn, et. al. (2009), Dias e Costa (2012), Grossi, et. al. (2014) e Lanz, et. al. (2016).

No estudo de Hartshorn, et. al. (2009), foram analisadas diversas plantas de indústrias petroquímicas onde eram realizados testes CC para diagnóstico dos cabos subterrâneos, que, mesmo aprovados no mesmo, continuavam a apresentar falhas. Os autores relataram a respeito de uma indústria norte americana onde foram realizados testes CC em uma instalação nova, e, antes de energizar o sistema e de maneira complementar, realizaram-se também testes diagnósticos de descargas parciais em 50/60Hz. Detectou-se no segundo uma falha em uma terminação que apresentava DPs em condições graves e cujas medições estavam abaixo dos requisitos da norma. Uma investigação posterior revelou um erro de instalação no local, o que foi diagnosticado no teste por DP.

Hartshorn, et. al. (2009) afirmam que os testes diagnósticos de DP offline apresentam melhor resultado e melhor custo benefício no que tange a manutenção da confiabilidade, visto que, através deles, foi possível identificar defeitos que eram invisíveis a outras metodologias aplicadas anteriormente, além de sua localização.

No estudo de Dias e Costa (2011), os autores utilizaram os testes de DPs para conhecer o estado dos alimentadores que

já apresentavam vida útil além do estimado pelos fabricantes dos cabos, em uma rede subterrânea da CEMIG Distribuição S.A., localizada na cidade de Belo Horizonte – MG, no Brasil. Na primeira fase do estudo foram realizadas medições por descargas parciais em 15 alimentadores, dos quais 9 apresentaram DPs em níveis acima do esperado. Na segunda fase do estudo, foram avaliados mais 15 alimentadores além dos 9 que apresentaram descargas parciais na primeira fase, dos quais 6 evoluíram para situação crítica.

A partir do relatório gerado após as medições, a gerência da concessionária pôde se preparar, elaborando um plano de manutenção preventiva para gradualmente substituir os condutores em estado crítico. Também se elaborou um plano a longo prazo para monitorar os alimentadores que não apresentaram DPs no estudo inicial.

Assim como Hartshorn, et. al. (2009), Dias e Costa (2011) afirmam que o plano desenvolvido a partir das análises por medições de descargas parciais, para substituição dos condutores em estado crítico, apresenta um valor pouco significativo quando comparado ao custo de manutenção reativa em qualquer um dos alimentadores.

Assim como os outros autores mencionados, Lanz, et. al. (2016), frente ao desafio de aumentar a confiabilidade de um sistema elétrico e reduzir os custos de operação, realizaram um estudo em uma concessionária norte americana que operava realizando a substituição dos cabos proativamente, baseada em idade, ano de instalação, frequência de falhas e tipo de construção. Conforme observado na conclusão do estudo de Xu e Brown (2011), a abordagem completamente proativa pode gerar custos de investimento elevados devido a substituições prematuras. Este fator foi o motivador da pesquisa de Lanz, et. al. (2016), em que, na concessionária onde seu estudo foi realizado, verificou-se que o montante investido em manutenção operando com esta abordagem crescia de uma forma proibitiva.

Realizando medições de descargas parciais offline a 50/60Hz, Lanz, et. al. (2016) afirmaram que, dos cabos originalmente marcados para substituição proativa, 94% poderiam permanecer em serviço, sendo indicado reparo a 13% deste grupo, sendo que apenas os 6% restantes da população analisada deveria de fato ser substituída em um curto espaço de tempo. Após a realização da análise e do tratamento dos cabos selecionados, o custo com reabilitação e substituição dos cabos decresceu consideravelmente e a taxa de falhas da concessionária para os grupos marcados para substituição decresceu 98%. Dessa forma, os autores foram capazes de atingir com sucesso o de reduzir os custos de operação e manutenção, otimizando a utilização dos recursos financeiros da concessionária.

Diferentemente dos outros casos, onde foram realizadas medições de DPs offline, Grossi et. al. (2014), na ausência de uma fonte de tensão auxiliar Aciaria GERDAU- unidade Ouro Branco, optaram pela realização das medições por DPs online, ou seja, sem desenergizar cabos da rede de alimentação. No estudo em questão, o objetivo era determinar as condições do isolamento dos cabos da instalação e gerar uma estratégia para a realização de manutenções, como feito

com sucesso anteriormente por Dias e Costa (2011). As medições foram realizadas e Grossi et. al. (2014) puderam então elaborar um relatório enfatizando os alimentadores com maiores índices de DP e com as recomendações de ações necessárias para aqueles que demandam atenção imediata, contendo também instruções para o monitoramento do restante dos cabos para verificar o possível surgimento de DPs e o estado geral do sistema de isolamento dos alimentadores.

A conclusão obtida por estes autores confirma o que já havia sido constatado anteriormente, que, através das medições para diagnosticar a integridade dos sistemas de cabos subterrâneos, pode-se reduzir consideravelmente os custos de substituição proativa, e, conseqüentemente, otimizar o custo global de operação de indústrias e concessionárias de energia.

Para sistemas com redes subterrâneas maiores e mais ramificadas, em que a realização frequente dos testes diagnósticos in loco é inviável, outras abordagens podem ser empregadas, baseadas em análises estatísticas e probabilísticas, com base no histórico de operação da rede.

Nesse contexto, Gill (2011) realizou um estudo em parceria com a concessionária norte americana Projeto Salt River (Salt River Project), sabendo o quanto as decisões orçamentárias impactam a confiabilidade do sistema a longo prazo. Seus esforços foram concentrados em desenvolver um modelo tendo como base a análise Crow-AMSAA, para previsão de falhas de cabos subterrâneos. O autor relata que o modelo desenvolvido simula a substituição dos cabos e realiza uma estimativa de previsão de falhas e confiabilidade para um período de 30 anos, para a rede de cabos primários subterrâneos, com base em um orçamento definido. O estudo de Gill (2011) avalia cenários considerando o orçamento disponível e os efeitos na confiabilidade do sistema, sendo que, a partir da análise, a operação utilizando a substituição proativa focada nesta otimização dos recursos disponíveis torna-se mais viável, uma vez que a escolha dos trechos a serem substituídos torna-se mais eficiente.

Assim como Gill (2011), Nemati, et. al. (2015) utilizaram dados históricos de uma das empresas suecas de distribuição de energia, Halmstads Energi & Miljö AB, para estimar os parâmetros de modelos probabilísticos criados para prever futuras falhas em diferentes cabos. Nesta análise, para estimar a taxa de falhas, foram consideradas apenas a idade e a quantidade histórica de falhas. Os autores utilizaram cinco modelos probabilísticos diferentes e analisaram a sua adequação às informações históricas existentes. A conclusão obtida é de que a taxa de falhas pode ser modelada por duas linhas constantes, uma com baixa taxa de falhas, até os 30 anos, e uma taxa crescente após esta idade, que remete ao gráfico apresentado na figura 1 neste artigo, onde os cabos apresentam taxa de falhas constante ao longo de quase toda a sua vida útil, desconsiderando as falhas prematuras, e a taxa de falhas aumenta à medida que a idade dos cabos avança.

Entretanto, os autores Nemati, et. al. (2015) reconhecem que a aproximação não é tão eficiente quanto a realização de medições diretas nos cabos e afirmam que, mesmo assim,

metodologias de estimativa são frequentemente escolhidas por serem menos dispendiosas que os testes de campo.

Lanz e Broussard (2008), por sua vez, sugerem uma metodologia que une as análises probabilísticas aos testes in loco. Sua aproximação, denominada Diagnóstico Específico de Defeitos (Defect Specific Diagnostic), aplicada a uma concessionária de energia norte americana, objetiva criar uma estratégia que equilibra investimentos planejados e a melhora desejada na confiabilidade do sistema, e é dividida em duas partes, onde uma primeira análise histórica é realizada para selecionar os grupos de cabos com piores desempenhos. A segunda parte da avaliação, através de testes offline por descargas parciais, examina os cabos selecionados anteriormente e remove do grupo aqueles não demandam reparos imediatos.

Os resultados apresentados na metodologia do Diagnóstico Específico de Defeitos indicam que, em média, 80% dos cabos da população alvo selecionada na primeira parte da análise não demandam substituição ou reabilitação imediata, de forma que os recursos para reparo e substituição podem ser otimizados e direcionados precisamente, atingindo assim o equilíbrio entre investimentos e confiabilidade. Os autores afirmam que a tecnologia é capaz de fornecer informações e sugestões de ações corretivas que poderão melhorar a confiabilidade do sistema com um custo otimizado.

A união dos dois tipos de metodologias, estatísticas e testes em campo, apresentou bons resultados, sendo capaz de otimizar a escolha dos trechos a serem analisados, e, através dos testes em campo, filtrar ainda mais os cabos a serem reparados ou substituídos, tonando possível economizar tempo e reduzir os custos de manutenção.

4. CONCLUSÕES

Apesar dos esforços para encontrar a melhor forma de se avaliar a degradação da isolamento de cabos subterrâneos e estimar a sua vida útil restante, ainda não foi obtida uma solução definitiva e capaz de apresentar uma resposta concreta para tal questão. As técnicas existentes são capazes de fornecer uma avaliação útil sobre as condições em que os cabos subterrâneos se encontram, porém sem trazer informações precisas sobre o restante de sua vida útil.

Do ponto de vista de confiabilidade, com as técnicas disponíveis até o presente momento, Densley (2001) e Dakka, et. al. (2011), sugerem que sejam realizados mais de um tipo de diagnóstico para avaliar as condições atuais dos cabos subterrâneos em serviço, de forma se tentar então estimar a sua vida útil restante. Ou ainda, de acordo com o primeiro, que os testes sejam realizados com maior frequência para observar as tendências e aprimorar o diagnóstico. Observa-se no estudo de Lanz e Broussard (2008) a efetividade da abordagem que une os estudos probabilísticos para selecionar o grupo de cabos a serem analisados e o diagnóstico in loco para a determinação da condição dos mesmos, possibilitando um planejamento adequado, de forma a manter o equilíbrio entre o investimento em operação e a manutenção do sistema, garantindo a confiabilidade do mesmo.

Entretanto, há ainda muita divergência entre autores em relação à escolha da melhor abordagem. Dakka, et. al. (2011) afirmam que as técnicas desenvolvidas, como as que foram apresentadas neste trabalho, apresentam resultados divergentes e que nenhuma delas isoladamente foi capaz de afirmar com total segurança quais são as condições reais de operação dos cabos e seu tempo de vida restante. Cabe ressaltar que a escolha do método de diagnóstico deve ser feita avaliando-se os custos de execução e os benefícios que poderão ser gerados.

Conclui-se, dessa forma, que para escolher uma técnica de avaliação a ser aplicada em um sistema de cabos para diagnóstico de sua vida útil, deve-se ponderar se as metodologias são financeiramente viáveis, se não têm potencial de causar mais danos aos cabos e se são capazes de fornecer uma estimativa razoável da vida útil restante. É preciso saber, também, se a empresa tem dados históricos suficientes, tanto em quantidade como em qualidade, para se adicionar à análise um estudo estatístico. Por fim, reforça-se que ao escolher uma metodologia para verificar as condições dos cabos, deve-se garantir, para que não haja desperdícios de recursos, que os testes não piorarão as condições dos cabos e nem os levarão à situação de demanda por reabilitação imediata.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Abernethy, R. B. (2004). *The New Weibull Handbook: Reliability and Statistical Analysis for Predicting Life, Safety, Supportability, Risk, Cost and Warranty Claim*. Fifth Edition.
- Bertini, G. J. (2002). Prioritizing Reliability for Underground Distribution. *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 15, no. 1, pp. 29-34.
- Carer, P.; Briend, C. (2008). "Weather Impact on Components Reliability: A Model for MV Electrical Networks," *Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Rincon, pp. 1-7.
- Dakka, M. A., Bulinski, A., Bamji, S. S. (2011). "On-site diagnostics of medium-voltage underground cross-linked polyethylene cables," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 27, no. 4, pp. 34-44.
- Densley, J. (2001). Aging Mechanisms and Diagnostics for Power Cables – An Overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 14-22.
- Dias E. J., Costa, P. R. F. C. (2012) Diagnóstico dos Cabos Subterrâneos de Energia em Belo Horizonte Através do Método de Descargas Parciais: Uma Viabilidade para Manutenção Preventiva/Preditiva. *XX Semin. Nac. de Distrib. de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro – RJ, pp. 1-12.
- Lohia S., Khan U., Dixit S. (2015). A Review on Fault Analysis in Underground Cables. *International Journal of Electrical and Electronics Engineers*, vol 7, issue 02, pp. 250-256.
- Dong, X., et al. (2014). Analysis of cable failure modes and cable joint failure detection via sheath circulating current. *2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Philadelphia, PA, pp. 294-298.
- Gill Y. (2011). "Development of an electrical cable replacement simulation model to aid with the management of aging underground electric cables," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 27, no. 1, pp. 31-37.
- Grossi, A.; Lana, G.; Lima, D.; Okumtoto, P. (2014). Diagnóstico em Cabos de Média Tensão Utilizando o Método de Descargas Parciais. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte, MG, pp. 2861 – 2866.
- Hartshorn, G. ; Lanz, B.; Broussard, B. (2007) "Medium Voltage Cable Predictive Diagnostics Technique," *2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, Calgary, Alta., pp. 1-9.
- Lanz, B. T.; Broussard, B. E. (2008). Maximizing Cable Reliability at the Lowest Possible Cost. *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vancouver, BC, pp. 535-538.
- Lanz, B.T., Byrne D., Spalding M. (2016). "Affordable Cable System Reliability and Life Extension Strategy," *2016 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*, Westminster, CO, pp. 50-56.
- Lassila, J.; Kaipia, T.; Partanen, J.; Lohjala, J. (2007). "New Investment Strategies in the Modern Electricity Distribution Business - Reliability in the Long-Term Planning," *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, pp. 1-8.
- Mashikian, M. S., & Szarkowski, A. (2006). "Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency". *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 22(4), 24–32. doi:10.1109/mei.2006.1678355
- Mendelsohn, A.; Richardson, B. (2009). "Evolution of medium voltage extruded cable technology in north america". *2009 IEEE Electrical Insul. Conf.*, Montreal, QC, pp. 430-434.
- Nemati, H. M.; Sant'Anna, A.; Nowaczyk, S. (2015). "Reliability Evaluation of Underground Power Cables with Probabilistic Models". *Int'l Conf. Data Mining - DMIN'15*, pp. 37-43.
- Petzold F; Schlapp, H.; Gulski, E. ; Seitz, P. P.; Quak B. (2008) "Advanced solution for on-site diagnosis of distribution power cables," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1584-1589.
- Seesanga S., Kongnun, W., Sangswang, A. and Chotigo S. (2008). "A New Type of the VLF High Voltage Generator," *2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Krabi*, pp. 929-932.
- Tang Z. et al., (2015). "Comparison of the Weibull and the Crow-AMSAA Model in Prediction of Early Cable Joint Failures," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 6, pp. 2410-2418.
- Tuinema B. W.; Rueda, J. L.; van der Sluis, L.; van der Meijden, M. A. M. M. Reliability of Transmission Links Consisting of Overhead Lines and Underground Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1251-1260.
- Vahlstrom W. (2009). "Strategies for field testing medium voltage cables," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, no. 5, pp. 7-17, doi: 10.1109/MEI.2009.5276074.
- Xu, L.; Brown, R. E. (2011). Justifying the proactive replacement of cable. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, pp. 1-6.