### Análise de Riscos no Processo Eddy-CurrentUtilizando BayesianBelief Networks (BBN)

Lincoln Campelo Dias

Mestrando em Gestão de Sistemas de Engenharia – UCP

lincoln@thermicengenharia.com.br

Jéssica Freire Moreira

Mestranda em Gestão de Sistemas de Engenharia – UCP

[jeje\_freire@hotmail.com](mailto:jeje_freire@hotmail.com)

José Cristiano Pereira

Professor Doutor, em Engenharia de Produção – UFF

[josec.pereira@ge.com](mailto:josec.pereira@ge.com)

# OBJETIVOS DO TRABALHO - INTRODUÇÃO

O objetivo do presente artigoé responder as seguintes questões de pesquisa:1 - Redes bayesianas são adequadas para identificarfalhas na realização de inspeção por*Eddy-Current* (EC)em peças críticas? 2 - Quais ações efetivas devem ser implementadas para eliminar ou mitigar o riscoexistente?

A utilização de BBN’s, como apoio a tomada de decisão em ambiente de incerteza para aumento de confiabilidade de processos, foi objeto de vários trabalhos em diversos campos do conhecimento, que vão desde a implantação de programas de manutenção centrados em confiabilidade (do inglês: RealibilityCenteredMaintenence - RCM), o desenvolvimento de inteligência artificial ou até vinculados a montagem de motores aeronáuticos [1]. Estudos probabilísticos como as Curvas de Probabilidade de Detecção (do inglês: ProbabilityofDetectionCurves – POD), também, já são de amplo conhecimento e aplicação prática, porém, nada ainda demonstra a utilização desta técnica para aumento da confiabilidade do ensaio de EC.

Não foram encontradas, na literatura existente e descritas no item 2,trabalhos que utilizassem metodologia semelhante ao que o presente se propõe.Utilizaram-se como base estudos existentes sobre o emprego da metodologia aplicadaem outras áreas como indústria naval, geração de energia e confiabilidade em produtos e processos, entre outras.

No estudofoi utilizadaaRede de Crenças Bayesianas (do inglês BayesianBelief Networks - BBN) para obter os riscos mais relevantes. Resumidamente, foi feita uma análise qualitativa sobre as fases do processo de inspeção utilizando-se EC listando, em cada uma das fases do processo, os fatores com maior probabilidade de ocasionar falha na execução da inspeção. Estes foram pesquisados na literatura especializada e em entrevistas de campo com especialistas.Após esta fase,os fatores foram relacionados efeito o tratamento das informações através dos processos supracitados.

O impacto esperado é um aumento da qualidade e segurança do processo de inspeção, fornecendo aos responsáveis por esta área informações confiáveis sobre os principais fatores de risco envolvidos no processo de inspeção por EC.

Os resultados mostraramque as atividades com maior chance de ocasionar falha na inspeção são relativos a fatores de mão de obra, predominantemente comportamentais. A saber: Erro de Manutenção pelo Inspetor, distração e falta de comunicação entre a equipe de inspetores. Desta forma conclui-se que o método proposto é de fundamental importância para uma correta identificação dos fatores críticose tomada de ações que possam evitar ou mitigar a ocorrência de erros na inspeção e a consequente ocorrência de falhas.

# DESCRIÇÃO

# *Caracterização do Ensaio por Correntes Parasitas – Eddy-Current(EC)*

O ensaio EC é um Ensaio Não Destrutivo (END) baseado nas correntes de Foucaut (correntes parasitas) que surgem em um condutor quando este é submetido a um campo magnético variável. Se existirem no material submetido a este campo descontinuidades tais como: trincas, inclusões, alterações de dureza, composição química, granulação, entre outras, superficiais ou subsuperficiais, estas alterarão o fluxo das correntes parasitas permitindo, desta forma, a sua detecção.

# *Componentes Críticos*

A integridade estrutural de componentes industriais é primordial para garantia da qualidade. Não há exemplo maior que a moderna indústria aeronáutica [2]. Alémdesta indústria, existem outras em queuma falha de funcionamento em uma peça crítica pode ocasionar perda de vidas e grandes prejuízostais como:plantas de geração de energia (em particular as nucleares), refinarias e plantas químicas. Neste contexto, os programas de manutenção preventiva e preditiva são cada vez mais importantes para o aumento de confiabilidade dos equipamentos críticos. Programas de In-serviceInspection(ISI)em plantas nucleares visam verificar que não existem defeitos em componentes submetidos a pressão ou, se existirem defeitos estes serão descobertos antes de afetarem a operação segura da planta[3]. A identificação de peças críticas é de fundamental importância para a implantação de um sistema de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), sendo este o segundo passo para implantação do sistema [4]. Podemos dizer que um componente crítico é aquele que em caso de falha, conduz todo o sistema, conjunto ou estrutura a um evento catastrófico.

# *Redes Bayesianas- Bayesian Belief Networks (BBN)*

BayesianBelief Networks (BBN) são estruturas gráficas que permitem representar razões ou argumentos no domínio da incerteza [5]. Foram desenvolvidas nos anos 80 para desenvolvimento de sistemas de InteligênciaArtificial (AI)[6]. Estas redes fornecem informações para que os profissionais de análise de riscos obtenham subsídios decisórios sobre os fatores de risco e de medidas destinadas a mitigar ou eliminar seus efeitos etêm sido extensivamente utilizadas em análises de risco e confiabilidade[7]. Os nós das redes Bayesianas representam as variáveis aleatórias e os arcos representam as conexões ou dependências diretas entre as variáveis, estas conexões representam relações de causa e efeito entre as variáveis. As variáveis aleatórias são quantificadas por uma distribuição de probabilidades condicionais associando cada nó a seus prováveis causadores diretos[8].Na figura1, os nós A e B representam,de forma simplificada, a probabilidade de acontecimento de fatores que podem causar problemas na inspeção e o nó C representa a probabilidade de haver falha na inspeção.

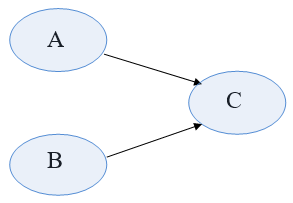


Figura 1:Representação simplificada dos nós de uma Rede Bayesiana

# *Metodologia*

Neste estudo, avaliou-se quaisfatores podem conduzir a uma falha em um ensaio de EC. Diversos fatores na execução do teste podem levar a imprecisões no resultado. Por exemplo, um filme de óxido na superfície de um tubo de um gerador de vapor pode causaruma estimativa incorreta no tamanho de uma trinca em tubos Alloy 600 [9].

Utilizou-seuma abordagem explanatória, recomendada para situações onde se procura uma resposta para uma pergunta explorando relações causais na prática.Ou seja, quando se deseja unir a implementação de um programa com seus efeitos [10, 11].

O trabalho foi dividido em 3 etapas: Em primeiro lugar, foi feita pesquisa na literatura estado da artesobre END´s e EC,para levantamento dos fatores que podem causar falhas na inspeção, utilizando-se as palavras-chave: Eddy-Current, Análise de Riscos, Componentes Críticos, Redes Bayesianas (Eddy Current; Risk Assessment; CriticalComponents; BayesianBelief Networks). A seleção dos artigos foi feita levando-se em conta que o foco do trabalho é em aumento da confiabilidade, e publicação deverá preferencialmente, em periódicos B2 – A1.

Em uma etapa seguinte, estes fatores foram classificados em categorias a saber:Organização (ORG), Material (MAT), Procedimento (PRO), Equipamento (EQU), Ambiente (AMB) eMão-de-obra. Neste último, subdividiu-se os fatores em Comportamentais (COM), Físicos (FIS) e de Treinamento (TRE).

Na última fase, o trabalho de elicitação foi feito com a participação de especialistas, com grande experiência em END - especialmente em EC,que validaram o trabalho eatribuíram a cada fator um nível de probabilidade de ocorrência, classificando-os, em ordem decrescente de probabilidade de ocorrência,como: esperado, muito provável, possível, pouco provável ou não provável, além de estimar o impacto da ocorrência dos fatores de risco para um evento de erro da inspeção. Os níveis de probabilidade foram convertidos em probabilidade de acontecer, conforme Tabela 1.

**Tab. 1** - Pontuações de níveis de probabilidade e ocorrência de erro na inspeção.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *Pontuação* | *Nível de*  *probabilidade* | *Probabilidade de acontecer* | *Impacto no resultado* | *Probabilidade de erro* |
| 5 | Esperado | Mais de 80% | Alto | Mais de 16% |
| 4 | Muito provável | 51% - 80% | Elevado | 12% - 16% |
| 3 | Possível | 31% - 50% | Moderado | 8,1% - 12% |
| 2 | Pouco Provável | 11% - 30% | Baixo | 4% - 8% |
| 1 | Não Provável | Menos de 10% | Limitado | Menos de 4% |

Desta forma, após atribuição da categoria, da probabilidade de acontecer e da probabilidade de um erro ser causado na inspeção,obteve-se os valores que foram introduzidos em um diagrama de blocos construído de acordo com o conceito de redes bayesianas. Estes valores se encontram descritos na Tabela 2.

**Tab. 2**–Fatores de Risco, Probabilidade de Acontecer e Probabilidade de Erro.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *Categoria* | *Fator de Risco* | *Probabilidade de acontecer* | *Probabilidade de Erro* |
| AMB01 | Espaço insuficiente | 3 | 4 |
| AMB02 | Iluminação deficiente | 3 | 2 |
| AMB03 | Problemas de ergonomia | 3 | 3 |
| EQU02 | Equipamento defeituoso | 4 | 5 |
| EQU03 | Erro de calibração do equipamento | 4 | 4 |
| EQU04 | Falta de acessórios no equipamento | 3 | 4 |
| FIS01 | Cansaço do operador | 3 | 4 |
| FIS02 | Deficiência de acuidade visual | 2 | 3 |
| COM01 | Distração do Operador | 3 | 5 |
| COM02 | Erro de manutenção pelo operador | 3 | 5 |
| TRE01 | Erro na inspeção do padrão | 3 | 4 |
| COM03 | Falta de atenção do operador | 3 | 4 |
| COM04 | Falta de comunicação entre os inspetores | 3 | 5 |
| TRE02 | Falta de habilidade na inspeção manual | 3 | 4 |
| TRE03 | Falta de treinamento dos inspetores | 3 | 4 |
| TRE04 | Falta de treinamento no procedimento | 4 | 4 |
| FIS03 | Óculos "vencidos" | 2 | 4 |
| COM05 | Operador desmotivado | 3 | 4 |
| EQU01 | Posicionamento inc. do teflon nas bobinas | 3 | 3 |
| MAT01 | Geometria da peça inadequada | 3 | 4 |
| MAT02 | Superfície da peça mal-acabada | 3 | 4 |
| MAT03 | Superfície oxidada | 3 | 4 |
| ORG01 | Falta de experiencia do operador | 3 | 4 |
| ORG02 | Falta de material de treinamento | 4 | 3 |
| ORG03 | Manutenção preventiva deficiente (\*) | 3 | 5 |
| ORG04 | Programação "apertada" | 3 | 2 |
| ORG05 | Temperatura do ambiente inadequada | 3 | 3 |
| PRO01 | Problemas com a limpeza da peça | 4 | 4 |
| PRO02 | Procedimento de limpeza mal definido | 3 | 5 |
| PRO03 | Setup do equipamento mal definido | 3 | 5 |
| PRO04 | Sistema de qualidade ineficiente | 3 | 4 |
| (\*) Do equipamento de inspeção | | |  |

# RESULTADOS OBTIDOS

# *Rede Bayesiana*

Foi utilizado o software Agenarisk® - versão 10 [11], para o processamento dos dados, auxiliando na análise dos riscos e permitindo verificar quaisfatores são mais impactantesem um eventual erro na inspeção. A rede bayesiana resultante das classificações dos fatores de risco, conforme definidos na metodologia, está apresentada na figura 2, tendo como nós ancestrais os fatores de risco e como nó filho a inspeção EC.

# Uma imagem contendo texto, mapa Descrição gerada automaticamente

# Figura 2:Representação da Rede Bayesiana relativa a Inspeção EC

# *Processamento dos Dados nos Grupos de Fatores de Risco*

# Para se concluir quais os grupos de fatores de risco mais contribuem para que haja falha no procedimento de inspeção por EC, fez-se uma análise de sensibilidade, na forma de um gráfico de tornado.Este mostra em primeiro lugaras categorias em que os fatores de risco foram classificados, esta análise está apresentada na figura 3.Nota-se que os fatores de Mão de Obra são os mais impactantes para a ocorrência de falhas na inspeção.

# Uma imagem contendo captura de tela Descrição gerada automaticamente

# Figura 3: Gráfico de Tornado mostrando as categorias mais impactantes no risco de falha da inspeção EC.

# Em seguida, foi executado o mesmo procedimento para cada fator de risco elencado na pesquisa. Este gráfico está mostrado na figura 4. Nesta figura verifica-se que os 3 principais fatores de risco são relativos a fatores comportamentais do inspetor. Pela ordem de influência no resultado da inspeção observa-se os seguintes fatores, todos eles relativos a Mão de Obra e comportamentais: Erro de Manutenção pelo Inspetor, distração do inspetor e falta de comunicação entre a equipe de inspetores.

# Uma imagem contendo texto Descrição gerada automaticamente

# Figura 4: Gráfico de Tornado mostrando as atividades mais impactantes no risco de falha da inspeção EC.

# CONCLUSÕES

# A conclusão é que os riscos existentes na inspeção EC podem interferir na definição de reparo ou descarte de um componente considerado crítico. Assim, o aumento na confiabilidade da inspeção ao qual este modelo conduz é de fundamental importância para o aumento de confiabilidade do processo.

# Em resposta a primeira pergunta da pesquisa, as Redes bayesianas se mostraram adequadas para identificar falhas na realização de inspeção por Eddy-Current (EC) em peças críticas. O modelo apresentado foi capaz de apontar os fatores mais relevantes para ocorrência de falha na inspeção por EC.

# Em resposta a segunda pergunta da pesquisa As ações efetivas a serem implementadas para eliminar ou mitigar o risco existentes são: medidas de manutenção preventiva dos equipamentos por empresa qualificada pelo fabricante do equipamento de teste, eliminação de elementos que possam perturbar ou distrair o inspetor durante a execução do teste para garantir que toda a área analisada seja coberta pelo teste e sistematizar a comunicação entre as equipes de inspetores de forma a garantir que todas as informações recolhidas por um inspetor ou equipe de inspetores sejam corretamente transmitidas às outras evitando perdas que podem levar a falhas ou a não cobertura de partes de componentes.

# Recomenda-se, como sugestão de trabalhos futuros, que as avaliações de fatores e suas respectivas probabilidades de acontecer sejam revistas pelos especialistas de cada área onde o modelo será aplicado, adaptando-se assim os resultados as características específicas de cada organização.

# REFERÊNCIAS

# PEREIRA, J. C.; FRAGOSO, M. D.; TODOROV, M. G. “Risk Assessment Using Bayesian Belief Networks and Analytic Hierarchy Process Applicable to Jet Engine High Pressure Turbine Assembly”. IFAC-PapersOnLine, Volume 49, (2016). 113-138.

# HUGHES, R. R.; DIXON, S. “Performance Analysis of Single-Frequency Near Electrical Resonance Signal Enhancement (SF-NERSE) Defect Detection.”NDT &E International, Volume 102, (2019). 96-103.

# CRONVALL, O. et al. “A Study on The Effect of Flaw Detection Probability Assumptions on Risk Reduction Achieved By Non-Destructive Inspection.” Reliability Engineering & System Safety, Volume 105, (2012). 90-96. Disponivelem: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832012000464>. Acesso em: setembro 2019.

# GUPTA, G.; MISHRA, R. P. “Identification of Critical Components Using ANP For Implementation OfReliability Centered Maintenance.”Procedia CIRP, Volume 69, (2018). 905-909. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117309071>Acesso em: setembro 2019.

# KORB, K. B.; NICHOLSON, A. E. *“Bayesian Artificial Intelligence.”* Segunda. ed. Boca Raton: CRC Press, (2011).

# CALIXTO, E.; LIMA, G.; FIRMINO, P. “Comparing SLIM, SPAR-H and Bayesian Network Methodologies.”Open JournalofSafety Science and Technology, 3, (2013). 31-41.

# PEREIRA, J. C. et al. “Risk Assessment in Fluid Penetrant Inspection (FPI) of Critical Parts via Bayesian Belief Networks and Analytic Hierarchy Process.”International Joint Conference. Lisboa: [s.n.]. (2018). p. 18-20.

# MENEZES, R. D. C. L. “Uma Metodologia para Avaliação da Confiabilidade Humana em Atividades de Substituição de Cadeias de Isoladores em Linhas de Produção.”Recife. (2005).

# LEE, H. et al. Effect of Oxide Film on ECT “Detectability of Surface IGSCC in Laboratory-Degraded Alloy 600 Steam Generator Tubing.” Nuclear Engineering and Technology, 51, (2019). 1381 - 1389. Disponívelem: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573319300154>.Acesso em: setembro 2019.

# BAXTER, P.; JACK, S. “Qualitative Case Study Methodology: Study Design and Implementation for Novice.”The QualitativeReport, Volume 13 (4), (2008). 544-559. Disponivel em: <http://www.nova.edu/ssss/QR/QR13-4/baxter.pdf>.Acesso em: setembro 2019.

# YIN, R. K. Case study research: *“Design and Methods.”* 3rd. ed. [S.l.]: Thousand Oaks, (2003).

1. AGENA LTD. AGENARISK Desktop. Disponível em: <https://www.agenarisk.com/agenarisk-free-trial>. Acessoem: outubro 2019.