

O ENVELHECIMENTO DE CABOS DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE EM CENTRAIS NUCLEARES

AGEING OF INSTRUMENTATION AND CONTROL CABLES IN NUCLEAR POWER PLANTS

Richard Brandão Nogueira Vital ¹
Tatiane Melo Vital ²

Data de entrega dos originais à redação em: 24/05/2016
e recebido para diagramação em: 25/05/2017

Muitas usinas nucleares pelo mundo tem se aproximado do final da operação comercial licenciada, mas ainda mantém as características de segurança. Neste contexto, diversos programas de gerenciamento de envelhecimento têm sido desenvolvidos para identificar agentes precursoros de falhas e oportunidades para se aumentar a segurança das usinas, maximizando a utilização de recursos e recuperação de investimentos. O envelhecimento do cabeamento de sistemas de instrumentação e controle tem sido exaustivamente estudado devido a sua importância para se garantir uma operação segura de uma usina. Os principais objetivos deste artigo são: analisar os efeitos do envelhecimento em algumas temperaturas operacionais e os modelos de cabos comercialmente utilizados em usinas nucleares; discutir formas de monitoramento e extração de parâmetros; estudar modelos matemáticos que descrevam o fenômeno de envelhecimento.

Palavras-chave: Cabos. Envelhecimento. Usina Nuclear.

Many nuclear power plants around the world are near of the end of licensed commercial operation, but maintained our safety characteristics. In this context, several ageing management programs have been developed to identify precursor's failure agents and opportunities to increase the safety in operating plants, increasing resources utilization and investment return. Ageing of instrumentation and control cable has been studied exhaustively, due the importance to guarantee a safety operation. The main objectives of these paper are: analyses the ageing effects in some operational temperatures and models of commercial nuclear power plants cables; evaluates monitoring ways and parameters extractions; studies mathematical models that describes the ageing phenomena.

Keywords: Cable. Ageing. Nuclear Power Plant.

1 INTRODUÇÃO

Entre os anos de 1960 e 1990 ocorreu uma grande expansão na capacidade de geração de energia elétrica através de reatores nucleares de potência (IAEA, 2011). A segurança destas instalações foi avaliada por diversos órgãos reguladores pelo mundo, através de robustos processos de licenciamento que utilizaram normas locais e internacionais. Em função das avaliações realizadas durante as diversas fases de licenciamento e características de projeto, alguns países definiram como 40 anos o tempo licenciado para a operação das usinas, como é o caso de países como Brasil e Estados Unidos (IAEA, 2012).

No início de 2016, dos 441 reatores em operação no mundo, aproximadamente 47% tem entre 30 e 40 anos de operação comercial. Estudos científicos e econômicos mostram que com algumas modificações de projeto ou substituição de itens, os reatores nucleares podem operar por um período maior que o inicialmente previsto, desde que sejam atendidos os requisitos de segurança definidos nos Relatórios Finais de Análise de Segurança (RFAS). Neste contexto, os organismos de regulamentação de cada país têm definido requisitos mínimos que devem ser acompanhados em programas de gerenciamento de envelhecimento a fim de garantir

a segurança operacional das instalações nucleares (SALDANHA; FRUTUOSO e MELO, 2011).

Diversas pesquisas mostram que componentes elétricos e eletrônicos podem sofrer degradação por envelhecimento devido ao longo tempo em operação e diferentes condições ambientais (VITAL; VITAL, 2015). Diversas pesquisas e informações provenientes de programa de troca de experiência operacional mundial mostram que apesar dos rigorosos processos de qualificação ambiental, os cabos são itens que podem perder sua capacidade de desempenhar determinada funcionalidade devido a mecanismos de envelhecimento; visto que os mesmos operam em diferentes condições ambientais (CNSC, 2012). Em uma usina nuclear, podem-se encontrar milhares de quilômetros de cabos de diferentes tipos, sejam de potência ou de instrumentação e controle que possuem funções específicas e, que podem estar relacionadas à operabilidade de equipamentos de segurança. (HASHEMIAN, 2011)

Este trabalho avalia o impacto do envelhecimento, de origem térmica, nas propriedades de cabos de instrumentação e controle; visto que os mesmos são responsáveis pela operação de importantes sistemas de segurança em usinas nucleares. A abordagem

1 - Doutorando em Engenharia Nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Graduado e Mestre em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações < richardvital@gmail.com >.

2 - CEFET/RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca).

apresentada avalia os efeitos de envelhecimento cujo objetivo é planejar uma possível substituição de cabos que podem não atender às necessidades de segurança exigidas em um determinado instante do período licenciado de uma usina. Dessa forma, são avaliadas algumas consequências e estimativas de tempo de vida útil, além de descrever métodos de monitoração que possibilitarão a determinação de um modelo estatístico relacionado a um determinado ambiente operacional.

Tabela 1 – Classificação do cabeamento de acordo com sua função

Categoria	Função
1	Equipamento necessário para mitigar os efeitos de um acidente (equipamento de segurança) que sofrem os efeitos da condição local pós-acidente
2	Equipamento necessário para mitigar os efeitos de um acidente (equipamento de segurança) que não sofrem os efeitos da condição local pós-acidente
3	Equipamento necessário para prevenir a liberação de radiação
4	Equipamento que suporta as necessidades de sistemas para mitigação de acidentes
5	Equipamento para monitoração pós-acidente
6	Equipamento necessário para a operação normal da usina
7	Equipamento que ao falhar confunde os operadores durante um acidente

Fonte: Agência Internacional de Energia Atômica.

2 CARACTERÍSTICAS E QUALIFICAÇÃO DE CABOS

Basicamente, um cabo de instrumentação e controle, em uma usina nuclear, pode ser modelado por quatro partes, como mostrado na Figura 1. Neste modelo, o condutor é a parte metálica constituída de um ou mais fios que permitem a transmissão de energia e informações; já o isolante confina o campo elétrico originado pela aplicação de uma diferença de potencial sobre o condutor. A malha protege o condutor de interferências externas e a cobertura funciona como uma proteção mecânica e química do conjunto.

O isolamento e a cobertura dos cabos, geralmente, são constituídos por polímeros orgânicos. Alguns exemplos de polímeros usados no isolamento são: etileno propileno (EPR), polietileno reticulado (XLPE) polietileno (PE), polietileno reticulado com retardo à propagação de fogo (FR-XLPE), (SiR) e espuma vinílica acetinada (EVA). Já na cobertura, os polímeros mais comuns são: cloreto de polivinila (PVC), cloreto de polivinila com retardo à propagação de fogo (FR-PVC), polietileno clorosulfonado (CSPE) e compostos termofixos (XLPO). (VERARDI, 2014)

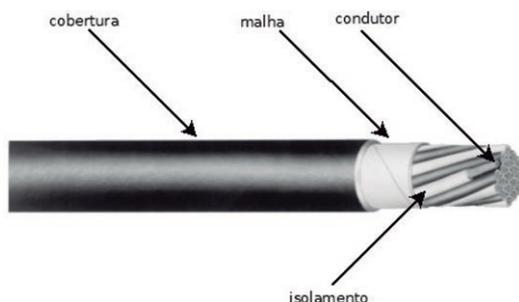


Figura 1 - Partes de um cabo de instrumentação e controle

Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), a manutenção das condições necessárias para a operação de uma usina, segundo os requisitos de segurança definidos internacionalmente, pode ser dividida em três áreas (IAEA, 2012):

- processo de qualificação ambiental, incluindo testes em laboratório e pós-instalação, para se garantir que o cabeamento terá um desempenho adequado em

condições operacionais normais ou no caso de um acidente básico de projeto;

- extensão de vida do cabeamento para suportar as renovações de licenças em curso ou que ainda serão iniciadas;
- monitoramento das condições do cabeamento para se avaliar o desempenho do isolamento ou identificar problemas nos condutores.

Dependendo da função que um determinado cabeamento ou equipamento elétrico pode desempenhar de acordo com o projeto de uma usina nuclear, ele pode ser classificado em uma das sete categorias definidas pela IAEA como mostrado na Tabela 1. (IAEA, 2012)

Na indústria existem diversas metodologias para se efetuar uma qualificação ambiental, sendo o objetivo principal comprovar a disponibilidade e confiabilidade dos sistemas em realizar de maneira adequada as funções para o qual foram projetados (IAEA, 2012). O processo de qualificação determinará o tempo de vida útil do cabo, entretanto, um programa de avaliação contínuo deve ser realizado para se identificar modos de falhas relacionadas ao envelhecimento ou condições ambientais de operação.

O Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (IEEE) também definiu critérios para se efetuar a qualificação ambiental de cabos em usinas nucleares. Os cabos necessários para a segura operação de sistemas de segurança são classificados como "Classe 1E". (VERARDI, 2014)

3 OS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO DE CABOS

O envelhecimento de qualquer material é caracterizado por uma modificação irreversível de suas propriedades que pode acarretar alterações em sua estrutura físico-química (VERARDI, 2013). Cada parte do cabo pode sofrer diferentes tipos de envelhecimento, ocasionados por diferentes tipos de condições ambientais e operacionais (VILLARAN; LOFARDO, 2010). O condutor pode apresentar aumento de resistência elétrica ou perda de integridade estrutural em função de umidade, vibração, esforços elétrico ou mecânico. O isolamento pode apresentar perda da integridade estrutural em ambientes altamente alcalinos. A blindagem pode sofrer perda da integridade estrutural e redução da compatibilidade a interferência

eletromagnética devido a elevadas temperaturas, radiação e umidade. Já na cobertura, pode-se observar perda de integridade estrutural devido a fatores como temperatura, radiação e esforços eletromecânicos. (VERARDI, 2013)

Diversas metodologias para estimativa da vida útil de um cabo têm sido estudadas, sendo que a aplicação da equação de *Arrhenius* é a mais difundida (VERARDI, 2013). Nesta metodologia, testes em laboratórios usando diferentes condições de temperatura e níveis de radiação aceleraram o processo de envelhecimento e buscam relacionar os resultados às condições operacionais a qual um determinado modelo de cabo estará submetido. A Equação 1 descreve a estimativa do tempo de vida útil de um cabo usando da teoria de *Arrhenius*. Neste modelo, a relação entre o tempo de vida estimado t_1 , e o tempo de vida em condições de envelhecimento t_2 é proporcional à energia de ativação E_a , constante de *Boltzmann* k , temperatura de operação normal T_1 e temperatura de operação em um ambiente de *stress* T_2 . (McCARTER et al., 2014)

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (1)$$

A limitação desta técnica é a constante variação das condições ambientais, que pode levar a uma estimativa incorreta. Adicionalmente, alguns programas de monitoramento mostram que alguns materiais, como por exemplo, o polietileno reticulado (XLPE), não segue adequadamente o modelo acima (BOWLER; LIU, 2015). Dessa forma, o estabelecimento de um processo contínuo de aquisição e modelamento das características ambientais e propriedades dos cabos se tornam necessárias. Diante das inúmeras dificuldades e incertezas na determinação do tempo útil exato de um cabo, diversas recomendações foram estabelecidas internacionalmente por instituições como a Agência Reguladora Americana (NRC) e a IAEA.

4 MONITORAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE CABOS

Os programas de monitoramento de condição operacional de cabos são constantemente atualizados com dados relacionados a observações ou medidas para se garantir que os critérios de aceitação previamente definidos, estão sendo atendidos (IAEA, 2012). Geralmente, os programas de monitoramento se concentram em quatro categorias de acordo com as seguintes propriedades: elétricas, mecânicas, físico-químicas e aparência do material (CNSC, 2012). Dentre as técnicas de extração de parâmetros existentes podemos distinguir duas classes: testes em ambiente operacional, onde as medições são realizadas no local onde os cabos estão instalados ou, testes em laboratório, onde existe a necessidade de se remover corpos de prova para a realização de testes. Os testes em ambiente operacional precisam ser não destrutivos e interferir o mínimo possível nas condições dos cabos. Já os testes em laboratório podem ser destrutivos, o que

limita a sua utilização, mas não invalida sua importância para o estudo de determinadas características. Em função do tipo de cabo, cujo envelhecimento estiver sendo investigado, algumas técnicas podem apresentar vantagens e desvantagens quanto a sua aplicação. A seguir são apresentadas algumas técnicas para monitoração das condições de cabos.

4.1 Ensaios de tração

Na técnica de ensaios de tração (EAB), algumas amostras de cabos são submetidas às mesmas condições ambientais de cabos instalados em determinadas regiões da usina e após um período pré-definido são retiradas e levadas a um laboratório para teste das propriedades mecânicas. (VERARDI, 2013)

Durante o teste, uma tração controlada é exercida sobre o cabo e suas propriedades mecânicas são monitoradas buscando identificar o ponto de ruptura. Quando o valor do teste for menor que o limite estabelecido, verifica-se a necessidade da substituição dos cabos em operação cujas condições de operação possam ser comparáveis à amostra em estudo. Apesar de importante, essa técnica é limitada à disponibilidade e localização das amostras de cabos em ambientes que possam acelerar o envelhecimento.

4.2 Inspeções visuais

Esta técnica avalia a condição física de um determinado cabo de forma não destrutiva e, portanto, pode ser realizada em cabos já instalados na usina (CNSC, 2012). Sua aplicação permite uma identificação rápida em casos onde o desgaste é aparente como deformação de cobertura ou isolamento ou ruptura total do cabo. Entretanto, os resultados da inspeção não permitem uma avaliação da vida útil esperada.

4.3 Termografia infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva que monitora as condições físicas de um cabo, indicando possíveis pontos de degradação a partir da medição de temperatura. A inspeção utiliza sistemas de detecção ou imagens térmicas que monitora radiação infravermelha ou calor emitido em diferentes posições do cabeamento. A precisão da monitoração depende da sensibilidade e sofisticação dos sistemas de detecção (VILLARAN; LOFARDO, 2010). A aplicação desta técnica é limitada para se identificar mecanismos operacionais ou quantidade de degradação de isolamento (SIMMONS et al., 2012).

4.4 Resistência de Isolamento

A monitoração da resistência de isolamento (IR) é um método comumente utilizado para se monitorar as propriedades elétricas de um cabo. O processo consiste na medição dos valores de corrente de fuga. A vantagem deste método é a sua simplicidade ao utilizar simples instrumentos. Por outro lado, para a realização do teste é necessária a desconexão dos cabos (HASHIMIAN; BEAN, 2011).

4.5 Tempo de indução oxidativa

A técnica por tempo de indução oxidativa (OIT) consiste na monitoração das propriedades de uma

amostra submetida a uma condição de abundância de oxigênio a uma determinada temperatura. As desvantagens da técnica são relacionadas à necessidade de amostras provenientes do ambiente operacional a ser estudado e a limitação de aplicação, visto que muitos estudos só recomendam a técnica para determinados compostos. (PARK et al., 2006)

5 ESTUDO DE CASO

A Figura 2 exibe um gráfico comparativo do tempo de vida útil de um cabo de instrumentação e controle usado em centrais nucleares submetido a diferentes condições operacionais, considerando uma degradação modelada por uma função exponencial. O cabo utilizado no estudo é composto por isolamento de polietileno reticulado (XLPE) e cobertura de polietileno clorosulfonado (CSPE). Este cabo possui qualificação nuclear 1E e sua vida útil estimada é de 40 anos para operação a 90°C (RSCC, 2012). Duas condições operacionais além da utilizada no processo de qualificação foram utilizadas considerando variações de temperaturas de 10°C, ou seja, foram traçados gráficos para 80 e 100°C. Neste estudo, considera-se que o cabo está submetido a uma taxa de dose constante e energia de ativação de 110 kJ/mol (GILLEN et al., 2005). A grandeza monitorada no estudo é o ponto de ruptura em tração, cujo valor mínimo aceitável é de 50% (SHUMAKER et al., 2013). Quando o valor dessa grandeza atingir 50%, a recomendação é para a substituição imediata do cabo.

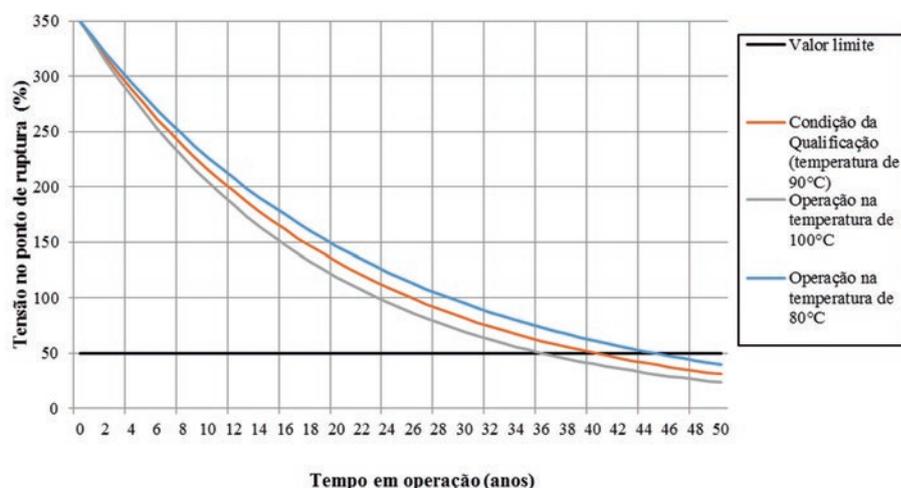


Figura 2 - Análise do ponto de ruptura em tração de um cabo em diferentes condições operacionais

Ao se aplicar o modelo de *Arrhenius*, ilustrado na Equação 1, observa-se que a vida útil do cabo operando a 100°C foi reduzida aproximadamente há 36 anos e, para operação a 80°C este valor seria elevado a valores superiores há 44 anos.

6 CONCLUSÃO

O estudo apresentado mostra que diferentes condições de temperatura podem acarretar em uma vida útil diferente das condições de qualificação efetuada pelo fabricante. A cada 10°C de variação de temperatura em relação às condições de qualificação pode acarretar uma diferença de 4 anos na vida útil estimada, considerando

as condições de contorno e aproximações adotadas. Essas observações reforçam a importância de se estabelecer programas de monitoração contínua de cabos em usinas nucleares, para ser detectado antecipadamente possíveis efeitos de envelhecimento, em função do longo tempo de operação em diferentes condições ambientais (temperatura, radiação, umidade e outras fontes de desgaste). Entretanto, devido a constantes variações nas condições operacionais no qual um cabo de instrumentação e controle estiver submetido, modelos mais elaborados que apenas os obtidos pela aplicação do modelo de *Arrhenius* podem ser necessários. A necessidade da medição contínua das propriedades dos cabos e, a criação de modelos estatísticos que reflitam um determinado comportamento, mostra a importância da integração entre empresas e institutos de pesquisa para se atingir objetivos comuns que são a manutenção da segurança operacional e maximização na utilização de recursos.

REFERENCIAS

Bowler, N.; Liu, S. Aging mechanisms and monitoring of cable polymers. **International Journal of Prognostics and Health Management**, 2015.

CNSC. **Ageing Management of Cable in Nuclear Generating Stations**. 2012.

Gillen, K. T.; Assink, R. A.; Bernstein, R. Nuclear Energy Plant Optimization (NEPO) final report on aging and condition monitoring of low-voltage cable materials. Sandia National Laboratories: USA, 2005.

Hashemian, H. M.; Bean, W. C. Advanced cable-testing techniques for nuclear power plants. **Nuclear Technology**, v. 176, p.p. 414-429, 2011.

Hashemian, H. M. **Nuclear Power Plant Instrumentation and Control, Nuclear Power – Control, Reliability and Human Factors**. Intech, 2011.

IAEA. **International Status and Prospects of Nuclear Power**. 2011.

IAEA. **Assessing and managing cable aging in nuclear power plants**. 2012.

McCarter, D.; Shumaker, B.; McConkey, B.; Hashemian, H. Nuclear power plant instrumentation and control cable prognostics using indenter modulus measurements. **International Journal of Prognostics and Health Management**, 2014.

Park, K. H.; Kim, J. S.; Cho, B. G. **Calculation of Activation Energy by OIT method for aging evaluation of NPP cable**. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2006.

RSCC Wire & Cable LLC, **Firewall® III – Instrumentation cable Datasheet**, 2012.

Saldanha, P. L. C.; Frutuoso e Melo, P. F. **Ageing Evaluation for the Extension of Qualified Life of Nuclear Power Plant Equipment, Nuclear Power** – Control, Reliability and Human Factors. Intech, 2011.

Shumaker, B. D.; Ledlow, J. B.; O'Hagan, R. D.; McCarter, D. E. **Remaining useful life estimation of electric cables in nuclear power plants. Chemical Engineering Transactions**, v. 33, 2013.

Simmons, K. L.; Ramuhalli, P.; Brenchley, D. L.; Coble, J. B.; Hashemian, H.; Konnik, R.; Ray, S. **Light Water Sustainability (LWRS) Program** – Non-Destructive Evaluation (NDE) R&D Radamap for Determining Remaining useful Life of Aging

Cables in Nuclear Power Plants. Pacific Northwest National Laboratory, 2012.

Verardi, L. **Aging of nuclear power plant cables**: in search of non-destructive diagnostic quantities. University of Bologna, 2013.

Villaran, M.; Lofardo, R. **Essential elements of an electric cable condition monitoring program** - NUREG/CR-7000. United States Nuclear Regularity Commission, USA, 2010.

Vital, R. B. N.; Vital, T. M. O Envelhecimento de capacitores em circuitos eletrônicos. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Vol. 36, N° 2, p. 109-118, 2015.